

SOCIETÀ ITALIANA DI OTTICA E FOTONICA
Gruppo di lavoro in Colorimetria e Reflectoscopia

Tecnologie multispettrali

Aspetti teorici ed applicativi

Atti dei Convegni di Colorimetria 2003 e 2004

a cura di Andrea Raggi



*Società Italiana
di Ottica e Fotonica
Italian Branch of the European Optical Society*

Indice

	pagina
Prefazione	V
Dispositivi di scansione iperspettrale: dalla fase di progettazione alla realizzazione pratica F. Rampazzo, M. D'Agostini, A. Dall'Ava, P. Maretto, A. Vendraminelli.....	1
Scanner ottico iperspettrale per la spettroscopia d'immagine G. Antonioli, F. Fermi, C. Oleari, R. Reverberi	10
Acquisition and Mosaicking of Large/High-Resolution Multi-/Hyper-Spectral Images P. Pellegrini, G. Novati, R. Schettini.....	25
Sistema stereoscopico di visione attiva per la caratterizzazione colorimetrica di superfici architettoniche M. L. Rastello, F. Saccomandi	40
Spectral-based printer modeling and characterization S. Zuffi, R. Schettini, G. Mauri.....	52
Spettrofotometro a scansione per la caratterizzazione multispettrale e colorimetrica ad immagine di superfici dipinte P. Carcagnì, A. Della Patria, C. Sanapo, R. Fontana, M. Greco, M. Mastroianni, M. Materazzi, E. Pampaloni, L. Pezzati.....	60
Evoluzione di apparati di spettroscopia d'immagine per l'analisi non invasiva di dipinti presso l'IFAC-CNR A. Casini, F. Lotti, L. Stefani, R. Bellucci, C. Frosinini.....	77
Spettroscopia d'immagine per l'identificazione di pigmenti pittorici N. Ludwig, M. Milazzo, L. De Maria.....	89
Misure spettrofotometriche per conservare le opere d'arte contemporanea F. Petrucci.....	103
Colorimetria multispettrale per la qualità della viticoltura in Franciacorta F. Campostrini, F. Serina	112
Spettrometria di immagine nel settore del legno e dell'arredamento S. Monti.....	122

Proposta di una stazione a camera digitale e sfera d'integrazione per la misurazione del colore	
F. Fermi, C. Oleari, R. Reverberi, R. Huertas, M. Melgosa	130
Filtri ottici variabili per spettrometria multispettrale	
A. Piegari, M. Dami.....	139
Estimating Surface Reflectance Functions from Tristimulus Values	
S. Zuffi, R. Schettini.....	148
Caratterizzazione di soluzioni operative per spettrofotometri di medio-basso costo	
G. D'Emilia, E. Di Carlo.....	157
Scanner spettrofotometrico per la digitalizzazione di quadri e altre opere d'arte di superficie piana	
G. Antonioli, F. Fermi, C. Oleari, R. Reverberi	169
Sistema multispettrale ad immagine per la caratterizzazione spettroradiometrica di opere d'arte e la valutazione delle condizioni di illuminazione	
N. Bo, P. Iacomussi, G. Rossi	181

Prefazione

Sono ormai sempre più numerosi i campi dell'attività umana nei quali, per varie finalità, si manifesta l'interesse o l'esigenza di un'accurata e precisa acquisizione strumentale di informazioni spettro-colorimetriche relative a superfici più o meno ampie, anche di aspetto non uniforme.

Negli ultimi decenni, in questo ambito si è assistito ad una rapidissima e consistente evoluzione tecnologica che ha prodotto sistemi strumentali versatili ed innovativi, ampliando notevolmente le potenzialità applicative della spettro-colorimetria strumentale. Ai classici spettrofotometri da laboratorio si sono, quindi, affiancati strumenti più flessibili, maneggevoli e veloci, quali gli spettrofotometri multicanale portatili, che, per le loro caratteristiche, hanno trovato una buona diffusione in diversi settori industriali, specialmente per il controllo di qualità in produzione. A questi si sono aggiunti sistemi strumentali a distanza che hanno svincolato l'utilizzatore dall'esigenza, spesso limitante, di porre in contatto fisico strumento e superficie da misurare.

L'impiego di tecniche e strumenti spettro-colorimetrici si è, dunque, esteso dalle più classiche applicazioni di "color matching" e controllo di qualità in laboratorio – che sono andate diffondendosi anche in nuovi settori produttivi – al monitoraggio in linea, fino ad impieghi più innovativi nei campi della grafica computerizzata o della gestione dei beni artistici, solo per citare alcuni esempi.

Del resto, il mondo delle immagini digitali ha ormai acquisito un ruolo di tale rilievo nel contesto attuale da portare in primo piano le esigenze legate alla qualità delle immagini stesse, rendendo improcrastinabili gli sforzi diretti alla soluzione dei problemi legati alle tecniche di acquisizione e riproduzione utilizzate.

Nell'ambito della gestione dei beni culturali è particolarmente sentita la necessità di disporre di un'accurata caratterizzazione spettro-colorimetrica delle immagini di riferimento, sia a fini conservativi, sia per finalità di studio e documentazione.

Queste sono solo alcune delle esigenze applicative che hanno portato all'intensificazione degli sforzi per lo sviluppo e la messa a punto di sistemi strumentali volti all'acquisizione di "immagini spettrali", cioè immagini basate sul fattore di riflessione spettrale dei loro pixel, ovvero caratterizzate da informazione spettrale referenziata spazialmente.

Nell'ultimo decennio le tecnologie di analisi ad immagine multispettrale (o, più semplicemente, tecnologie multispettrali o di *spectral imaging*) hanno ricevuto notevole attenzione da parte del mondo scientifico. I potenziali ambiti di applicazione vanno ampliandosi e, di pari passo, si stanno diffondendo i relativi sistemi strumentali, anche se, spesso, ancora a livello di prototipo.

Le tecnologie sviluppate si basano, fondamentalemente, su alcuni principali approcci. Nei sistemi a filtro si usa una camera digitale con matrice CCD monocromatica e una serie di filtri interferenziali (o, in alternativa, filtri sintonizzabili – *tunable filters*) posti fra rivelatore e immagine da acquisire, in modo da ottenere una sequenza di immagini monocromatiche, in base alle quali

ricostruire il fattore di riflessione spettrale dei singoli pixel. Nei sistemi a spettrografo si ricorre all'anteposizione di un policromatore di linea ad un sensore matriciale montati su un sistema di scansione motorizzata; in questo modo si attua una scansione spaziale lungo un asse e una ripresa simultanea su tutte le lunghezze d'onda di una linea dell'immagine. In entrambi i casi, volendo garantire un'elevata risoluzione spaziale anche per superfici di grandi dimensioni, si ricorre ad appositi software di "mosaicatura" in grado di assemblare numerose porzioni dell'oggetto singolarmente acquisite.

Questi ed altri approcci tecnologici del multispettrale, spesso ancora in corso di sviluppo e sperimentazione, la cui applicazione trova sempre più ampia diffusione in vari settori (beni culturali, agricoltura, alimentazione, ambiente, sensoristica spaziale, solo per citarne alcuni) sono stati l'oggetto delle edizioni dei Convegni di Colorimetria del 2003 e 2004, le cui relazioni sono raccolte nel presente volume con il precipuo intento di proporre alcune significative testimonianze dei recenti avanzamenti teorici ed applicativi delle tecnologie multispettrali d'immagine nel nostro Paese.

A conclusione di queste note, vorrei ringraziare vivamente gli Autori dei contributi qui pubblicati che, aderendo a questa iniziativa, hanno accettato di condividere i risultati della loro attività di studio e ricerca.

Un ringraziamento va anche a tutti coloro che hanno fattivamente contribuito alla realizzazione di questo volume e, in particolare, a Konica Minolta Business Solutions Italia S.p.A., per il determinante supporto fornito.

Andrea Raggi

*Coordinatore del Gruppo di Lavoro in
Colorimetria e Reflectoscopia*

Settembre 2004

Dispositivi di scansione iperspettrale: dalla fase di progettazione alla realizzazione pratica

F. RAMPAZZO, M. D'AGOSTINI, A. DALL'AVA
DV S.R.L TECNOLOGIE D'AVANGUARDIA, DIP. DI SPETTROSCOPIA
Viale Dell'Industria, 64 – 35129 Padova

P. MARETTO, A. VENDRAMINELLI
VECOM S.R.L
Viale Dell'Industria, 64 - 35129 Padova, Italia

1. Introduzione

La realizzazione dei primi dispositivi di spettrometria d'immagine era basata sulla sincronizzazione della movimentazione di filtri anteriormente disposti a camere matriciali sensibili nella banda di frequenza d'interesse. Non vi erano particolari richieste nell'ambito progettuale meccanico/ottico se non accortezze nella scelta e disposizione di filtri tali da assicurare l'attendibilità della misura. Per superare le difficoltà intrinseche nell'uso dei filtri discreti o interferenziali (aventi caratteristiche diverse fra loro e poco ripetibili) si sono usati filtri tunabili che garantivano la possibilità di variare con continuità la propria risposta spettrale in termini di frequenza centrale. Tali configurazioni permisero risultati confortanti nei limiti delle risoluzioni spettrali consentite senza mai garantire l'interstrumentalità dei dispositivi, caratteristica comune con gli apparati di precedente generazione. La strada della movimentazione 2D di sonde a minisfera integratrice collegate al medesimo spettrofotometro puntuale ha portato risultati notevoli dal punto di vista della qualità delle misure con forti limitazioni però nella risoluzione spaziale e nei tempi di acquisizione; le meccaniche poi risultavano necessitare di grande precisione con conseguenti ingombri e criticità.

La soluzione che allo stato tecnologico attuale presenta i maggiori vantaggi nel compromesso fra attendibilità e ripetibilità della misura, risoluzione spaziale e tempi di acquisizione vede l'impiego di spettrometri di linea [1-4].

L'anteposizione di un policromatore di linea (a riflessione o trasmissione) ad un sensore matriciale di adeguata sensibilità spettrale consente di acquisire lo spettro di una linea spaziale del campione in pochi centesimi di secondo con risoluzione limitata in termini assoluti unicamente dalla qualità/tipologia delle ottiche interne. Attraverso la movimentazione relativa dello spettrofotometro e del campione si rileva lo spettro punto punto dell'immagine nei tempi caratteristici dei dispositivi di acquisizione scelti.

2. Parametri e vincoli progettuali

Passiamo in rassegna parametri e vincoli progettuali caratterizzanti la strumentazione in esame nell'ottica del confronto fra le diverse tipologie

costruttive. In ambito applicativo alcune variabili assumono connotazioni estese e/o specifiche della spettrofotometria d'immagine.

2.1 Risoluzione spaziale e range spaziale

Nei dispositivi "a filtri" e "puntuali" la risoluzione spaziale è unica e limitata dalle caratteristiche dei sensori e delle ottiche a questi accoppiati (generalmente adattabili ai casi d'interesse). Espressa in paia di linee per millimetro o unità equivalenti risulta legata a vincoli minimi dettati dal potere risolvibile dell'occhio umano. Nei dispositivi impieganti policromatori di linea è generalmente diversa quella orizzontale (legata alla sensoristica e alle ottiche disperdenti) e verticale (legata alle dimensioni della fenditura del policromatore). Il range spaziale, l'area che lo spettrofotometro d'immagine può rilevare, è quindi legata alla risoluzione spaziale voluta; a parità di sensore/spettrofotometro impiegato questi risultano complementari. Anche se solitamente non stringente, le esigenze dell'applicazione finale del dispositivo possono rendere anche il range spaziale un limite vincolante dato che la rilevazione di ampie superfici comporterebbe non solo un elevato impegno logistico ma anche delicate operazioni di "mosaicing".

2.2 Risoluzione spettrale e range spettrale

La risoluzione spettrale si esprime generalmente come parametro massimo poiché risulta spesso differente nei dispositivi a filtri quando esaminata in diverse regioni del range spettrale utile (ovvero dell'estensione frequenziale rilevabile dallo strumento). La suddivisione di detto range in bande sfocia in compromessi poco soddisfacenti in relazione al tipo e al numero dei filtri impiegati e a conseguenti operazioni di deconvoluzione degli spettri molto pesanti. Nei dispositivi impieganti dispersori ottici puntuali o di linea invece la risoluzione spettrale è un parametro rappresentativo in tutto lo spettro. Le caratteristiche della risposta spettrale in quest'ultimo caso validano a priori le misure ottenute lasciando i limiti di risoluzione alla progettazione delle ottiche disperdenti.

2.3 Sensibilità, dinamica e tempi di acquisizione

Come per tutti i dispositivi di acquisizione fotonica è la sensoristica che determina principalmente sensibilità e dinamica. Nei sistemi a filtri non si avvertono particolari esigenze nella scelta del sensore purché assicurati l'opportuno SNR nella banda d'interesse. I sensori impiegati a valle di policromatori di linea invece sono scelti avendo cura che la geometria del focal plane di sensore e policromatore corrispondano. Il miglior compromesso fra i parametri citati è da ricercarsi spingendo più sui tempi di acquisizione complessivi richiesti dall'applicazione che sui valori di sensibilità e dinamica ormai garantiti dalle camere di pregio attuali.

2.4 Illuminazione

E' cruciale mantenere i parametri d'illuminazione costanti in termini di geometria e radianza durante l'acquisizione completa del dispositivo d'immagine impiegato. Ecco perché sempre più costruttori propongono come parte integrante del dispositivo l'illuminatore stabilizzato e controllato alogeno, allo Xe o combinato.

2.5 Precisione meccanica e ingombri

Contrariamente alle esigenze di natura qualitativa legate ai primi usi dei dispositivi di scansione d'immagine, agli strumenti attuali è richiesta una elevata ripetibilità delle misurazioni. Il principale parametro che nell'ambito del rilevamento in riflettanza (già di per sé teoricamente immune alle problematiche di variazione nell'illuminazione a distanza di tempo) risulta cruciale è il riposizionamento. Infatti la reticolatura in pixel se non riproposta nelle medesime condizioni impedisce un efficace confronto fra misure in tempi successivi. La praticità di posizionamento e la sua ripetibilità metodica è quindi fondamentale per i nuovi dispositivi. Alcuni costruttori propongono infatti geometrie chiuse (nel caso di sistemi da banco) o sensoristica di prossimità per sistemi per acquisizioni in situ.

3. Progettazione

L'esemplificazione delle scelte progettuali in uno specifico caso di buona complessità renderanno concrete le proposizioni precedenti. Facciamo riferimento ad un dispositivo completo di alte prestazioni realizzato in collaborazione con l'Università di Parma nell'ambito del progetto "Parmigianino" nell'anno 2001.

3.1 Specifiche e scelte progettuali

Le specifiche muovevano da necessità legate alla scansione di opere d'arte quindi:

- ∞ risoluzione spaziale: 4 punti per millimetro
 - ∞ range spaziale: fasce da 50 cm
 - ∞ risoluzione spettrale: 5 nm
 - ∞ range spettrale: 380 – 750 nm VIS, 700 – 1000 nm NIR
 - ∞ sensibilità: 10^5 elettroni FW
 - ∞ dinamica: 4000 livelli di discretizzazione
 - ∞ tempo acquisizione: inferiore al minuto per aree di 1 metro quadro
 - ∞ illuminazione: annessa e controllata
 - ∞ ingombri: limitati il più possibile
- unite a richieste di trasportabilità e solidità tipiche di un apparecchio "portabile" per poterlo utilizzare sia in laboratorio che nei musei.

3.2 Scelte progettuali

Allo scopo di sfruttare i benefici legati all'uso degli spettrofotometri di linea si è scelto di impiegare il policromatore ImSpector V8 350 – 750 nm con reticolo olografico in trasmissione (prodotto da Specim Ltd). Tale ottica assiale, essendo priva di astigmatismo per geometria costruttiva, mantiene ridotti gli ingombri pur consentendo ampie possibilità di discretizzazione spettrale. Per la zona dell'infrarosso si è deciso di utilizzare un altro ImSpector (V10 400 - 1000 nm) con fenditura da scegliersi la più ridotta possibile compatibilmente con l'illuminazione utilizzabile nei limiti d'irraggiamento al quale sono sottoponibili le opere. Come per i normali spettrofotometri maggiore è la dimensione della fenditura maggiore è la quantità di energia che il dispositivo collette a discapito della risoluzione spettrale. La scelta di differenziare i policromatori fra visibile e infrarosso trova

quindi fondamento nel salvaguardare le opere non agendo con eccessive fonti di calore nelle analisi. L'utilizzazione dell'illuminazione alogena viene a preferirsi ad illuminazioni alternative nel contesto in esame. La stabilità intrinseca di illuminatori alogeni controllati in tensione e termalizzati consente di non effettuare correzioni dei segnali misurati o di utilizzare dispositivi a doppio raggio poco pratici; una semplice calibrazione in intensità consente precise misure in riflettanza. Opportuni filtraggi atti ad aumentare la componente blu relativa nel caso del visibile riducendo quella IR o viceversa, nel caso l'IR sia d'interesse, sono facilmente utilizzabili. Per ragioni di praticità si è scelto di operare con sensori anch'essi opportunamente ottimizzati. Nel visibile, Orca C 4742-95 di Hamamatsu ha le specifiche di risoluzione spaziale e dinamica desiderate (1000×1000 a 12 bit). Nell'infrarosso, DVC-10 presenta particolare sensibilità e stabilità.

Fissando una camera per visione di basso costo ad ogni ottica spettrofotometrica l'aggancio meccanico è divenuto ripetibile con elevate precisioni dando l'ulteriore possibilità all'operatore di agire in fase preliminare nella definizione dell'area da misurarsi.

Il compendio delle variabili d'intensità di segnale emesso dall'illuminatore alogeno e delle specifiche di sensibilità dei sensori valutati come ottimali hanno consentito di optare per fenditure da 25 micron per l'ambito visibile e da 80 per quello IR. La prima consente di rispettare le specifiche di risoluzione spettrale desiderata; la seconda non è da ritenersi vincolante dato che l'ambito applicativo della scansione IR non richiede un numero di bande elevato in analisi. La scelta cade su un valore elevato per aumentare la quantità di energia fluente all'interno dell'ottica disperdente a parità di emissione per le ragioni addotte in precedenza.

Per supportare le movimentazioni vale la pena di optare per guide leggere e profilati in alluminio da assemblare all'occorrenza a seconda delle esigenze. Motorizzazioni passo-passo per i posizionamenti di precisione, in corrente continua per quelli grossolani e manuali per gli assestamenti sono le linee guida ideali per limitare i costi senza gravare l'apparecchiatura di limiti funzionali.

Per l'elettronica di controllo e gestione del dispositivo la trasportabilità è l'unico requisito che occorre tenere in considerazione. Vale la pena di progettare un'unica centralina da inserirsi in una valigia adibita allo scopo.

Al software di base, oltre al controllo dell'hardware, è deputata l'operazione di acquisizione, di primo filtraggio del dato, d'immagazzinamento e di ricostruzione dell'immagine. Altri tool aggiuntivi saranno definibili solo una volta acquisite le prime immagini dal prototipo.

4. Realizzazione

Tralasciando la progettazione di dettaglio descriviamo con l'ausilio delle immagini i principali componenti impiegati, l'apparato e gli accorgimenti realizzativi impiegati per renderlo "user friendly".

Il policromatore utilizzato è quindi ImSpector del quale in Fig.1 si nota l'aspetto esterno e uno schema di principio delle ottiche interne.

Questo viene montato con agganciate camera e obiettivo su un supporto micrometrico (Asse Z, Fig. 2) utile a regolare la distanza dello stesso dalla

superficie di misura. Il controllo avviene manualmente con riferimenti a video dati dalla camera di posizionamento (acquisita da Sony) su una superficie di controllo appositamente predisposta.

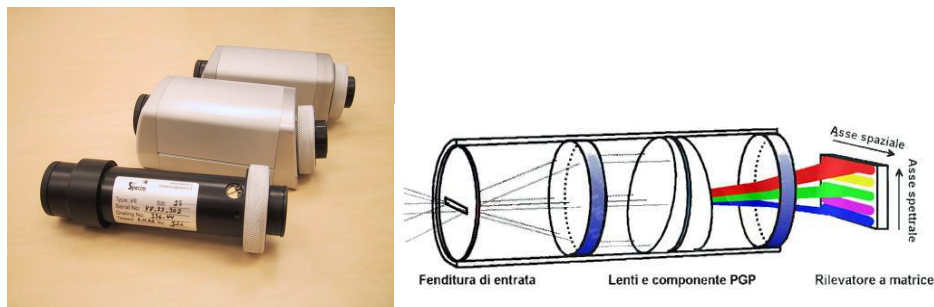


Fig. 1 – ImSpector



Fig. 2 – Supporto meccanico dell'asse Z del dispositivo

Poter regolare con continuità il range di visione a parità di ottica è la principale utilità di questa disposizione che risulta evidente in fase di utilizzo. Indipendentemente dalle necessità di focalizzazione risolte dall'obiettivo il posizionatore Z consente notevole flessibilità senza obbligare a faticosi e poco ripetibili spostamenti dei dipinti (a volte non movibili) o della macchina.

Per portare l'illuminazione secondo le specifiche geometriche dettate dalle normative e allo scopo di ridurre il più possibile la potenza delle lampade impiegate si è optato per l'impiego di lame di luce in fibra (Fig. 3) agganciate agli illuminatori disposti solidali alle ottiche.

Queste consentono di operare come se le sorgenti fossero rasenti al dispositivo pur mantenendo effettivamente lontane collaterali fonti di calore. La soluzione consente quindi di utilizzare basse potenze diminuendo il dispendio energetico e anche il calore prodotto, calore che viene disperso sul retro del dispositivo data la particolare disposizione inclinata degli illuminatori.

Il grande pianale siffatto alloggia così tutte le parti ottiche/emittenti del dispositivo

e, raggiungibile e controllabile con soli cavi elettrici, consente ottima maneggevolezza.

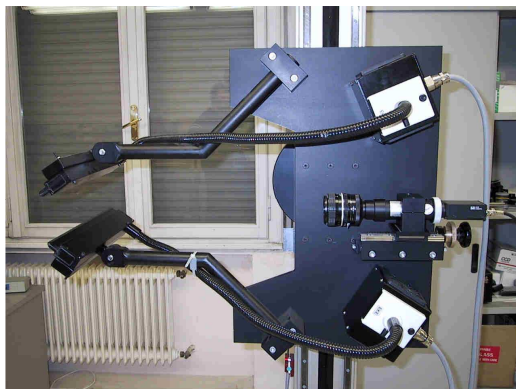


Fig. 3 – Disposizione delle lame di luce e degli illuminatori



Fig. 4 – Assi verticali Y, Y' e giunto rotativo autosostenente

Allo scopo di poter valutare affreschi, volte o dipinti disposti in non perfetta verticalità si è sdoppiato l'asse verticale di movimentazione (Fig. 4). La macchina

possiede così un asse Y di precisione movimentato in automatico dal controllore software e un secondo asse Y' che, regolato elettricamente con controlli manuali, consente di centrare l'acquisizione del primo nelle aree d'interesse. L'aggancio dell'asse Y su Y' è stato munito di un giunto a rotazione autosostenente (visibile al centro di Fig. 4) in maniera da consentire l'inclinazione dell'asse verticale di misura rispetto all'asse verticale vero e proprio.

L'esigenza di esplorare dipinti di grandi dimensioni ha suggerito di montare l'apparecchiatura su guide. In Fig. 5 si nota la struttura (munita di bloccaggi) in alluminio disposta su piedini antivibranti e le guide prismatiche ad alta robustezza che supportano il piantone in profilato leggero che regge gli stativi.



Fig. 5 – Evidenza della struttura a supporto della movimentazione orizzontale

Tale ricerca di solidità è atta a garantire che la movimentazione orizzontale delle ottiche non dia luogo a distorsioni difficilmente correggibili in fase di "mosaicing". L'aggiunta di un sensore a filo per il monitoraggio della posizione orizzontale collegato ad un display a led consente di operare spostamenti noti dell'acquisitore potendoli verificare anche mediante la camera di posizionamento.

Altro accorgimento utile per facilitare il riposizionamento dell'intero sistema da una misura all'altra è stato dotare la struttura del supporto orizzontale di sensori di prossimità.

I controlli elettronici, i driver dei motori e le alimentazioni sono stati assemblati all'interno di una stessa valigia in alluminio (Fig. 6) facilmente trasportabile che funge da pannello di controllo.

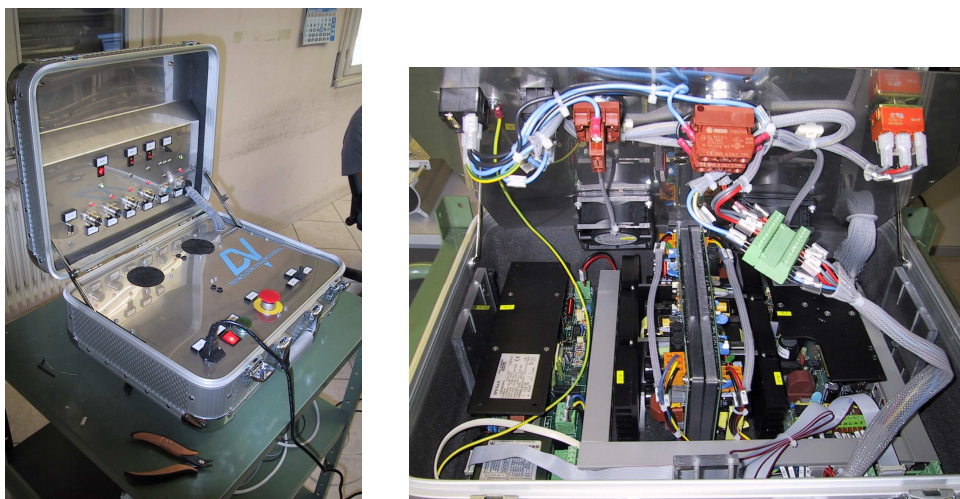


Fig. 6 – Valigia di controllo

5. Problematiche e considerazioni funzionali

Il software di controllo del dispositivo è particolarmente delicato; la corretta gestione della movimentazione dell'asse verticale automatico sincronizzata con l'acquisizione della camera consente di minimizzare l'effetto smearing che si verrebbe a creare nel caso di acquisizione incoerente. La modalità di scansione continua è comunque mantenuta quale possibilità di rilevamento veloce non prevedendo arresti e ripartenze della meccanica.

Va seguito accuratamente il protocollo di presa di riferimento in intensità iniziale. Essendo il dispositivo a geometria "quasi 45/0" in virtù dell'illuminazione mediante lama di luce (indispensabile in ambito spettroscopico di linea) non è assicurata la totale fedeltà alle normative CIE. Ogni problematica di taratura va quindi pesata in relazione alle lievi differenze che tale soluzione comporta.

6. Conclusioni

Lo spettrofotometro d'immagine da noi progettato unitamente all'Università di Parma (attualmente in fase di test presso la sovrintendenza ai Beni Culturali di Parma) ingloba le più moderne tecnologie spettrometriche d'immagine.

Acquisisce immagini validate:

- ∞ a risoluzione di 5 nm,
- ∞ con tempi di acquisizione dell'ordine del minuto,
- ∞ su superfici dell'ordine del metro quadro in singola fase e più metri quadri con operazioni di "mosaicing" (per i dati dettagliati si veda [5]).

L'utilizzo dei monocromatori di linea ImSpector (da Specim Ltd), compatti e risolvibili ha consentito di progettare il dispositivo con particolare riguardo alla portabilità e maneggevolezza d'uso senza venir meno alle esigenze di precisione e ripetibilità necessarie ad una apparecchiatura ad uso ricerca e monitoraggio.

Particolari accorgimenti meccanici e ottici fra i quali:

- ∞ mirata scelta di policromatori e sensoristica ottimizzata,
 - ∞ dislocazione di ottiche, illuminazioni e fibre in un unico pianale compatto, facilmente raggiungibile e controllabile elettronicamente,
 - ∞ sdoppiamento dell'asse verticale con possibilità di rotazioni angolari relative,
 - ∞ la scelta di accorgimenti elettronici e video per il riposizionamento,
- consentono all'utente di sfruttare al meglio le potenzialità dello spettrometro senza gravarsi delle limitazioni che hanno contraddistinto le apparecchiature a filtri e puntuali di passata generazione. Verifiche di interstrumentalità sono aspetto cruciale superato il quale la strada dell'applicazione sistematica della tecnologia, ancora giovane, sarà completamente aperta.

Bibliografia

1. T. Hyvarinen, E. Herrala, A. Dall'Ava. "Direct sight spectrograph: a unique add-in component brings spectral imaging to industrial applications". SPIE, Vol. 3302.
2. A. Dall'Ava, F. Rampazzo, M. D'Agostini. "Applicazione di colorimetria e spettroscopia d'immagine in campo alimentare", in: A. Raggi e C. Oleari (a cura di), *Atti di Colorimetria 2002*, Centro Editoriale Toscano, Firenze, 2002, pagg. 99-108.
3. S. Monti. "Spettrometria d'immagine nel settore del legno e dell'arredamento", in: A. Raggi (a cura di), *Tecnologie multispettrali – Aspetti teorici ed applicativi*, Centro Editoriale Toscano, Firenze, 2004, pagg. 122-129.
4. A. Casini, F. Lotti, L. Stefani. "Evoluzione di apparati di spettroscopia d'immagine per l'analisi non invasiva di dipinti presso l'IFAC-CNR", in: A. Raggi (a cura di), *Tecnologie multispettrali – Aspetti teorici ed applicativi*, Centro Editoriale Toscano, Firenze, 2004, pagg. 77-88.
5. G. Antonioli, F. Fermi, C. Oleari, R. Reverberi. "Scanner ottico iperspettrale per la spettroscopia d'immagine", in: A. Raggi (a cura di), *Tecnologie multispettrali – Aspetti teorici ed applicativi*, Centro Editoriale Toscano, Firenze, 2004, pagg. 10-24.

Scanner ottico iperspettrale per la spettroscopia d'immagine

**GIANNI ANTONIOLI, FERNANDO FERMI, CLAUDIO OLEARI,
REMO REVERBERI**

UNIVERSITÀ DI PARMA, DIPARTIMENTO DI FISICA

E

INFN-UNITÀ DI RICERCA DI PARMA

Parco Area delle Scienze, 7A – 43100 Parma, www.fis.unipr.it/~fermi
cognome@fis.unipr.it

1. Introduzione

Il mondo delle immagini digitali ha ormai invaso la nostra esistenza. Tuttavia, le immagini digitali, come le fotografie tradizionali, presentano problemi di qualità dovuti alla tecnica utilizzata per la loro cattura e alla tecnica della loro riproduzione, sia essa eseguita con un monitor o con una stampante o con un proiettore. Se per le immagini in bianco e nero i problemi tecnici possono considerarsi sostanzialmente risolti, per le immagini a colori il problema non è ancora risolto nonostante l'impulso e lo stimolo impresso alle ricerche negli ultimi dieci anni.

Il problema del colore nasce già al momento della cattura delle immagini. Gli strumenti tradizionali quali le macchine fotografiche a pellicola, le fotocamere digitali e le telecamere, funzionano su base tricromatica come l'occhio umano ma non hanno le sensibilità spettrali dell'occhio umano. Inoltre le loro sensibilità spettrali (pellicola, fotorivelatori, filtri ottici) sono tra loro differenti e soggette a cambiamenti a causa dell'invecchiamento. Di fatto, trovare due strumenti con la stessa risposta spettrale è molto difficile se non impossibile. Questo fatto ha conseguenze importanti:

- i colori delle immagini sono falsi (rispetto alla percezione dell'occhio umano);
- le immagini soffrono il fenomeno del metamerismo;
- due immagini riprese con strumenti diversi ma anche con lo stesso strumento, a distanza di tempo, sono difficilmente confrontabili.

In altre parole, le immagini sono dipendenti dallo strumento e dalla sorgente di luce che le illumina così, se ci proponiamo di utilizzare queste immagini come immagini di riferimento o per confronti futuri, si commette un grossolano errore.

Il problema di disporre di immagini di riferimento è particolarmente sentito nel campo della conservazione, della diagnostica a fini conservativi, del restauro e dello studio colorimetrico e morfologico di dipinti o di altri oggetti d'arte come libri, codici miniati, pergamene, ecc..

Le immagini utilizzabili a questo scopo, devono basarsi sulla misurazione di qualche grandezza fisica rappresentativa. Nel caso dei dipinti, questa grandezza è il fattore di riflessione spettrale dello strato pittorico, nell'intervallo della luce

visibile per la caratterizzazione del colore e nell'infrarosso per mettere in evidenza strati pittorici o disegni coperti data la maggiore profondità di penetrazione di questa luce. Il fattore di riflessione spettrale nell'infrarosso è inoltre di grande importanza per lo studio dei pigmenti utilizzati dagli artisti. Naturalmente esistono altre grandezze utili per lo studio e la caratterizzazione dello strato pittorico. Citiamo qui la fluorescenza eccitata con luce ultravioletta in grado di mettere in evidenza caratteristiche dei dipinti altrimenti non rilevabili.

Negli ultimi dieci anni molta attenzione è stata dedicata alla tecnica multispettrale [1-8] in grado di ottenere immagini spettrali, cioè immagini basate sul fattore di riflessione spettrale dei loro pixel. Questa tecnica usa una camera digitale con matrice CCD monocromatica e un insieme di 6÷12 filtri opportunamente scelti. Utilizzando questi filtri, essa misura, per ogni pixel dell'immagine, un uguale numero di punti del fattore di riflessione spettrale mediato sulla banda passante dei filtri. Il corretto fattore di riflessione spettrale è ricostruito, a partire da questi punti sperimentali, mediante un processo di deconvoluzione abbastanza complesso [3-6]. La tecnica da noi sviluppata per riprendere immagini spettrali [9,10], si basa sulla misurazione spettrofotometrica del fattore di riflessione spettrale. La banda passante dello spettrofotometro è sufficientemente piccola da non richiedere alcun processo di deconvoluzione.

In questo articolo si presenta il lavoro svolto per realizzare uno scanner ottico iperspettrale in grado di riprendere immagini spettrali necessarie per la costituzione di archivi di immagini digitali di riferimento che consentano di seguire l'evoluzione storica dello stato di conservazione di dipinti e di altri oggetti d'arte a superficie piana.

L'articolo illustra i principi di funzionamento dello scanner e i risultati delle sue prestazioni riguardanti la riproduzione del colore e la risoluzione spaziale.

2. Principi di funzionamento dello scanner

La CIE (Commission International de l'Éclairage) definisce [11] il colore di uno strato pittorico mediante le coordinate di tristimolo:

$$\begin{aligned} X &= K \sum_i \bar{x}(\lambda_i) R(\lambda_i) S(\lambda_i) \Delta\lambda_i \\ Y &= K \sum_i \bar{y}(\lambda_i) R(\lambda_i) S(\lambda_i) \Delta\lambda_i \\ Z &= K \sum_i \bar{z}(\lambda_i) R(\lambda_i) S(\lambda_i) \Delta\lambda_i \end{aligned} \quad (1)$$

dove:

- le somme riguardano le lunghezze d'onda della luce visibile (400÷700nm);
- $\bar{x}(\lambda_i)$, $\bar{y}(\lambda_i)$, $\bar{z}(\lambda_i)$ sono le funzioni colorimetriche della CIE;
- $S(\lambda_i)$ è un illuminante della CIE;

- $R(\lambda_i)$ è il fattore di riflessione spettrale misurato;
- $\Delta\lambda_i$ è la banda passante dello spettrofotometro di misurazione;
- K è un fattore di normalizzazione così definito:

$$K = \frac{100}{\sum_i \bar{y}(\lambda_i) S(\lambda_i) \Delta\lambda_i} \quad (2)$$

La misurazione del colore, secondo le equazioni (1), è ricondotta alla misurazione del fattore di riflessione spettrale $R(\lambda_i)$ poiché le altre grandezze sono tutte tabulate. Esse dicono inoltre che la misurazione del fattore di riflessione spettrale di uno strato pittorico equivale alla misurazione delle sue coordinate colorimetriche. Non è vero il viceversa: note le coordinate colorimetriche di uno strato pittorico, si possono sempre trovare molti fattori di riflessione spettrale che le determinano. Su questo fatto si basa la riproduzione metamERICA del colore ottenuta con miscele di colori diversi. Il fenomeno del metamerismo, se da una parte agevola la riproduzione del colore, comporta dall'altra la dipendenza del colore dalla sorgente luminosa che lo determina; un fatto grave che genera notevoli contenziosi commerciali e che può avere conseguenze drammatiche nel caso del restauro di dipinti. Quanto successo alla National Gallery of Art di Washington, dove la parte restaurata del quadro *The Tragedy* di Picasso, eseguito su base colorimetrica nel 1937, appare diversa dall'originale sotto diversa illuminazione [12], ne è un esempio. Purtroppo questo problema non è ancora stato risolto data la difficoltà di rimuovere lo strato pittorico aggiunto dal restauratore. La caratterizzazione di uno strato pittorico mediante il fattore di riflessione spettrale è molto precisa e consente di evitare il fenomeno del metamerismo perché due strati pittorici con lo stesso fattore di riflessione spettrale appariranno uguali sotto diverse sorgenti luminose.

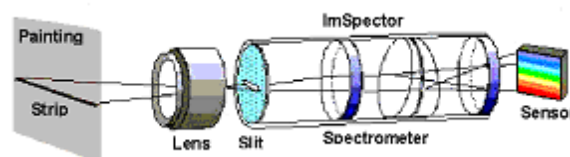


Fig. 1 – Vista esplosa della catena ottica dello scanner per la ripresa di immagini spettrali

Da quanto detto si può capire quanto sia importante lo sviluppo di tecnologie riguardanti sia la ripresa sia la riproduzione di immagini spettrali. Nel tessile, la riproduzione di immagini stampate su base spettrale è molto sentito e in fase di sviluppo. Lo stesso si può dire per l'editoria d'arte.

Lo scanner da noi sviluppato per la misurazione di immagini spettrali, è costituito da una camera digitale con CCD matriciale monocromatico, accoppiata ad uno spettrometro che a sua volta si accoppia ad un obiettivo. La vista esplosa della catena ottica è mostrata in Fig. 1 dove è possibile notare sia il soggetto da riprendere sia il CCD della camera digitale. L'obiettivo del sistema focalizza un'area della scena sul piano della fenditura d'ingresso dello spettrometro, ma solo la luce riflessa dalla striscia coniugata con i punti della fenditura d'ingresso entrerà nello spettrometro. La luce entrante è dispersa dallo spettrometro lungo una direzione perpendicolare all'asse ottico e rifocalizzata sul sensore della camera digitale parallelamente alle righe di pixel del sensore. Lo spettrometro ha un rapporto d'ingrandimento 1:1, quindi l'immagine della fenditura d'ingresso focalizzata sul sensore ha dimensioni identiche. La lunghezza della fenditura d'ingresso dello spettrometro è generalmente uguale a quella del formato del CCD della camera digitale, anche se ciò non è necessariamente obbligatorio. Nel nostro caso la fenditura d'ingresso è lunga 8.8 mm e alta 25 microns, identica alla lunghezza del CCD da 2/3". La posizione dell'immagine della fenditura dello spettrometro sul sensore dipende dalla lunghezza d'onda della luce come mostrato in Fig.2.

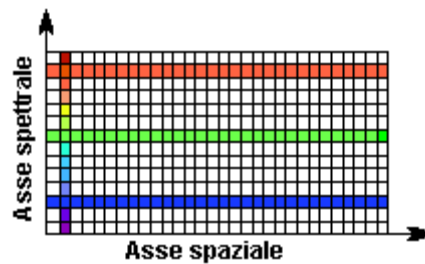


Fig. 2 – Posizione dell'immagine della fenditura d'ingresso sul sensore dovuta alla lunghezza d'onda della luce

Se la luce entrante nella fenditura dello spettrometro è rossa otterremo, per esempio, una striscia rossa luminosa lungo le righe di pixel del sensore, localizzate nella parte superiore del CCD, se invece la luce fosse blu otterremmo una striscia blu nella parte inferiore mentre per la luce verde la striscia sarà sulle righe centrali. Se nella fenditura entrasse luce bianca, il sensore sarebbe tutto illuminato con i colori dell'iride distribuiti dall'alto verso il basso.

Si può così capire che l'acquisizione di un "frame" della camera digitale equivale alla cattura simultanea di tante immagini della fenditura d'ingresso quante sono le lunghezze d'onda significative della luce entrante. Se ora consideriamo che sulla fenditura d'ingresso è focalizzata una sottile striscia del soggetto che vogliamo riprendere, possiamo dire che l'acquisizione di un "frame" della camera digitale consente di catturare tante immagini della striscia del soggetto quante sono le lunghezze d'onda significative in cui è scomposta la luce da parte dello spettrometro. Dunque, le righe di pixel del CCD forniscono l'informazione

spaziale della scena mentre le colonne del CCD forniscono l'informazione spettrale relativa ad ogni pixel della striscia catturata.

Lo scanner cattura l'immagine spettrale di una piccola striscia della scena, ogni volta che il sistema acquisisce un "frame" della camera digitale. Per acquisire un'intera immagine occorre acquisire in successione le immagini spettrali di un certo numero di strisce. Il sistema di ripresa deve quindi scorrere lungo una determinata direzione per consentire l'acquisizione ordinata delle immagini spettrali di più strisce della scena. Inoltre, se è richiesta un'elevata risoluzione spaziale, sarà necessario riprendere separatamente diverse parti dell'immagine e procedere successivamente alla sua ricomposizione con programmi in grado di ricostruire il mosaico.

Vogliamo concludere questo paragrafo riassumendo le caratteristiche del nostro scanner dicendo che si tratta di uno *spettrofotometro a singolo raggio a multi canali spaziali e spettrali*.

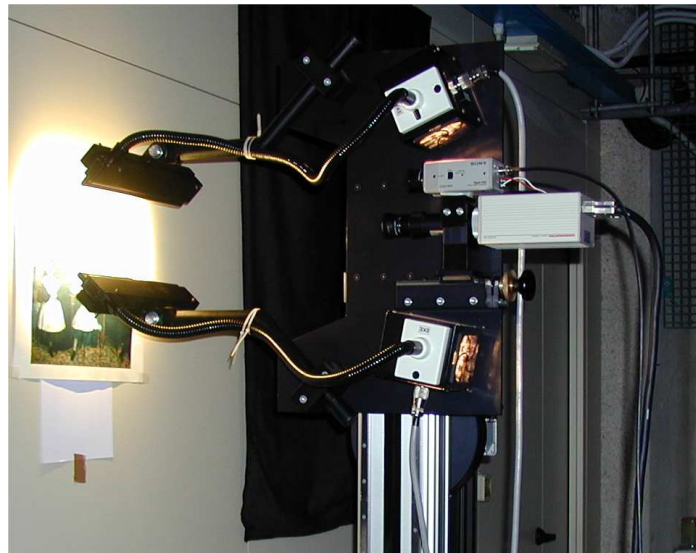


Fig. 3 – Dettagli della piastra rigida su cui sono fissati i componenti optoelettronici

3. Descrizione dello strumento

Lo strumento si può considerare composto di tre parti: la parte optoelettronica che cattura la luce e la trasforma in segnali elettrici, la parte meccanica destinata alla movimentazione della parte optoelettronica e la parte informatica che acquisisce i segnali e li converte in immagini.

I dettagli della parte optoelettronica sono mostrati in Fig. 3. Essa è formata dall'obiettivo, dallo spettrometro e dalla camera digitale accoppiati rigidamente e dal sistema di illuminazione formato da due lampade alogene la cui luce è

trasportata mediante due fibre ottiche di vetro con terminazioni a lama di luce. Le lame di luce sono orientabili per ottenere una ben definita geometria ottica di misurazione. Tutti questi componenti sono rigidamente fissati ad un'unica piastra che durante la ripresa è traslata rigidamente. Questa disposizione consente di evitare variazioni indesiderate della geometria ottica di misurazione.

Le parti meccaniche sono visibili in Fig. 4 che mostra la visione complessiva dello scanner. In essa sono visibili il supporto su cui appoggia il piantone che sostiene la barra su cui scorre la piastra durante la ripresa delle immagini.



Fig. 4 – Visione complessiva dello scanner

Il piantone scorre manualmente sulle guide del supporto. La sua corsa orizzontale è di circa 150 cm e la sua posizione è controllata da un dispositivo elettronico.

La barra che porta la piastra può scorrere lungo il piantone e può ruotare rispetto ad esso in modo da assumere qualunque angolazione rispetto alla verticale,

consentendo la ripresa di immagini inclinate. Questo è particolarmente utile nella ripresa di affreschi o di dipinti su arconi o a soffitto.

La piastra scorre finemente sulla barra, controllata dal programma di acquisizione. La sua corsa utile è di 60 cm. Considerando che la barra può muoversi rispetto al piantone di sostegno si possono riprendere immagini lunghe 140 cm in più riprese. La parte informatica comprende un “frame grabber” che interfaccia la camera digitale al computer e un programma di acquisizione che controlla il processo di cattura dell’immagine spettrale. La camera digitale e il “frame grabber” acquisiscono i segnali a 12 bit, come è riconosciuto necessario per ottenere una buona profondità del colore.

4. Acquisizione dell’immagine spettrale

Come detto in precedenza, l’acquisizione dell’immagine spettrale di una scena, richiede la misurazione del fattore di riflessione spettrale dei suoi pixel. La misurazione deve essere eseguita con una ben definita geometria ottica che, nel nostro caso, è quella $45^\circ/0^\circ$. Le lame di luce che illuminano la scena devono avere un angolo di incidenza di 45° rispetto all’asse ottico del sistema di ripresa. Inoltre, se si desidera misurare il fattore di riflessione spettrale senza bisogno di deconvoluzione, occorre che lo scanner possieda una banda passante di analisi spettrale $\Delta\lambda \leq 5\text{nm}$, condizione soddisfatta dallo spettrometro utilizzato dallo scanner la cui banda passante è di circa 2nm. Per eseguire le misurazioni occorre disporre di un bianco standard con buona uniformità superficiale, cioè di una superficie che possieda un alto fattore di riflessione spettrale $R_{wc}(\lambda_i)$ nell’intervallo 380÷750nm, certificato da un laboratorio metrologico. Inoltre, la misurazione del fattore di riflessione spettrale sarà corretta se lo scanner risponde linearmente al cambiare dell’intensità di luce. La linearità della risposta è accertata al paragrafo 4.

La procedura di misurazione prevede alcuni passaggi fondamentali:

1. scelta preliminare di alcuni parametri del programma di acquisizione usati per la misurazione del fattore di riflessione spettrale e nella ricostruzione dell’immagine, quali le funzioni colorimetriche e l’illuminante;
2. scelta del tempo di integrazione della camera digitale;
3. acquisizione del segnale di buio $B_n(\lambda_i)$ di ogni pixel del CCD della camera digitale;
4. acquisizione del segnale bianco di riferimento $W_n(\lambda_i)$ di ogni pixel del CCD della camera digitale.

L’acquisizione del segnale di buio si esegue normalmente chiudendo l’obiettivo con un tappo nero.

L’acquisizione del segnale bianco di riferimento, si esegue ponendo il bianco standard al posto della scena e acquisendo i segnali di ogni pixel del CCD generati dalla luce riflessa dal bianco standard. Quando si acquisisce il segnale bianco di riferimento è importante evitare che anche un solo pixel del CCD vada in

saturazione. Per evitare questa eventualità, il programma di acquisizione controlla preliminarmente tutti i segnali dei pixel e ne indica il valore massimo. In caso di saturazione si può o diminuire il tempo di integrazione o chiudere il diaframma dell'obiettivo.

La misurazione del fattore di riflessione spettrale si esegue per i pixel n di tutte le strisce S della scena, acquisite durante la scansione. Questo avviene registrando i segnali $S_n^S(\lambda_i)$ dei pixel del CCD generati dalla luce riflessa da ogni striscia della scena e calcolando, per ogni lunghezza d'onda λ_i , i valori del fattore di riflessione spettrale di ogni pixel con la formula:

$$R_n^S(\lambda_i) = R_{WC}(\lambda_i) \frac{S_n^S(\lambda_i) - B_n(\lambda_i)}{W_n(\lambda_i) - B_n(\lambda_i)} \quad (3)$$

dove l'apice S indica la striscia. I segnali $B_n(\lambda_i)$, $W_n(\lambda_i)$ e $R_{WC}(\lambda_i)$, non dipendono dall'indice S della striscia misurata. Acquisendo ordinatamente le strisce si costruisce la matrice:

$$\begin{pmatrix} R_1^1(\lambda) & \dots & R_N^1(\lambda) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_1^M(\lambda) & \dots & R_N^M(\lambda) \end{pmatrix} \quad (4)$$

dove N indica i pixel di una striscia, M indica le strisce catturate e $R_n^S(\lambda)$ è il fattore di riflessione spettrale del pixel n della striscia S .

La matrice (4) rappresenta quella che abbiamo chiamato *l'immagine spettrale* della scena ripresa.

Questa immagine non può essere direttamente visualizzata per cui occorre prima eseguire il calcolo del colore. Terminata la fase di acquisizione, il programma esegue il calcolo delle coordinate di tristimolo XYZ in accordo alla definizione della CIE espressa dalle Eq. (1), utilizzando l'Osservatore Standard della CIE e l'illuminante preventivamente selezionati. Le coordinate di tristimolo sono poi convertite, con una trasformazione lineare, nei segnali RGB che sono poi degammati per il pilotaggio del monitor tenendo conto dei suoi dati di taratura. Il risultato di queste operazioni è riassunto in Fig. 5 dove si mostra l'interfaccia tra lo scanner e l'operatore presentata dal monitor del computer. In essa si può notare l'immagine acquisita e gli spettri di cinque piccole aree significative selezionate su di essa. Il programma consente di salvare l'immagine nel formato spettrale proprietario SIF, nei formati BMP e TIFF e nel formato ASCII.

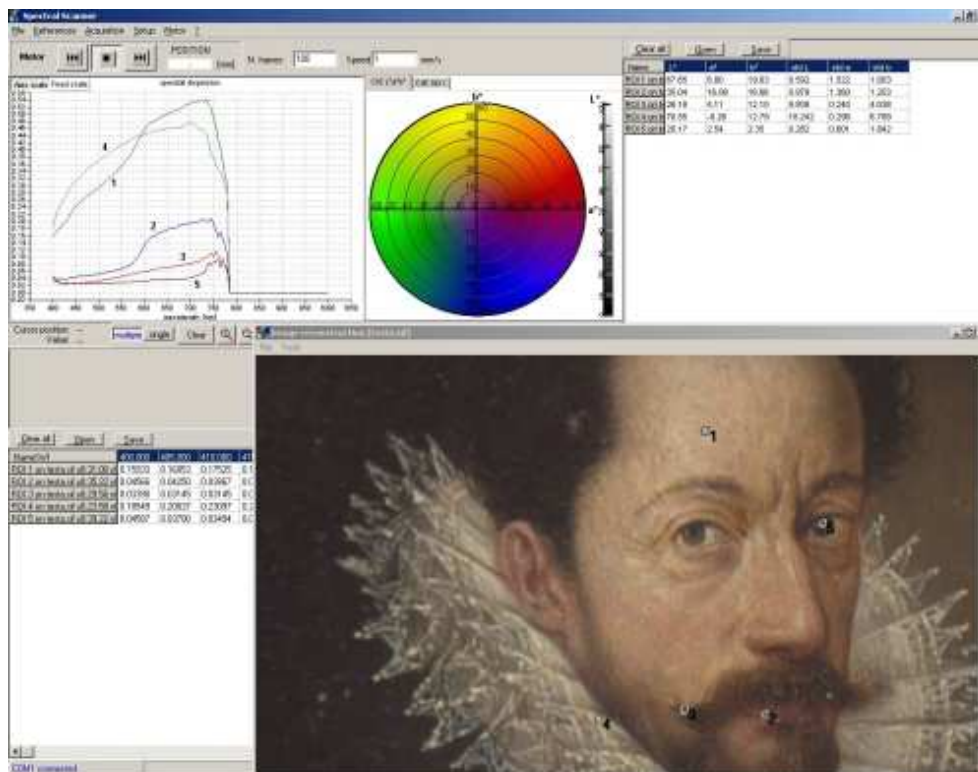


Fig. 5 – Immagine dell'interfaccia del programma di acquisizione. I grafici dei fattori di riflessione spettrale dei punti segnati sull'immagine, sono visibili in alto a sinistra

Il programma consente anche di calcolare le immagini per una determinata lunghezza d'onda della luce illuminante. Questo è importante perché la luce penetra più profondamente nello strato pittorico andando dal blu al rosso, per cui l'immagine nel rosso può mostrare dettagli nascosti che l'immagine nel blu non può mettere in evidenza. Naturalmente queste differenze sono più marcate per la luce infrarossa.

5. Prestazioni dello scanner

Le principali prestazioni dello scanner riguardano la sua abilità sia nella riproduzione del colore, che nel nostro caso si traduce nella qualità della misurazione del fattore di riflessione spettrale, sia nel discriminare i dettagli spaziali dell'immagine.

5.1. Riproduzione del colore

Le misurazioni sono state effettuate utilizzando 14 mattonelle comprendenti il bianco, il nero, tre grigi e 12 colori tra i quali alcuni molto saturi come il giallo, l'arancio e il rosso. Le mattonelle sono state acquistate al National Physical

Laboratory, UK (NPL), con certificazione del fattore di riflessione spettrale nella geometria 45°/0° da noi utilizzata. In pratica abbiamo formato un quadro con le 14 mattonelle e ne abbiamo ripreso l'immagine spettrale. Quindi abbiamo preso lo spettro di riflessione spettrale di ogni mattonella mediato su di un'area centrale in accordo con quanto dichiarato dalla certificazione NPL.

Il colore delle mattonelle è stato calcolato nello spazio CIELAB che consente di misurare le differenze di colore. I calcoli delle differenze sono stati eseguiti in base alla formula CIELAB76. I risultati sono mostrati nella Tab. 1.

Tab. 1 – Differenze di colore nello spazio CIELAB calcolate in accordo alla formula CIELAB76

Colore	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*_{ab}
White	0.01	-0.01	-0.01	0.02
Black	-0.61	-0.36	0.56	0.90
Pale Grey	-0.02	0.02	0.03	0.04
Difference Grey	-0.32	-0.09	-0.17	0.37
Mid Grey	-0.40	0.04	-0.18	0.44
Deep Grey	-0.24	-0.18	0.10	0.31
Deep Pink	-0.34	0.37	-0.39	0.63
Red	-0.38	0.73	1.00	1.29
Orange	-0.15	0.58	3.44	3.49
Bright Yellow	0.22	-0.64	4.05	4.10
Green	-0.14	-0.91	0.37	0.99
Difference Green	-0.05	-1.12	0.70	1.32
Cyan	-0.21	0.49	-0.76	0.93
Deep Blue	-0.38	1.06	-0.72	1.34

La Tab. 1 mostra risultati molto soddisfacenti poiché le differenze di colore sono molto vicine ad un'unità CIELAB considerata come limite di discriminazione del colore. Soltanto due colori presentano valori abbastanza alti, il giallo brillante e l'arancio che sono colori molto saturi. Si vede anche che questa differenza è attribuibile alla coordinata blu in entrambi i casi. In Fig. 6 è mostrato il confronto fra i valori certificati e quelli misurati dei fattori di riflessione spettrale dei due colori. In essa si possono notare le code nella regione blu dello spettro responsabili dell'elevato valore Δb^* per questi due colori.

Queste code possono essere attribuite all'intensità della luce diffusa dai campioni che passa nello spettrometro come luce spuria. L'interpretazione è supportata dal fatto che la coda del giallo, che diffonde più luce dell'arancio è più alta. Sarebbe comunque necessario un accertamento più circostanziato.

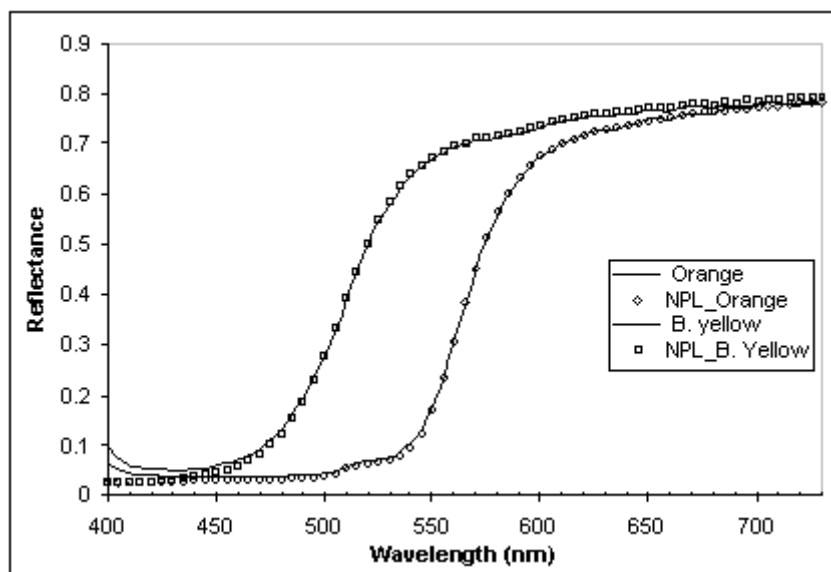


Fig. 6 – Fattore di riflessione spettrale per i colori orange e bright yellow. I marker sono i valori certificati da NPL, le linee continue sono gli spettri misurati

Il risultato complessivo della misurazione è in genere caratterizzato con il valore medio, la deviazione standard e il valore massimo della distribuzione ΔE^*_{ab} che risultano: valore medio=1,16; deviazione standard=1,21; valore massimo=4,10. L'unità di misura è quella CIELAB. Questi dati rappresentano una performance di assoluto valore.

L'ultima nota di questo paragrafo è dedicata alla linearità della risposta dello scanner al variare dell'intensità di luce. Ebbene la misurazione dei fattori di riflessione spettrale del bianco, dei grigi e del nero comporta un intervallo di intensità di luce compreso nel rapporto 1:250. Ebbene gli spettri di riflessione spettrale misurati, riproducono fedelmente quelli certificati da NPL dimostrando la buona linearità della risposta dello scanner nell'intervallo di intensità di luce esplorato.

5.2. Risoluzione spaziale

La risoluzione spaziale dello scanner è determinata dalla dimensione del più piccolo dettaglio di forma che può essere riconosciuto nell'immagine. Essa dipende da molti fattori: dimensione dei pixel del CCD della camera digitale, profondità del colore, dispersione spaziale dell'ottica (spread point), fattore di ingrandimento, disuniformità dell'illuminazione, vibrazioni meccaniche, ecc..

La risoluzione spaziale dello scanner è caratterizzata dalla sua Funzione di Trasferimento di Modulazione (MTF) la cui valutazione richiede l'uso di target a profili sinusoidali di intensità di luce. Noi misureremo invece la Funzione di Trasferimento di Contrasto (CTF) che si misura con target meno costosi a barre

bianche e nere quindi con ripidi profili di intensità di luce. Entrambe sono determinate dalla diminuzione della profondità di modulazione dei segnali, causata dallo scanner durante la cattura dell'immagine, al variare della frequenza spaziale. Le nostre misurazioni sono state condotte con il "test target" prodotto da SinePatterns (USA), scelto dalla FBI americana per verificare la qualità degli scanner utilizzati per la cattura delle impronte digitali. Questo target contiene una serie di aree formate da linee bianche e nere a diverse frequenze spaziali indicate sul target. La frequenza spaziale è data in lp/mm (line pairs/mm) cioè dal numero di coppie di barre bianche e nere contenute in un millimetro. La misurazione consiste nella cattura dell'immagine del target e nel calcolo della modulazione dei profili di intensità alle diverse frequenze spaziali.

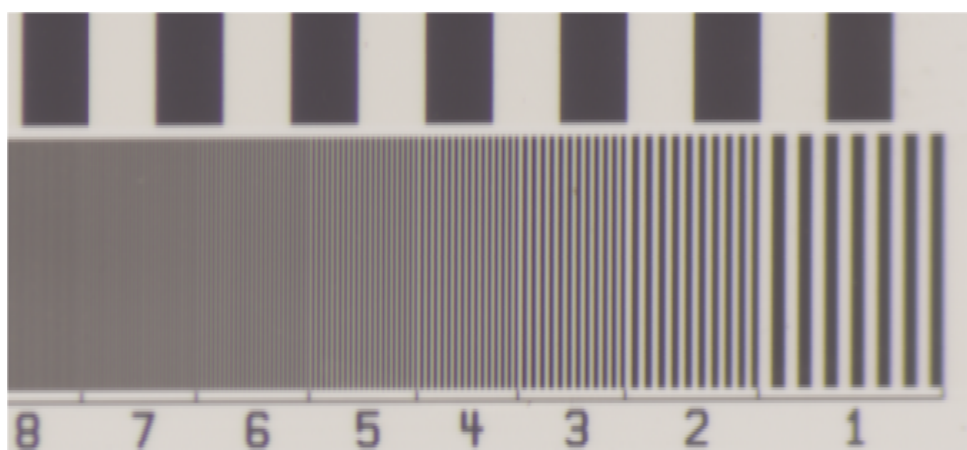


Fig. 7 – Immagine, ripresa con lo scanner, delle barre verticali dell' FBI test target chart fornito da SinePattern (USA). I numeri indicano le frequenze spaziali in lp/mm. Il rapporto di ingrandimento è 8:1 e la velocità di scansione è di 1 mm/sec.

L'immagine delle barre orientate parallelamente alla direzione di scansione è mostrata in Fig. 7.

La stima della CTF si può ricavare con metodi diversi, tuttavia il modo più semplice è quello di valutare la profondità di modulazione del profilo di intensità per ogni frequenza spaziale secondo la formula:

$$m = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (5)$$

dove I_{\max} e I_{\min} sono i valori di intensità minima e massima del profilo d'intensità. Per ottenere la CTF occorre normalizzare i dati delle modulazioni ottenute, con la modulazione massima del target ottenuta da una frequenza molto bassa come quella rappresentata dalle barre bianche e nere della parte superiore di Fig. 7. I risultati sono riassunti in Fig. 8 dove sono riportate le CTF nelle direzioni

perpendicolare e parallela alla direzione della scansione. Esse sono ottenute dai segnali RGB di due immagini catturate dallo scanner con barre rispettivamente parallele e perpendicolari alla direzione di scansione.

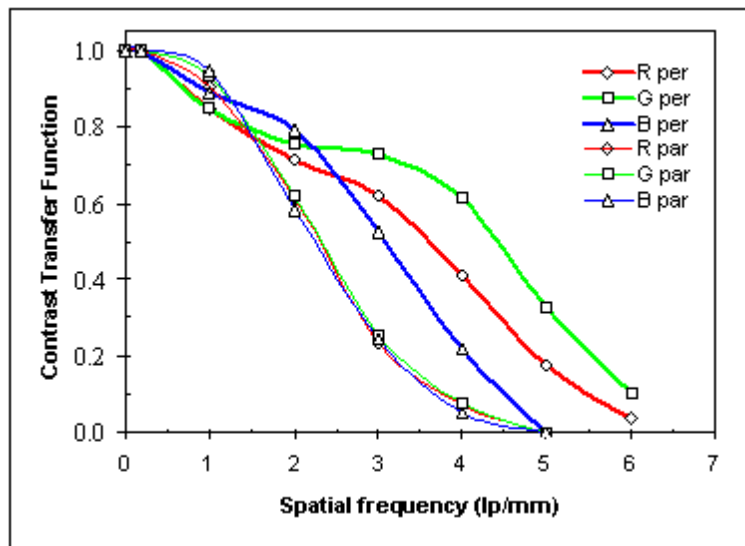


Fig. 8 – CTF ottenute da immagini del FBI test target fornito da SinePattern (USA).
 — CTF perpendicolare alla direzione di scansione;
 — CTF parallela alla direzione di scansione.

In Fig. 8 possiamo notare che la CTF nella direzione perpendicolare alla direzione di scansione è sempre maggiore di quella nella direzione parallela. Questo comportamento è fisicamente corretto perché il campionamento spaziale nella direzione parallela è limitato dalla fenditura d'ingresso dello spettrometro che è di 25 micron. In questo caso infatti, per una frequenza di 5 lp/mm, l'obiettivo focalizza sulla fenditura dello spettrometro una barra nera e una bianca. L'immagine dell'area corrispondente risulterà uniformemente grigia cioè con modulazione nulla.

Utilizzando il criterio di Rayleigh [13,14] per la risoluzione di due bande sovrapposte e, considerando che una CTF del 10% costituisce il limite di risoluzione per l'occhio umano possiamo dire che lo scanner ha una risoluzione spaziale di circa 5 lp/mm nella direzione perpendicolare e 3.5 lp/mm nella direzione parallela. La risoluzione spaziale dell'occhio umano è di circa 4÷6 lp/mm per cui la risoluzione spaziale dello scanner è leggermente al di sotto solo per la direzione parallela a quella di scansione.

Possiamo ancora aggiungere che, mentre la CTF perpendicolare non dipende sostanzialmente dalla velocità di scansione, quella parallela diminuisce rapidamente all'aumentare della velocità a causa dell'integrazione spaziale dovuta

al movimento. Questo limita la velocità operativa dello scanner a 1 mm/sec se si desidera avvicinare la risoluzione dell'occhio umano.

6. Conclusioni

Possiamo concludere questo lavoro mettendo in evidenza i vantaggi e gli svantaggi dello scanner da noi realizzato:

- ∞ non richiede la conoscenza della risposta spettrale del sistema;
- ∞ la misurazione del fattore di riflessione spettrale non dipende dalle disuniformità dell'illuminazione e risente molto poco dei difetti fotografici degli obiettivi;
- ∞ misura il colore direttamente nello spazio di un Osservatore Standard della CIE predefinito;
- ∞ è di facile utilizzo, quindi può essere gestita da personale di medio livello scientifico;
- ∞ può essere smontato e rimontato in poco tempo senza bisogno di essere tarato di nuovo e quindi è facilmente trasportabile per poter eseguire misure in situ;
- ∞ ha prestazioni di assoluto livello relativamente alla riproduzione del colore;
- ∞ ha una buona risoluzione spaziale anche se occorre migliorare quella nella direzione della scansione;
- ∞ richiede tempi piuttosto lunghi per la ripresa di un'immagine di 1 m² di superficie;

Crediamo tuttavia che esistano gli strumenti tecnologici per superare i limiti dello scanner emersi con la realizzazione di questo prototipo.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano la Fondazione della Cassa di Risparmio di Parma per il sostegno finanziario che ha reso possibile la realizzazione del progetto e la Soprintendenza alle Belle Arti di Parma e Piacenza, per il sostegno dato al progetto e per la concreta collaborazione che ha reso possibile verificare le prestazioni dello strumento sul campo.

Si ringraziano inoltre gli ingegneri F. Rampazzo e M. D'Agostini della ditta DV tecnologie d'avanguardia (Padova) per i preziosi suggerimenti e per le soluzioni tecniche adottate nella realizzazione dello strumento.

Bibliografia

1. D. Saunders, J. Cupitt, "Image processing at the National Gallery: The VASARI project", *National Gallery Tech. Bull.*, 14: 72 (1993).
2. P.D. Burns, R.S. Berns, "Analysis of multispectral image capture, *Proc. IS&T/SID 4th Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications*, Scottsdale, USA, 1996, p. 19.

3. J. Y. Hardeberg, F. Schmitt, H. Brettel, J-P. Crettez, and H. Maître, "Multispectral image acquisition and simulation of illuminant changes", *Color Imaging: Vision and Technology*, John Wiley and Sons (1999), p. 145.
4. F. König, W. Praefcke, "A multispectral scanner", *Color Imaging: Vision and Technology*, John Wiley and Sons (1999), p. 129.
5. B. Hill, "Optimization of total multispectral imaging systems: best spectral match versus least observer metamerism", *Proc. SPIE*, 4421: 481 (2002).
6. A. Ribés, F. Schmitt, and H. Brettel, "Calibration and spectral reconstruction for an art painting multispectral acquisition system", *Proc. of The 2nd European Conference on Colour Graphic, Imaging and Vision*, Aachen, Germany, 2004, p. 403.
7. H. Liang, D. Saunders, J. Cupitt, M. Benchouika, "A new multi-spectral imaging system for examining paintings", *Proc. of The Second European Conference on Colour Graphic, Imaging and Vision*, Aachen, Germany, 2004, p. 229.
8. R. Schettini, G. Novati, P. Pellegrini, "Training set and filter selection for the efficient use of multispectral acquisition systems", *Proc. of The Second European Conference on Colour Graphic, Imaging and Vision*, Aachen, Germany, 2004, p. 422.
9. G. Antonioli, F. Fermi, C. Oleari, R.Reverberi, M. D'Agostini, A. Dall'Ava, F. Rampazzo, "Monitoraggio dello stato di conservazione sulle opere del Parmigianino mediante misurazione dell'apparenza della superficie pittorica e implicazioni illuminotecniche", *Atti del Convegno Internazionale di Studi su "Parmigianino e il manierismo europeo"*, Parma, Italia, 2002, p. 158.
10. G. Antonioli, F. Fermi, C. Oleari, R.Reverberi, "Spectrophotometric scanner for imaging of paintings and other works of art", *Proc. of The Second European Conference on Colour Graphic, Imaging and Vision*, Aachen, Germany, 2004, p. 219.
11. Publication CIE n. 15.2 "Colorimetry" 2nd edition, Vienna, Austria (1986).
12. R.S. Berns, "The science of digitizing paintings for color-accurate image archives: a review", *J. Imaging Sci. Tech.* 45, 305 (2001).
13. M. Born and E. Wolf, "Principle of optics" 6th edition, Pergamon Press, Oxford, 1980, p. 333.
14. D. Williams and P.D. Burns, "Diagnostics for digital capture using MTF", *IS&T2001, Image processing, Image quality, and Image capture system*, Montreal, Canada, 2001, p. 227.

Acquisition and Mosaicking of Large / High-Resolution Multi- / Hyper-Spectral Images

PAOLO PELLEGGRI, GIANLUCA NOVATI

DISCO - DIPARTIMENTO DI INFORMATICA, SISTEMISTICA E COMUNICAZIONE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO – BICOCCA
Via Bicocca degli Arcimboldi, 8 – 20126, Milano - Italy
[novati, pellegri]@disco.unimib.it

AND

ITC, ITALIAN NATIONAL RESEARCH COUNCIL
Via Bassini, 15 – 20133, Milano – Italy
Phone: +39-02-23699-559, Fax: +39-02-23699-543
[novati, pellegri]@itc.cnr.it

RAIMONDO SCETTINI

DISCO - DIPARTIMENTO DI INFORMATICA, SISTEMISTICA E COMUNICAZIONE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO – BICOCCA
Via Bicocca degli Arcimboldi, 8 – 20126, Milano - Italy
Phone. +39-02-64487840, Fax +39-02-64487839
schettini@disco.unimib.it

1. Introduction

In recent years, the limitations of ‘traditional’ RGB imaging have become more and more evident as the requirements in terms of image quality are being raised, and new uses and applications are being conceived within the digital imaging field. At the same time, multispectral imaging has been emerging as a technology that allows the acquisition of color images with a superior quality [1], and has established itself as a suitable alternative to (and evolution for) current RGB imaging.

A number of studies have already been published that outline the general framework of multispectral imaging [2-5] as well as more specific technical issues [6,2]. Potential applications are plentiful and are actively being investigated, and several prototype multispectral acquisition systems have been assembled in research labs all over the world. However, so far multispectral imaging has generally been seen as a cutting edge technology that can yield high quality results but is accessible only to resourceful institutions and companies.

In this paper, we briefly introduce the theoretical framework of multispectral imaging, particularly with regard to ‘wide-band’ multispectral acquisition. In doing so, we drop any distinction (usually based on the number of bands considered) between hyper- and multispectral imaging, and only use the latter term. We then introduce a system assembled by authors for the acquisition of large / high-

resolution multispectral images, and outline the methodology employed to operate it.

2. ‘Narrow-band’ multispectral imaging

Compared to RGB imaging, which is based on the theoretical framework of colorimetry [7] and therefore ‘synthetizes’ color stimuli from the contributions of objects, environment, and observer, multispectral imaging attempts to estimate objects’ reflectances. It is therefore unaffected by the typical problems of RGB imaging, including device-dependency [1], metamerism [7,1], and accuracy limitations of the device sensors [8,9]. In fact, despite the availability of colorimetric device-independent color spaces and international standards such as ICC profiles [10] and sRGB [11], multispectral imaging remains the only way to achieve complete independence from both the environment and observer.

Motivations for the use of multispectral imaging can be found in everyday experiences like the phenomenon of metamerism, which shows that there exist different ‘physical’ colors (spectra) that sometimes get the same colorimetric representation. At the same time, physics outlines that while color representations in RGB imaging and colorimetry use parameters whose ultimate physical significance is that of measuring the amount of light energy that is ‘registered’ by the sensors considered (both human and electronic), such parameters have only an indirect relationship with the fact that the objects observed are actually able to reflect light towards those sensors.

The aim of multispectral imaging is then that of describing this ‘ability’ of color surfaces as modelled by their reflectance function; as this function depends on the physical properties of the surfaces considered, it is also much more invariant than environmental conditions and observers sensitivity, and therefore more ‘fundamental’.

In general, the acquisition performed using a given sensor will return a value a in the form

$$(1) \quad a = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda)R(\lambda)S(\lambda)d\lambda.$$

This value integrates contributions from the energy E that reaches the physical sample observed, the color reflectance R of the sample, and the ‘sensitivity’ S of sensor. The integration with respect to the wavelength λ is performed in the range λ_1 to λ_2 of the sensor’s sensitivity; if this range exceeds that of the visible light spectrum, then appropriate steps must be taken to cut unwanted radiation off.

To obtain an estimation of the reflectance R , two different approaches are currently used in multispectral imaging [12]. On one hand, direct measures of these values can be attempted if the device’s sensors are sensitive to a very narrow wavelength

interval (in which case, the system sensitivity S varies for each sensor), or the light sources employed show a very narrow emission spectrum. In both cases, the value a obtained from an acquisition can be interpreted as the value of function $E(\lambda)R(\lambda)S(\lambda)$ at a specific wavelength, so that, by changing sensors or light sources, different values of this function can be estimated on the whole visible light spectrum. For a given wavelength λ_i , Equation 1 then becomes

$$(2) \quad a_i = E(\lambda_i)R(\lambda_i)S(\lambda_i) ,$$

and if the properties of the illuminant and sensor(s) are known or can be measured, then the values $E(\lambda_i)$ and $S(\lambda_i)$ are known and $R(\lambda_i)$ can be computed. As an alternative, the output values a_i can be compared with the corresponding values previously obtained from the acquisition of a reference physical sample whose reflectance is known. If the result of this previous acquisition is indicated with a_i' , then it is

$$(3) \quad \frac{a_i}{a_i'} = \frac{E(\lambda_i)R(\lambda_i)S(\lambda_i)}{E(\lambda_i)R'(\lambda_i)S(\lambda_i)} = \frac{R(\lambda_i)}{R'(\lambda_i)} ,$$

where R' is the (known) reflectance of the reference sample. The value of $R(\lambda_i)$ can then be computed using the following equation:

$$(4) \quad R(\lambda_i) = \frac{a_i}{a_i'} R'(\lambda_i) .$$

If necessary, the model can be further complicated to cope with such phenomena as internal light scattering and re-emission. Also, appropriate steps can be taken to account for any fluorescence, if needed.

Multispectral acquisition systems that use this approach can be extremely precise; however, they also often suffer from drawbacks including expensiveness, need of specialized personnel for the operation, bulky and unwieldy machinery, and misalignment problems.

3. 'Wide-band' multispectral imaging

The second approach to multispectral acquisition is based on wide-band sensors. In this case, each sensor is sensitive to light energy in a sufficiently large wavelength interval, and the emission of the light source considered has a sufficiently broad spectrum, so that the values a_i obtained from the acquisition cannot be associated to specific wavelengths. The relationship between these values and the actual reflectance values must then be somehow established to estimate the reflectance

function R . In mathematical terms, this can be seen as a deconvolution problem, and the general theory of deconvolution can be applied to it.

If the value of R at N different wavelengths values λ_j is wanted, then the discrete form of equation 1 will be written as

$$(5) \quad a_i = \sum_{j=1}^N E(\lambda_j) R(\lambda_j) S_i(\lambda_j) \Delta\lambda_j ,$$

with $\Delta\lambda_j$ being the width of the wavelength interval in which the value of function $E(\lambda)R(\lambda)S_i(\lambda)$ (S_i varies with the sensor) is considered to be constant and equal to $E(\lambda_j)R(\lambda_j)S_i(\lambda_j)$. If M sensors are used, then M such equations can be written to form a linear system. In algebra notation, this system can be written as

$$(6) \quad \mathbf{a} = \mathbf{D}\mathbf{r} ,$$

with

$$(7) \quad \mathbf{a} = [a_i] , \mathbf{D} = [d_{ij}] = [E(\lambda_j)S_i(\lambda_j)\Delta\lambda_j] , \mathbf{r} = [R(\lambda_j)] ,$$

and if matrix \mathbf{D} were known, then Equation 6 could be solved with respect to \mathbf{r} by means of some system inversion technique. However, this is seldom the case, as the estimation of the illuminant E and the sensitivity S_i is not straightforward, and a complex illumination geometry (such as multiple and possibly different light sources used together from different angles) would require costly computations as well.

For these reasons, it is customary to estimate the relationship between the acquisition output \mathbf{a} and the sampled reflectance function \mathbf{r} by means of an empirical model. If \mathbf{r} is measured for a ‘sufficiently representative’ set of sample spectra, then the relationship between the measured reflectance \mathbf{r} and the corresponding acquisition output \mathbf{a} obtained from an acquisition of the same spectra can be identified and extended to all spectra. Following Equation 6, it can be seen that the function linking an acquisition output vector \mathbf{a} to its corresponding reflectance \mathbf{r} is linear, and can be approximated using a linear model built from the chosen sample spectra. If P samples are available, and their corresponding \mathbf{a}_k and \mathbf{r}_k vectors (with k ranging from 1 to P) are considered, then it is

$$(8) \quad \mathbf{a}_k = \mathbf{D}\mathbf{r}_k ,$$

and therefore

$$(9) \quad \mathbf{A}_S = \mathbf{D}\mathbf{R}_S ,$$

with

$$(10) \quad \mathbf{R}_S = [\mathbf{r}_1 \mid \dots \mid \mathbf{r}_P] \text{ and } \mathbf{A}_S = [\mathbf{a}_1 \mid \dots \mid \mathbf{a}_P] .$$

The (pseudo-)inverse \mathbf{D}^- of matrix \mathbf{D} can then be computed by inverting Equation 9 with some chosen technique, and the reflectance \mathbf{r} for a generic acquisition output \mathbf{a} can thus be computed using the relationship

$$(11) \quad \mathbf{r} = \mathbf{D}^- \mathbf{a} .$$

The model built, represented by matrix \mathbf{D}^- , is dependent on the illumination, so in general a new model will be needed everytime the illumination conditions change. Also, the acquisition output values a_i must be properly corrected to discount the geometry of the illumination before they can be used to compute the corresponding reflectance \mathbf{r} . In fact, achieving a uniform illumination on the whole scene to be acquired is usually very difficult; different parts of the scene will typically receive different amounts of light energy, so that the illuminant function E will actually vary depending on the point being considered within the scene. This would in turn make matrix \mathbf{D}^- and the resulting empirical model dependent on the position within the scene, so that a different model would have to be computed for each point in the scene, which is not feasible. However, it is possible to correct the acquisition output values to make them independent from the position in the scene; such correction is usually performed by acquiring a reference physical sample as in the narrow-band approach, although the result has in this case a different meaning [2]. The corrected output values can then be used in Equations 8-11 to compute a single model which is valid for the whole scene.

Another obvious issue is the choice of the 'training set', which is, the set of the colors used to build the empirical model. As stated above, this set must be 'sufficiently representative' of the whole range of possible colors, which intuitively means that the resulting model can actually be extended to any other color. This is not a clear-cut notion, but specific targets that include a varied selection of sample colors, such as the Macbeth ColorChecker and ColorChecker DC [13], are available. Also, some studies that outline the theoretical bases of this subject and propose working methods to select sample colors were published in recent years [14,15].

4. A 'wide-band' multispectral acquisition system

The typical wide-band acquisition system uses optical filters coupled with a monochrome digital camera to simulate sensors of different sensitivity. The same camera sensors are typically used for all bands, and their sensitivity is modified each time by putting different optical filters before them. One acquisition is then performed for each filter to retrieve the acquisition output vectors a_i . The optical filters are the heart of the system; currently, either traditional filters like those used

in standard and professional photography or a tunable filter are employed. A tunable filter has the ability to change its sensitivity to light by means of an internal magnetic field that can be controlled by the user [16-18], so that the same one filter may be used to replace a whole set of traditional filters. As the configuration of a tunable filter is tuned electronically in real time by the controlling computer, the acquisition with a tunable filter is therefore faster compared to traditional filters that are changed one time for each simulated sensor; also, operating a tunable filter does not imply more technical setup issues (if any) than those encountered using a filter wheel.

For these reasons, we based our 'wide-band' acquisition system [2] on a VIS2 VariSpec Tunable Filter (from Cambridge Research and Instrumentation); this filter has a nominal bandwidth of 40nm at 500 nm. The rest of the system consists of a Photometrics CoolSnap digital camera (from Roper Scientific) with a resolution of 1392 by 1040 pixels and a dynamic range of 12 bits, a high-quality 28mm f/4 Rodagon lens (from Rodenstock), a cut-off optical filter for infrared and ultraviolet radiations (from Andover Corporation), and a set of light sources for professional photography (see Figures 1 and 2).

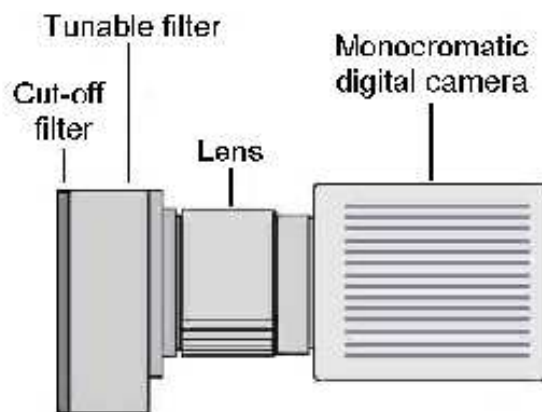


Fig. 1 – A scheme of the wide-band multispectral acquisition system assembled by the authors

To operate our system, we first performed a calibration phase in which we estimated the camera noise by means of acquisitions performed with the lens shut at different integration times. Based on the results of these trials, we built a correction model which is applied to raw acquired images in order to eliminate noise. We also verified the linearity of the camera sensors response, so that after noise correction we can apply Equation 5 to our system (barring a multiplying constant which is subsumed in the characterization model of equation 6) without

any previous linearization step. Lastly, we evaluated whether the lens employed generates any geometrical distortion by acquiring a home-made calibration target; our trials showed that no distortions are generated.



Fig. 2 – A shot of our acquisition system. It can be mounted on a tripod but also hanged from above using a simple frame like this one

At the beginning of an acquisition session, if we do not already have an empirical characterization model for that light setup, we build one using the Macbeth ColorChecker DC as our training set. We then proceed to the acquisition of our intended target, as well as of a reference sheet of paper to be used in discounting the geometry of illumination. Following CIE recommendations, we estimate reflectance at intervals of 10 nanometers in the range 400 nm to 700nm; we therefore employ thirty-one different configurations of our tunable filter so as to avoid ending up with an underdetermined system in Equation 9. These configurations are chosen so that the peak of the corresponding filter transmittance also varies between 400 nm and 700 nm with steps of 10 nm.

The acquisition output vectors are then processed to correct noise and geometry of illumination, and are feded through the characterization model to obtain estimated reflectances. The model itself is built using standard numerical analysis techniques for system inversion, revolving around Singular Value Decomposition. A complete diagram of our operation pipeline can be seen in Figure 3.

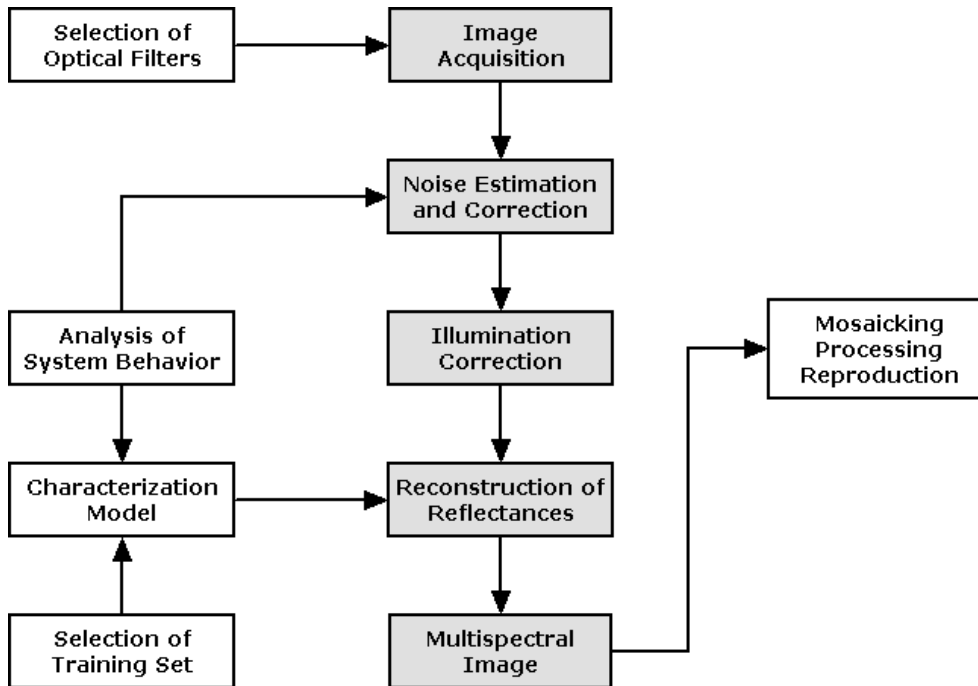


Fig. 3 – A framework for ‘wide-band’ multispectral acquisition

As a reference, Figure 4 shows results obtained by the authors for a few different acquired color samples in terms of a comparison between the estimated reflectance curves and the corresponding measurements obtained using a Minolta CM-2002 spectrophotometer.

5. Mosaicking of multispectral images

A single multispectral image does not necessarily provide a complete representation of the scene or artifact considered. Whenever large artifacts or scenes must be acquired, and / or a high image resolution is wanted, it is unlikely that a single acquired image can be sufficient; a narrow field of view in the acquisition system can also contribute to this situation. In fact, often several images (called ‘tessels’) covering different parts of the scene will have to be taken

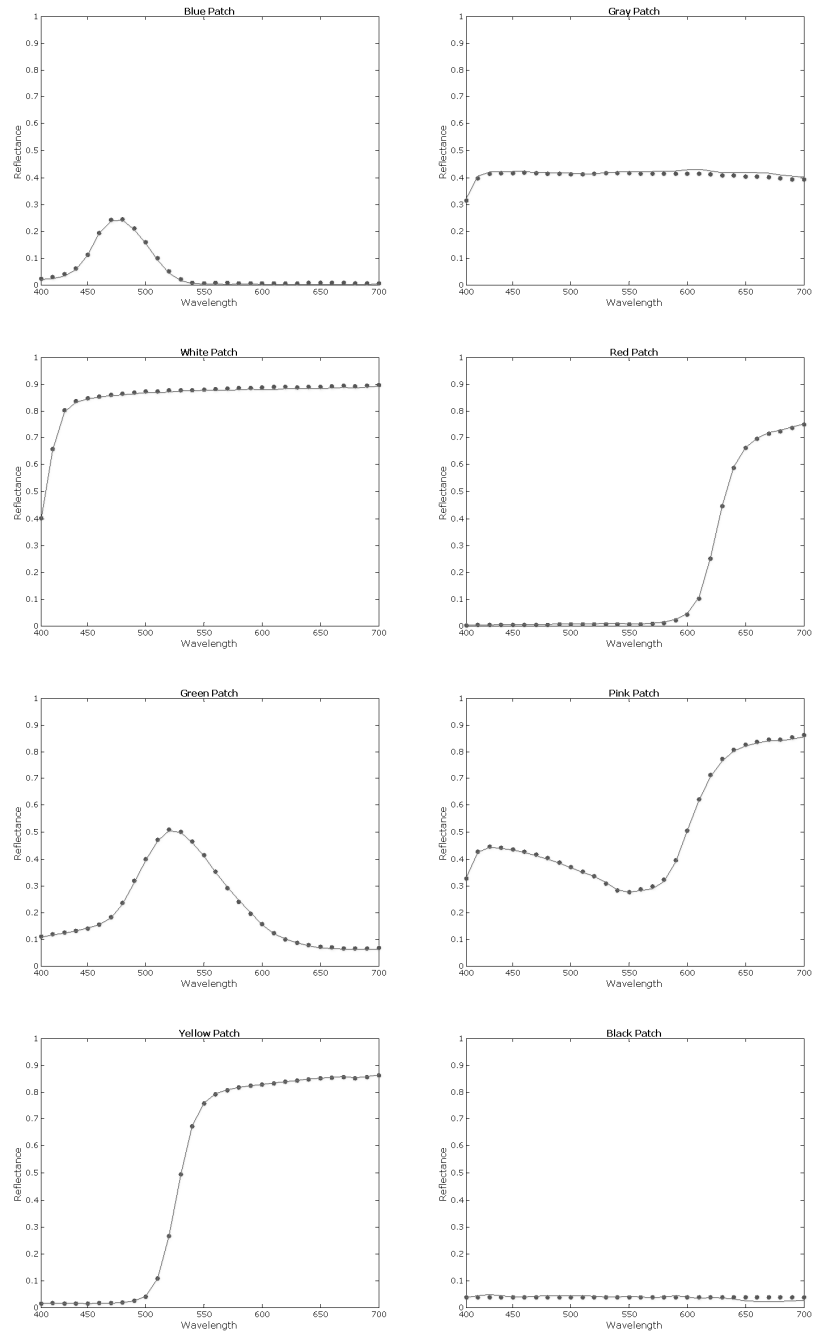


Fig. 4 – Some results obtained by the authors for a few different color samples. Reflectance curves measured using a spectrophotometer are shown as dotted lines, while the corresponding curves estimated from a real acquisition are shown as continuous lines.

and then ‘stitched together’ to form an image of the whole. This operation, which is called mosaicking, consists in finding corresponding details in overlapping tessels that cover adjacent areas of the scene, and then stitch those tessels together in such a way that the corresponding details perfectly overlap and the resulting composite image does not show any geometrical or color artifact, especially where the edges of the tessels were placed.

Mosaicking has been extensively studied for wide-angle images like those obtained from aerial and satellite photography or panoramas taken with standard cameras (see for instance [19-21]). In these cases, tessels often show great geometrical distortions because of the lens characteristics, while the level of detail is sufficiently small, so that correcting large distortions can give good results even if some small-scale artifacts are still present. However, in many of the applications envisioned for multispectral imaging, the situation is usually different, with tessels that show very little to no geometrical distortions and are taken from slightly different view angles or slightly misaligned positions, especially on the vertical axis. On the other hand, the final mosaicked images are usually very sensitive to even small-scale artifacts. Anyway, no multispectral acquisition system can be considered complete if it does not include a framework for multispectral mosaicking.

A typical approach in mosaicking is that of letting the user / operator indicate some overlapping details of two or more tessels, and then having the mosaicking software compute the corresponding mathematical transformations and produce the final mosaic. Image understanding and applied artificial intelligence techniques have also been tried to develop automated procedures that should be capable of choosing the right transformations without any intervention by the user. In these cases, however, results are mixed, as many kinds of artifacts and scenes do not lend themselves easily to this approach. Also, much research concentrated on panorama-like (i.e., horizontal) mosaicking, and the resulting algorithms perform poorly when confronted with bi-dimensional mosaicking (see Figure 5).

On our part, we opted for a mixed approach and developed a semi-automatic procedure that gets input from the user under the form of corresponding areas, and then applies image analysis techniques to find the precise match to be used for computing image transformations (see Figure 6).

Compared to other procedures that require single corresponding points to be indicated, this approach aims to reduce the impact of any errors caused by the limitations of the user inspection, which is performed by eye. Such errors, even when their magnitude is limited to a distance of very few pixels, may result in significantly distorted mosaicking, especially in those regions of the tessels which are distant from the detail considered.

As a reference, Figure 7 shows a mosaic obtained by the authors through the application of this procedure.



Fig. 5 – Upper left, upper right, lower left: examples of scenes that can raise issues when attempting automatic mosaicking. Scarcity of distinctive details (upper left), large zones of almost-uniform color (sky, upper right), and wrong perspective (lower left) can all pose problems to automatic image understanding. Lower left: research is often directed towards panorama-like (horizontal) mosaicking, and consequent available software implementation may perform poorly in bi-dimensional mosaicking.

6. Applications and future work

Based on the encouraging results obtained so far, further research is being carried out by the authors to expand the capabilities of the acquisition system introduced. In particular, one of the main goals is that of integrating color data with shape data. On one hand, shape data are sometimes needed even to obtain images of the artifacts involved. For instance, in the case of a book it may be impossible to open pages wide because of the risk of damaging the binding; pages will then be partly bent when they are acquired, resulting in a geometric distortion of the page content. Some technique will therefore have to be applied to measure or estimate the bending and correct the acquired images to discount its effect. Similar (although often greater) difficulties must be overcome when acquiring frescoes and paintings which were made on markedly non planar walls, such as churches vaults; if a 'linear representation' is wanted, which is, a representation in which the paintings are viewed as if the walls were 'unfolded' onto a plane, then the effect of the wall surface curvature must be corrected.

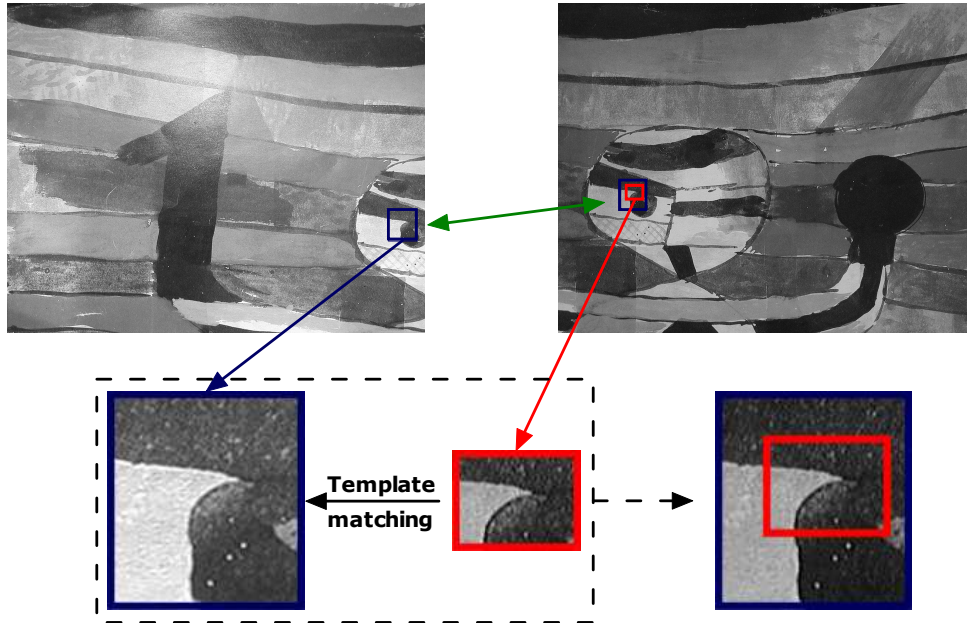


Fig. 6 – A semi-automated approach to mosaicking devised by the authors. The user is asked to identify corresponding areas (above), but the exact spatial match between those areas is computed automatically by means of image processing techniques (below). This approach does not invest the user with the responsibility of a precise (i.e., pixel-wise) match, which can be difficult when inspecting by eye.

On the other hand, some artifacts have a strong three-dimensional component that contributes to their nature and appearance at least as much as their color. Such artifacts range from low reliefs, and possibly even some kind of paintings, to fully three-dimensional objects such as archaeological material or statues. In all these cases, the effect of shape on the color appearance of the object or scene must be evaluated, and appropriate actions must be taken to account for it. Also, a complete and more useful / realistic representation of the artifact may require the addition of 3D shape data (possibly obtained from specific instruments like 3D laser range scanners) to the corresponding multispectral color data.

To further test the system and try the features being added, different applications (especially in the cultural heritage field) are currently part of the authors' work on the subject.



Fig. 7 – A mosaicked image obtained from 4 tessels using the semi-automated method implemented by the authors

7. Conclusions

We proposed a framework for the acquisition of large and high-resolution multispectral images based on the so-called 'wide-band' approach. We introduced an acquisition system assembled by the authors, as well as methods to operate it and process its output data to retrieve the final multispectral images. The methods also include an approach to the mosaicking of multispectral images for scenes that require it. The system was tested in acquisitions of real artifacts, and some reference results from these trials were reported. These results indicate that the system can achieve a good quality in both color acquisition and mosaicking; based on this work, further research and experiments are being carried out by the authors to expand the system capabilities and test it in different applications.

References

1. Fairchild M.D., Rosen M.R., Johnson G.M., Spectral and Metameric Color Imaging, Munsell Color Science Laboratory, Center for Imaging Science, Rochester Institute of Technology, Rochester, NY.
2. G. Novati, P. Pellegrini, R. Schettini, S. Zuffi, Acquisizione di immagini multispettrali, *DDD_COLORE*, numero monografico sul colore di DDD - Rivista trimestrale Disegno e Design Digitale, Poli Design Press. Anno_2 numero_6 apr/giu 2003.
3. F. Schmitt, H. Brettel and J. Hardeberg, Multispectral Imaging Development at ENST, International Symposium on Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives: p. 50 (1999).
4. S. Tominaga, Spectral imaging by a multichannel camera, *Journal of Electronic Imaging*, 8(4): p. 332 (1999).
5. B. Hill, The History of Multispectral Imaging at Aachen University of Technology, online publ. at www.multispectral.org.
6. G. Hong, M. R. Luo, and P. A. Ronnier, A Study of Digital Camera Colorimetric Characterization Based on Polynomial Modeling, *Color Research and Application*, vol. 26, no. 1, pp. 76-84, Feb. 2001.
7. Hunt R.W.G., *Measuring Colour*, Third edition, Fountain Press, England 1998.
8. S. Quan, N. Ohta, N. Katoh: Optimal Design of Camera Spectral Sensitivity Functions Based on Practical Filter Components. Color Imaging Conference 2001: 326-331.
9. G. Sharma, H. J. Trussell, Figures of merit for color scanners,' *IEEE Trans. Image Proc.*, vol. 6, no. 7, pp. 990-1001, Jul. 1997.
10. International Color Consortium, ICC Profile Format Specification, latest version, (<http://www.color.org>).
11. <http://www.srgb.com>
12. F. H. Imai, M. Rosen, R. S. Berns, Comparison of spectrally narrow-band capture versus wide-band with a priori sample analysis for spectral reflectance estimation, Proc. Eighth Color Imaging Conference: p. 234 (2000).
13. http://www.gretagmacbeth.com/files/products/ColorCheckerDC_new_EN.pdf
14. J. Y. Hardeberg, H. Brettel, F. Schmitt, Spectral characterisation of electronic cameras, Proc. SPIE 3409: p. 100 (1998).
15. P. Pellegrini, G. Novati, R. Schettini, Training set selection for multispectral imaging system characterisation, *Journal of Imaging Science and Technology*, vol. 48(3), pp. 203-210, 2004.
16. Hans Brettel, Jon Yngve Hardeberg, and Francis Schmitt, WebCam for Interactive Multispectral Measurements, Colour Image Science Conference (CIS'2000) , Derby, UK, April 10-12, 2000.
17. S. Tominaga, R. Okajima, A Spectral-Imaging System and Algorithms for Recovering Spectral Functions, Proc. 4th IEEE Southwest Symp. on Image Analysis and Interpretation, p. 278, Austin, Texas (2000).

18. S. Poger, E. Angelopoulou, Selecting Components for Building Multispectral Sensors, IEEE CVPR Technical Sketches (CVPR Tech Sketches) 2001, IEEE Computer Society Press (2001).
19. Fedorov D., Fonseca L.M.G., Kenney C., Manjunath B.S., Automatic Registration and Mosaicking System for Remotely Sensed Imagery, 9th International Symposium on Remote Sensing, 22-27 September 2002, Crete, Greece.
20. S. Peleg, M. Ben-Ezra, Stereo panorama with a single camera, Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, 1999 (CVPR'99): 395-401.
21. Heung-Yeung Shum, Richard Szeliski, Panoramic Image Mosaics, Microsoft Research, Technical Report, Redmond, U.S.A., 1997.

Sistema stereoscopico di visione attiva per la caratterizzazione colorimetrica di superfici architettoniche

MARIA LUISA RASTELLO, FABIO SACCOMANDI

ISTITUTO ELETTROTECHNICO NAZIONALE "GALILEO FERRARIS"

Strada delle Cacce, 91 – 10135 Torino, Tel. 011 39 19 219 , Fax: 011 346384
rastello@ien.it

1. Introduzione

La raccolta della documentazione sullo stato di conservazione di un'opera d'arte è il primo fondamentale passo per la salvaguardia del patrimonio nazionale dei beni culturali, permettendo la corretta programmazione degli interventi di restauro ed evitando di conseguenza il degrado eccessivo delle opere. I maggiori ostacoli sono costituiti, da un lato, dal numero e dalla dispersione delle opere d'arte sul territorio, e dall'altro dalla mole di dati necessari ad una documentazione esauriente della singola opera.

Nel caso delle strutture architettoniche, il rilievo è prevalentemente di carattere geometrico ed ha lo scopo di fornire la conoscenza della forma e delle dimensioni del manufatto. In questo caso la documentazione deve fornire informazioni metriche e morfologiche dettagliate, essere attendibile in termini di livelli di precisione adeguati alle finalità, e possedere requisiti di tridimensionalità, almeno per le parti per le quali il controllo stereometrico dell'oggetto studiato risulta essere fondamentale per analizzare le relazioni tra le singole parti in modalità tridimensionale. È evidente che maggiore diventa il dettaglio della documentazione, e quindi la mole dei dati da acquisire e gestire, migliore potrà essere la valutazione delle situazioni di conservazione.

A fronte di queste esigenze, le tecniche disponibili sul mercato sono laboriose, richiedono personale esperto, e i risultati vengono ottenuti in un secondo tempo, fuori linea, per cui eventuali ripetizioni o aggiornamenti possono risultare molto onerosi sia dal punto di vista temporale sia da quello economico. Per questi motivi queste tecniche vengono applicate solo in casi di particolare importanza escludendo tutte quelle situazioni dove il rilievo fotogrammetrico, ancorché importante, non può essere finanziato con risorse adeguate.

Da questo contesto nasce l'esigenza di una strumentazione flessibile, facile da usarsi e trasportarsi, multifunzione, che, anche a costo di una eventuale perdita in accuratezza rispetto alla strumentazione tradizionale, affianchi per favorire la diffusione della raccolta dei dati.

Per potere essere di aiuto all'analisi di tipo ricognitivo, il sistema deve permettere di rilevare sia le variazioni geometriche sia quelle cromatiche delle superfici. Le due tipologie di dati tendono a sommarsi, dando alla fine il quadro di insieme, soprattutto se il dato così ottenuto diventa confrontabile con dati simili o analoghi

contenenti lo stesso tipo di informazione. Se la perdita di materiale da un volume viene messa in evidenza in modo preciso, questo parametro può essere facilmente impiegato per una valutazione, anche empirica ma senz'altro indicativa, dei processi di degrado. Analogo discorso vale per l'analisi cromatica delle superfici. La variazione del grado di annerimento, o l'estensione di una frattura, di un'area di crescita biologica o di alterazioni cromatiche più o meno degradanti, rappresentano un altro modo per valutare la dinamica dei sistemi di degrado presenti su un monumento.

Da uno strumento di rilevamento con sistema stereoscopico, ci si deve attendere un grado di definizione che sia almeno confrontabile con i sistemi classici di documentazione, come per esempio la fotogrammetria. Il guadagno che si ottiene dall'acquisizione di immagini a basso costo, rispetto ai tempi di valutazione che potrebbero impegnare un collaboratore esperto, rende accettabile un'eventuale perdita di definizione, soprattutto su grandi distanze. Per questo motivo, è opportuno che lo strumento di acquisizione possa effettuare riprese a distanze variabili con definizione differente e che questo possa essere deciso in fase di progettazione del monitoraggio. Questo permette di osservare in modo più accurato alcuni dei punti più importanti e più a rischio del monumento.

Lo strumento deve possedere quindi un sistema di taratura che definisca in modo corretto la precisione e l'accuratezza della misura in corso, sia sotto l'aspetto metrico, sia sotto quello della resa cromatica, alla quale si potranno collegare i dati di alterazione di tipo chimico fisico che si possono continuare a monitorare nel contorno ambientale. È difficile definire dei valori generali di riferimento, dato che gli stessi sono molto diversificati a seconda delle tecnologie applicate e delle distanze di ripresa. Per superfici architettoniche, variazioni percettibili di un millimetro possono essere considerate come il limite invalicabile, anche se sul travertino questo valore può essere non sufficiente per avere una valutazione corretta di fenomeni, quali, per esempio, l'erosione acquosa. Nel colore le difficoltà aumentano, sia per le difficoltà percettive dell'occhio umano, sia per la disomogeneità delle superfici su cui vengono applicati i sistemi. La letteratura definisce con una differenza di colore ΔE pari a 5 unità dei parametri di tristimolo del metodo CIE-Lab, un limite significativo per percepire variazioni in tutti i settori dello spettro.

Obiettivo generale del Progetto Parnaso è stato proprio lo sviluppo di un sistema integrato di tecniche, funzioni e dati, per l'indagine sullo stato di conservazione di un monumento, che, con l'uso combinato, interattivo e, quanto più possibile, automatico di diverse metodologie di acquisizione, analisi e elaborazione, rende accessibili le informazioni attraverso un sistema informativo integrato. In altre parole, il sistema acquisisce, analizza, elabora, archivia e presenta in modo interattivo i dati multidimensionali che caratterizzano lo stato di conservazione del monumento.

I dati multidimensionali di riferimento sono, in generale, relativi a diversi ambiti (parametri geometrici, caratteristiche chimico-fisiche dei materiali, indagini

macroscopiche sullo stato di conservazione, dati ambientali e strutturali), si collocano a diversi livelli di scala (dall'intero manufatto sino al singolo elemento) a seconda dei dettagli richiesti per la specifica applicazione, sono di diversa tipologia (immagini, dati alfanumerici, disegni) e diverso formato.

Nell'ambito del Progetto sono stati sviluppati :

- ☞ un *sistema software integrato* dotato di opportune interfacce a tecniche e sottosistemi con funzioni specifiche, alcuni dei quali, peraltro, utilizzabili anche autonomamente;
- ☞ una *base di dati multimediale*, sulla quale e' costruito il sistema integrato, riguardante informazioni rilevanti per la caratterizzazione del degrado. I dati di ingresso sono sia acquisiti *in situ* o in laboratorio sia derivati da specifici programmi di elaborazione con i quali e' previsto un opportuno interfacciamento. L'interfaccia utente opera su WEB browser standard, in modo da rendere la base dati usufruibile su qualunque tipo di stazione di lavoro, indipendentemente da hardware e sistema operativo usato, collegata ad Internet (o ad una Intranet privata).
- ☞ un *sistema stereoscopico*, basato su tecniche di *visione attiva*, in grado di operare, automaticamente e in tempo reale, nel rilievo geometrico multiscala e per l'analisi colorimetrica e spettrale. Le caratteristiche di impiego del sistema sono la maneggevolezza, la trasportabilità, la non invasività delle misure e la semplicità d'uso.
- ☞ un *sistema software per l'assistenza alla progettazione dell'appoggio topografico* e della presa fotografica per fini fotogrammetrici, utile per migliorare la pianificazione dell'acquisizione dati *in situ*. Il software prevede un'utilizzo combinato di camere metriche tradizionali con camere digitali.
- ☞ un *sistema software per l'integrazione*, a superamento del fotogrammetrico tradizionale, di diverse *tecniche di restituzione automatica* che prevedono l'utilizzo di camere metriche e non metriche.

Per la realizzazione del Progetto Parnaso e' stato costituito il Consorzio di rappresentanza con rilevanza esterna denominato "Sistemi Innovativi di Indagine e Diagnosi Assistita" - SIINDA, al quale partecipano il Consiglio Nazionale delle Ricerche con ben quattro Istituti: l'Istituto per le Applicazioni del Calcolo, l'Istituto di Elettronica e Ingegneria dell'Informazione e delle Telecomunicazioni, l'Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali e l'Istituto di Metrologia "Gustavo Colonnati"; la Regione Autonoma Valle d'Aosta con la propria Soprintendenza per i Beni Culturali Ambientali e il Servizio Laboratorio Ricerche e Beni Archeologici; il Politecnico di Milano con il proprio Dipartimento di Elettronica e Informazione, e l'Istituto Elettrotecnico Nazionale "Galileo Ferraris" con i settori di Ingegneria dei Sistemi e di Fotometria. Tre sono le Aziende direttamente coinvolte nel Progetto; una operante nel settore della fotogrammetria terrestre, FOART srl, e due nel settore informatico applicativo, CM Sistemi SpA e Menci Software srl.

2. Il Sistema di Stereovisione Attiva

Il sistema di stereo visione attiva (SVA) si inserisce nell'ambito del progetto Parnaso con lo scopo di permettere la raccolta di dati geometrici, colorimetrici e di immagine anche da parte di personale non altamente specializzato.

Si tratta di un sistema portatile di ripresa per mezzo di telecamere, in grado di fornire dati geometrici e colorimetrici di oggetti di dimensioni medio-piccole (entro un'area di 10 m²). Il sistema di ripresa si basa sul principio della stereovisione attiva con telecamere a multirisoluzione controllate da elettronica dedicata.

Il sistema è in grado di operare sia in ambienti chiusi sia in esterni, è trasportabile agevolmente dagli operatori e consente un elevato grado di automazione delle misure garantendo, conseguentemente, un modo semplice di operare.

Il sistema di visione attiva multirisoluzione è costituito da tre telecamere allineate lungo una base di misura comune e con gli assi ottici vincolati a giacere su di un piano di osservazione comune. In questa configurazione la telecamera centrale è dotata di obiettivo ad ampio campo di vista che le permette di inquadrare l'intera scena di interesse a bassa risoluzione, mentre le due telecamere laterali sono dotate di teleobiettivi che consentiranno loro di inquadrare piccole porzioni della scena a più alta risoluzione. Il sistema è dotato di servomeccanismi in grado di ruotare con estrema precisione sia la base comune, sia le due telecamere laterali in maniera indipendente. Un sistema di supervisione controlla in tempo reale i servomeccanismi, acquisisce e elabora le immagini, gestendo l'interfaccia con l'operatore.

Le caratteristiche del sistema sono:

- ∞ l'esecuzione di misure geometriche con un'incertezza percentuale dell'ordine di $10^{-3} \div 10^{-4}$
- ∞ l'acquisizione dell'informazione geometrica e fotometrica di una scena su campi di lavoro (distanza strumento-oggetto) dai 3 ai 10 m
- ∞ l'esecuzione di misure colorimetriche con precisione dell'ordine di ΔE pari a 5 nel sistema CIE Lab, ed eventualmente di riflettanza spettrale
- ∞ l'acquisizione di una documentazione iconografica della scena a diversi livelli di risoluzione e di correlarla ai rilievi geometrici
- ∞ l'acquisizione di immagini a due livelli di risoluzione (bassa risoluzione: campo angolare 0.64 rad., risoluzione angolare 880 μ rad.; alta risoluzione: campo angolare 88 mrad., risoluzione angolare 86 μ rad.);
- ∞ l'individuazione, la localizzazione e il puntamento di bersagli artificiali e naturali, e la misura della posizione 3D di bersagli artificiali con incertezze percentuali dell'ordine di $2 \cdot 10^{-4}$;
- ∞ l'acquisizione dell'immagine di una superficie ad alta risoluzione mediante la mosaicatura di tasselli di immagine .

Il sistema SVA si compone di 3 telecamere B/N allineate lungo un asse comune γ (Fig. 1).

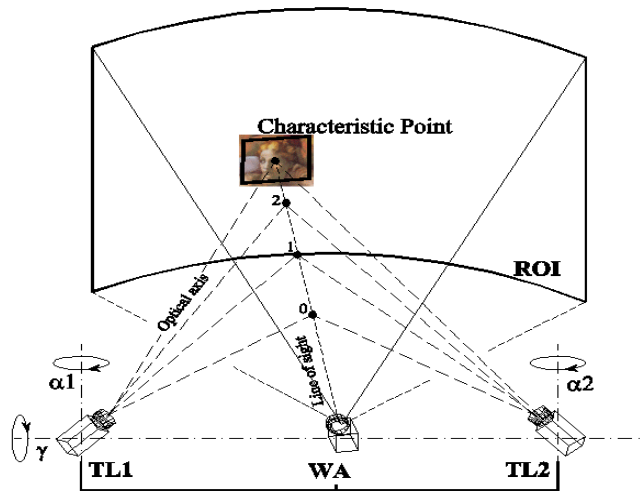


Fig. 1 – Il sistema SVA

Due di esse (TL1 e TL2) formano la stereo-coppia del sistema SVA e sono dotate di teleobiettivi, da 105 mm di focale, in grado di inquadrare solo piccole porzioni della scena ad alta risoluzione. Queste telecamere TL possono ruotare di angoli noti sia intorno ad assi paralleli di vergenza α_1 e α_2 , sia intorno all'angolo di alzo γ , per eseguire il puntamento di punti diversi della scena.

Una telecamera TL del sistema SVA è dotata di 3 filtri spettrali per la misura del punto di colore delle superfici. Considerata la regione spettrale di interesse di questi filtri essi verranno indicati con R, V, B. Per fornire misure colorimetricamente utili, il segnale fornito dai filtri deve prima essere convertito nelle componenti CIE X, Y, Z mediante matrici di trasformazione, e quindi nelle componenti CIE $L^*a^*b^*$ con formule standard.

La terza telecamera (WA) è dotata di un'ottica grandangolare che le permette di inquadrare una regione più ampia della scena (regione di interesse) ad una risoluzione più bassa; la sua funzione principale è di supervisione e di guida delle operazioni rilevamento.

Il principio di funzionamento è il seguente: ogni volta che il sistema viene posto davanti ad una scena da analizzare, esso viene orientato in modo tale da inquadrare l'intera regione di interesse con la telecamera WA di cui ne viene acquisita l'immagine in B/N. L'immagine WA viene elaborata per cercare in essa le strutture che sono di interesse per il fine che si vuole perseguire e una volta trovate, il sistema guida automaticamente i due TL a puntare o "fissare" queste strutture per eseguire su ciascuna di esse le operazioni previste. L'azione di puntamento consiste nel fare convergere l'osservazione (gli assi ottici) della coppia stereo di telecamere sullo stesso punto della scena. Per questo occorre confrontare il contenuto delle due immagini, riconoscere se in esse è presente la stessa scena, o parte di essa, e misurarne la disparità di rappresentazione. La misura della disparità permetterà di

raggiungere la condizione di puntamento attraverso un controllo automatico ad anello chiuso che agisce sugli angoli di vergenza delle camere.

L'acquisizione dell'informazione pittorica e dimensionale è ottenuta ponendo il sistema SVA di fronte al soggetto che deve essere acquisito, e regolandolo in modo tale che la telecamera WA inquadri l'intera regione di interesse. La superficie viene acquisita ad alta risoluzione come un insieme di tasselli di immagine parzialmente sovrapposti, ottenuti da una scansione sequenziale della scena effettuata dai TL. Per ciascun tassello vengono misurate e memorizzate le caratteristiche geometriche (orientazione e posizione 3D) e cromatiche (coordinate CIE Lab*).

L'informazione pittorica e dimensionale complessiva della scena viene ricostruita mediante l'algoritmo di mosaicatura. La ricostruzione della scena ad alta risoluzione è ottenuta mediante un processo che si articola nei seguenti passi:

- a) pre-deformazione delle immagini in modo da sovrapporsi l'una all'altra sulla superficie di riferimento. Questa operazione si basa sulla conoscenza accurata della geometria di ripresa del sistema di acquisizione SVA;
- b) registrazione locale dei tasselli mediante cross-correlazione e calcolo di parametri di "criticità" della registrazione;
- c) registrazione globale di tutti i tasselli. Viene ottimizzata in funzione dei parametri di criticità della registrazione locale e si ottiene come soluzione di un sistema di equazioni lineari.

Come già detto, la funzione della telecamera WA è quella di analizzare la scena nel suo complesso e individuare le strutture di interesse permettendo così al sistema di guidare su di esse l'osservazione dei teleobiettivi TL. Per svolgere la funzione di guida al puntamento, occorre che la telecamera WA fornisca i parametri della retta secondo cui la struttura di interesse è vista dal sistema SVA. Questo richiede una calibrazione geometrica della telecamera WA tale per cui sia possibile associare a ciascun punto della sua immagine una retta di vista nello spazio. Per questo sono stati sviluppati due metodi che sfruttano la capacità del sistema SVA di misurare la posizione 3D di bersagli artificiali, nel proprio sistema di riferimento. Un metodo si basa sulla modellizzazione del sistema di ripresa e sul calcolo dei parametri del modello, l'altro si basa sulla mappatura diretta dei punti dell'immagine in rette nello spazio mediante tassellazione e interpolazione.

La definizione delle componenti cromatiche che caratterizzano lo spazio colorimetrico Rosso – Verde – Blu del sistema SVA è ottenuta mediante l'inserimento di filtri spettrali R, V e B tra l'ottica e il sensore della telecamera TL. L'inserimento dei filtri spettrali tra l'ottica e il sensore comporta sia una variazione della lunghezza focale complessiva (funzione dello spessore dei filtri e del loro indice di rifrazione), sia una possibile deformazione geometrica dell'immagine rispetto alla condizione senza filtri. I filtri in oggetto sono costituiti da cilindri di vetro a facce piane e parallele. La correzione delle distorsioni viene ottenuta secondo la procedura che segue.

Si pone un piano di calibrazione, formato da un insieme di bersagli artificiali (corone circolari) posti a matrice su di una superficie piana (es.: 7 x 9 bersagli), alla distanza di messa a fuoco della TL e lo si inquadra in modo che le immagini dei bersagli coprano tutto il piano immagine. Si acquisiscono le immagini per ogni filtro (R, V, B, T). Il filtro T è un filtro che copre tutto lo spettro del visibile (filtro trasparente), ed è usato per compensare la variazione di lunghezza focale causata da R, V e B nella telecamera TL_s rispetto a quella nella TL_d , nelle operazioni geometriche. Per ogni immagine si estraggono le posizioni dei baricentri dei bersagli con precisione sub-pixel e, prendendo a riferimento le immagini acquisite con filtro trasparente T, si analizzano le deviazioni geometriche subite dai baricentri per le altre componenti cromatiche. Dalle corrispondenze tra bersagli omologhi si calcolano i parametri della trasformazione affine che legano le posizioni di detti bersagli nelle diverse immagini.

L'operazione di guida al puntamento di un bersaglio naturale viene condotta dal SVA in due passi: nel primo passo i teleobiettivi TL scandiscono, a passi regolari, la retta secondo cui il bersaglio è visto dalla telecamera WA. Ad ogni passo i TL controllano se la "descrizione" del bersaglio, fornita dalla WA, è presente nelle loro immagini. Se presente, perfezionano il puntamento alla risoluzione della WA (bassa) facendo convergere gli assi ottici sul bersaglio. Nel secondo passo, le descrizioni delle telecamere TL vengono confrontate direttamente tra di loro, per effettuare il puntamento ad alta risoluzione.

3. La misura del colore

Per fornire misure corrette da un punto di vista colorimetrico, il segnale fornito dai filtri R, V, B deve prima essere convertito nelle componenti CIE X, Y, Z mediante matrici di trasformazione, e quindi nelle componenti CIE $L^*a^*b^*$ con formule standard. Gli elementi di queste matrici costituiscono i parametri che devono essere calibrati. La calibrazione consiste nel misurare dei campioni di colore (es. Piastrelle ceramiche) sia con il sistema SVA (R, V, B) sia con quelle di un colorimetro campione (X, Y, Z), e quindi nel trovare i parametri che minimizzano l'errore della trasformazione da R, V, B a X, Y, Z. Poiché gli elementi delle matrici di trasformazione sono funzione della temperatura di colore dell'illuminante tali parametri devono essere calcolati per ogni tipo di sorgente luminosa.

Il sistema di misura del colore è costituito da SVA e dal bianco di riferimento RW. Non è richiesto l'uso di alcun colorimetro di riferimento. Il sistema permette di

α determinare le componenti tricromatiche $S_{CIE} = [X_S, Y_S, Z_S]^T$ dello stimolo

S di colore acquisito, sulla base dei valori $S_{SVA} = [R_S, V_S, B_S]^T$, misurati sull'omonimo canale di SVA, attraverso la matrice C di rotazione (3X3) dallo spazio colorimetrico Rosso - Verde - Blu (RVB) di SVA allo spazio CIE 1931, secondo la relazione

$$S_{CIE} = C \cdot S_{SVA} \quad (1)$$

dove la matrice

$$C = \begin{bmatrix} c_{XR} & c_{XV} & c_{XB} \\ c_{YR} & c_{YV} & c_{YB} \\ c_{ZR} & c_{ZV} & c_{ZB} \end{bmatrix}$$

è funzione della temperatura di colore ed è determinata nella fase di taratura del sistema;

☞ determinare la luminanza in cd m^{-2} , secondo la relazione

$$L = c \cdot Y_{SVA} \quad (2)$$

dove il coefficiente c è funzione della temperatura di colore ed è determinato nella fase di taratura del sistema;

☞ determinare la temperatura di colore dell'illuminante naturale dal rapporto tra i segnali R_{RW} e B_{RW} misurati da SVA inquadrando RW, secondo la relazione

$$T_c = a_0 + a_1 \cdot \left(\frac{R_{RW}}{B_{RW}} \right) + a_2 \cdot \left(\frac{R_{RW}}{B_{RW}} \right)^2 \quad (3)$$

☞ calcolare le coordinate CIE-LAB secondo le formule di definizione

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \left(\frac{Y_S}{Y_{RW}} \right)^{1/3} - 16 \\ a^* &= 500 \left[\left(\frac{X_S}{X_{RW}} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y_S}{Y_{RW}} \right)^{1/3} \right] \\ b^* &= 200 \left[\left(\frac{Y_S}{Y_{RW}} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z_S}{Z_{RW}} \right)^{1/3} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

La scelta di RW è a discrezione dell'utente anche se, a garanzia della stabilità nel tempo, si consiglia una piastrella ceramica opaca.

Sono oggetto di taratura sia SVA sia RW. La taratura fornisce per una determinata temperatura di colore :

- ☞ la matrice di rotazione (3X3) dallo spazio colorimetrico Rosso - Verde - Blu (RVB) di SVA allo spazio XYZ,
- ☞ il fattore di taratura per ottenere dalla lettura Y di SVA il valore di luminanza in cd m^{-2} ,
- ☞ il valore del rapporto Rosso/Blu (R/B) attribuito da SVA a RW con l'illuminante scelto, e
- ☞ le coordinate tricromatiche (Lxy) di RW.

Per tenere conto delle variazioni di illuminante nel corso dell'acquisizione all'aperto, il sistema viene tarato a diverse temperature di colore, partendo dall'illuminante CIE-A (2856 K) sino a raggiungere temperature di colore intorno

a 20 000 K. I valori corrispondenti a temperature di colore intermedie a quelle di taratura sono ricavabili con opportune interpolazioni lineari. All'utente viene fornita l'informazione necessaria in forma di data base.

Il sistema va tarato almeno con cadenza annuale; questo criterio è generale e vale per un qualsiasi colorimetro che operi in regime di qualità. Il sistema permette di verificare l'eventuale necessità di una taratura prematura confrontando il risultato della misura effettuata da SVA su RW con il valore di taratura (L_{xy}) di RW alla stessa temperatura di colore.

Purché vengano effettuate le acquisizioni relative a RW, il sistema permette di elaborare i dati *on line* oppure in differita.

La sequenza di acquisizione prevede il campionamento di RW all'inizio e al termine dell'acquisizione, ed eventualmente a intervalli di tempo regolari tra l'inizio e la fine. Il numero N di campionamenti è a discrezione dell'utente.

Le operazioni preliminari all'acquisizione sono:

- ∞ la collocazione di RW sulla scena dell'acquisizione, in posizione fissa per tutta la durata temporale dell'acquisizione. La posizione è a discrezione dell'utente;
- ∞ la registrazione dei valori dell'ora di inizio, della temperatura ambiente, e dell'umidità;
- ∞ la determinazione dei tempi τ_R , τ_V e τ_B di integrazione dei singoli canali R, V e B, in misura tale da non saturare nella lettura dei segnali RW durante l'acquisizione;
- ∞ la valutazione approssimativa del tempo necessario all'intera acquisizione;
- ∞ la conseguente scelta, a discrezione dell'utente, nel numero N di acquisizioni intermedie su RW all'interno della procedura generale di acquisizione sull'intero soggetto;
- ∞ la definizione della sequenza di M acquisizioni di stimoli S ; la sequenza deve obbligatoriamente iniziare e finire con un'acquisizione $W = [R_{RW}, V_{RW}, B_{RW}]^T$ su RW, ad esempio:

$$(W_{10})S_{11}S_{12} \dots S_{1M} (W_{11} = W_{20}) S_{21}S_{22} \dots S_{2M}(W_{21} = W_{30})S_{31} \dots \\ (W_{N0})S_{N1}S_{N2} \dots S_{NM} (W_{N1});$$

- ∞ la misura dei segnali di buio R_0 , V_0 e B_0 su ciascun canale di SVA.

Il sistema permette di elaborare i dati *on line* oppure in differita. La procedura di elaborazione viene descritta per la generica i -esima sequenza base $W_{i0}S_{i1}S_{i2} \dots S_{iM}W_{i1}$. Essa prevede:

- ∞ il trattamento dei dati sperimentali della sequenza per tenere conto del segnale di buio e del tempo di integrazione, secondo la relazione generale

$$F = \frac{(F_{mis} - F_0)}{\tau}$$

dove F_{mis} è il dato sperimentale, F_0 è il corrispondente segnale di buio e τ il tempo di integrazione sul canale di misura;

- ∞ il calcolo del valore medio $\bar{W}_i = \frac{1}{2}(W_{i0} + W_{i1})$ caratterizzante l'acquisizione della sequenza;
- ∞ il conseguente calcolo della temperatura di colore secondo l'eq.3;
- ∞ la scelta sul data base degli opportuni dati di taratura, rappresentati dalla matrice C e dal coefficiente c , in base al valore tabellare più vicino alla temperatura di colore determinata al punto precedente;
- ∞ il calcolo delle componenti tricromatiche, secondo l'eq. 1, e della luminanza, secondo l'eq. 2, di ogni elemento S_{ij} della sequenza e di \bar{W}_i ;
- ∞ la memorizzazione dei dati così ottenuti su apposito file;
- ∞ il calcolo delle coordinate CIELAB, secondo l'eq. 4, sulla base dei valori memorizzati al punto precedente;
- ∞ la memorizzazione dei dati così ottenuti su file dedicato.

Nel caso di misure in interni con sorgenti di luce artificiale, la temperatura di colore delle lampade è già nota e si conosce la matrice di rotazione. L'immagine di buio da sottrarre (sia per il bianco che per la scena) è quella ottenuta spegnendo le lampade ed acquisendo il segnale residuo dovuto ad illuminazioni diverse. È necessario l'uso di un colorimetro campione per poter fare i confronti.

Nel caso di misure in esterno la sorgente dominante è il sole la cui temperatura di colore è variabile. Si deve pertanto calcolare la temperatura di colore dell'illuminante nel momento della misura e poi usare la matrice di trasformazione corrispondente (tra le diverse matrici ricavate per calibrazione). In questo caso l'immagine di buio è quella che si ottiene acquisendo con lo shutter chiuso, dato che il sole non lo si può spegnere.

4. Valutazione delle prestazioni colorimetriche

Per valutare le prestazioni di SVA, sono state calcolate le differenze ΔLab in unità CIE-Lab tra i valori di riferimento e quelli misurati dal SVA mediante test in trasmissione e in riflessione, eseguiti in laboratorio.

I test in trasmissione sono stati effettuati utilizzando una sorgente di temperatura di distribuzione 2878 K filtrata per ottenere segnali nelle regioni del rosso con $x_F \in [0,661-0,721]$, $y_F \in [0,279-0,338]$, arancione con $x_F \in [0,558-0,604]$, $y_F \in [0,388-0,439]$, giallo con $x_F \in [0,550-0,510]$, $y_F \in [0,439-0,471]$, verde con $x_F \in [0,294-0,261]$, $y_F \in [0,589-0,628]$, e blu con $x_F \in [0,211-0,166]$, $y_F \in [0,410-0,025]$. La tabella 1 riporta i valori misurati, le coordinate tricromatiche (x, y) nominali del singolo colore e la differenza ΔLab .

Tabella 1

Colore	L_{SVA}	x_{SVA}	y_{SVA}	L_{ien}	x_{ien}	y_{ien}	Δ_{Lab}
Rosso1	227	0,695	0,303	239	0,685	0,313	4,28
Rosso2	290	0,678	0,321	300	0,672	0,326	1,93
Rosso3	317	0,669	0,329	325	0,667	0,331	0,46
Giallo1	930	0,520	0,468	938	0,517	0,471	1,80
Giallo2	942	0,511	0,470	950	0,507	0,472	3,67
Giallo3	958	0,510	0,470	964	0,506	0,472	4,40
Verde1	457	0,419	0,541	464	0,419	0,538	1,72
Verde2	202	0,300	0,584	223	0,289	0,590	4,06
Verde3	126	0,265	0,630	140	0,261	0,624	3,70
Blu1	767	0,392	0,427	745	0,396	0,421	0,85
Blu2	559	0,340	0,420	561	0,340	0,421	0,75
Blu3	120	0,174	0,350	130	0,172	0,368	4,06

I test in riflessione sono stati effettuati utilizzando una sorgente di temperatura di distribuzione 2890 K e campioni ceramici di colore palegrey, midgrey, Diffgrey, deep grey, deep pink, red, orange, cyan, green, yellow, e deepblue. La tabella 2 riporta i valori misurati, le coordinate tricromatiche (x, y) nominali del singolo colore e la differenza Δ_{Lab} .

Tabella 2

Colore	L_{SVA}	x_{SVA}	y_{SVA}	L_{ien}	x_{ien}	y_{ien}	Δ_{Lab}
Palegrey	154,3	0,447	0,410	154	0,446	0,411	0,00
Midgrey	75,0	0,445	0,411	76,1	0,446	0,411	1,01
Diffgrey	76,4	0,443	0,415	76,6	0,445	0,414	1,42
Deepgrey	31,6	0,447	0,407	31,5	0,442	0,411	1,83
Deeppink	50,0	0,509	0,380	51,9	0,51	0,38	1,55
Red	61,0	0,555	0,367	60,5	0,554	0,368	0,24
Cyan	56,7	0,353	0,389	56,4	0,356	0,387	1,78
Green	62,0	0,413	0,447	63,1	0,408	0,448	1,78
Yellow	164,5	0,509	0,448	164	0,509	0,448	0,80
Diffgreen	63,9	0,411	0,452	63,4	0,413	0,451	1,19
Deepblue	25,0	0,427	0,390	22,6	0,419	0,385	3,36

In entrambi i casi valori ottenuti si mantengono nel range richiesto $\Delta_{Lab} < 5$.

3. Conclusioni

Dopo avere presentato le problematiche, le tecniche e la strumentazione utilizzate per quanto riguarda gli aspetti delle misure dimensionali e colorimetriche, sono state presentate le funzionalità specifiche del sistema per la misura del punto di colore.

La sperimentazione delle tecnologie innovative di acquisizione ha avuto come caso di studio il Teatro Romano di Aosta. Il sistema ha superato la verifica delle prime misure sul campo. Alla fine delle operazioni di calibrazione in laboratorio sono state effettuate le prime misure *in situ*. Le misure hanno riguardato il pilastro centrale del Teatro Romano di Aosta. Di questa struttura sono stati effettuati quattro rilievi, da quattro posizioni diverse, in due giorni successivi. Nel periodo di misura le condizioni atmosferiche sono passate dalla nuvolosità uniforme, alla variabilità accentuata, all'irraggiamento solare diretto e alla pioggia e al vento, sottoponendo il sistema ad un test molto severo. Il sistema di acquisizione ha comunque confermato le caratteristiche individuate in laboratorio.

In conclusione, come si può verificare dai risultati riportati, le prestazioni del sistema SVA approssimano già abbastanza bene le richieste dell'utenza, tuttavia, ci si attende che le prestazioni possano ulteriormente migliorare. In generale, essendo il sistema un prodotto di ricerca, esso è aperto allo sviluppo di nuove funzioni (comprese l'elaborazione e l'analisi dei dati direttamente sul campo) ed al continuo miglioramento di quelle esistenti.

Bibliografia

1. F. Grum, C. J. Bartleson. *Optical Radiation Measurements*, vol. 2, Color Measurements, Academic Press: New York
2. G. Wyszecki, W. S. Stiles. *Color Science: Concepts and methods*. 2nd ed., John Wiley & Sons: New York, NY, 1982
3. R.W.G. Hunt. *Measuring Colour*. Ellis Horwood: Chichester, 1982
4. Roberto Nerino, Paolo Grattoni, Rapporto Tecnico IEN-IEIIT-VA R.T. 01/04, Feb.2004
5. C. Chatterjee, V. P. Roychowdhury. "Algorithms for coplanar camera calibration". *Machine Vision and Applications*, 2000, Vol. 12, pp. 84-97.
6. H. A. Brown. "Decentering Distortion of Lenses". *Photogrammetric Engineering* 32(3): pp 444-462, 1966.
7. A. Rosenfeld and A. Kak, *Digital Picture Processing*, Academic Press, Inc, 1982.
8. B. Reddy and B. Chatterji, "An FFT-Based Technique for Translation, Rotation, and Scale-Invariant Image Registration", *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 5, pp. 1266-1271, August 1996.

Spectral-based printer modeling and characterization

SILVIA ZUFFI

ITC CNR, UNITÀ STACCATA DI MILANO
Via Bassini, 15 – 20133 Milano, Tel. 0223699557, Fax: 0223699543
zuffi@itc.cnr.it

RAIMONDO SCETTINI, GIANCARLO MAURI

DISCO, UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO BICOCCA
Via Bicocca degli Arcimboldi, 8 – 20126 Milano
schettini@disco.unimib.it, mauri@disco.unimib.it

1. Introduction

In image acquisition, the possibility of capturing the reflectance spectra of surfaces in a multispectral image constitutes a powerful tool for detailed and accurate color information regarding objects and scenes. In image reproduction, the multispectral approach can significantly reduce the undesirable effects of metamerism between the original and the corresponding reproduction. Most of the methods developed for the spectral-based characterization of binary printers are based on the color mixing model introduced by Hans Neugebauer in 1937. It assumes additive color theory, and computes the reflectance of a halftone print as the sum of each combination of inks weighted by the proportion of paper that it covers. Each ink combination is therefore a primary in the additive model, and is called a Neugebauer primary.

Light scattering in paper causes a shadow around the edge of the dots that makes them look larger. This phenomenon, referred to as optical dot gain, was modeled by Yule and Nielsen with the introduction of a simple n -factor as a power function in the equation of a single color halftone, and successively applied in the Neugebauer color mixing model, giving the Yule-Nielsen modified Spectral Neugebauer Model.

Much has been published on the physical grounds for the Yule Nielsen n -value. It has been observed that values between 1 and 2 are physically meaningful, and values greater than 2 represent various effects, among which the variation in dot density, and are required for high-resolution printers [1]. Usually, the n -value is treated as a free parameter to improve the model fit; and may be considered wavelength dependent [2].

Another effect, commonly called mechanical dot gain, determines a color darker than that predicted: due to the spread of the ink on paper, the real size of a dot printed on a substrate is larger than its theoretical size. The nonlinear relationship between the theoretical concentration of ink on paper and the effective concentration (that is the area the dot actually covers), due to the combination of

optical and mechanical dot gain, is usually taken as a parameter in the model fit optimization. Alternative approaches describe the spreading of the ink, as proposed by Emmel and Hersch [3, 4], and by Gustavson [5].

We have adopted the Yule-Nielsen modified Spectral Neugebauer model for binary printer characterization. The parameters of the YNSN model are usually computed with regression-based methods. The Yule-Nielsen n -value may be derived from an exhaustive procedure of error minimization between the measured and the predicted spectra of a set of colors, where n varies over a limited range of values. Dot gain functions can be estimated before [6], or after [1, 7] the n -value optimization. In a context in which the physical meaning of the Yule-Nielsen n -value has been lost, n -value and dot gain functions represent two strategies for dealing with the effect of dot gain regardless of its origin, optical or mechanical, and should therefore be estimated at the same time. Moreover, our experience shows that the training set of reflectance data does not always exhibit the characteristics of regularity that make it possible to fit the model to the printer simply by using least-square estimated parameters. To solve this problem, we have designed an analytical printer model that can be used regardless of the characteristics of the device considered. Our model is based on the Yule-Nielsen Spectral Neugebauer equation, formulated with a large number of degrees-of-freedom in order to account for dot-gain, ink interaction, and printer- driver operations. To estimate the model's parameters we use genetic algorithms.

Genetic algorithms are a general method inspired by the mechanisms of evolution in biological systems for solving optimization problems. In the basic genetic algorithm (GA), every candidate solution to the optimization problem is represented by a sequence of binary, integer, real, or even more complex values, called an individual, or chromosome. A small number n of individuals (with respect to the cardinality of the whole solution space) are randomly generated as an initial population P . The GA then iterates a procedure that produces a new population P' from the current P , until a given "STOP" criterion is satisfied. Each iteration consists in the following steps:

- ∞ fitness evaluation: for every individual x in P , the value $f(x)$ of a suitable "fitness" function is computed;
- ∞ selection: $n/2$ pairs of individuals are randomly selected from population P ; the probability of selection is higher for individuals of greater fitness;
- ∞ crossover: two new individuals (sons) are generated by separating the two elements of each pair (parents) at a randomly chosen point and interchanging the four parts thus obtained;
- ∞ mutation: the value of each position of the elements in P' is changed with a given probability.

The main advantages of using the genetic approach are that it allows the simultaneous management of many parameters, and can deal with irregular training data sets. The disadvantages are that it cannot guarantee an optimal solution, and that it is, in general, also difficult to tune the free parameters of genetic algorithms.

2. Printer Model

The model of the printer we refer to is based on the well-known Yule-Nielsen Spectral Neugebauer equation. According to the YNSN model, the spectrum of a N -inks halftone print is the weighted sum of 2^N different colors, called Neugebauer primaries, given by all the possible overprints of inks. The weight of each Neugebauer primary is the area it covers in the halftone cell. The YNSN model for a 4-ink halftone print is:

$$R_{print,\lambda} = \left[\sum_{p=0}^{15} a_p R_{p,\lambda}^{\frac{1}{n}} \right]^n \quad \lambda = 1..8 \quad (1)$$

where $R_{print,\lambda}$ is the reflectance of the printed color, n is the Yule-Nielsen factor, $R_{p,\lambda}$ is the reflectance of the p -th Neugebauer primary, and a_p is the primary area coverage. The area coverage is the percentage of the halftone cell covered by the Neugebauer primary.

A model by Demichel can be used to compute the percentage of the area covered by each primary. The dot overlap is the product of the relative area covered by single inks, computed in a stochastic fashion that assumes the ink dots are randomly arranged. The model is considered valid for random or rotated halftone screen [8]; it fails in all cases in which there is a singular screen superposition, although the color deviation observed is not excessively large [9]. For dot-on-dot printing a different formulation must be considered [10]. We have used the model for a random screen, and computed area coverage according to the equations in Table 1, where $\mathbf{c} = [c, m, y, k]$ represents the concentration of inks for printing a given color.

We consider each printer an RGB device and model the driver according to Equation 2, where the gray component is composed of equal amounts of cyan, magenta and yellow.

$$\begin{aligned} c &= c' - U \cdot k, \\ m &= m' - U \cdot k, \\ y &= y' - U \cdot k, \\ k &= \min(c', m', y'), \\ 0 &\leq U \leq 1; \end{aligned} \quad (2)$$

where $c' = 1 - r, m' = 1 - g, y' = 1 - b$.

In our model, the complex interaction of inks and substrate determining optical and mechanical dot gains depends upon the wavelength, but also upon the quantity and number, and types of inks in the halftone. The function used to compute the effective ink concentration, tuned with only one parameter, is:

$$c_{\lambda} = \frac{c_t}{(1 - C_{\lambda}) \cdot c_t + C_{\lambda}} \quad (3)$$

where c_{λ} is the effective concentration of ink, c_t is the theoretical concentration of ink, computed from RGB values using Equation 2, and C_{λ} is the wavelength-dependent parameter.

Tab. 1 – Calculation of the area coverage for each Neugebauer primary given the concentration of inks

Index (p)	Neugebauer primary	Area coverage (a_p)
0	W	(1-c)(1-m)(1-y)(1-k)
1	K	(1-c) (1-m) (1-y) k
2	Y	(1-c) (1-m) y (1-k)
3	YK	(1-c) (1-m) y k
4	M	(1-c) m (1-y) (1-k)
5	MK	(1-c) m (1-y) k
6	R	(1-c) m y (1-k)
7	RK	(1-c) m y k
8	C	c (1-m) (1-y) (1-k)
9	CK	c (1-m) (1-y) k
10	G	c (1-m) y (1-k)
11	GK	c (1-m) y k
12	B	c m (1-y) (1-k)
13	BK	c m (1-y) k
14	CMY	c m y (1-k)
15	CMYK	c m y k

Dot gain functions are commonly used to model the spread of inks on paper, but the spread may be altered when covering a previously deposited ink. We have chosen to account for the interaction of the inks by providing a different dot gain function for any overprinting. Table 2 lists the parameters used to compute the effective concentration of inks, with Equation 3, to obtain the area coverage for any Neugebauer primary indicated in Table 1.

The subscripts in the dot gain parameters refer to the inks present in the Neugebauer primary. For example, $C_{cy,\lambda}$ is the parameter used to compute dot gain for the effective concentration of cyan when computing the area coverage of the Neugebauer primary G (green), which is an overprint of cyan and yellow. The same parameter is used to compute the amount of cyan in the Neugebauer primary Y (yellow) because if any amount of cyan is present, the dot gain must account for the presence of both yellow and cyan inks.

There are 32 different dot gain parameters in the model; each is a vector, the dimension of which is the number of wavelengths considered. The area of paper

covered is computed as the difference between the sum of the area coverage of the inks and their overprints, with the constraint to be positive:

$$a_0 = 1 - \sum_{p=1}^{15} a_p \quad (4)$$

To effectively tune the model, the training set must be customized to employ all the parameters. At the same time we want to have as few color patches to print and measure for printer characterization as possible. The training set consists therefore of ramps of eleven patches, ranging from the absence of ink to full ink coverage of cyan, magenta, yellow, red, green, blue, black, cyan with black, magenta with black, yellow with black, red with black, green with black and blue with black, for a total of 143 samples.

Tab. 2 – Dot gain parameters for computing effective ink concentration using Equation 4

Index (p)	Neugebauer primary	Dot gain parameters			
1	K	$C_{ck, \lambda}$	$M_{mk, \lambda}$	$Y_{yk, \lambda}$	$K_{k, \lambda}$
2	Y	$C_{cy, \lambda}$	$M_{my, \lambda}$	$Y_{y, \lambda}$	$K_{ky, \lambda}$
3	YK	$C_{cyk, \lambda}$	$M_{myk, \lambda}$	$Y_{yk, \lambda}$	$K_{ky, \lambda}$
4	M	$C_{cm, \lambda}$	$M_{m, \lambda}$	$Y_{ym, \lambda}$	$K_{km, \lambda}$
5	MK	$C_{cmk, \lambda}$	$M_{mk, \lambda}$	$Y_{ymk, \lambda}$	$K_{km, \lambda}$
6	R	$C_{cmy, \lambda}$	$M_{my, \lambda}$	$Y_{ym, \lambda}$	$K_{kmy, \lambda}$
7	RK	$C_{cmyk, \lambda}$	$M_{myk, \lambda}$	$Y_{ymk, \lambda}$	$K_{kmy, \lambda}$
8	C	$C_{c, \lambda}$	$M_{mc, \lambda}$	$Y_{yc, \lambda}$	$K_{kc, \lambda}$
9	CK	$C_{ck, \lambda}$	$M_{mck, \lambda}$	$Y_{yck, \lambda}$	$K_{kc, \lambda}$
10	G	$C_{cy, \lambda}$	$M_{cmy, \lambda}$	$Y_{yc, \lambda}$	$K_{key, \lambda}$
11	GK	$C_{cyk, \lambda}$	$M_{cmyk, \lambda}$	$Y_{yck, \lambda}$	$K_{key, \lambda}$
12	B	$C_{cm, \lambda}$	$M_{mc, \lambda}$	$Y_{cmy, \lambda}$	$K_{kcm, \lambda}$
13	BK	$C_{cmk, \lambda}$	$M_{mck, \lambda}$	$Y_{cmyk, \lambda}$	$K_{kcm, \lambda}$
14	CMY	$C_{cmy, \lambda}$	$M_{cmy, \lambda}$	$Y_{cmy, \lambda}$	$K_{cmyk, \lambda}$
15	CMYK	$C_{cmyk, \lambda}$	$M_{cmyk, \lambda}$	$Y_{cmyk, \lambda}$	$K_{cmyk, \lambda}$

3. The Genetic Algorithm

A genetic algorithm is used to estimate the printer model parameters described above. The choice of the representation of candidate solutions (individuals) and the fitness function used to evaluate individuals are crucial factors in the effectiveness of this genetic approach.

The genetic material, called the genome, of each individual must consist of the minimum amount of data required to represent a solution to the problem.

Here the genome is an array of real numbers. In the printer model we have introduced:

- ∞ the Yule-Nielsen factor (Equation 1),
- ∞ U for the printer driver model (Equation 2),
- ∞ and 32 parameters for the dot gain functions (Table 2).

Reflectance spectra have been sampled at intervals of 40 nm in the range from 400 nm to 680 nm, producing 8 samples. The dot gain parameters are wavelength-dependent, giving us a total of 258 real numbers.

Since the genome is an array of real numbers, a range must be specified. And since we consider that the dot gain functions do not alter the theoretical value of ink concentration by more than some 30%, consequently the range for real parameters has been set at [0.3; 3.0]. The theoretical value of the Yule-Nielsen factor ranges from 1.0, corresponding to the absence of scattering, to 2.0, corresponding to Lambertian or perfectly diffused scattering, with the assumption that the dots are rectangular in cross section. In reality the dots have soft transitions and, in cases of high frequency rotated screens, or error diffusion, much of the paper is covered by transitory regions. In these cases, the Yule-Nielsen factor experimentally computed, may exceed the theoretical limit of 2 [11]. In our experiment, we have considered a range of [1.0; 12.0] for the Yule-Nielsen factor.

The fitness function is computed as:

$$fitness = \frac{1}{S} \cdot \left(\sum_{s=1}^S \frac{1}{\Gamma} \cdot \left(\sum_{\lambda=1}^{\Gamma} (R_{print,\lambda,s} - R_{meas,\lambda,s})^2 \right) \right) \quad (5)$$

where S is the number of elements in the training set (S=143), Γ is the number of wavelengths ($\Gamma=8$), and $R_{print,\lambda}$ is computed with Equation 1.

We have used the ‘simple’ genetic algorithm in the Galib [12] library. It employs non-overlapping populations: at each generation the algorithm creates a new population of individuals by selecting parents from the previous population, and then mating to produce the new offspring. The best individual from each generation is also carried over into the next generation (elitism). The probability of crossover and mutation are set at 0.9 and at 0.002, respectively. Selection is based on the “roulette wheel” method. The initial population of 12 individuals is randomly selected; only the initial value of parameter U in the conversion from RGB to CMYK (Equation 2) is initialized at 1. The stopping criterion is the number of iterations performed: we have set this at 4000 iterations.

4. Experiment and Results

We have applied our model in the characterization of four printers: Epson Stylus Color, HP 2000C, Epson Stylus C80, and Epson 890.

The characterization procedure started with the printing and measurement of the Neugebauer primaries and the training set. The test set consisted of 777 samples, uniformly distributed in the RGB color space.

The spectra were measured with a Gretag Spectrolino, considering values in the wavelength range from 400 to 680 nm with a step of 40 nm. Reflectance spectra lie in the range of [0;100].

The results are reported in terms of color difference in CIELAB ΔE^*_{ab} and CIELAB ΔE^*_{94} [13], hue and lightness difference [14], and root mean square error in Tables 3 and 4.

Tab. 3 – Statistics of color distances and spectra differences for the Training Set
(m = mean, M = maximum, sdv = standard deviation)

	Epson 890 photo quality paper Linux driver			Epson Stylus Color photo quality paper Linux driver			HP 2000C plain paper Windows driver			Epson Stylus C80 plain paper Windows driver		
	m	M	sdv	sdv	m	M	m	M	sdv	m	M	sdv
ΔE^*_{ab}	2.30	7.63	1.15	1.80	1.49	6.47	2.29	8.02	1.67	1.67	5.93	1.21
ΔH	0.93	4.61	0.74	1.02	0.70	3.67	0.87	3.29	0.82	0.78	3.33	0.71
ΔL	0.96	6.25	0.56	1.01	0.52	3.27	0.79	3.56	0.73	0.92	5.24	1.11
ΔE^*_{94}	1.85	6.95	0.91	1.43	1.18	4.85	1.71	5.77	1.25	1.47	5.85	1.18
RMS	0.86	3.43	0.41	0.73	0.65	2.34	1.12	3.23	0.82	0.96	4.69	0.68
fitness	1.26			0.59			1.92			1.38		

Tab. 4 – Statistics of the color distances and spectra differences for the Test Set
(m = mean, M = maximum, sdv = standard deviation)

	Epson 890 photo quality paper Linux driver			Epson Stylus Color photo quality paper Linux driver			HP 2000C plain paper Windows driver			Epson Stylus C80 plain paper Windows driver		
	m	M	sdv	m	M	sdv	m	M	sdv	m	M	sdv
ΔE^*_{ab}	3.21	11.0	2.05	1.92	7.99	1.22	5.4	18.5	3.12	2.74	8.51	1.45
ΔH	1.36	7.87	1.26	0.87	6.31	0.97	2.01	12.2	1.88	0.97	6.00	0.76
ΔL	1.70	7.97	1.64	0.9	3.41	0.71	1.74	6.62	1.31	1.74	7.98	1.56
ΔE^*_{94}	2.78	8.54	1.72	1.64	6.03	0.95	4.09	11.0	1.95	2.51	8.45	1.42
RMS	1.42	4.49	0.85	0.90	5.82	0.56	2.24	12.2	1.34	1.72	5.37	1.15

The model's performance, we see, can be strongly influenced by the printer driver, to the point that it may be impossible for the training set to provide a full description of the printer's behavior. But the type of paper also plays a role.

5. Conclusion

Our objective was to see whether it is feasible to approach the complex problem of printer spectral modeling by introducing a set of parameters into the mathematical framework of the Yule Nielsen Spectral Neugebauer equation. Our results indicate that characterization with a mean ΔE^*_{94} ranging from 1.64 to 4.09, and a maximum hue difference of 12.2 is possible.

References

1. D.R. Wyble, R. S. Berns, "A Critical Review of Spectral Models Applied to Binary Color Printing", *Color Research and Application*, vol. 25, n. 1, February 2000.
2. K. Iino and R. S. Berns, "Building color management modules using linear optimization I. Desktop color system", *Journal of Imaging Science and Technology*, Vol. 42, 79-94, 1998.
3. P. Emmel, R. D. Hersch, "A Unified Model for Color Prediction of Halftoned Print", *Journal of Imaging Science and Technology*, Vol. 44, n. 4, pp.351-385, 2000.
4. P. Emmel, R. D. Hersch, "Modeling Ink Spreading for Color Prediction", *Journal of Imaging Science and Technology*, Vol. 46, n. 3, 2002.
5. S. Gustavson, "The Color Gamut of Halftone Reproduction", *Proc. The Fourth IS&T/SID Color Imaging Conference*, Scottsdale, Arizona, USA, November 19-22, 1996.
6. R. Balasubramanian, "Optimization of the spectral Neugebauer model for printer characterization", *Journal of Electronic Imaging*, Vol. 8, n. 2, pp. 156-166, 1999.
7. D. Tzeng, "Spectral-based color separation algorithm development for multiple-ink color reproduction", Ph.D. Thesis, R. I.T., Rochester, NY, 1999.
8. G. L. Rogers, "Neugebauer Revisited: Random Dots in Halftone Screening", *Color Research and Application*, Vol. 23, No. 2, 1998.
9. I. Amidror, R. D. Hersch, "Neugebauer and Demichel: Dependence and Independence in n-Screen Superpositions for Colour Printing", *Color Research and Applications*, Vol. 25, No. 4, 2000.
10. R. Balasubramanian, "A spectral Neugebauer model for dot-on-dot printers", *Proc. SPIE*, Vol. 2413, pp. 356-364, 1995.
11. J. A. Stephen Viggiano, "Modeling the Color of Multi-Colored Halftones", *Proc. TAGA*, pp. 44-62, 1990.
12. A Galib: C++ Library of Genetic Algorithm Components, <http://lancet.mit.edu/ga/>
13. M.D. Fairchild, *Color Appearance Models*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1998.
14. G. Wyszecki, W. S. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, Second Edition, Wiley and Sons, 1982.

Spettrofotometro a scansione per la caratterizzazione multispettrale e colorimetrica ad immagine di superfici dipinte

P. CARCAGNÌ, A. DELLA PATRIA, C. SANAPO

ISTITUTO NAZIONALE DI OTTICA APPLICATA

Via Barsanti – 73010 Arnesano (Lecce)

beniculturali@ino.it

R. FONTANA, M. GRECO, M. MASTROIANNI, M. MATERAZZI,

E. PAMPALONI, L. PEZZATI

ISTITUTO NAZIONALE DI OTTICA APPLICATA - INOA

Largo E. Fermi, 6 – 50125 Firenze

1. Introduzione

Con la definizione di *tecniche di analisi ad immagine* si identificano quelle tecniche il cui risultato sia la caratterizzazione secondo uno o più parametri fisici (es. colore, spettro di riflettanza, quota) di una superficie o un volume eseguita tramite un campionamento regolare e referenziato spazialmente dell'oggetto su tutta la sua estensione. Tale risultato viene quindi visualizzato attraverso una o più immagini.

In particolare la misura ad immagine del fattore di riflessione spettrale (chiamata anche analisi ad immagine multispettrale) consiste nel caratterizzare spettralmente la riflettanza di una superficie in un intervallo di lunghezze d'onda che si estende (in tutto o in parte) dal visibile al vicino infrarosso (400-2400 nm).

La caratterizzazione spettrale e colorimetrica di superfici dipinte è di grande interesse nell'ambito della conservazione dei beni culturali non solo per quanto riguarda la documentazione dell'opera d'arte ma anche relativamente alla fase di diagnostica (es. riconoscimento dei pigmenti, monitoraggio delle variazioni di colore nel tempo...). La tecnica attualmente in uso per l'analisi ad immagine multispettrale di superfici dipinte [1-4], prevede l'irraggiamento della superficie con radiazione proveniente da due o più lampade ad alogeni disposte in modo da procurare un'illuminazione quanto più omogenea possibile. L'immagine dell'area irraggiata viene quindi acquisita mediante una telecamera (CCD o a tubo Vidicon) il cui ingresso sia filtrato con filtri a banda stretta ($\text{FWHM} \cong 10 \text{ nm}$) che complessivamente coprano, in tutto o in parte, la regione spettrale di interesse. Nell'inquadratura vengono compresi campioni neutri di riflettanza che consentono di normalizzare lo spettro della radiazione riflessa acquisito agli spettri sia della sorgente sia di sensibilità del rivelatore, e ottenere così il fattore di riflessione spettrale. Esistono inoltre telecamere CCD il cui obiettivo è accoppiato con un dispositivo ottico dispersivo [5] e che sono montate su sistemi di scansione

motorizzata: tali dispositivi consentono l'acquisizione ad alta risoluzione spettrale (~1 nm) della radiazione riflessa da una linea di punti della superficie che viene scansionata riga per riga. In entrambi i casi il risultato finale è un set di immagini del campione, una per ciascuna banda spettrale. La risoluzione spaziale è legata alle dimensioni dell'area inquadrata ed alla risoluzione intrinseca del rivelatore: nel caso di dipinti di grandi dimensioni vengono acquisite immagini di piccole aree con elevata risoluzione spaziale che vengono successivamente sottoposte a mosaicatura. Le eventuali deformazioni geometriche introdotte dal necessario uso di obiettivi (o legate a caratteristiche intrinseche del rivelatore) come pure le alterazioni legate alla disomogeneità di illuminazione delle zone acquisite vengono corrette seguendo un apposita procedura di calibrazione. A ciascun pixel dell'immagine è associato uno spettro di riflettanza e a partire da questo vengono per esempio ricostruite le coordinate colorimetriche.

In questo lavoro presentiamo un dispositivo per analisi ad immagine multispettrale di superfici dipinte sviluppato all'Istituto Nazionale di Ottica Applicata nel corso degli ultimi due anni che, nell'acquisizione del dato multispettrale, segue un approccio diverso rispetto ai dispositivi ad oggi disponibili.

2. Lo spettrofotometro a scansione

Il dispositivo realizzato (Fig. 1) è basato su uno spettrofotometro veloce per la misura non a contatto e su singolo punto del fattore di riflessione spettrale. La sorgente è composta da due lampade alogene alimentate a bassa tensione e stabilizzate in corrente, che illuminano un'area di circa 5 cm². La radiazione diffusa dal dipinto è raccolta da un'ottica a specchi ed è focalizzata sulla terminazione di una fibra multimodo (N.A. = 0,22) che la conduce ad un sistema ottico (adattatore ottico) che collima e modella il fascio divergente in uscita dalla fibra e lo proietta sulla superficie sensibile del rivelatore. La configurazione di illuminazione/osservazione è la 45°/0° [6]. L'ottica di osservazione lavora ad una distanza di sicurezza dal dipinto pari a 160 mm. Il rivelatore è un fotomoltiplicatore multianodo (mod. H7260-01FSEL, Hamamatsu customizzato) la cui superficie sensibile è filtrata da una serie di 32 filtri interferenziali che coprono l'intervallo spettrale 380÷800 nm con lunghezze d'onda centrali spaziate di 10/20 nm e con larghezza a metà altezza pari a 10 nm. La conversione A/D dei segnali a 12 bit consente una dinamica tonale elevata che viene praticamente utilizzata in tutta la sua estensione date le caratteristiche di bassa rumorosità del sistema. L'immagine multispettrale dell'intera superficie è acquisita integrando lo spettrofotometro ad un sistema di traslazioni motorizzate montate ortogonalmente che permettono di scansionare punto per punto superfici di 1,5 m² con una risoluzione spaziale di 16 punti/mm². E' inoltre prevista la realizzazione di un sistema di autofocus che mantenga la superficie a fuoco durante la scansione anche nel caso di superfici irregolari: un micro-profilometro anticiperà l'ottica di osservazione durante la scansione consentendo in questo modo di aggiustare la distanza dell'ottica di osservazione dal punto misurato in tempo reale e contemporaneamente di

ricostruire il profilo tridimensionale della superficie indagata. Il trasporto in fibra della radiazione ha lo scopo di alleggerire quanto più possibile il carico movimentato dal sistema di scansione che in questo modo sarà limitato alla sorgente, all'ottica di osservazione e al profilometro del sistema autofocus.

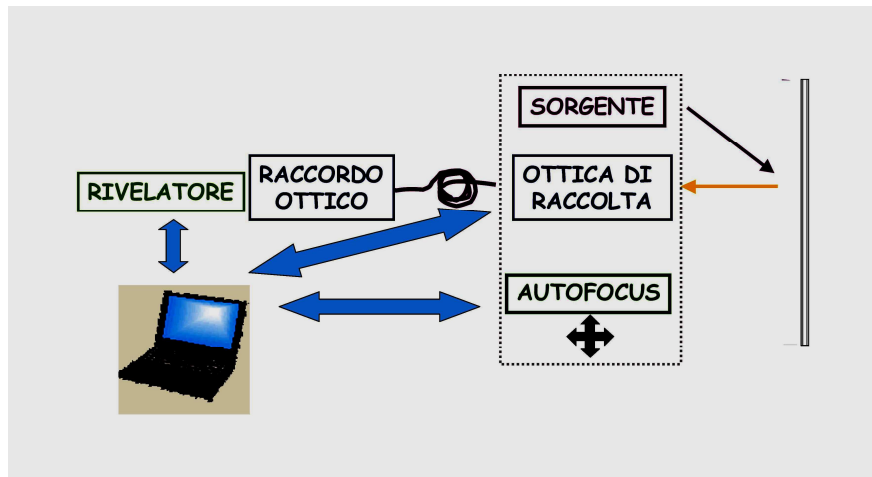


Fig. 1 – Schema a blocchi dello spettrofotometro a scansione. Nella zona tratteggiata si distinguono le componenti che fanno parte del carico della meccanica di scansione.

Poiché il sistema di illuminazione si muove solidalmente con l'ottica di osservazione, il riscaldamento della superficie è minimizzato. La stabilità nel tempo è ottenuta alimentando le lampade con un generatore stabilizzato in corrente e l'illuminazione uniforme è assicurata sia durante la scansione che nelle misure successive grazie al movimento solidale di sorgente e ottica di osservazione ed al campionamento punto per punto della superficie. Quest'ultimo elimina inoltre la possibilità di introdurre deformazioni geometriche nell'immagine legate alle aberrazioni ottiche per i campi fuori asse.

Le *sorgenti* utilizzate hanno una divergenza di 10° e una potenza di alimentazione di 20 W. Seppur caratterizzate da una bassa efficienza relativa nella zona blu dello spettro visibile, presentano uno spettro stabile perché basate su un emettitore continuo stabilizzato in corrente che minimizza i cambiamenti relativi di intensità spettrale. Il fascio è omogeneo e definito e l'emissione è praticamente costante per tutta la loro durata. Inoltre sono facilmente reperibili in commercio e di basso costo. E' stato possibile ovviare in parte alla scarsa efficienza di emissione nella zona del blu scegliendo delle lampade con riflettore diecricoico che modifica lo spettro di emissione della sorgente nel senso di una maggiore efficienza relativa nella zona blu dello spettro. Inoltre, il rivestimento diecricoico trasmette quasi il 70% della radiazione infrarossa nella zona posteriore della lampada producendo il cosiddetto "fascio freddo".

L'ottica di osservazione, di cui in Fig. 2 è mostrata una foto, è costituita da due specchi sferici affacciati: il primario, che raccoglie i raggi provenienti dal punto scansionato ed il secondario, posto prima del fuoco del primario al centro del quale è stato ricavato un foro per permettere il passaggio dei raggi che vengono focalizzati sulla terminazione della fibra ottica. La scelta della configurazione catottrica consente di evitare qualsiasi problema legato all'aberrazione cromatica.



Fig. 2 – Montaggio meccanico dell'ottica di osservazione. Si distinguono lo specchio primario con il foro al centro e quello secondario più piccolo in primo piano.

L'f-numero effettivo dello specchio primario è uguale a 2.4 e corrisponde ad un angolo di raccolta della radiazione pari a circa 24° , di poco superiore ai limiti suggeriti da CIE per la configurazione $45^\circ/0^\circ$. Verificata la compatibilità di angoli inferiori con i segnali acquisiti in contesti realistici, una successiva versione dell'ottica di raccolta è stata progettata ed è in via di realizzazione con angolo di apertura pari a 16° . Una volta deciso l'uso di una fibra di diametro nucleare pari a $200\ \mu\text{m}$, si è scelto un ingrandimento dell'ottica di osservazione pari ad 1,5 che equivale ad inquadrare sul piano oggetto un punto con diametro di circa $130\ \mu\text{m}$. Ne consegue un limite di tolleranza pari ad oltre cento micrometri sul diametro dell'area del punto inquadrato prima di eccedere il passo di campionamento spaziale ($250\ \mu\text{m}$) e quindi che l'informazione relativa a due pixel adiacenti dell'immagine acquisita si mescolano. Considerato che al variare della distanza reciproca tra l'ottica di osservazione ed il dipinto, l'area inquadrata aumenta, si è stabilito per la variazione di questa distanza un limite massimo di $\pm 275\ \mu\text{m}$ rispetto alla posizione in cui l'oggetto è a fuoco. Questo in pratica ha definito entro che limiti, durante la scansione, non è necessario l'utilizzo dell'autofocus. Il valore $550\ \mu\text{m}$ stabilisce quindi la profondità di campo del sistema.

Un sistema di specchi appositamente progettato costituisce l'*adattatore ottico* che ha lo scopo di collimare e modellare il fascio uscente dalla fibra prima che incida sul rivelatore. La superficie sensibile è un rettangolo mentre la radiazione uscente

dalla fibra è a sezione circolare. Il sistema è stato pensato per formare il fascio in modo che abbia una sezione ellittica che, proiettata sul rivelatore, circoscriva il rettangolo sensibile minimizzando la differenza fra le aree. In questo modo la perdita di energia viene ridotta al minimo. Per collimare il fascio si è scelto di utilizzare uno specchio parabolico fuori asse e per renderlo ellittico uno specchio cilindrico concavo. L'idea seguita è quella di intercettare con il rivelatore il fascio collimato dallo specchio parabolico e riflesso a 45° dallo specchio cilindrico alla distanza opportuna. In Fig. 3 è mostrato il progetto ottico dell'adattatore: si tratta di uno specchio parabolico off-axis di diametro 50.8 mm e angolo di inclinazione 90° e di uno specchio ellittico concavo di 60 mm di diametro e raggio di curvatura 300 mm.

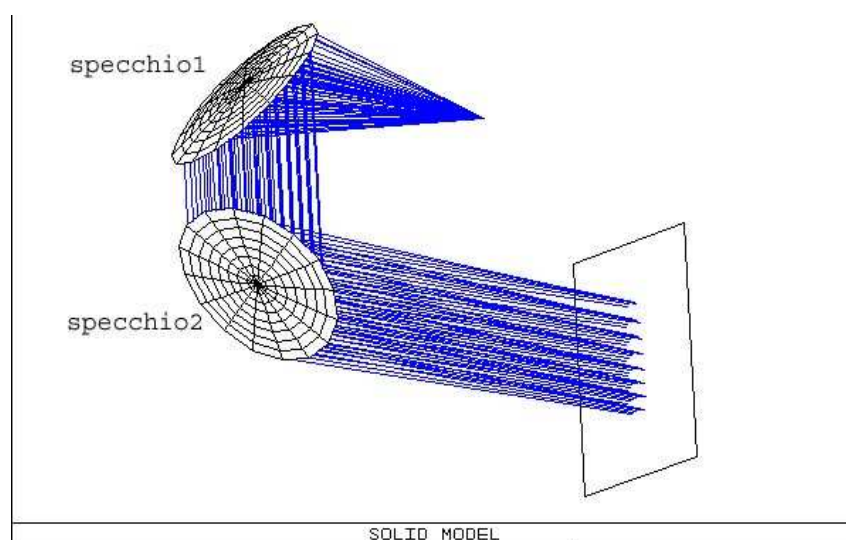


Fig. 3 – Progetto ottico dell'adattatore. Specchio1: specchio parabolico fuori asse, specchio2: specchio concavo cilindrico.

La scelta del *rivelatore* è stata fortemente condizionata dall'obiettivo di ottenere una frequenza di campionamento di 500 Hz. Considerati i valori anche di pochi percento del fattore di riflessione spettrale caratteristici degli strati pittorici, la necessità di minimizzare l'irraggiamento delle superfici indagate e l'acquisizione degli spettri con l'ottica di raccolta in movimento, il vincolo sul tempo di integrazione del segnale riflesso dal singolo punto ha implicato la ricerca di un sensore caratterizzato da elevata frequenza di aggiornamento ed elevata sensibilità in termini di A/W. Inoltre il carattere multispettrale della misura ha orientato la scelta verso un array di rivelatori in modo da poter misurare simultaneamente il segnale per bande, in tutto l'intervallo spettrale di indagine. Il sensore utilizzato è un fotomoltiplicatore multianodo (prodotto in versione perzialmente customizzata

da Hamamatsu), costituito da un'unica area sensibile, il fotocatodo, filtrato da 32 filtri interferenziali (FWHM 10 nm). Il tempo di integrazione minimo è di 130 μ s ed il tempo di campionamento minimo di 200 μ s. Il passo di campionamento in lunghezza d'onda è stato stabilito in modo che i filtri fossero più densamente spazati nella regione 400-600 nm, in quanto l'andamento degli spettri caratteristici della materia pittorica, seppur regolare, presenta maggiore variabilità in termini di picchi e/o flessi proprio in questa regione. Le caratteristiche della risposta spettrale in termini di sensibilità (A/W) sono determinate dalla curva di sensibilità del fotocatodo pesata secondo la curva di trasmittanza dei filtri, tenuto conto del fattore di guadagno del fotomoltiplicatore: a 420 nm, lunghezza d'onda alla quale c'è il picco di sensibilità del sensore, si ha una sensibilità al catodo di 65 mA/W; il guadagno a 750 V di tensione di alimentazione del fototubo (range: 100-900 V) è 10^6 . La sensibilità al catodo risulta maggiore nella zona relativa alle lunghezze d'onda del blu, il che compensa almeno in parte la carenza di emissione delle sorgenti, nella stessa regione dello spettro.

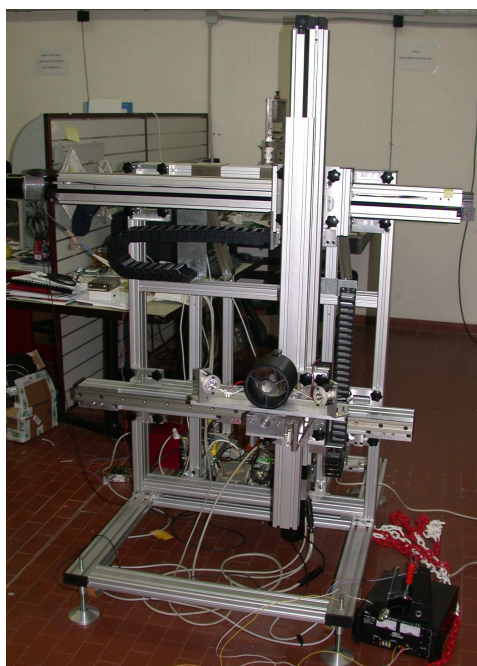


Fig. 4 – Sistema di scansione basato su una terna XYZ di traslazioni motorizzate montate ortogonalmente. Sull'asse Z sono alloggiate l'ottica di raccolta e le sorgenti.

Il *sistema di scansione* (Fig. 4) è costituito da una terna di traslazioni meccaniche di precisione montate ortogonalmente. Il sistema, trasportabile, è realizzato in modo da poter essere facilmente assemblato e smontato ed è composto da moduli separabili del peso massimo di 30 kg. I moduli più pesanti sono dotati di contenitori

con maniglie e ruote per semplificare e ridurre lo sforzo nel trasporto. Inoltre, per facilitare il montaggio, il sistema è dotato di raccordi meccanici a bloccaggio rapido e connettori elettrici a inserimento univoco. Schematicamente il sistema può essere suddiviso in cinque blocchi principali: la struttura portante, composta da un telaio realizzato in profilati di alluminio, gli assi motorizzati X, Y, Z ed il modulo di controllo dei motori che contiene l'hardware per la gestione della movimentazione degli assi.

Il sistema è corredato da un *software* sviluppato appositamente per la gestione sincrona delle motorizzazioni e del rivelatore, il controllo dei parametri di acquisizione (area scansionata, tempo di integrazione, frequenza di campionamento,...) e l'archiviazione dei dati raccolti.

3. Taratura del dispositivo

Fissata la geometria di illuminazione/osservazione, il fattore di riflessione spettrale relativo ad punto su una superficie si ottiene misurando la radiazione riflessa dal punto stesso $V_{\lambda}^{\text{campione}}$, da un punto su un diffusore reale di riferimento $V_{\lambda}^{\text{riferimento}}$, e calcolando la seguente quantità:

$$R_{\lambda}^{\text{campione}} = \rho_{\lambda}^{\text{riferimento}} \frac{V_{\lambda}^{\text{campione}} - V_{\lambda}^{\text{buio}}}{V_{\lambda}^{\text{riferimento}} - V_{\lambda}^{\text{buio}}}$$

in cui $\rho_{\lambda}^{\text{riferimento}}$ rappresenta la riflettanza spettrale del diffusore di riferimento certificata per la specifica geometria di misura e $V_{\lambda}^{\text{buio}}$ rappresenta il risultato dell'acquisizione effettuata chiudendo l'ingresso dello strumento di misura.

L'acquisizione di $V_{\lambda}^{\text{riferimento}}$ e $V_{\lambda}^{\text{buio}}$ rappresenta la procedura di calibrazione dello strumento che è parte integrante della misura stessa in quanto viene effettuata all'inizio di ciascuna misura.

La taratura del dispositivo sviluppato è stata condotta confrontando i valori del fattore di riflessione spettrale misurati su 7 campioni di colore con i corrispondenti valori certificati per la configurazione di illuminazione/osservazione $45^{\circ}/0^{\circ}$ dal National Physical Laboratory del Regno Unito [7]. Come diffusore di riferimento è stato utilizzato un campione neutro con riflettanza spettrale media del 65% anche questo certificato dal NPL. Poiché alcuni dei filtri interferenziali montati sul sensore mostrano una parziale trasmissività nella regione intorno a 900 nm nella quale il fotocatodo è ancora sensibile, la taratura è stata eseguita ponendo, all'uscita della fibra che trasporta la radiazione riflessa, un filtro passabasso con frequenza di taglio a 810 nm. Ciascuna acquisizione è stata ripetuta 100 volte per dare una stima della ripetibilità della misura stessa, ovvero del grado di concordanza tra i risultati di misure indipendenti condotte a breve distanza l'una dall'altra con lo stesso metodo sullo stesso campione e con la stessa apparecchiatura. In particolare la ripetibilità è rappresentata dall'errore statistico ottenuto dal calcolo della deviazione standard che in media risulta dell'ordine di 0,05 %.

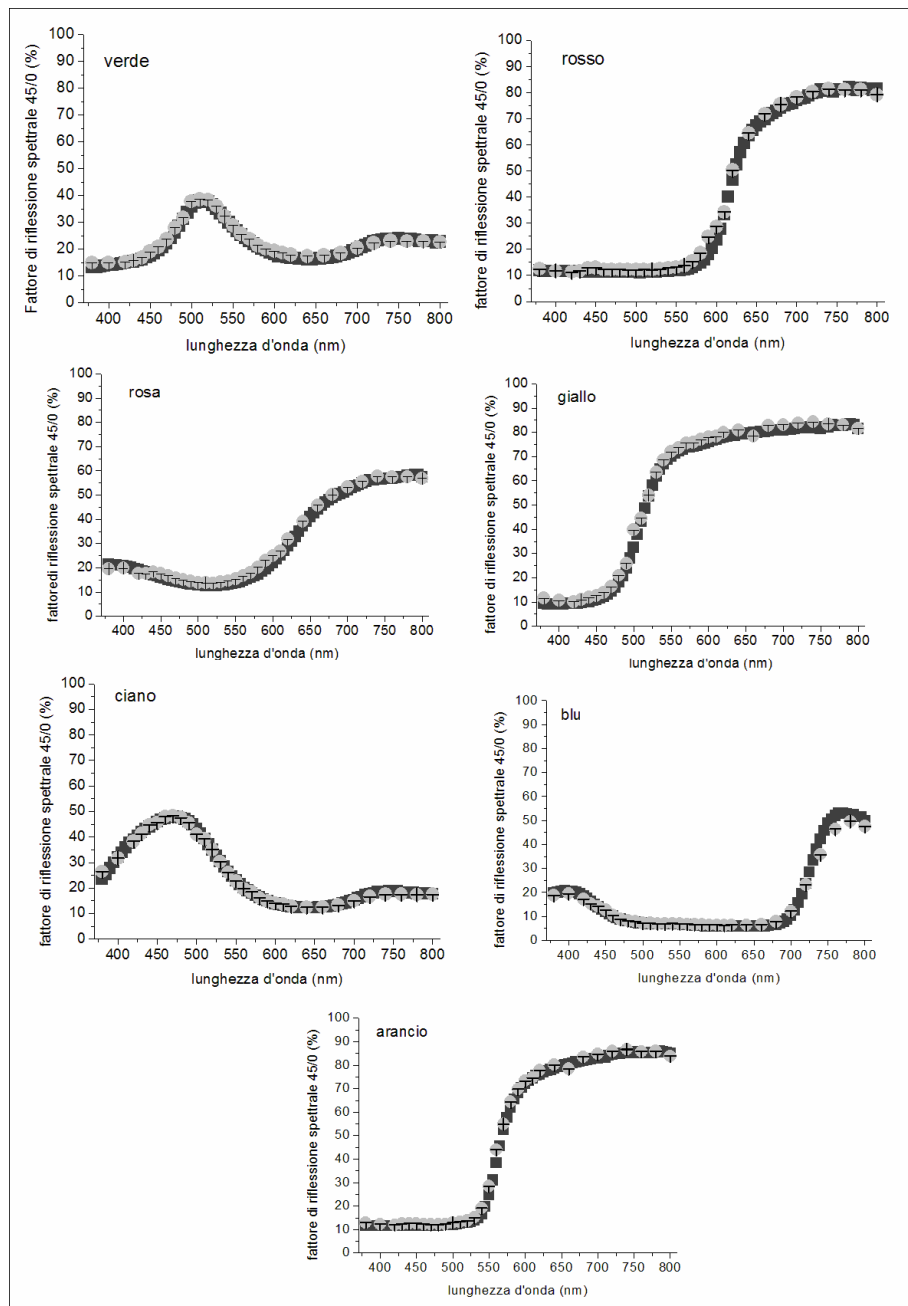


Fig. 5 – Confronto tra i fattori di riflessione spettrale misurati (cerchi) e certificati dal NPL (quadretti neri) dei campioni di colore. Punto per punto è riportata la deviazione standard della media della misura.

In fig. 5 sono riportati i risultati del calcolo del fattore di riflessione spettrale ottenuti per i sette campioni. Ciascun grafico mostra la media del fattore di riflessione spettrale ottenuto (cerchi) e i valori certificati dal NPL (quadretti neri). I punti sperimentali sono accompagnati dalle barre di errore lungo l'asse delle ordinate che rappresentano la deviazione standard della media.

Si noti come l'accordo tra i fattori di riflessione spettrale misurati e quelli certificati sia buono anche nella zona dove questi sono bassi e presentano picchi e flessi. Per un confronto quantitativo è stata stimata l'accuratezza della misura, intesa come la capacità dello strumento di riprodurre spettri confrontabili con quelli certificati, calcolando per ciascun campione il valore medio dello scarto assoluto tra i fattori di riflessione spettrale misurato e certificato interpolati a passi di 1 nm (Tab. 1).

Tab 1. Valore medio dello scarto assoluto tra i fattori di riflessione spettrale misurato e certificato interpolati a passi di 1 nm

CAMPIONE	VERDE	ROSA	ARANCIO	ROSSO	BLU	CIANO	GIALLO
S _{medio}	0,9%	1,5%	1,4%	1,4%	1,5%	0,6%	1,7%

E' stato inoltre verificato che l'incidenza sul valore del fattore di riflessione spettrale delle sollecitazioni subite dalla fibra durante la scansione fosse inferiore agli errori statistici legati alla ripetibilità della misura [8-9].

Infine, sono stati calcolati i valori tristimolo (X, Y, Z) e conseguentemente le coordinate di cromaticità (x, y) e la luminanza Y a partire dai dati sperimentali e anche in questo caso i valori ottenuti sono stati confrontati con i valori certificati dal NPL (Tab. 2).

Tab. 2 – Confronto tra la luminanza (Y) e le coordinate cromatiche (x, y) misurate e certificate dal NPL. $\Delta Y, \Delta x$ e Δy rappresentano il valore assoluto dello scarto.

	Y	Y _{cert}	ΔY	x	x _{cert}	Δx	y	y _{cert}	Δy
Arancio	40,9	38,8	2,1	0,48	0,49	0,01	0,39	0,38	0,01
Blu	6,92	6,58	0,34	0,27	0,26	0,01	0,25	0,25	0,0
Ciano	24,1	24,2	0,10	0,22	0,22	0,00	0,26	0,26	0,00
Giallo	66,3	64,6	1,70	0,42	0,43	0,01	0,46	0,46	0,00
Rosso	19,8	17,8	2,00	0,44	0,45	0,01	0,33	0,33	0,00
Verde	27,4	26,6	0,80	0,28	0,28	0,00	0,39	0,39	0,00
Rosa	18,9	17,1	1,8	0,38	0,37	0,01	0,32	0,31	0,01

Il calcolo colorimetrico è stato eseguito secondo le seguenti espressioni:

$$X = K \sum_{\lambda_i=380}^{\lambda_i=780} S_{\lambda_i} R_{\lambda_i} \underline{x}_{\lambda_i} \Delta\lambda_i$$

$$Y = K \sum_{\lambda_i=380}^{\lambda_i=780} S_{\lambda_i} R_{\lambda_i} \underline{y}_{\lambda_i} \Delta\lambda_i$$

$$Z = K \sum_{\lambda_i=380}^{\lambda_i=780} S_{\lambda_i} R_{\lambda_i} \underline{z}_{\lambda_i} \Delta\lambda_i$$

con

$$K = \frac{100}{\sum_{\lambda_i=380}^{\lambda_i=780} S_{\lambda_i} \underline{y}_{\lambda_i} \Delta\lambda_i}$$

e

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

dove S_{λ} è la distribuzione spettrale relativa all'illuminante D65, le funzioni \underline{x}_{λ} , \underline{y}_{λ} , \underline{z}_{λ} sono le funzioni colorimetriche dell'Osservatore Standard CIE 1931, R_{λ} è il fattore di riflessione spettrale misurato e K è il fattore di normalizzazione.

4. Esempi di applicazione

Per verificare le prestazioni dello spettrofotometro a scansione sviluppato è stata realizzata l'acquisizione multispettrale di un'opera del XV secolo eseguita da un anonimo fiorentino. La misura è stata eseguita su un particolare del dipinto di dimensioni 4,5x9 cm², campionato con una risoluzione spaziale di 16 punti/mm² e un tempo di integrazione di 200 μs. Le informazioni spettrali ottenute per ogni punto campionato sono state ricombinate a formare 32 immagini digitali: in Fig. 6 ne sono mostrate alcune, in scala ridotta rispetto all'originale.

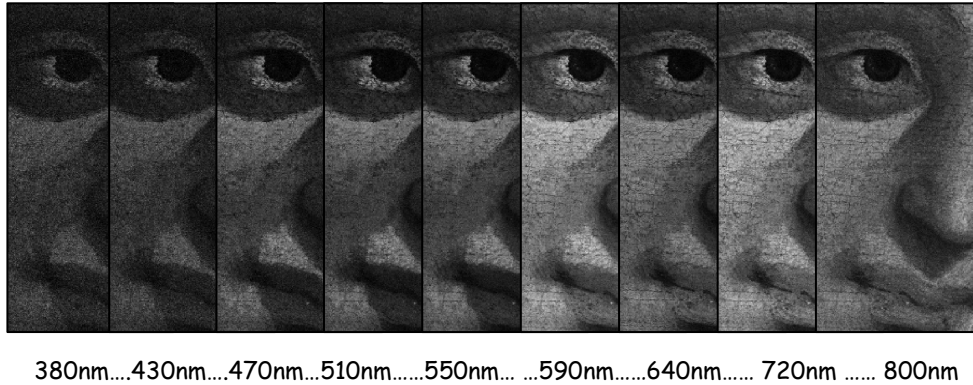


Fig. 6 – Immagini selezionate tra le 32 acquisite dal sistema. Le immagini sono riportate in scala ridotta rispetto all'originale.

Per ogni pixel dell'area campionata sono state calcolate le coordinate di tristimolo nello spazio XYZ utilizzando i valori del fattore di riflessione spettrale misurati nell'intervallo 380-780 nm, interpolati ad 1 nm. Nel caso specifico si è scelta la distribuzione spettrale dell'illuminante standard D65 e le funzioni colorimetriche dell'Osservatore Standard 1931. Al fine di ricostruire l'immagine a colori della area acquisita, le coordinate XYZ di ogni pixel sono state convertite nello spazio colorimetrico RGB. I valori delle coordinate colorimetriche RGB sono stati normalizzati al massimo valore da esse assunto e riportate in una dinamica ad 8 bit. Sono stati quindi costruiti i file immagine relativi a ciascuna coordinata colorimetrica in formato bitmap. Le immagini così ottenute sono state combinate mediante un software commerciale per elaborazione di immagini. Vale la pena sottolineare che l'immagine finale, riportata in Fig. 7, non costituisce una semplice riproduzione a colori del particolare dell'opera d'arte, ma una visualizzazione della misura ad alta risoluzione spaziale del colore della superficie dipinta esente da distorsioni geometriche e in scala 1:1 con l'originale. Ad un esame visivo il confronto di tale immagine con il dipinto originale mostra un'ottima fedeltà nella resa cromatica.

La caratterizzazione spettrale della superficie ha poi permesso di formulare alcune ipotesi circa la natura dei pigmenti utilizzati in due regioni specifiche: le labbra e la parte sottostante il naso. I fattori di riflessione spettrale riportati in Fig. 8, sono stati ottenuti dalla media di misure effettuate su punti adiacenti per avere uno spettro medio che fosse rappresentativo dell'area. Ai dati sperimentali è poi stato applicato un FFT smoothing (su cinque punti) al fine di eliminare il contributo ad alta frequenza dovuto all'instabilità della singola misura. L'andamento degli spettri così ottenuto è stato infine confrontato con quello del fattore di riflessione spettrale misurato (con uno spettrofotometro commerciale) su alcuni campioni di stesure pittoriche, realizzati con materiali che riproducono quelli utilizzati nei dipinti antichi, che ci sono stati messi a disposizione all'Opificio delle Pietre Dure (OPD).



Fig. 7 – Particolare di un dipinto del XV sec., opera di un anonimo fiorentino: immagine RGB in scala 1:1 con l'originale. L'immagine è stata ricostruita a partire dalla 31 immagini acquisite nell'intervallo 380-780 nm mediante lo spettrofotometro a scansione sviluppato.

Trattandosi di un dipinto ad olio sono state analizzate solo le stesure basate sul legante vegetale. Grazie alla collaborazione con i conservatori ed i restauratori dell'OPD si è poi potuto restringere ulteriormente il campo di indagine: la segnalazione di un restauro avvenuto nel XVIII sec. rendeva probabile la presenza di biacca nella zona dell'incarnato, tipica di epoche successive a quella del dipinto. Per quanto invece riguarda le labbra, il colore rosso cupo faceva presupporre la presenza di pigmenti calcinati di impiego tipico del XV sec.

L'analisi spettrofotometrica si è dunque potuta restringere ad un numero limitato di stesure campione di riferimento. Il confronto tra il fattore di riflessione spettrale misurato sul quadro e sui campioni mostra un ottimo accordo tra il pigmento delle labbra e un'ocra rossa con tracce di nero d'avorio ed un buon accordo tra il pigmento della parte sottostante il naso e una miscela di bianco di piombo e giallo di marte. In particolare per quanto riguarda l'analisi spettrale della parte sottostante il naso sono stati analizzati spettri relativi a mescolanze di bianco di piombo con pigmenti diversi poiché nessun fattore di riflessione spettrale di bianco puro aveva un andamento in accordo con quello misurato sul quadro. Le discrepanze tra lo spettro misurato relativamente a tale zona e quello del campione di riferimento potrebbero secondo noi attribuirsi al fatto che le stesure pittoriche siano state preparate con mescolanze di vari colori in percentuali fisse (e non note!) che

inciderebbero sulla forma del fattore di riflessione spettrale rendendo più difficile l'identificazione del pigmento. Questi risultati, per quanto preliminari, mostrano tuttavia come l'analisi ad immagine multispettrale trovi tra le sue applicazioni più significative anche l'identificazione dei pigmenti costituenti il film pittorico.

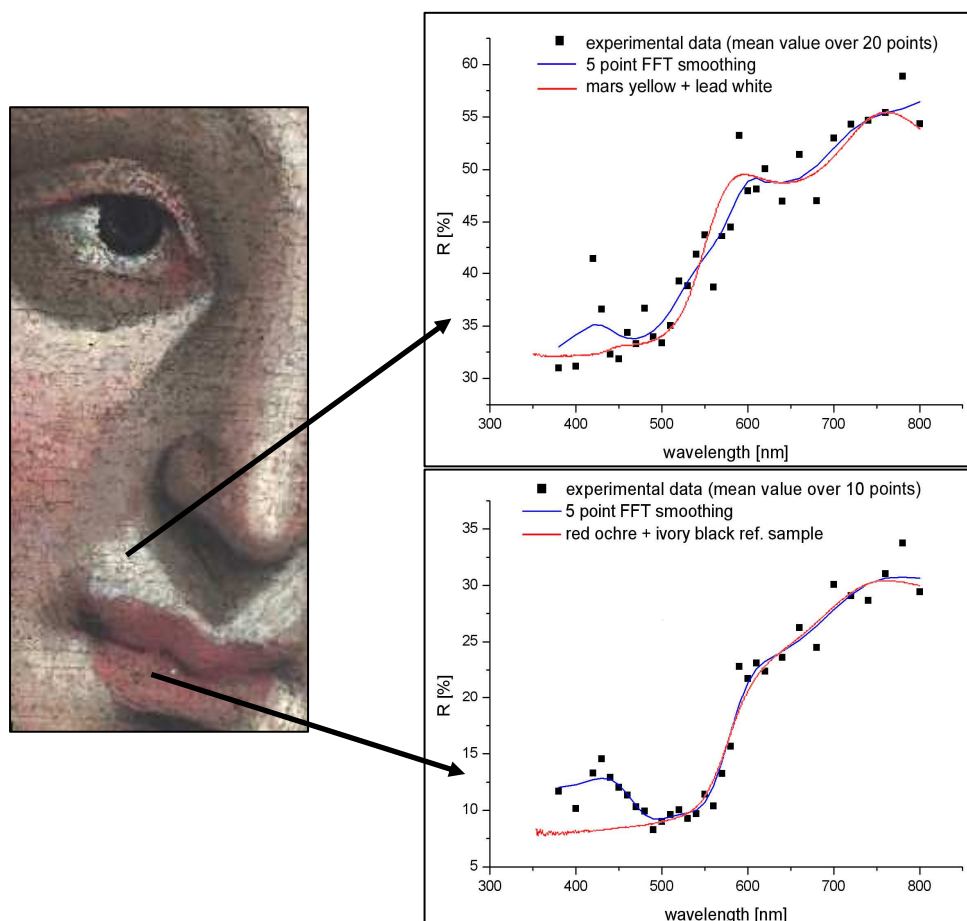


Fig. 8 – I fattori di riflessione spettrale (quadretti neri) sono stati ottenuti dalla media di punti adiacenti in due regioni specifiche. Ai dati sperimentali è stato applicato un FFT smoothing (linea blu). L'andamento degli spettri così ottenuto è stato confrontato con quello (linea rossa) del fattore di riflessione spettrale misurato (con uno spettrofotometro commerciale) su alcuni campioni di stesure pittoriche che ci sono stati messi a disposizione all'Opificio delle Pietre Dure.



Fig. 9 – Croce di Rosano, croce lignea dipinta nel XII secolo, particolare della scena delle tre Marie al Sepolcro. Immagine a colori (in alto), riflettografia a 800 nm (al centro), immagine in falso colore (in basso).

Infine in Fig. 9 sono riportati i risultati relativi a misure effettuate sulla Croce di Rosano, una croce lignea del sec.XII, attualmente in restauro presso l'Opificio delle Pietre Dure [10]. Le immagini mostrate si riferiscono al particolare di un'area acquisita più grande (60x16 cm²) che rappresenta la scena delle tre Marie al Sepolcro di Cristo (Fig. 10). Nello specifico sono riportate: in alto, l'immagine a colori ricostruita a partire dalle immagini acquisite con lo spettrofotometro a scansione (illuminante D65, osservatore CIE1931), al centro, la riflettografia infrarossa (IR) corrispondente all'immagine acquisita dal canale 32 ($\lambda = 800$ nm), ed in basso, l'immagine in falso colore [11] ricostruita combinando le immagini IR, R, G, ed associandole rispettivamente ai canali R, G, B. Il particolare riportato in Fig. 9, in scala 1:1 con l'originale dipinto, mostra un eccellente livello di risoluzione sia tonale sia spaziale nella riproduzione che consente di apprezzare anche i dettagli più fini. Inoltre, l'acquisizione intorno a 800 nm, per quanto di leggibilità inferiore rispetto al riflettogramma acquisito con altri dispositivi quali la telecamera Vidicon o lo scanner per riflettografia IR dell'INOA [12], fornisce tuttavia (e questo vale in generale) una prima indicazione su quanto si trova sotto lo strato pittorico superficiale, al pari dell'informazione che si può ottenere con la tecnica fotografica. L'immagine in falso colore infine è coerente con altre immagini di questo tipo ottenute sia con la tecnica fotografica sia con lo scanner per riflettografia IR: è ad esempio il caso del 'falso' rosso brillante del velo delle due Marie, agli estremi del trio, che ne rivela la realizzazione con lapislazzuli.



Fig. 10 – Croce di Rosano, croce lignea dipinta nel XII secolo, immagine fotografica della scena delle tre Marie al Sepolcro.

Conclusioni

E' stato realizzato uno spettrofotometro a scansione trasportabile per analisi multispettrale (32 bande) ad immagine, ad alta risoluzione spaziale nella regione spettrale 380-800 nm. Il dispositivo consente la caratterizzazione spettrale e colorimetrica di superfici dipinte fino a 1,5 m² con una risoluzione spaziale di 16 punti/mm². E' stata determinata una procedura di calibrazione dello strumento e la taratura è stata eseguita confrontando i risultati con esso ottenuti, con i valori relativi ad un set di 7 superfici campione colorate, certificate dal National Physical Laboratory (UK). Sono stati inoltre presentati alcuni esempi di applicazione nell'ambito della documentazione e della diagnostica di dipinti antichi.

La caratterizzazione multispettrale delle superfici dipinte rappresenta un dato quantitativo che dipende, oltre che dalle caratteristiche intrinseche della materia pittorica, unicamente dalla configurazione geometrica di illuminazione/osservazione, e non dagli specifici sorgente e rivelatore utilizzati. In questo senso il dato multispettrale acquisito può essere utilizzato sia per il monitoraggio dello stato di conservazione dell'opera e per documentare le modifiche subite dall'opera a seguito di interventi di restauro, sia come strumento di identificazione dei materiali costituenti il film pittorico.

La realizzazione del dispositivo presentato è parte di un progetto di ricerca più ampio denominato S.I.D.Art, finalizzato all'implementazione e integrazione di tecnologie e strumentazione per la conservazione di beni culturali.

Tra gli sviluppi futuri ci sono la realizzazione del sistema autofocus, che consentirà di aggiustare in tempo reale la distanza dell'ottica di osservazione dal dipinto nel caso di superfici fortemente irregolari e contemporaneamente produrrà il rilievo tridimensionale della superficie dipinta, permettendo la realizzazione di un modello integrato di forma e colore della superficie indagata. E' poi prevista la realizzazione di una nuova ottica di osservazione che rispetti i suggerimenti CIE per quanto riguarda l'angolo solido di osservazione per la geometria 45°/0°. Infine l'obiettivo è di estendere quanto più possibile la banda spettrale di sensibilità del dispositivo nel vicino infrarosso fino a coprire la regione 380-2400nm.

Ringraziamenti

Siamo estremamente grati a Roberto Bellucci e Cecilia Frosinini (Opificio delle Pietre Dure, Firenze) per la gentile collaborazione e le proficue discussioni. Si ringrazia, inoltre, Nicola Ludwig (Università di Milano) per aver condiviso con noi le prime esperienze di laboratorio. Infine, siamo riconoscenti al MIUR per il cofinanziamento del progetto S.I.D.Art..

Bibliografia

1. S. Baronti, A. Casini, F. Lotti, S. Porcinai, "Multispectral imaging system for the mapping of pigments in works of art by use of principal component analysis", *Applied Optics*, 37, 1229 (1998).

2. D. Anglos, C. Balas, C. Fotakis, "Laser spectroscopic and optical imaging techniques in chemical and structural diagnostic of painted artwork" *American Laboratory*, 31, 60-67 (1999).
3. A. Abrardo, L. Alparone, V. Cappellini, A. Prosperi, "Color constancy from multispectral images", *International Conference on Image Processing*, 570-574 (1999).
4. D. Saunders, J. Cupitt, C. White, S. Holt, "The MARC II camera and the scanning initiative at the National Gallery", *National Gallery Technical Bulletin* 23, 76-82 (2002).
5. G. Antonioli, F. Fermi, C. Oleari, R. Reverberi, M. D'Agostino, A. Dall'Ava, F. Rampazzo, "Monitoraggio dello stato di conservazione sulle opere del Parmigianino mediante misurazione dell'apparenza della superficie pittorica e implicazioni illuminotecniche", www.fis.unipr.it/beni/Parmigianino_scan.htm.
6. Radiometric and Photometric characteristic of materials and their measurement, CIE, Wien, 1977.
7. Certification of calibration, *National Physical Laboratory*, C13-00/10, March 2004.
8. M. Mastroianni, "Sviluppo di uno spettrofotometro per analisi multispettrale ad immagine di pitture antiche", *Tesi di Laurea* (2004).
9. M. Greco, "Realizzazione di un dispositivo a scansione per la caratterizzazione multispettrale e colorimetrica ad immagine di superfici pittoriche", *Tesi di Specializzazione in Ottica* (2004).
10. R. Bellucci, "La Croce di Rosano. Valutazioni sul restauro e presentazione dei primi risultati", in *Restauri e Ricerche – Dipinti su tela e su tavola*, pag. 77, editore: Edifir-Edizioni Firenze, Firenze (2003).
11. A. Aldrovandi, R. Bellucci, D. Bertani, E. Buzzegoli, M. Cetica, D. Kunzelman, "La ripresa in falso colore: nuove tecniche di utilizzo", *O.P.D. Restauro*, Vol. 5, pp 94-98, 1993.
12. R. Fontana, M. C. Gambino, M. Greco, L. Marras, M. Materazzi, E. Pampaloni, L. Pezzati, P. Poggi, "New high resolution IR-colour reflectography scanner for painting diagnosis", in *Proceedings of SPIE*, Vol. 5146 (2003), pp 108-115.

Evoluzione di apparati di spettroscopia d'immagine per l'analisi non invasiva di dipinti presso l'IFAC-CNR

ANDREA CASINI, FRANCO LOTTI, LORENZO STEFANI

SEZIONE ELABORAZIONE DI SEGNALI E IMMAGINI,
ISTITUTO DI FISICA APPLICATA "NELLO CARRARA",
CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE
Via Panciatichi, 64 – 50127 Firenze, Tel. 0554235.280, Fax: 055410893
A.Casini@ifac.cnr.it

ROBERTO BELLUCCI, CECILIA FROSININI

LABORATORIO DI RESTAURO,
OPIFICIO DELLE PIETRE DURE
Viale Strozzi, 1 – 50123 Firenze, Tel. 0554235.280, Fax: 055410893

1. Introduzione

Nel 1983, in occasione del restauro degli affreschi di Masaccio e Masolino nella Cappella Brancacci e seguendo i primi studi svolti presso la National Gallery di Londra, presso l'Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara" del CNR (allora Istituto di Ricerca sulle Onde Elettromagnetiche) si iniziò una linea di ricerca sulla spettroscopia di riflettanza dei materiali pittorici [1-3].

Questi studi furono resi possibili dall'introduzione di spettroscopi trasportabili dotati di sonde a fibre ottiche che permisero le misure di zone del diametro di circa 3 mm situate in qualsiasi parte di un dipinto. Soprattutto allo scopo di monitorare le variazioni nel tempo o durante le fasi di operazioni di restauro, i dati spettroscopici misurati alle lunghezze d'onda visibili furono usati anche per misure di colore. Per studiare i materiali pittorici ed i prodotti di degrado si rivelò utile e pratico lo studio di un campo di lunghezze d'onda dai ~350 nm nel vicino ultravioletto fino ai 2 µm nell'infrarosso a lunghezza d'onda breve (SWIR).

Nei primi anni '90, seguendo anche studi condotti al Doerner Institute [4], venne deciso di dare inizio un'attività di sperimentazione di spettroscopia d'immagine, con lo scopo di estendere le informazioni di spettroscopia di riflettanza a tutti i punti di un'inquadratura di un dipinto. Poiché all'epoca non erano disponibili strumenti adatti, il compito dello studio e dell'implementazione di un prototipo di camera multispettrale fu assunto dalla Sezione Elaborazione di Segnali ed Immagini dell'Istituto "Nello Carrara".

Nel seguito vengono brevemente riportate le caratteristiche sia di tale strumento sperimentale, sia quelle di un interessante interferometro ad immagine divenuto disponibile in anni successivi ed usato soprattutto per l'analisi spettrale delle immagini di fluorescenza indotta da radiazione UVA.

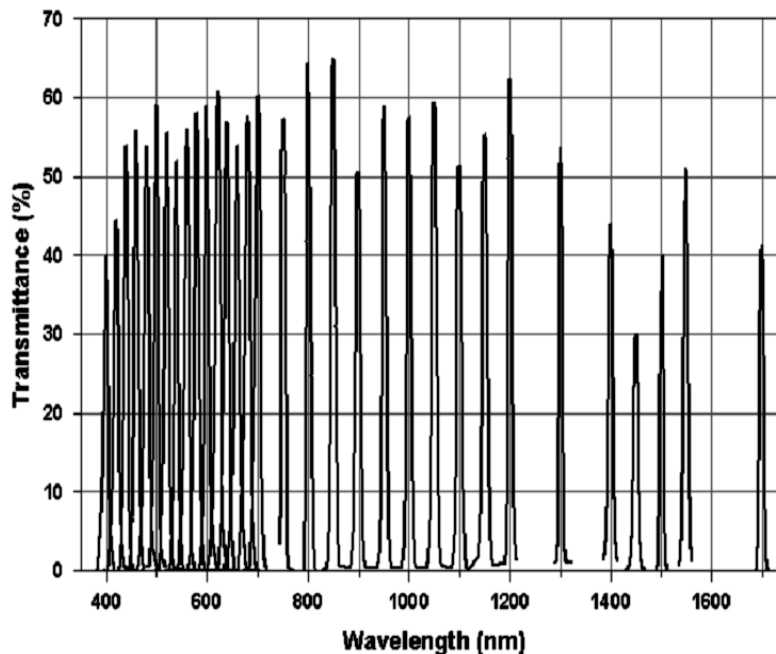


Fig. 1 – Filtri interferenziali usati nella telecamera multispettrale a vidicon

L'esperienza maturata, in collaborazione con un centro di alta qualificazione nella conservazione e nel restauro dei dipinti quale l'Opificio delle Pietre Dure, ha condotto all'implementazione di un prototipo di scanner iperspettrale ad alta risoluzione spaziale. Lo scopo di tale strumento, basato su uno spettrografo di linea del tipo *prisma-reticolo-prisma* in trasmissione, è quello di ottenere sia mappe dei materiali, sia mappe colorimetriche accurate e ripetibili.

Vengono nel seguito riportati i primi risultati ottenuti su un dipinto rinascimentale di rilevante importanza storico-artistica, insieme a risultati più tecnici, adatti ad una valutazione della qualità delle misure ottenibili con tale spettrografo.

2. Telecamera multispettrale

La telecamera utilizzata era un vidicon PbO-PbS Hamamatsu, il cui intervallo utile di sensibilità va da 400 nm a poco più di 1800 nm. Questo sensore fu scelto proprio per la sua banda estesa nell'infrarosso poiché ci si poneva l'obiettivo di sperimentare la spettroscopia ad immagini nello spettro oltre 1 μm , cioè oltre la banda di sensibilità dei CCD, dove diviene rilevante il potere di penetrazione della radiazione al disotto della superficie pittorica. Come è noto, questo effetto è sfruttato dai restauratori nella cosiddetta riflettografia nell'infrarosso per rilevare disegni preparatori eseguiti con materiali assorbenti (es., carboncino) e per scoprire ridipinture. Era da aspettarsi che un'analisi multibanda avrebbe fornito informazioni sulla stratificazione dei materiali dato che il potere di penetrazione della radiazione aumenta con la lunghezza d'onda, anche se in maniera diversa per diversi materiali.

I 32 filtri interferenziali selezionati (Fig 1) hanno tutti una larghezza di banda di 10 nm a metà altezza e sono distanziati di 20 nm nel visibile fino a 700 nm, mentre nell'infrarosso sono distanziati di 50 nm fino a 1200 nm, per poi diradarsi e distanziarsi in maniera meno regolare. Ciò è dovuto anche al motivo pratico che nell'infrarosso esiste una scelta minore di filtri già pronti e di costo ragionevole. Nella scelta dei filtri si sono comunque privilegiate le lunghezze d'onda alle quali ci si aspettano bande di assorbimento, ad es. quelle caratteristiche del solfato di calcio (1450-1550 nm), cioè del *gypsum* di cui sono costituiti molti strati preparatori.

Per governare l'acquisizione di immagini con un così grande numero di filtri si è dovuto allestire un sistema di controllo comandato da un PC per cambiare filtro, aggiustare l'esposizione, mettere a fuoco e aprire o chiudere l'otturatore dei proiettori. Quest'ultima operazione è importante per ridurre all'indispensabile l'esposizione delle opere d'arte alla densità di irradiazione piuttosto intensa (~10000 lux) dei due proiettori alogeni.

Da ogni immagine spettrale viene sottratta la corrispondente immagine di buio poiché il sensore vidicon non è raffreddato, ma semplicemente ventilato, e quindi la sua corrente di buio è elevata e segue la temperatura ambiente. Inoltre, poiché la cattiva stabilità del sensore rende inefficace ogni operazione di calibrazione preventiva della risposta, su una cornice in cartone appoggiata al dipinto e posta nel campo inquadrato vengono fissati 5 campioni di riferimento di grigio (*Spectralon*) per avere un riferimento radiometrico relativo fra le varie immagini alle diverse lunghezze d'onda. Sulla stessa cornice sono stampati alcuni motivi a scacchi e barre equispaziate bianco-nere, usati dal programma di focalizzazione automatica per ricercare il massimo del contrasto. La focalizzazione immagine per immagine è di importanza essenziale nell'infrarosso, dove l'obiettivo fotografico non è più compensato "cromaticamente". Altri motivi geometrici ad alto contrasto, stampati ai quattro angoli dell'inquadratura, forniscono dei riferimenti al programma automatico che riscalda spazialmente le immagini, dato che queste hanno subito una variazione di ingrandimento per effetto dell'operazione di focalizzazione.

Descrizioni più dettagliate della telecamera, delle modalità di acquisizione e della casistica affrontata si possono trovare in [5, 6]. In sintesi si può dire che le esperienze hanno dimostrato la versatilità della spettroscopia d'immagine nel visibile e nell'infrarosso oltre 1 μ m, che oltre a dare informazioni locali sugli spettri dei materiali, può con facilità fornire mappature dei medesimi su zone estese, specialmente mediante algoritmi di analisi statistica multivariata della varianza (analisi delle componenti principali, PCA). Grazie alla sua caratteristica di riassumere la variabilità di tutte le immagini in poche immagini non correlate, in uno dei casi la PCA è riuscita a fornire evidenza immediata a un dettaglio di ridipintura che era sfuggito ad un esame riflettografico infrarosso a banda larga, perché essa rilevabile solo da differenze di andamento delle curve spettrali, non da differenze di riflettanza media.

E' chiaro tuttavia che uno strumento di questo genere rimane limitato dal numero elevatissimo di filtri interferenziali che sarebbe necessario per ottenere una vera e propria spettroscopia.

Rispetto alle tecniche note per ottenere l'analisi spettrale dispositivi più compatti (filtri acusto-ottici, filtri sintonizzabili a cristalli liquidi) nel 1996 fummo attratti da una originale telecamera interferometrica, sviluppata soprattutto per ottenere mappe spettrali di fluorescenza in applicazioni in citogenetica.

3. Telecamera interferometrica *SpectraCube*

Il principio di funzionamento è simile a quello degli interferometri a trasformata di Fourier (FT) impiegati in spettroscopia molecolare, salvo che in questo caso l'interferometro non segue lo schema di Michelson, ma è di tipo Sagnac (Fig. 2).

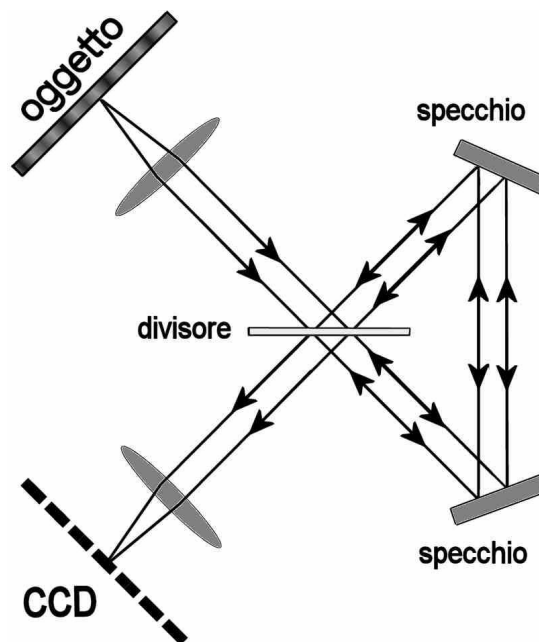


Fig. 2 – Schema di principio dell'interferometro ad immagini SpectraCube

La formazione di immagini interferenziali è ottenuta tramite un'ottica che collima la radiazione da un qualsiasi punto dell'oggetto in un'onda piana con direzione di propagazione determinata dall'angolo di vista del punto medesimo. Ciascuna onda piana subisce la divisione in due rami che alla fine vengono ricombinati e focalizzati in un punto immagine situato sul piano del sensore a matrice CCD. Nello strumento reale lo schema Sagnac di base è modificato mediante l'introduzione uno specchio rotante a doppia faccia mosso da un galvanometro controllato da calcolatore. La rotazione dello specchio a passi angolari costanti

realizza la scansione di differenze di cammino ottico che nello schema classico di Michelson è ottenuta per mezzo della traslazione dello specchio di uno dei due rami ortogonali. Infine, un programma basato sull'algoritmo veloce di Fourier ricostruisce lo spettro in ciascun punto dalla sequenza dei valori interferometrici registrati in quel punto.

In una camera interferometrica, di per sé particolarmente sensibile alle vibrazioni, è bene non usare otturatori elettromeccanici. Per questo i CCD più adatti sono quelli dotati di un sistema di otturazione elettronica, che consiste nel trasferire molto rapidamente i fotoelettroni accumulati durante ciascuna esposizione in celle di memoria schermate dal flusso luminoso dalle quali le cariche vengono lette a velocità adeguata all'elettronica di conversione analogico-digitale e di accesso alla memoria del calcolatore.

In uno strumento interferometrico ideale il rivelatore dovrebbe avere una risposta spettrale costante poiché il segnale raccolto ad ogni posizione dello specchio è una sovrapposizione di tutte le lunghezze d'onda contenute nello spettro da analizzare. Se la risposta spettrale non è costante, non c'è quindi modo di evitare che il rapporto segnale/rumore sia diverso alle diverse lunghezze d'onda. Purtroppo, questo è il caso del CCD impiegato nella versione dello "SpectraCube" in nostro possesso: EEV-37, 512x512 pixels "frame-transfer". In particolare, esso ha una risposta veramente bassa alle lunghezze d'onda del blu, ragione per cui, pur impiegando filtri correttori blu, la camera non dà dati utili sotto i 430 nm. Inoltre, la presenza di molti dispositivi ottici (un obiettivo esterno e due interni) contribuisce a peggiorare la qualità della funzione di trasferimento totale, in particolare la compensazione "cromatica".

Per queste ragioni la qualità delle immagini spettrali ottenute con questa versione dello strumento non è risultata adeguata ai dipinti d'arte e in effetti la camera interferometrica è stata poco usata per l'analisi di casi reali. Invece, essa è stata usata e viene usata tuttora per lo studio degli spettri di fluorescenza dei materiali pittorici di stesure campione, poiché, a parità di altre condizioni, uno strumento interferometrico offre un'efficienza ottica maggiore rispetto ad uno a reticolo o a prisma (vantaggio di Jaquinot) ed è quindi più adatto ad analizzare deboli luminescenze [7].

A parte i difetti della particolare prima versione dello strumento sopra menzionati, il sistema interferometrico si è dimostrato di uso pratico. Il pregio maggiore è quello di poter adattare risoluzione e numero di bande alla misura specifica semplicemente variando la programmazione dell'ampiezza e del numero dei passi angolari dello specchio.

La risoluzione massima ottenibile col particolare strumento varia da ~2 nm (a 430 nm) a ~20 nm (a 900 nm), con circa 200 bande.

4. Scanner iperspettrale

L'Opificio delle Pietre Dure è depositario di un'esperienza vastissima nel campo della diagnostica non invasiva sulle opere d'arte. L'attività dei suoi laboratori

scientifici e di restauro è affiancata da quella di numerosi laboratori di Università e di Enti di ricerca per la sperimentazione di metodiche di strumenti innovativi, la cui concezione nasce proprio dalle osservazioni e dalle esigenze manifestate dai restauratori e dai conservatori sulla base delle esperienze con la strumentazione già disponibile.

In particolare, le misure di colore ottenute con gli spettrofotometri a fibre ottiche si erano rivelate utili per seguire le varie fasi delle operazioni di pulitura di dipinti. Era però desiderabile ottenere anche delle “immagini” di valori colorimetrici precisi, ma soprattutto riproducibili.

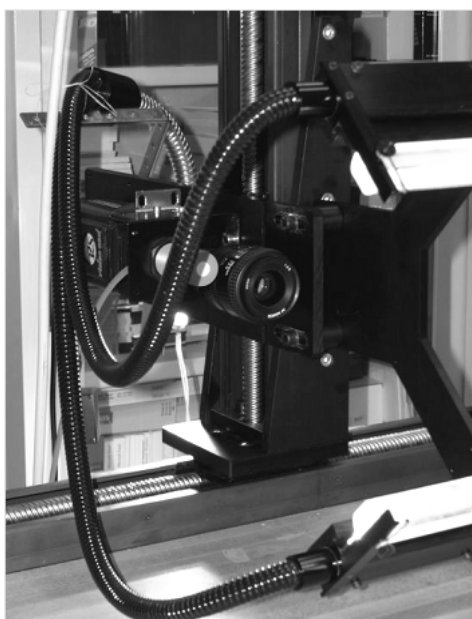


Fig. 3 – Movimenti, ImSpector e illuminatore a fibre ottiche dello scanner iperspettrale

Poiché la riproducibilità di misure di colore dipende dalla possibilità di riprodurre con esattezza l’assetto geometrico fra sorgente d’illuminazione e rivelatore, venne immediato pensare ad un sistema XY che muoveva uno spettrofotometro a fibre ottiche con sonda non a contatto, nella quale le posizioni e le orientazioni delle due fibre illuminanti e della fibra ricevente sono rigidamente collegate secondo la geometria $2 \times 45^\circ / 0^\circ$. Vennero effettuate alcune prove con una tale sonda, ma le velocità di trasferimento dei dati ottenibili con spettrofotometri ad array CCD lineare erano troppo piccole per un dispositivo a scansione punto-per-punto che avesse uso pratico. Inoltre, la densità spaziale determinata dal diametro dello spot (~ 3 mm) era decisamente bassa rispetto all’obiettivo ideale di poter risolvere sulle immagini spettrali gli stessi dettagli che si risolvono ad occhio nudo sul dipinto.

Il fatto di dover posizionare la microlente della fibra di ricezione ad una distanza di pochi millimetri dalla superficie dell'oggetto rendeva l'assetto non indicato per la sicurezza di un dipinto. Sarebbe stato perciò necessario posizionare la fibra in un'ottica che permettesse di raggiungere distanze di almeno qualche centimetro.

Tutte queste difficoltà consigliarono di passare alla sperimentazione di un sistema a scansione basato su uno spettrografo di linea *ImSpector* (SpecIm Ltd), il quale ha una struttura compatta prisma-reticolo-prisma che s'interpone semplicemente fra obiettivo e telecamera. Con un tale dispositivo si può aumentare la distanza di lavoro, traendo vantaggio dal fattore di riduzione dell'ottica, e si possono ridurre i tempi di scansione, traendo vantaggio dalla parallelizzazione delle misure su tutti i punti della linea di vista.

Lo spettrografo è attraente anche perché disponibile in diversi modelli per diverse gamme di lunghezza d'onda, dal vicino ultravioletto all'infrarosso fino a $\sim 2 \mu\text{m}$; con una coppia spettrografi si può coprire tutta la gamma della telecamera multispettrale a vidicon descritta in 2., ma con una risoluzione spettrale confrontabile a quella degli spettroscopi a fibre ottiche.

4.1 Assemblaggio e prestazioni dello scanner

Allestito un sistema di movimentazione con un'area di scansione di circa un 1 m x 1 m per mezzo di due movimenti lineari dotati di motori passo-passo, si è connesso un *ImSpector V10* con fenditura di $25 \mu\text{m}$ ad una telecamera Hamamatsu ORCA-ER (Fig. 3). Questa è una telecamera di media velocità di trasferimento basata su un CCD "interline transfer" con 1344×1024 pixels di efficienza quantica superiore al 50 % anche nella regione del blu, che è la zona critica per tutte le misure con illuminazione da lampada alogena. L'illuminazione è fornita da due lame di luce lineari orientate a 45° create da un sistema a fibre ottiche FOSTEC con lampada alogena a 3200 K e 150W montata su riflettore dicroico ellissoidale

Usando la telecamera in una modalità di acquisizione che sottocampiona di un fattore 2 in entrambe le direzioni, la linea di vista dell'*ImSpector V10* risulta campionata in $1024/2=512$ punti. Programmando un passo di campionamento spaziale di 0.1 mm in direzione ortogonale alla linea di vista, l'ottica usata (Nikon 35 mm) consente al campionamento lungo la linea di vista di avere un valore uguale per distanze di ~ 30 cm fra obiettivo e piano dell'oggetto. Con tale modalità di acquisizione l'asse di dispersione spettrale è ridotto a $1344/2=672$ punti e poiché l'intervallo di dispersione è ~ 600 nm, il campionamento spettrale risulta ~ 1 nm.

Dato che lo strumento è ancora in evoluzione, non sono state effettuate delle misure accurate delle risoluzioni spettrale e spaziale. Tuttavia, per mezzo di alcune righe del campione spettrale in olmio usato per la calibrazione dell'asse delle lunghezze d'onda, si può stimare una risoluzione spettrale di ~ 2 nm. Con un semplice *target* USAF-1955 a barre rettangolari bianche e nere di uguale larghezza, la caduta del 50% di contrasto è stimabile intorno alle 2 linee per mm per immagini di lunghezza d'onda di ~ 550 nm.

Per quanto riguarda la precisione delle misure colorimetriche, si sono fatte delle valutazioni in coordinate CIE1964 su campioni di colore *Labsphere*. Il risultato riassuntivo è riportato nell'istogramma in Fig. 4, che riporta lo scarto complessivo ΔE fra i valori misurati e quelli certificati dal produttore, misurati con uno spettrofotometro Perkin Elmer Lambda 9 in geometria 8°/emisfera. Per confronto, vengono riportati gli scarti ottenuti dalle misure degli spettri degli stessi campioni con uno spettrofotometro a fibre ottiche Zeiss MCS501 in geometria 2x45°/0 (come quella usata nello scanner).

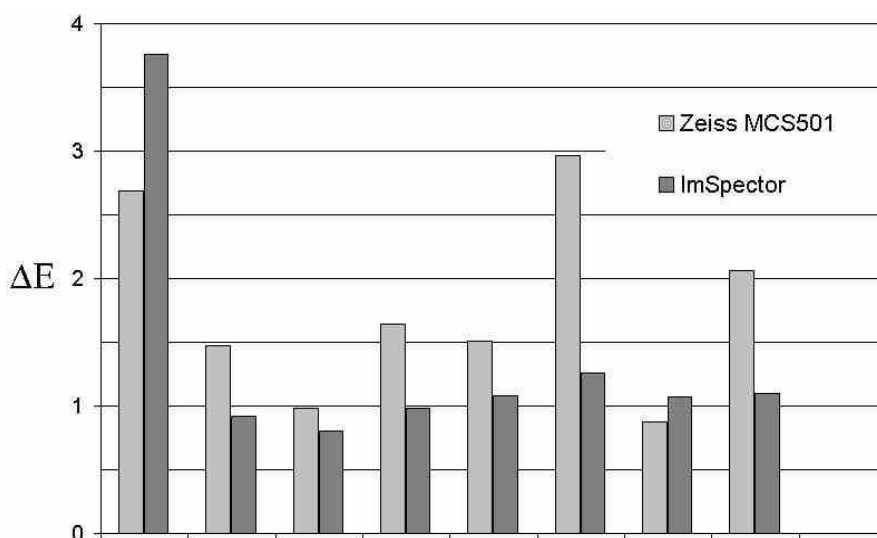


Fig. 4 – Confronto fra le deviazioni ΔE delle coordinate CIELAB ottenute con l'*ImSpector V10* e con uno spettrofotometro a fibre ottiche *Zeiss MCS501* su campioni *Labsphere*

L'inconveniente maggiore riscontrato riguarda la qualità del filtro di blocco dello spettro del secondo ordine (OBF, *order blocking filter*) che si pone nella telecamera quanto più vicino possibile al CCD. L'OBF dell'*ImSpector V10* è un filtro in vetro con trattamento superficiale antiriflesso, separato in due zone: una è trasparente a tutte le lunghezze d'onda da 400 a 1000 nm, mentre l'altra dovrebbe bloccare tutte le lunghezze d'onda inferiori a 550 nm. Purtroppo la trasmittanza fuori banda di questo filtro, che al minimo arriva a 10^{-3} a ~ 440 nm, risale a 10^{-1} a ~ 520 nm. Accade allora che nella zona dove sono diffratte le lunghezze d'onda superiori a ~ 800 nm, le componenti residue del secondo ordine ad esse sovrapposte cominciano a prevalere. Ciò è grave perché le componenti infrarosse sono già un po' deboli a causa dell'abbattimento della radiazione infrarossa attuato dai riflettori dicroici usati negli illuminatori a fibre ottiche. Inoltre, nel vicino infrarosso la sensibilità sensore dell'*ORCA-ER*, che pure è fra CCD "interline transfer" uno quelli che hanno una gamma IR più estesa, inizia a calare: a 800 nm è $\sim 33\%$ del

massimo e a 900 nm η è ~10% . Fra i CCD retroilluminati ne esistono certamente alcuni con sensibilità molto più alta nell'infrarosso, ma sono molto costosi.

4.2 Software

Particolarmente impegnativo è stato lo sviluppo dei programmi di controllo dei movimenti, di acquisizione e di *editing* dei dati. Essi sono stati realizzati nei linguaggi Visual C++ e Visual Basic impiegando le librerie dinamiche della camera e del controllore numerico dei motori.

I dati acquisiti sono organizzati in unico file “cubo” ordinato sequenzialmente per spettri o per immagini. Date le dimensioni del file risultante, che può arrivare a ~100 Gbytes per l'area di 1 m², si è sviluppato un programma che consente di scegliere un'area di interesse e di sottocampionare sia spettralmente, che spazialmente, adattando la quantità di dati allo scopo particolare (mappatura dei materiali, riproduzione colorimetricamente corretta, analisi delle immagini spettrali di particolari fini). Per realizzare questi programmi si sono dovuti aggirare i problemi di indirizzamento dei PC attuali, che possono gestire direttamente solo files di dimensioni inferiori a 2³² bit (~4 Gbyte).

Sebbene i file “cubo” possano essere facilmente importati dai programmi per l'analisi di immagini iperspettrali di telerilevamento da satellite, per una pronta visualizzazione dei risultati non legata a software proprietari è stato realizzato un programma di presentazione dati la cui funzione principale è quella di fornire in maniera interattiva il grafico dello spettro medio calcolato su un'area rettangolare centrata sulla posizione del cursore. Lo stesso programma può anche costruire immagini in pseudo-colore con bande delle componenti RGB a scelta, può mettere in display l'immagine di una singola banda o l'immagine media in un intervallo di bande, può ricavare le mappe colorimetriche L*a*b* e le mappe di differenza colorimetrica fra misure iperspettrali diverse. Su tutte queste immagini calcolate è attivabile la funzione di graficazione degli spettri e tutte le altre funzioni di elaborazione.

I grafici degli spettri possono essere ottenuti anche posizionandosi su immagini “esterne”, non ricavate cioè dai dati del file “cubo”, purché esse siano state registrate geometricamente rispetto a quelle contenute nel file. In questo modo si possono fare dei raffronti con altri tipi di misura per immagini, quali radiografie e immagini di fluorescenza ottica. Queste immagini “esterne” possono essere anche delle semplici immagini di riferimento su cui siano stati marcati i punti di misure di tipo puntuale, quali la fluorescenza a raggi X (XRF), l'emissione X o gamma indotta da particelle accelerate (PIXE/PIGE).

Il programma ha anche funzioni per creare mappe di distanza con uno spettro di riferimento o mappe che localizzano la presenza di una banda di assorbimento.

Su intervalli di lunghezza d'onda selezionabili, in aree di interesse definibili interattivamente o rilevabili da un'immagine “maschera”, si può applicare l'algoritmo statistico delle PCA (Principal Component Analysis) o diagonalizzazione della matrice di autocovarianza. Si possono mettere in display le

immagini componenti principali (autovalori), i grafici dei pesi in funzione delle lunghezze d'onda (coseni direttori degli assi principali, cioè gli autovettori) e le immagini degli istogrammi fra coppie di componenti principali, con possibilità di evidenziare interattivamente i pixel che hanno originato addensamenti di punti nel piano istogramma. Naturalmente, essendo quello delle PCA un algoritmo il cui tempo di esecuzione cresce esponenzialmente con le dimensioni dei dati, la sua applicazione pratica è riservata a delle piccole aree di interesse o a "cubi" opportunamente sottocampionati mediante il programma di *editing*.

4.3 Test su un dipinto rinascimentale

Come prima applicazione su un dipinto d'arte, lo scanner è stato impiegato su un dipinto del primo Cinquecento, di attribuzione incerta, che era presente presso i laboratori dell'Opificio delle Pietre Dure per essere sottoposto a esami diagnostici a scopo di studio.

La ripresa iperspettrale del dipinto di ~35 x 48 cm alla densità spaziale di 0.1 mm ha originato un file di ~26 Gbyte. In Fig. 5 è riportata la finestra del programma di presentazione con il risultato di un'elaborazione spettrale che localizza i ritocchi nell'incarnato eseguiti con un pigmento che si differenzia da quello di base per una banda di assorbimento fra 600 e 700 nm. L'immagine presentata in figura è sottocampionata cinque volte rispetto alle dimensioni di ripresa a 0.1 mm di campionamento.

5. Conclusioni

Per quanto le prove dell'assemblaggio provvisorio dello scanner iperspettrale abbiano dato risultati molto promettenti, prima di considerare raggiunto uno stadio soddisfacente del prototipo occorre mettere a punto diversi dettagli importanti. A parte i problemi posti dal filtro OBF, che sono più propriamente di pertinenza del costruttore, esiste il problema di trovare un sistema di illuminazione che sfrutti al meglio la radiazione emessa dalla sorgente alogena le cui componenti infrarosse sono attualmente attenuate dal riflettore dicroico. Questo comporterà probabilmente la sostituzione del *bundle* di fibre ottiche con uno dotato di terminazione in grado di sopportare temperature più alte.

Ancora più importante sarà la sostituzione del computer con uno che consenta accessi più rapidi alla memoria e maggiori velocità di acquisizione. Tempi di misura più brevi significano soprattutto ridurre i tempi di esposizione dell'opera d'arte a una radiazione luminosa intensa. Ad esempio, nel caso del dipinto rinascimentale l'acquisizione è durata circa due ore e mezzo contro poco più di mezzora teoricamente indispensabile considerando solo i tempi di apertura della telecamera. Se nel caso esaminato l'esposizione è stata contenuta in limiti assolutamente ragionevoli, e cioè equivalente a circa 68 ore di esposizione museale in condizioni di illuminazione ancora corrette per dipinti su tavola (150 lux), nel caso di disegni e tessuti, che devono essere esposti a meno di 50 lux, l'esposizione sarebbe considerata elevata.

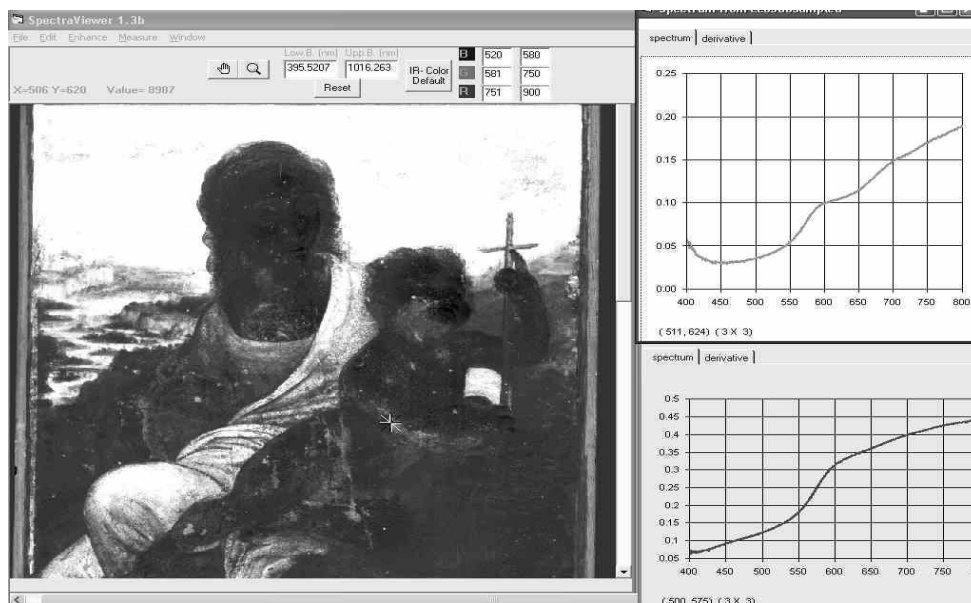


Fig. 5 - Mappatura dei ritocchi sull'incarnato del Bambino. Le macchie più chiare sono in corrispondenza di una banda di assorbimento fra 600 e 700 nm (grafico in alto a destra, relativo alla posizione del cursore in display sul braccio destro) rispetto al resto dell'incarnato (grafico in basso a destra)

Bibliografia

1. N.F. Barnes, "A Spectrofotometric Study of Artists Pigments", *Technical Studies in the Fields of the Fine Arts*, 7, 1938, pp. 120-138.
2. L. Bullock, "Reflectance Spectrophotometry for Measurements of Colour Change", *National Gallery Technical Bulletin*, 2, 1978, pp. 49-55.
3. M. Bacci, F. Baldini, R. Carlà, R. Linari, "A Color Analysis of the Brancacci Chapel Frescoes", *Applied Spectroscopy*, 45, 1991, pp. 26-31.
4. A. Burmester, "The Study of Drawings in the Near Infrared", *Proceedings of the 12th International Symposium on the Conservation and Restoration of Cultural Property, Analysis and Examination of an Art Object by Imaging Technique*, Tokyo National Research Institute of Cultural Properties, 1991, pp. 61-82.
5. S. Baronti, A. Casini, F. Lotti and S. Porcinai, "Multispectral Imaging System for the mapping of Pigments in Works of Art by Use of Principal-Component Analysis", *Applied Optics*, Vol 37, No. 8, 10 March 1998, pp. 1299-1308.

6. A. Casini, F. Lotti, M. Picollo, L. Stefani, E. Buzzegoli, “ Image Spectroscopy Mapping Technique for Non-invasive Analysis of Paintings”, *Studies in Conservation*, 44, 1999, pp 39-48.
7. A. Casini, F. Lotti, M. Picollo, L. Stefani, A. Aldrovandi, “Fourier Transform Interferometric Imaging Spectroscopy: a New Tool for the Study of Reflectance and Fluorescence of Polychrome Surfaces”, *Conservation Science 2002*, papers from the conference held in Edinburgh, 22-24 May 2002, Archetype Publications, 2003, pp. 249-253.

Spettroscopia d'immagine per l'identificazione di pigmenti pittorici

NICOLA LUDWIG, MARIO MILAZZO, LETIZIA DE MARIA
ISTITUTO DI FISICA GENERALE APPLICATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
Via Celoria, 16 – 20125 Milano, Tel. 0250317473, Fax: 0250317422
Nicola.ludwig@unimi.it

1. Introduzione

Il riconoscimento in modo non distruttivo di pigmenti pittorici può essere ottenuto analizzando gli spettri caratteristici di assorbimento nella regione spettrale del visibile e del vicino infrarosso attraverso misure del fattore di riflessione spettrale (riflettanza). Differenti tecniche sono state sviluppate per ottenere curve di riflettanza da misure non a contatto [1, 8, 9]. I sistemi per la spettroscopia d'immagine attualmente impiegati si basano su due principi differenti di scansione: nei sistemi a spettrografo [1-2] si attua una scansione spaziale lungo un asse e una ripresa simultanea su tutte le lunghezze d'onda di una linea dell'immagine, nei sistemi a filtro si attua invece una scansione in lunghezza d'onda riprendendo il medesimo oggetto attraverso diversi filtri passabanda. I valori di riflettanza sono ottenuti dal confronto dell'intensità luminosa nelle zone del dipinto con quella di standard di riflettanza calibrati. Le prove realizzate nel laboratorio di Archeometria dell'Istituto di Fisica Generale Applicata sono rivolte a verificare il grado di affidabilità della tecnica che impiega come rivelatori CCD sensibili nella banda 400-1000 nm attraverso il raffronto con le misure ottenute con spettrofotometri a sfera integratrice. Il sistema di spettroscopia d'immagine in uso presso il Laboratorio di Milano è stato messo a confronto con un sistema analogo a filtri interferenziali messo a punto nell'ambito del progetto europeo CRISATEL presso i laboratori di ricerca del C2RMF del Louvre di Parigi.

2. Sistemi a filtri per la spettroscopia d'immagine

I sistemi a filtro si basano sull'impiego di filtri interferenziali posti fra rivelatore e scena in modo da ottenere una sequenza di immagini monocromatiche. I vantaggi principali dei sistemi a filtri risiedono nell'indipendenza delle due parti di cui si compone un sistema per spettroscopia d'immagine: il sistema di monocromazione e quello di rivelazione. E' così possibile una volta filtrata la luce registrare l'immagine con un qualsiasi dispositivo adattato alle specifiche esigenze di risoluzione spaziale, di rapidità di scansione o di portabilità che l'applicazione richiede [3]. In particolare si possono utilizzare sistemi a scansione lineare ad alta risoluzione come nel caso del sistema del progetto CRISATEL. Gli svantaggi principali nell'uso di filtri interferenziali sono:

- ∞ necessità di una movimentazione meccanica dei filtri;
- ∞ dipendenza della risoluzione spettrale dalla ampiezza di banda/numero di filtri;
- ∞ forma non analitica dello spettro di trasmissione dei filtri;
- ∞ cambio dello spettro di trasmittanza dei filtri in funzione dell'angolo di ripresa e del loro stato di conservazione.

In particolare per il secondo punto è da notare che riducendo la banda passante dei filtri se ne aumenta il numero necessario per coprire l'intervallo spettrale desiderato. Il numero ottimale di filtri per ottenere un campionamento "fine" degli spettri di riflettanza è pari all'ampiezza dell'intervallo indagato diviso la risoluzione spettrale desiderata. Un sistema commercialmente disponibile che si avvicina a questo requisito è costituito dal sistema di filtri accordabili (fino a 5 nm di banda passante) VARISPEC. Questo è costituito da una serie di lamine polarizzatrici (lineari) e di ritardo, un elemento a cristalli liquidi ed un secondo polarizzatore lineare in uscita. Il sistema di filtri accordabili è stato dettagliatamente studiato nei laboratori dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale di Torino nell'ambito del locale progetto di ricerca sulla spettroscopia d'immagine. La presenza del polarizzatore lineare in ingresso determina, nel caso di radiazione incidente non polarizzata, una perdita del 50% sui valori del fattore di trasmissione indicati dal costruttore. Lo studio dell'IEN dimostra che allo stato attuale il sistema a filtri accordabili non è l'ideale per le misure su dipinti: la bassissima trasmittanza spettrale nel blu (fra 400 e 450 nm con valori inferiori al 5%) imporrebbe infatti o l'impiego di lampade estremamente potenti o quello di rivelatori a matrice molto sensibili e ad alta risoluzione spaziale (difficilmente reperibili in commercio).

L'impiego di lampade con maggiore potenza nel blu è stato affrontato nell'ambito del progetto CRISATEL. L'esperienza ha portato ad escludere questo tipo di lampade che sfruttano in genere fenomeni di fluorescenza con spettri a picchi di emissione e risultano inappropriati nell'accoppiamento con filtri interferenziali a banda passante. Ciò poiché, di norma, il valore di riflettanza ottenuto dalla misura attraverso la banda passante di un filtro coincide con il suo picco di trasmittanza nell'approssimazione che lo spettro dell'illuminante sia pressoché costante nell'intervallo della banda.

2.1 Il sistema NIR2000

Il sistema di acquisizione adottato per l'analisi multispettrale nel laboratorio di Archeometria dell'Istituto di Fisica Generale Applicata a Milano è un *NIR 2000*, costruito dalla OPTO-LAB srl di Milano, è costituito essenzialmente, da una telecamera con rivelatore a stato solido, fornita di 17 filtri interferenziali, e da un personal computer. La telecamera è interfacciata col *PC* tramite una scheda di acquisizione video digitale a 8 bit della National Instruments (P1422). La elaborazione e il calcolo dei valori di riflettanza sulle immagini sono effettuati a mezzo di un software appositamente sviluppato in ambiente Labview. Il dipinto sottoposto ad analisi è illuminato uniformemente da due lampade alogene da 650 Watt, sistemate ad un angolo di incidenza di 45° rispetto alla perpendicolare di osservazione, in accordo con le norme CIE [1998 n°130].

Nella zona di ripresa vengono inclusi degli standard di riflettanza di valore noto (Spectralon, Labsphere 2%, 12%, 25%, 50%, 80%, 99%); tramite un algoritmo di interpolazione numerica rispetto a tali riferimenti si ottengono, per ciascuna immagine, i valori di riflettanza alla lunghezza d'onda selezionata dal filtro. Lo spettro di riflettanza degli standard (figura 1) è stato verificato in laboratorio, con uno spettrofotometro a sfera integratrice, (Cecil 3000) sono state osservate alcune discrepanze rispetto ai valori certificati in parte attribuibili all'invecchiamento degli standard stessi, a causa della continua esposizione alla luce che può alterare le proprietà ottiche del materiale.

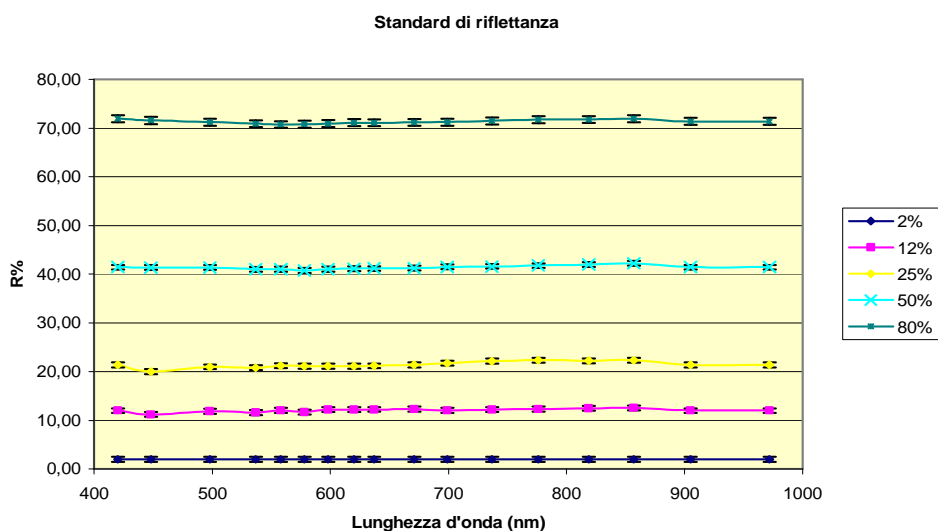


Fig. 1 – Spettri di riflettanza degli standard di riferimento

Il sistema multispettrale consiste in una telecamera con rivelatore CCD al silicio, munita di filtri interferenziali; questi sono montati su un'apposita ruota fissata tra telecamera e CCD. Il NIR 2000 acquisisce immagini digitali ciascuna delle quali porta le informazioni relative alla riflettanza diffusa dal campione nella banda spettrale trasmessa dal filtro interferenziale. In figura 2 sono riportate le curve spettrali dei filtri utilizzati misurate col sistema CECIL.

La verifica dei valori di riflettanza ottenuti con il metodo d'immagine è stata effettuata per confronto con i valori misurati con due sistemi a sfera integratrice: uno Spettrocolorimetro Minolta 2600d con una risoluzione di 10 nm nel visibile e lo spettrofotometro da banco CECIL3000 con una risoluzione nominale di 1 nm nell'intervallo 360-999 nm. Il confronto è stato effettuato con misure di tipo SPINC (componente speculare inclusa) [4].

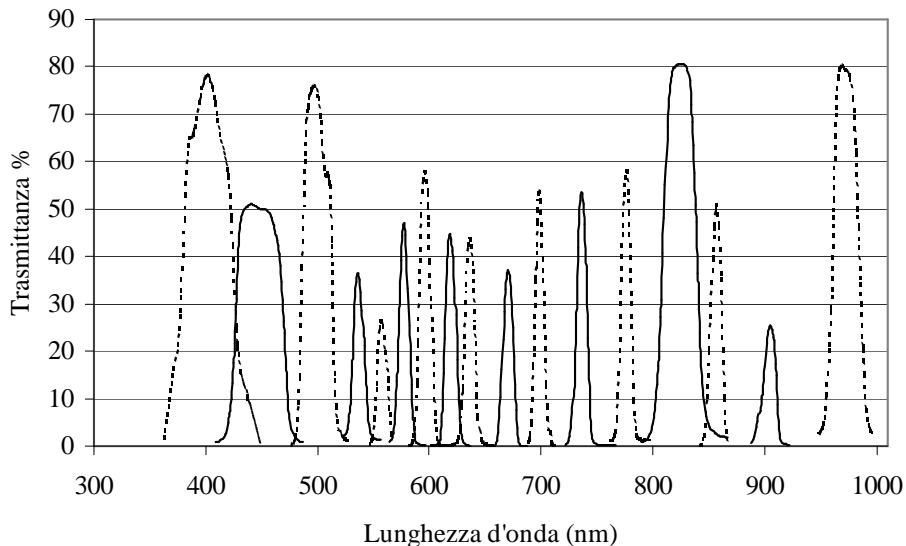


Fig. 2 – Filtri interferenziali nella telecamera NIR2000

2.2 Lo scanner multispettrale CRISATEL

Un sistema per l'imaging multispettrale ad alta risoluzione spaziale è stato sviluppato nell'ambito del progetto europeo CRISATEL. Il sistema, di seguito denominato CRISATEL è composto da una telecamera multispettrale basata sul sistema a filtri anteposti al rivelatore e da un sistema di illuminazione speciale studiato per il particolare tipo di ripresa a scansione [5-6]. Questo sistema nasce da una modifica di uno scanner tre-bande denominato Jumboscan e dal relativo sistema di illuminazione Jumbolux fig. 3. Il Jumboscan è una camera dotata di sensore CCD costituito da un array lineare di 12000 elementi al silicio. Questo rivelatore è montato verticalmente e viene spostato con estrema precisione meccanica (ripetibilità di 5 micron) da un motore passo-passo in modo da poter scandire fino a 30.000 posizioni orizzontali. In questo modo si possono ottenere immagini in una sola ripresa fino a 12.000x30.000 pixel reali.

La camera nella versione multispettrale è stata dotata di un dispositivo rotante con di 13 filtri interferenziali passabanda che vengono posizionati davanti al rivelatore. Dieci filtri a banda di 40 nm coprono la porzione di spettro del visibile e 3 con banda di 100 nm quella dell'infrarosso.

I filtri interferenziali utilizzati seguono un criterio differente rispetto al sistema NIR2000: la forma della curva di trasmittanza non è affatto gaussiana e presenta piuttosto una forma a dente, le bande sono equidistanziate ma si sovrappongono leggermente in modo da non lasciare alcuna sezione dello spettro non coperta. I filtri sono stati prodotti dalla Melles Griot e le relative curve di trasmittanza

riportate in fig 4 sono state misurate con uno spettrofotometro Hitachi U-4000 al Victoria and Albert Museum di Londra.

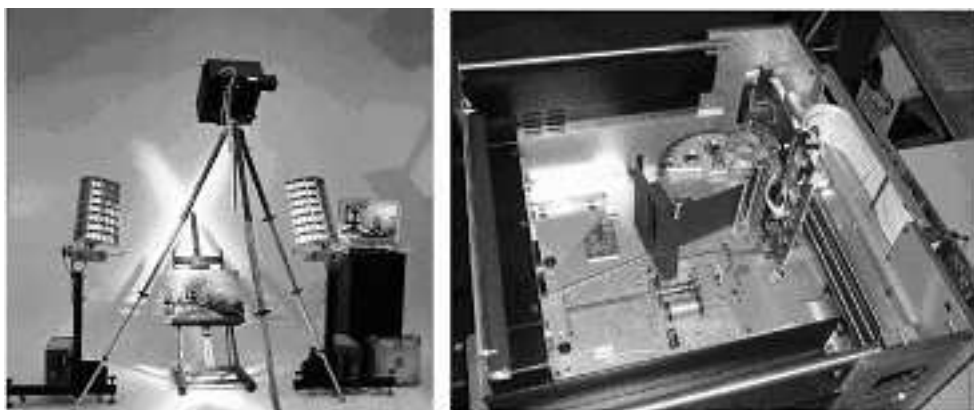


Fig. 3 – Sistema multispettrale CRISATEL con illuminatori Jumbolux in opera (a sinistra) e interno della telecamera Jumboscan con cilindro portafiltri (a destra)

Il progetto CRISATEL nasce con l'obiettivo della digitalizzazione dei dipinti e quindi il sistema di illuminazione è stato studiato per garantire la minima illuminazione complessiva dell'opera nel corso delle riprese. Il sistema Jumbolux è costituito quindi da due lampade simmetriche che illuminano attraverso un sistema di specchi solo la striscia di opera in scansione muovendosi sincronicamente con il rivelatore all'interno della camera.

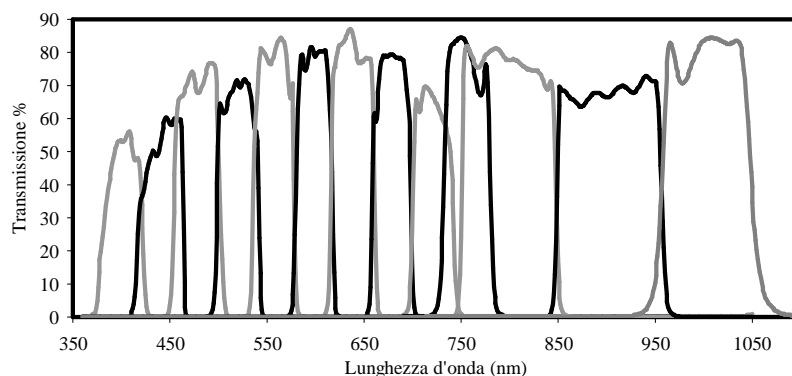


Fig. 4 – Serie di filtri interferenziali Melles-Griot impiegati nel sistema CRISATEL

Nella geometria di acquisizione del sistema CRISATEL il filtro, costituito un sottile parallelepipedo, e il rivelatore durante la scansione del piano immagine non sono sempre complanari contrariamente al sistema NIR2000. Questo può modificare la banda di trasmittanza dei filtri a causa dello spostamento angolare

lungo l'asse di scansione. Con lo spettrofotometro citato è stato misurato questo effetto. Lo shift misurato, verso il blu, è di circa 1.5 nm per angoli di incidenza di 5° e arriva fino a 4,5 nm a 10° senza nessuna apparente distorsione dello spettro di trasmissione (fig 5). Nel sistema CRISATEL l'angolo massimo di incidenza è di circa 7° con uno shift corrispondente di 3 nm.

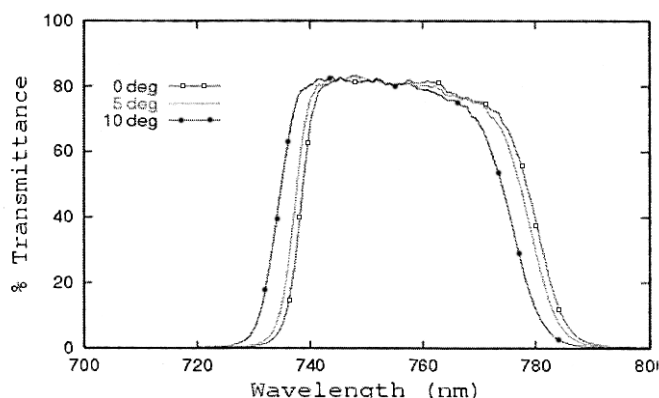


Fig. 5 – Spostamento dello spettro di trasmittanza del filtro 760 al variare dell'angolo di incidenza della luce

Le differenti posizioni del piano focale dovute al cambiare della lunghezza d'onda vengono automaticamente aggiustate dal sistema di controllo della telecamera mediante un set di valori focali preventivamente determinati dallo sperimentatore per le condizioni di ripresa (diaframma e distanza del campo di ripresa). A causa di questo aggiustamento si avrebbe come risultato finale che le immagini presentano una dimensione leggermente diversa per ogni lunghezza d'onda, per ovviare a questo fenomeno il sistema trasla lungo la direzione focale l'intero corpo macchina al variare della lunghezza d'onda. Si ottengono in questo modo 13 immagini multispettrali perfettamente sovrapponibili del quadro ripreso.

Il sistema di illuminazione è composto da due proiettori ellittici posizionati ai due lati dell'oggetto in esame. Ogni proiettore ruota sul proprio asse e proietta un fascio di luce verticale sulla superficie del dipinto. La sincronizzazione delle due lampade fra di loro e con il sistema di scansione fa sì che il fascio illumini il dipinto solo nell'area ripresa dal CCD nell'istante esatto della scansione. Le lampade usate per l'illuminazione sono una serie di lampadine poste all'interno dello specchio ellittico. Sono state impiegate lampade alogene a filamento e lampade HQI.

3. Risultati

3.1 Misure con il NIR 2000

Risultati delle prove condotte su una tavoletta fig. 6 con stesura a olio di alcuni pigmenti ritenuti interessanti per lo studio della pittura veneta rinascimentale sono

mostrati qui di seguito. Al fine di verificare eventuali disuniformità nella stesura sono state selezionate 5 ROI all'interno di ciascuna stesura di pigmento. E' stata inoltre applicata la procedura di normalizzazione su un bianco topografico (BT) di riferimento per la correzione delle disuniformità di illuminazione [4,8].

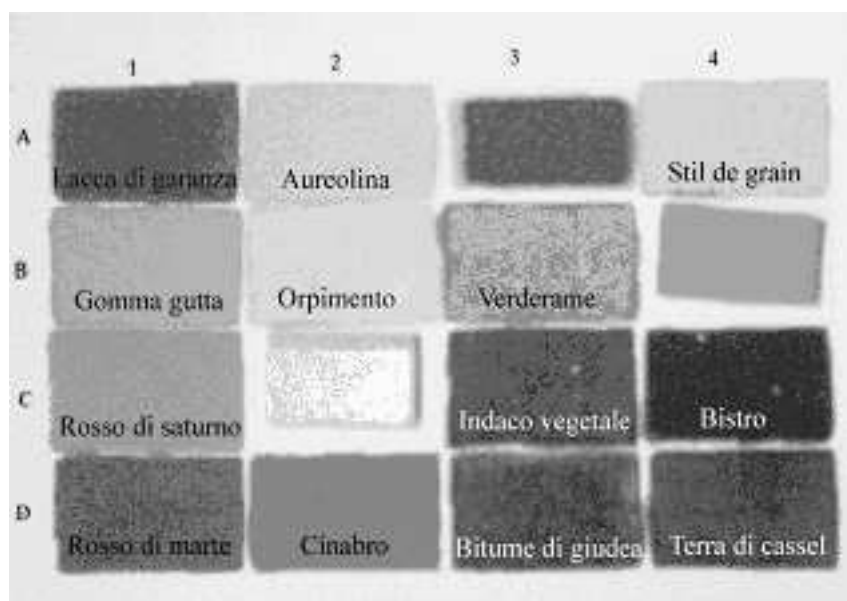


Fig. 6 – Tavola con stesure di pigmenti antichi in legante a olio

Nelle ipotesi di bianco topografico ideale, l'immagine acquisita del pannello bianco dipende dalle caratteristiche del filtro interferenziale, dell'ottica e del rivelatore. Al fine di caratterizzare complessivamente questi fattori sono state acquisite due serie di immagini di BT con e senza un filtro attenuatore (polaroid), posto davanti all'ottica di raccolta. I valori della deviazione standard dal valore di grigio medio misurato sull'immagine di BT sono mostrati in Tab. 2. Il valore fuori norma del filtro 671 nm è imputabile a un danneggiamento fisico del filtro interferenziale. Questo non viene corretto dalla procedura di normalizzazione su BT, perché il fattore di correzione ottenuto per ogni pixel in una situazione di bianco topografico fortemente disomogeneo produce, nell'immagine analizzata, aree dei riferimenti campione con valori prossimi alla saturazione ed uno spostamento delle curve di calibrazione in una regione in cui la risposta del rivelatore non è più lineare. I risultati corrispondenti al filtro a 671nm sono stati scartati nel calcolo dell'errore ma vengono comunque riportati nei grafici.

L'efficacia del filtro attenuatore può essere apprezzata osservando come varia l'errore sull'immagine nelle due configurazioni (tab.1) e dal confronto delle due serie di dati (figura 7A e 7B).

I valori di Riflettanza ($R^T\%$ e $R^T_A \%$) ottenuti su 6 pigmenti (Aureolina, Verderame, Cinabro, Indaco vegetale, Rosso di saturno e Ocra-B4), con il NIR2000, relativamente a misure senza e con filtro attenuatore, e quelli ($R^{SF}\%$) ottenuti con uno spettrocolorimetro a contatto (Minolta 2600d) sono riportati, rispettivamente, nelle figg.8-11. Nei grafici, la linea continua rappresenta lo spettro di “riferimento,” mentre i punti, relativi alle misure con il NIR2000, sono denominati con la coordinata del pigmento nella tavoletta (cfr fig. 6) seguito dal numero d’ordine della ROI considerata.

Tab. 1 – Confronto tra gli errori (scarto quadratico medio) su uno standard bianco 99% uniforme

Lunghezza d’onda (nm)	σ senza attenuatore	σ con attenuatore
420	0,71	0,19
448	0,50	0,01
498	9,81	0,09
537	0,69	0,18
558	0,55	0,06
578	0,46	0,03
598	4,38	0,05
620	0,70	0,01
637	0,50	0,04
671	1,57	1,80
699	5,67	0,11
737	1,79	0,08
776	0,40	0,12
857	0,69	0,19
905	1,64	0,47
972	1,22	0,96

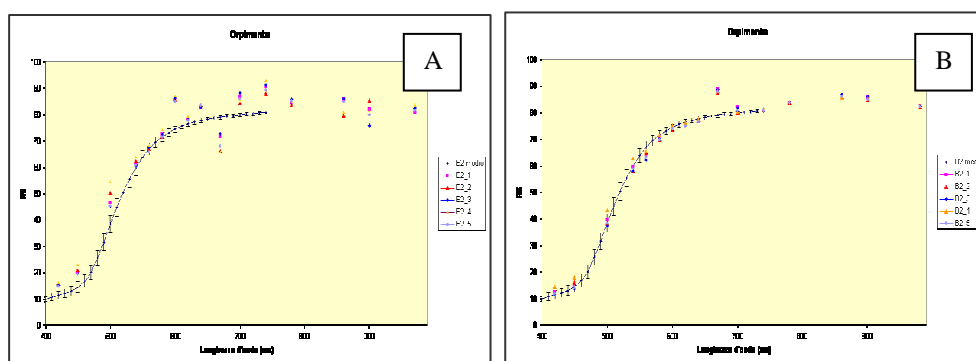


Fig. 7 – Confronto fra le misure effettuate sul pigmento Orpimento nelle due configurazioni: A) senza e B) con filtro attenuatore

Il grado di precisione delle “misure a distanza” è stato valutato considerando lo scarto quadratico medio, Δ , fra le due serie di misure fra 400 e 740 nm (Intervallo di misura dello spettrofotometri Minolta), calcolato tramite la seguente espressione:

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^{11} (R_i^{SF} \% - R_i^T \%)^2}$$

Questi valori, calcolati tra lo spettro ottenuto col metodo telemetrico, nelle due configurazioni (T e A), e lo spettro ottenuto con spettrofotometro a sfera integratrice, sono riportati in Tab.3. Quello che si osserva è che, nella gran parte dei casi, la presenza di un filtro attenuatore migliora sensibilmente la misura; se ciò non avviene in generale la causa è da ricercarsi principalmente nel cattivo stato dei filtri. Fa eccezione il bistro che presenta grosse disuniformità di stesura.

Tab. 2 – Scarti quadratici medi tra lo spettro ottenuto col sistema NIR2000 nelle due configurazioni, con e senza filtro attenuatore-polarizzatore, e lo spettro ottenuto con spettrofotometro a sfera integratrice

Pigmento	Δ senza attenuatore	Δ con attenuatore
Lacca di garanza	16,18	3,61
Aureolina	16,85	5,46
Verde acrilico	15,89	5,43
Stil de Grain	9,45	28,26
Gomma gutta	15,95	4,28
Orpimento	21,36	4,15
Verderame	16,93	3,38
Ocra acrilico	8,68	9,60
Rosso di Saturno	21,04	4,40
Giallo acrilico	19,94	10,46
Indaco vegetale	10,26	5,88
Bistro	7,46	9,67
Rosso di Marte	16,54	4,13
Cinabro	21,35	5,35
Bitume di Giudea	12,30	3,21
Terra di Cassel	12,63	7,50

3.2 Il sistema CRISATEL

Lo scopo del progetto CRISATEL è innanzitutto la possibilità di ottenere dalla sequenza di immagini multispettrale una fedele riproduzione a colori ad alta definizione. Solo in un secondo piano sono poste le esigenze di studio e identificazione dei pigmenti. Vengono mostrati i risultati ottenuti sui pigmenti delle “mire di colore Pebeo” impiegati per la calibrazione del colore nelle immagini multispettrali. La calibrazione del colore può essere infatti effettuata attraverso delle mire colorimetriche di riferimento misurate con uno spettrofotometro

Minolta. Una matrice di corrispondenza permette di correggere le differenze fra i valori di riflettanza degli standard di colore misurati della telecamera e quelli acquisiti con il sistema a contatto [7].

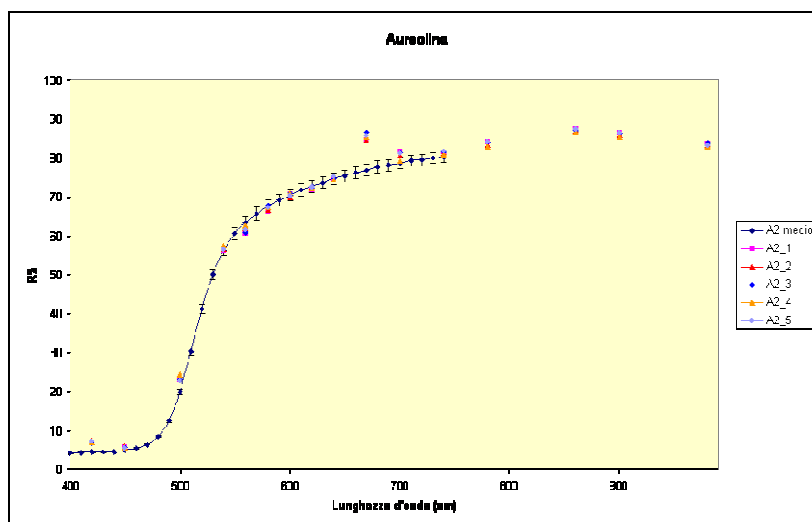


Fig. 8 – Spettro del pigmento Aureolina

Alcuni risultati significativi ottenuti dall'analisi multispettrale con la camera CRISATEL sono riportati nei grafici (figura 12) per le stesure di alcuni pigmenti puri o misti impiegati come mire colorimetriche di riferimento.

Nelle curve di riflettanza spettrale degli otto campioni della mira Pebeo la linea rappresenta la misura effettuata con lo spettrocolorimetro Minolta 2600d e i punti i dati ottenuti con la telecamera per i 13 filtri utilizzati. In ascissa la lunghezza d'onda fra 400 e 1000nm. In ordinata la riflettanza spettrale fra 0 e 90%.

In tabella 3 per alcuni campioni selezionati sono riportati il ΔE_{94} (distanza nello spazio colorimetrico CIELab secondo la definizione CIE del 1994) e lo scarto quadratico medio fra la serie di dati ottenuta con il sistema CRISATEL e i corrispondenti valori sulla curva di riferimento misurata con lo spettrocolorimetro Minolta 2600d fra 400 e 700 nm.

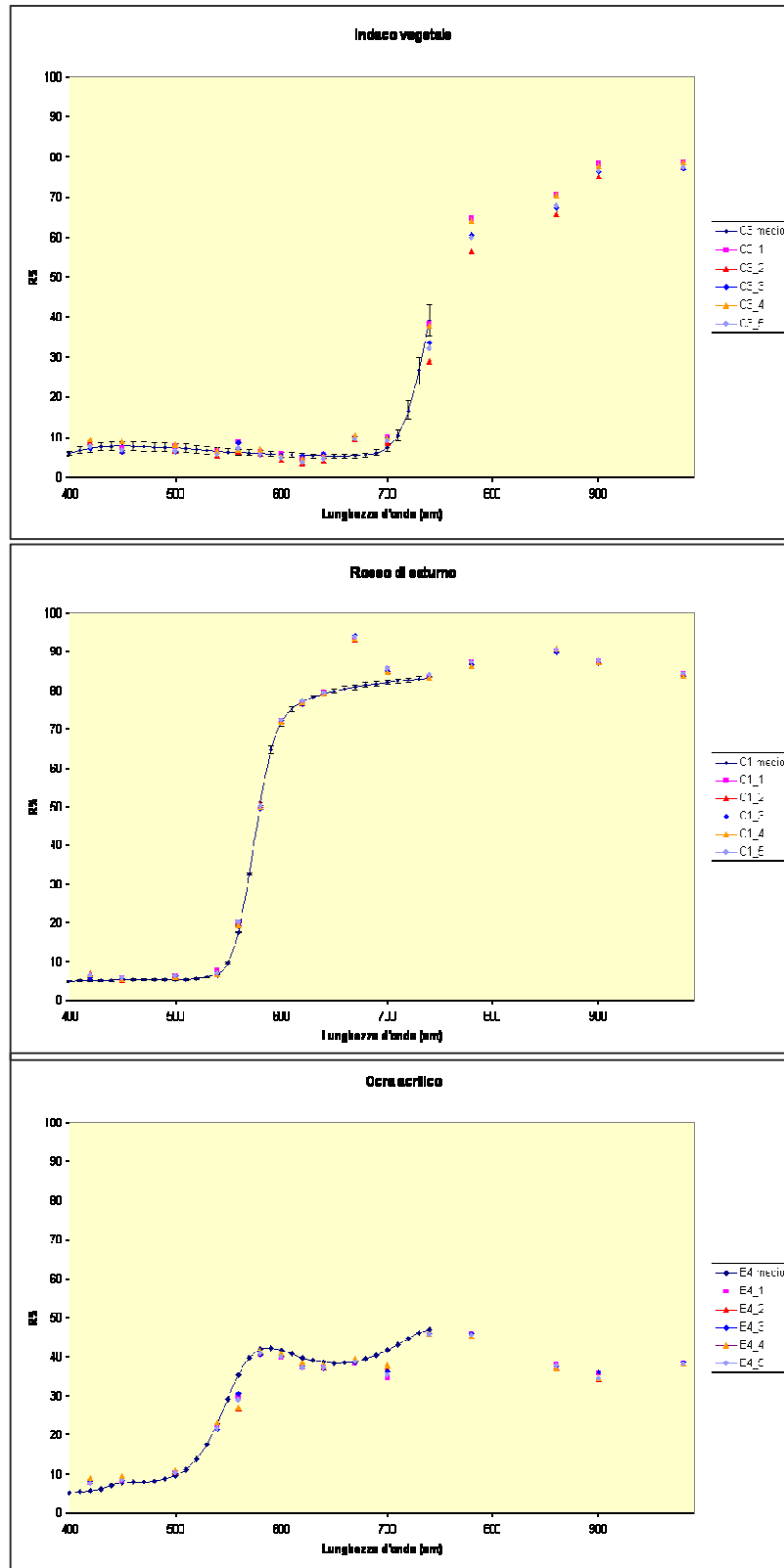


Fig 9, 10, 11 – Spettro dei pigmenti: ocra, rosso di saturno e indaco

Tab. 3 – Confronto in termini di ΔE_{2000} e di scarto quadratico medio fra i dati ottenuti col sistema CRISATEL e quelli con uno spettrocolorimetro Minolta

Campioni di pigmento (coordinate e composizione)	Scarto quadratico medio	$\Delta E_{Lab_{94}}$
1,4: ematite	0,4%	0,51
2,7: goethite	1,1%	1,91
4,9: giallo acetanile + giallo arilide + verde ftalo + bianco di titanio	1,1%	0,76
5,3: solfocromato di piombo e verde ftalo	0,8%	1,34
5,9: titanato di Co, Ni, Zn + bianco di titanio	0,8%	0,91
6,7: blu e verde ftalo e + bianco di titanio	1,7%	2,34
7,5: viola diocianina + verde ftalo + bianco di titanio	1,0%	1,21
9,7: indigo + bianco di titanio	2,4%	0,95

4. Conclusioni

L'impiego di sistemi a telecamera e filtri interferenziali consente di ottenere anche in condizioni di illuminazione relativamente disomogenee una buona stima del fattore di riflessione di superfici pittoriche. Il confronto dei risultati ottenuti con due strumentazioni equipaggiate con set di filtri interferenziali concettualmente differenti ha consentito di verificare il grado di confidenza delle misure in Spettroscopia d'Immagine sia per scopi di misura affidabile del colore che di ricostruzione di firme spettrali già con un numero di campionamenti ridotto a una decina di lunghezze d'onda nel visibile. L'impiego di dispositivi sempre più semplificati per lo studio degli spettri di riflettanza dei pigmenti pittorici può portare rapidamente all'affermarsi delle tecniche di SI per la diagnostica e lo studio con tecniche non invasive sulle opere d'arte.

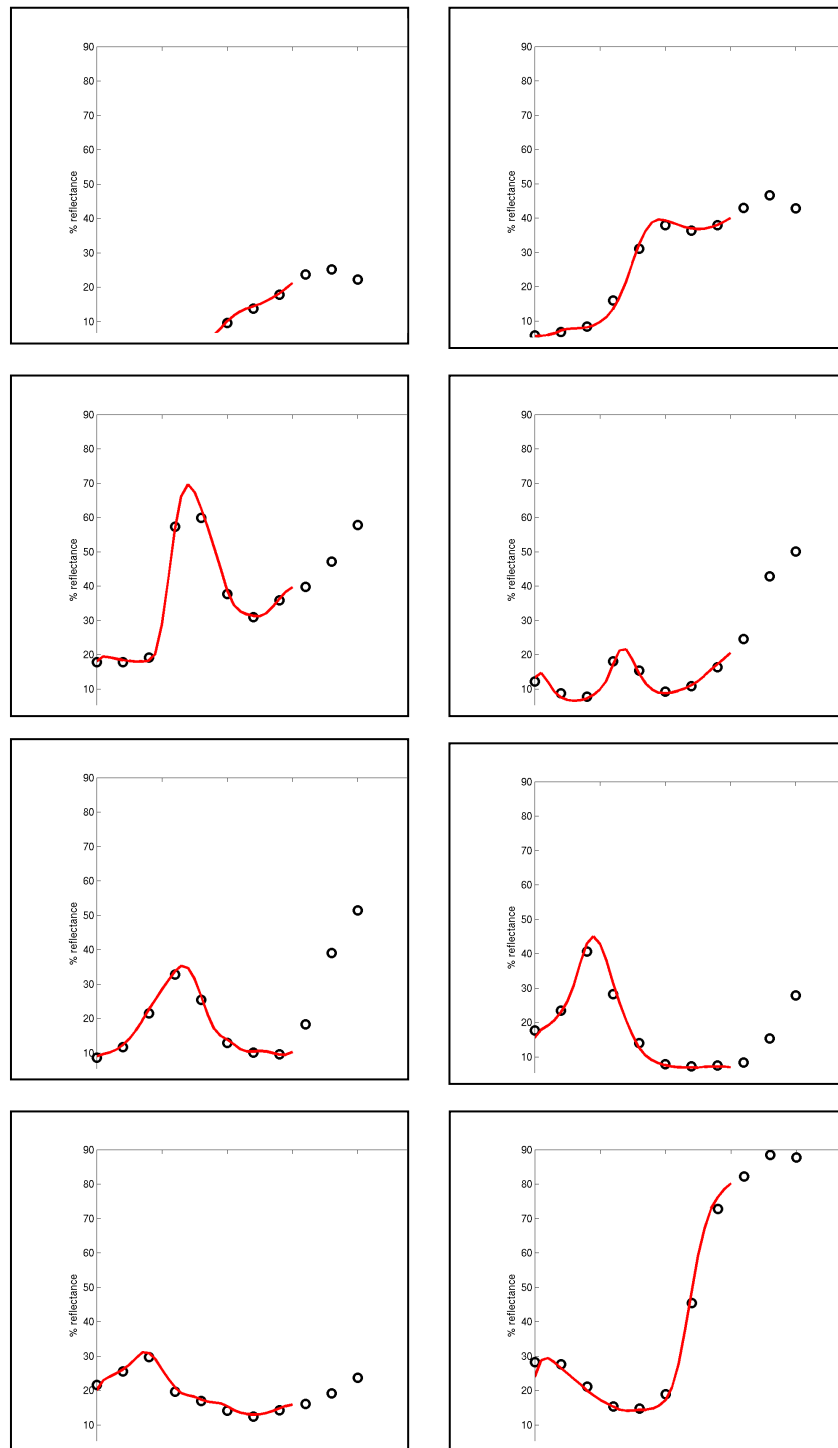


Fig 12 – Spettri di riflettanza ottenuti su alcuni campioni di pigmento (Mire Pebeo) in legante acrilico. I punti sono ottenuti per i 13 filtri della camera crisatel, la linea continua si riferisce a misure effettuate a contatto con uno spettrofotocolorimetro Minolta 2600d (risoluzione 10 nm)

Bibliografia

1. Fermi F., Antonioli G., Oleari C. and Reverberi R. (2004): "Spectrophotometric scanner for imaging of paintings and other works of art." CGIV 2nd European Conference on colour in Graphics, Imaging and Vision, p.219.
2. Hyvarinen T., Herrala E. and Dall'Ava A.(1998): "Direct sight imaging spectrograph: a unique add-on component brings spectral imaging to industrial application." Proc. SPIE, Vol. 32.
3. Bruni S., Cariati F., Consolandi L., Galli A., Guglielmi V., Ludwig N., Milazzo M. (2002): "Field and laboratory spectroscopic methods for the identification of pigments in a northern Italian eleventh century fresco cycle." *Applied Spectroscopy*, vol 56, 7, p.827.
4. Ludwig N., "Tecniche di spettroscopia d'immagine." Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Firenze, 2004, cap. 4.
5. Ribes A., Brettel H., Schmitt F., Liang H., Cupitt J. and Saunders D. (2003): Color and multispectral imaging with the CRISATEL multispectral system. PICS-IS&T03 The digital Photography Conference, p.215.
6. Ribes A., Schmitt F. and Brettel H.(2004): Calibration and spectral reconstruction for an art painting multispectral acquisition system. CGIV 2nd European Conference on colour in Graphics , Imaging and Vision, p.403.
7. Liang H., Cupitt J., Saunders D. and Benchouika M. .(2004):: A new multispectral imaging system for examining painting. CGIV 2nd European Conference on colour in Graphics , Imaging and Vision, p.229.
8. Consolandi L.M., De Maria L., Ludwig N., Milazzo M. (2000): "Sistema portatile telefotometrico per l'identificazione di pigmenti pittorici. Elettroottica 2000. 6° convegno nazionale: (pp. 181-184).
9. Berns R.S., Imai F.H.(2002): The use of multi-channel visible spectrum imaging for pigment identification. ICOM Committee for conservation, 13th triennial meeting, 2002.

Misure spettrofotometriche per conservare le opere d'arte contemporanea

FERRUCCIO PETRUCCI

DIPARTIMENTO DI FISICA DELL'UNIVERSITÀ DI FERRARA

E

INFN, SEZIONE DI FERRARA

Via Paradiso, 12 – 44100 Ferrara, Tel. 0532 974264, Fax: 0532 762057

petrucci@fe.infn.it

1. Quali problemi di conservazione per l'Arte Contemporanea?

Forse molti sono convinti che le opere d'arte contemporanea, proprio perché di recente creazione, non necessitano di interventi di restauro, né di prassi conservative. Purtroppo questo pregiudizio è sbagliato all'origine: qualsiasi manufatto, anche se realizzato con i materiali più durevoli, può andare incontro proprio nei primi anni della sua vita ai cambiamenti più rilevanti.

È infatti in questa fase – che può durare da pochi mesi a varie decine di anni – che l'opera, interagendo con l'ambiente che la ospita, può subire modifiche nella propria composizione materiale ed eventualmente nella propria struttura.

Queste modifiche possono essere lente e inavvertibili a chi ha sott'occhio quelle opere giorno per giorno, ma imporsi con allarmante evidenza in occasione del rinnovarsi di esposizioni pubbliche, a distanza di anni.

Tra i "rischi" più frequenti per un'opera d'arte [1], l'*accumulo di polvere* è forse il più banale e il meno insidioso, se il particolato che si deposita è chimicamente neutro e se la superficie del dipinto è sufficientemente impermeabile. L'effetto visibile è generalmente un'attenuazione del contrasto e la diagnostica più usata in questo caso è la Fotografia in Luce Radente.

Danni meccanici dovuti a *traumi da trasporto* o a *detensionamento del supporto* sono di solito facilmente diagnosticabili e legati alla storia commerciale dell'opera.

Altri inconvenienti, come la *scropolatura precoce* dovuta a eccesso di solventi o a miscele di materiali fra loro non compatibili, trovano la loro origine nella formazione stessa dello strato dipinto.

In genere sono le repentine variazioni di temperatura e di umidità relativa nell'ambiente-contenitore a produrre gli effetti più distruttivi e per questo si consiglia sempre, giustamente, di tenere sotto controllo i parametri microclimatici. Tuttavia, le variabili in gioco sono tante, soprattutto in presenza di opere polimeriche e con materiali di recente introduzione, che raramente si possono prevedere gli esiti, soprattutto quantitativamente.

Gli effetti forse più insidiosi, perché progressivi e inavvertiti su tempi brevi, sono l'*attenuazione del contrasto*, l'*evanescenza dei colori*, i *viraggi cromatici*.

2. Quali diagnostiche per l'Arte Contemporanea?

Si va facendo strada la convinzione che, in particolare per le opere d'Arte Contemporanea sia necessaria una *manutenzione* periodica, piuttosto che una prassi basata su episodici interventi di restauro [1, 2]. Almeno per i seguenti motivi:

- ∞ i materiali ed il loro invecchiamento non sono ben noti;
- ∞ i processi di degrado sono spesso irreversibili;
- ∞ le alterazioni sono solitamente progressive e inavvertite in tempi brevi;
- ∞ l'intervento porta spesso ad ulteriore degrado.

In questa prospettiva acquistano rilievo le tecniche in grado di eseguire un controllo periodico, squisitamente non-invasivo, delle opere.

Le varie tecnologie di Spettroscopia di Riflettanza rientrano chiaramente in questa categoria: la possibilità di tenere sotto osservazione periodica lo strato dipinto nelle condizioni di normale conservazione e senza minimamente influire su di esso, è il punto di maggiore forza delle varie metodiche che consentono la misura spettrale della luce riflessa.

Colorimetria, Spettrofotometria con sfera integratrice, Spettroscopia per Immagini offrono, ciascuna, vantaggi e peculiarità.

3. Un esempio di applicazione

Le tre tecniche citate sono state applicate sullo stesso campione di dipinto, realizzato con materiali e procedure attuali e sottoposto ad invecchiamento artificiale. In Fig. 1 è mostrato il rettangolo (di dimensioni 7x6 cm²) dipinto con Bianco di Titanio in Olio di Lino e ricoperto per metà con Vernice Griffin per pittura ad olio.

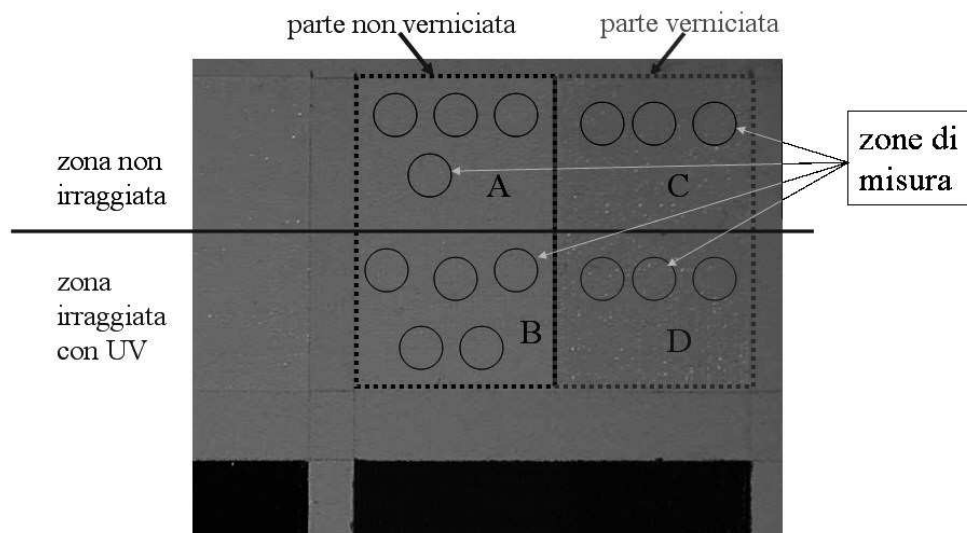


Fig. 1 – Dipinto di test

La metà inferiore del rettangolo è stata sottoposta ad irraggiamento UV+IR con una lampada solare da 650 W alla distanza di 1 metro, per 376 ore complessivamente. La parte superiore è stata protetta durante l'irraggiamento.

Questo trattamento ha generato una differenza visibile nell'aspetto delle zone irraggiate e non. In particolare, la parte verniciata, che appare ingiallita rispetto al colore non verniciato, ha subito, con l'irraggiamento, un'accentuazione di tale caratteristica. Il rettangolo originale di test risulta così suddiviso in 4 sottozone. Su queste sono state eseguite 16 misure di tipo SPEX, con UV incluso e illuminante D65. Lo strumento è uno Spettrofotometro Minolta CM2600d con software Spectramagic 3.6. L'integrazione è avvenuta su cerchi di diametro 8mm, pure mostrati in Fig. 1.

La prima applicazione colorimetrica è mostrata in Fig. 2, dove i risultati delle 16 misure sulle varie zone del campione sono rappresentati nel piano a^*b^* .

Le misure sulle parti verniciate C, D si distinguono chiaramente e altrettanto evidente risulta, su queste, l'effetto dell'irraggiamento, che le ha nettamente separate. Più debole – e di segno opposto – risulta la separazione indotta dall'irraggiamento sulle parti non verniciate A, B.

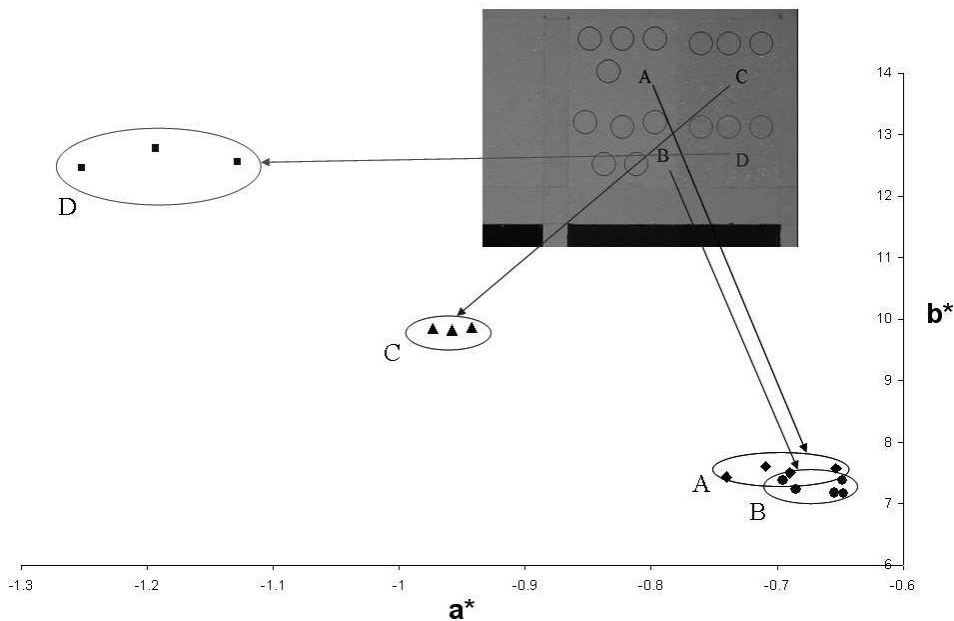


Fig. 2 – Rappresentazione delle misure colorimetriche sul piano a^*b^*

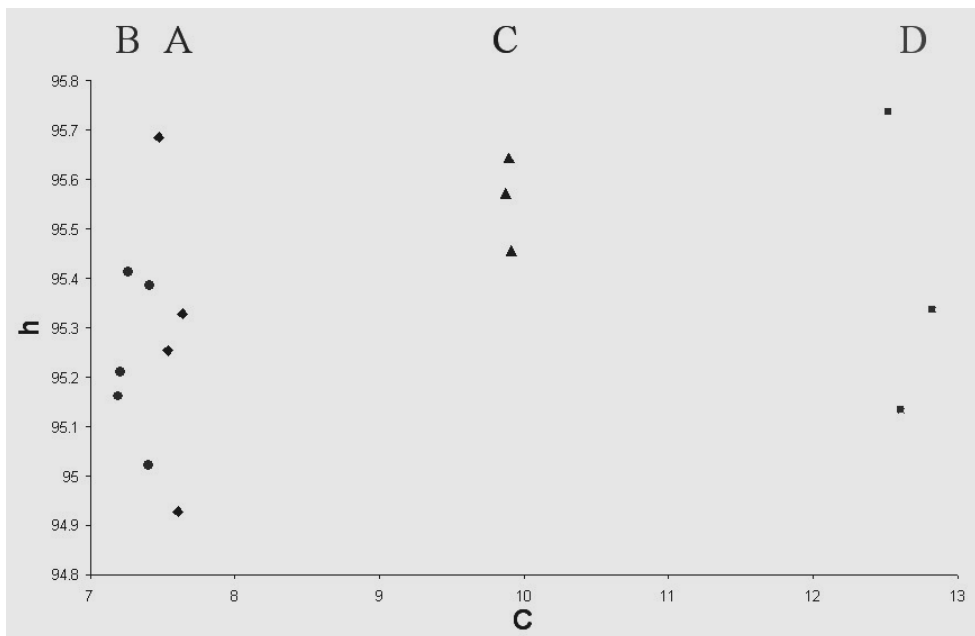


Fig. 3 – Rappresentazione delle misure colorimetriche nel piano Ch

Grazie al significato colorimetrico degli assi a^* e b^* e osservando che la separazione tra i punti di misura è 10 volte maggiore sull'asse b^* che sull'asse a^* , possiamo immediatamente interpretare l'effetto della verniciatura come ingiallimento, intensificato dal successivo irraggiamento.

La rappresentazione nel piano Ch, visibile in Fig. 3, ribadisce il risultato precedente. Le misure sulle zone verniciate C e D si separano bene sull'asse del croma, con un progressivo spostamento verso il giallo da A (zona non verniciata e non irraggiata) a C (verniciata) a D (verniciata e irraggiata). La separazione tra A e B (non verniciata, irraggiata) è qui meglio visibile, ma pur sempre di un ordine di grandezza inferiore e di segno opposto.

Gli spettri completi delle stesse zone di misura, ottenuti con la Spettrofotometria con Sfera Integratrice, mostrano molto bene la complessiva riduzione di riflessione diffusa dovuta alla vernice e l'attenuazione nella regione 400-500 nm generata dall'irraggiamento.

Le misure presentate in Fig. 4 hanno una risoluzione spettrale di 10 nm e sono state eseguite in geometria $d/8^\circ$.

È evidente la maggiore quantità di informazioni, ma è altrettanto evidente la difficoltà di sintetizzare i risultati in frasi e concetti immediatamente comprensibili, come è stato fatto con la Colorimetria.

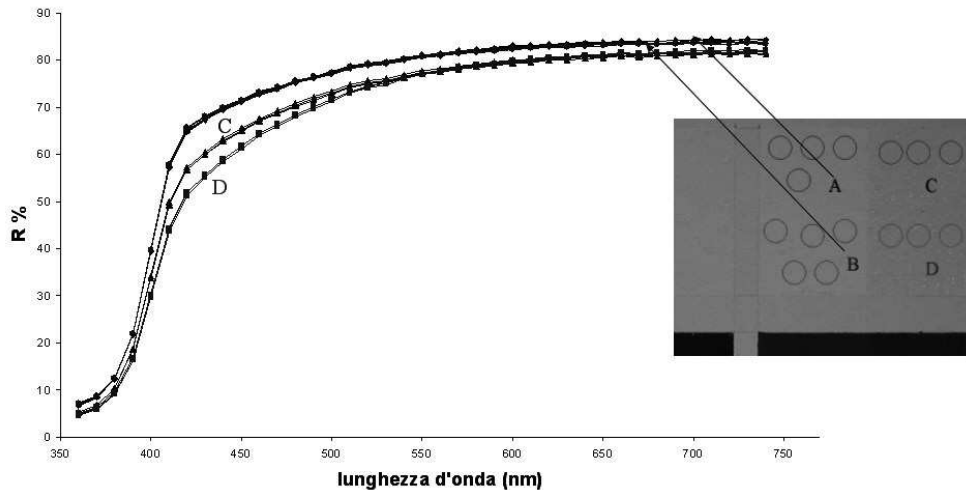


Fig. 4 – Spettri di Riflettanza Diffusa

La elaborazione dei dati spettrofotometrici con un'analisi multivariata come l'Analisi delle Componenti Principali (PCA) [3] risolve questo problema. In Fig. 5 i 16 spettri, rappresentati da un punto ciascuno, sono inseriti nel grafico delle prime 2 Componenti Principali: i 4 cluster in cui appaiono riuniti i punti corrispondono esattamente alle 4 zone fisicamente identificabili sul campione.

La maggiore sensibilità della Spettrofotometria trova quindi la massima esaltazione, in quanto anche i due gruppi delle zone non verniciate, A e B, risultano ora ben distinguibili. Per contro, i due assi principali non offrono la facile ed intuitiva interpretazione degli assi colorimetrici.

L'approccio qualitativo della Spettroscopia per Immagini è visibile in Fig. 6: con una semplice elaborazione grafica dell'immagine digitale acquisita a 450 nm le 4 zone del rettangolo di test appaiono immediatamente evidenti e separate.

Com'è noto, il metodo di Spettroscopia per Immagini consiste nell'acquisizione digitale di una sequenza di immagini dello stesso soggetto a varie lunghezze d'onda [4].

Nel caso considerato, l'acquisizione è stata eseguita con lo strumento NIR1000 della Opto-Lab di Milano, dotato di 15 filtri interferenziali con larghezza di banda 10 nm, da 410 a 1060 nm. La scheda di digitalizzazione a 8 bit era la DT3155 della Data Translation. Un'ulteriore applicazione di questa tecnica mostra con evidenza ancora maggiore le sue potenzialità.

In Fig. 7 sono visibili 3 rettangoli di test per il Bianco di Titanio: legato con resina acrilica, con resina alchidica e infine con olio di lino.

Una delle immagini – quella a 450 nm – sottoposta a level stretching permette di identificare immediatamente le variazioni indotte da vernici e irraggiamento in tutti

e tre i riquadri, anche in quelli che non appaiono affatto diversificati all'occhio nudo.

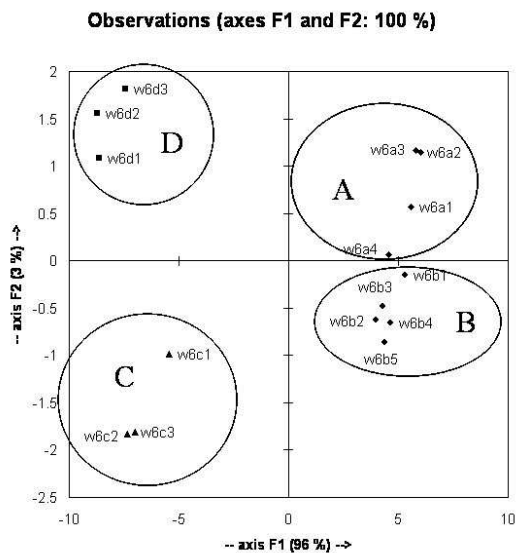


Fig. 5 – PCA degli spettri di Fig. 4

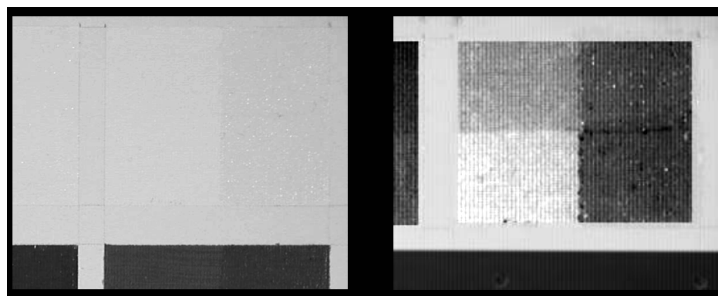


Fig. 6 – Fotografia del riquadro di Bianco di Titanio in olio di lino ed elaborazione grafica (level stretching) dell'immagine digitale acquisita a 450 nm

4. Spettroscopia per Immagini per il monitoraggio di opere d'arte

Come si è visto, per ottenere risultati qualitativi con la Spettroscopia per Immagini è spesso sufficiente elaborare una delle immagini acquisite. Per ottenere misure quantitative occorre includere nelle immagini stesse degli standard di riflettanza ed eseguire opportune calibrazioni e interpolazioni numeriche.

In questo modo la metodica fornisce misure del Fattore di riflessione Spettrale di ogni punto dell'immagine acquisita, alle varie lunghezze d'onda. Si propone quindi

come una sorta di Spettrofotometria senza contatto, su ampie zone del dipinto anziché per punti.

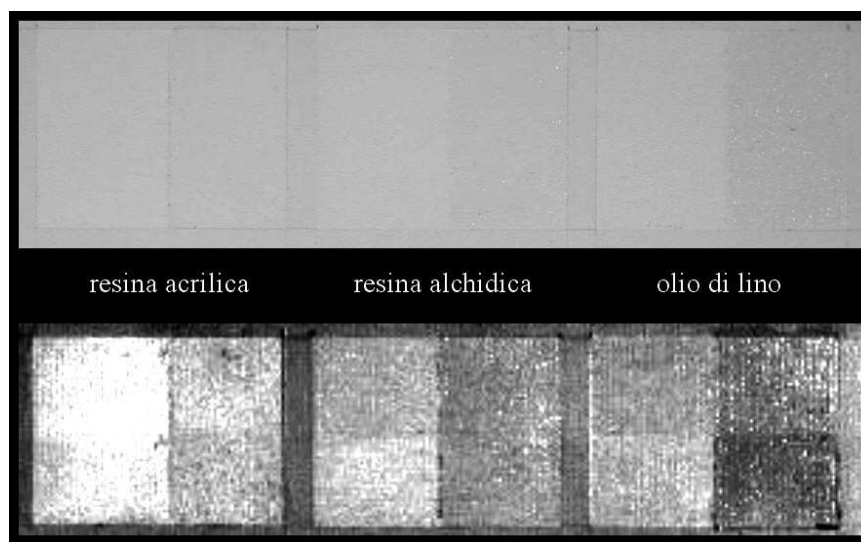


Fig. 7 – Fotografia dei riquadri di Bianco di Titanio in vari leganti ed elaborazione grafica (level stretching) dell'immagine digitale acquisita a 450 nm

Sono proprio questi i peculiari vantaggi di questa tecnica ai fini del controllo periodico di opere d'arte contemporanea: eseguire le riprese a distanza e svincolare la misura dal campionamento a punti.

Il metodo di monitoraggio consiste nel confronto fra le misure del Fattore di Riflessione Spettrale eseguite a distanza di tempo sulle stesse zone del dipinto. Per queste misure non occorre tanto una estrema accuratezza, quanto una buona riproducibilità e una elevata sensibilità nel rilevamento delle differenze.

Per questo gli spettri ottenuti sono elaborati con l'Analisi delle Componenti Principali: il binomio Spettroscopia per Immagini + PCA può essere la scelta di elezione per rilevare precocemente le alterazioni dei materiali pittorici di recente introduzione.

Un esempio di questo genere di applicazione è mostrato in Fig.8, che raccoglie le misure eseguite in diversi anni, con lo stesso strumento e la stessa prassi, su campioni di Bianco di Titanio in legante alchidico. La rappresentazione grafica dei risultati delle PCA mostra chiaramente la variazione avvenuta nel tempo e indistinguibile ad occhio nudo.

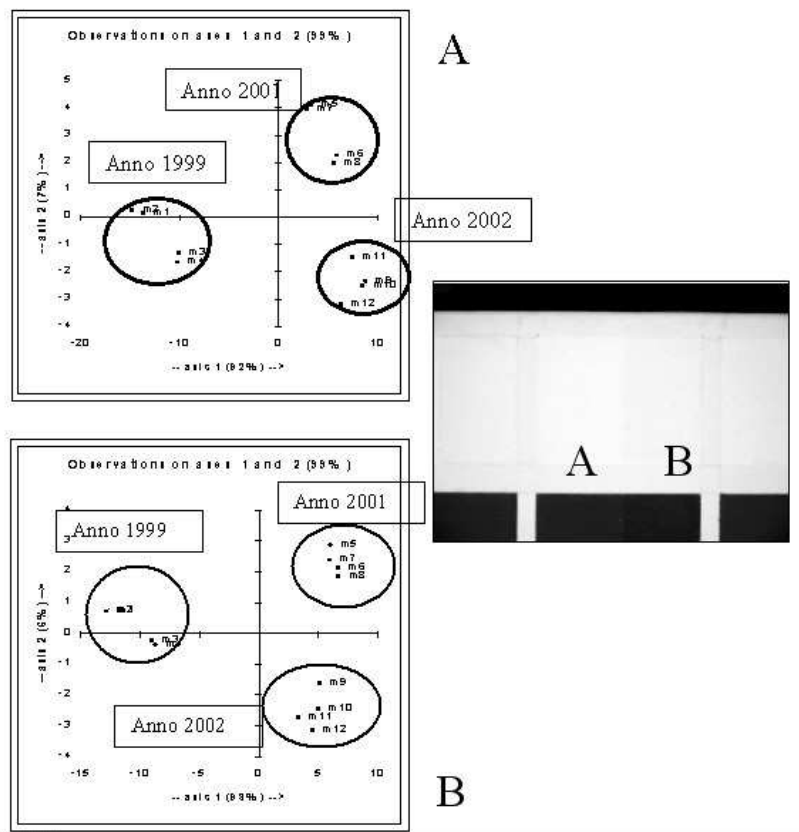


Fig. 8 – PCA delle misure rilevate in tempi successivi con la Spettroscopia per Immagini su Bianco di Titanio in legante alchidico.

A: parte non verniciata; B: parte trattata con vernice Finale

5. Conclusioni

Le tre tecniche spettrofotometriche che sono state prese in considerazione per il controllo di opere d'arte contemporanea, al fine di evidenziare precocemente alterazioni e viraggi cromatici sono idonee allo scopo, con diverse caratteristiche.

La Colorimetria offre una efficace sintesi dei risultati delle misure, con una semplice ed intuitiva interpretazione ed una immediata comparabilità, ma soffre di una limitata sensibilità.

La Spettrofotometria con Sfera Integratrice è sicuramente la tecnica più accurata ed affidabile, avendo come limiti solo la necessità di misure a contatto e su campionature di punti. Il trattamento dei dati con la PCA supera, infatti, la difficoltà di sintetizzare grandi moli di dati spettrali.

La Spettroscopia per Immagini, per quanto di limitata accuratezza e appesantita da una complessa procedura di calibrazione, mantiene i grandi vantaggi di non

richiedere neppure il contatto con la superficie dell'opera e di non limitarsi a misure per punti.

Bibliografia

1. G. Scicolone, *Il restauro dei dipinti contemporanei*, Nardini Editore, 2002
2. U. Baldini, *Teoria del restauro e unità di metodologia*, Nardini Editore, 1988
3. F. Murtagh, A. Heck, *Multivariate Data Analysis*, ASSL, Dordrecht, 1987
4. F. Petrucci, "Spettroscopia per immagini applicata alla conservazione di dipinti contemporanei" in: A. Castellano, M. Martini, A. Sibilìa, *Elementi di Archeometria*, EGEA Italia, Milano, 2002.

Colorimetria multispettrale per la qualità della viticoltura in Franciacorta

FAUSTO CAMPOSTRINI, FLAVIO SERINA

CONSORZIO PER LA TUTELA DEL FRANCIACORTA,

Via Verdi, 53 – Erbusco (Brescia), Tel: 030.7760477, Fax: 030.7760467
ufficiotecnico@franciacorta.net

1. Precision Farming

Grazie a recenti applicazioni in campo vitivinicolo, comincia a diventare abbastanza familiare anche in Italia il termine Precision Farming, che può essere tradotto letteralmente, e con perfetta rispondenza di contenuti, in Agricoltura di Precisione.

Si tratta dell'applicazione in agricoltura di tecniche integrate ed a tecnologia avanzata, che consentono di gestire in modo puntuale l'azienda agricola, per ottimizzare le pratiche agricole, migliorare e prevedere le rese, pianificare la logistica.

Le risorse non tradizionali che vengono impiegate possono essere sintetizzate in tre ampie categorie:

- ☞ il telerilevamento multispettrale (cioè l'utilizzo e l'analisi di rilievi da aereo o da satellite che registrano come le diverse coltivazioni si comportano, in diverse lunghezze d'onda, in relazione all'assorbimento ed alla riflessione dell'energia solare);
- ☞ il posizionamento di precisione con sistemi satellitari (mediante strumenti che determinano la posizione in qualsiasi parte del mondo in un sistema unico di riferimento e garantiscono quindi di poter ritornare, in qualsiasi momento, esattamente nello stesso punto rilevato);
- ☞ i sistemi informativi geografici (sistemi informatici che consentono di archiviare ed elaborare tutti i dati relativi all'azienda ubicandoli nello spazio e nel tempo in modo da poter essere utilizzati come un modello virtuale, in scala, della realtà).

2. Telerilevamento e viticoltura

I viticoltori esperti sanno da sempre che grappoli raccolti da differenti aree all'interno dello stesso vigneto possono produrre vini di differente qualità.

Anche quando fattori biologici come cloni e vitigni sono identici, la qualità delle uve, il loro grado di maturazione ed il vino che si ottiene da esse sono influenzati, oltre che dalle diverse tecniche colturali, da sottili differenze nelle caratteristiche del vigneto che includono, ad esempio, la natura pedologica del suolo, le sue capacità drenanti, il microclima, la pendenza e l'esposizione.

Utilizzando tecniche di telerilevamento, si possono determinare le zone dove la copertura fogliare è troppo (o troppo poco) sviluppata ed i grappoli sono sottoesposti (o sovraesposti) alla luce del sole.

In fase di maturazione, la vite dedica la propria attività vegetativa unicamente alla maturazione dell'uva, ed è in questo momento che possono essere trovate ed applicate delle correlazioni fra lo stato complessivo della pianta e l'andamento della maturazione. Ubicando, secondo logiche opportune, dei campioni sui quali effettuare misure quantitative (Brix, acidità totale, ecc...), è possibile correlare ad esse le evidenze spettrali della vite (la capacità di riflessione/assorbimento dell'energia solare) e derivarne una mappatura anch'essa quantitativa delle caratteristiche delle uve.

In fase di raccolta delle uve, l'utilizzo di dati multispettrali consente ai viticoltori di pianificare le strategie di vendemmia per raccogliere i grappoli al momento più appropriato ed avviare alla vinificazione uve con analogo livello di maturazione o per ottenere mosti differenziati anche all'interno di uno stesso vigneto.

Più a lungo termine, il supporto fornito dalla applicazione di tecniche di telerilevamento alla viticoltura assiste il viticoltore nella formulazione delle pratiche colturali ottimali (concimazione, potatura, scelta del tipo di impianto, preparazione dei suoli) in termini di miglioramento, anno dopo anno, della produzione.

L'utilizzo dei sistemi informativi geografici rende possibile integrare tra loro informazioni telerilevate, informazioni geomorfologiche (pendenze, fasce altimetriche, esposizioni), meteorologiche, cartografiche, alfanumeriche.

Nei vigneti della Napa Valley, il telerilevamento è stato utilizzato per l'ottimizzazione dei processi di crescita e di raccolta, con eccellenti risultati. Analoghe utilizzazioni si riscontrano in Australia, Nuova Zelanda e Sud America. Nel corso del 2001, l'attività è stata realizzata, in Italia, in fase di sperimentazione, con successo su alcune aree della Franciacorta, mentre nel 2002 lo studio è stato esteso ad un'ampia porzione del territorio vitato franciacortino.

L'attività svolta si è caratterizzata, a differenza delle precedenti esperienze, per un'elaborazione quanti-qualitativa del dato che comprende non solo il vigore della pianta ma anche i dati di grado zuccherino, acidità e produzione ad ettaro, fornendo in questo modo informazioni fondamentali nella pianificazione dell'attività vendemmiale e produttiva.

3. Il caso Franciacorta

Tra le attività del Consorzio per la tutela del Franciacorta vi è anche quella di vigilanza del rispetto del disciplinare di produzione e di monitoraggio della maturazione dell'uva. Vista la necessità di operare con tempestività, quindi in tempi ristretti, per fornire i dati alle aziende il più possibile in tempo reale e data l'esigenza di essere rappresentativi di un territorio piuttosto ampio e paesaggisticamente molto variabile, in grado di modulare ampiamente il fenomeno della maturazione delle uve, il Consorzio ha ritenuto di utilizzare i nuovi mezzi che

stanno alla base dell'agricoltura di precisione, ricorrendo all'azienda MC2 srl in collaborazione con l'Università degli Studi di Milano, con il finanziamento della Regione Lombardia e della Provincia di Brescia. È stata condotta una prova che ha previsto l'impiego di dati originati da sensori multispettrali finalizzata alla stesura di una mappa del vigneto Franciacorta tematizzato in relazione al vigore vegetativo, alla produzione ad ettaro, al contenuto zuccherino e al contenuto acidico.

Il ricorso a queste nuove tecnologie si motiva in quanto esse sono in grado di assicurare i seguenti risultati:

- ∞ elevato dettaglio e precisione del dato di maturazione delle uve;
- ∞ elaborazione di un modello in grado di estendere ad ampie superfici vitate i dati raccolti in aree campione;
- ∞ rapidità di produzione del dato su ampie superfici;
- ∞ facile e immediata leggibilità dell'immagine prodotta;
- ∞ immediata trasferibilità via web delle informazioni prodotte.

L'esperienza riportata è localizzata in Franciacorta, territorio vocato alla viticoltura della provincia di Brescia che si estende su circa 18.000 ha dei quali nel 2002 circa 1860 vitati e di cui circa 1250 destinati a Franciacorta docg (Tab. 1).

Tab. 1 – Estensione dei vigneti iscritti alle denominazioni di origine Franciacorta

	Sup. iscritta albo 1999	Sup. iscritta albo 2000	Sup. iscritta albo 2001
Franciacorta	907	1.016	1.147
Terre di Franciacorta bianco doc	334	393	553
Terre di Franciacorta rosso doc	398	445	487

I rilievi del dato multispettrale sono stati effettuati utilizzando un sensore costituito da una camera digitale multispettrale aereomontata basata su tecnologia CCD, che produce immagini in quattro bande di 1500 x 1000 pixel ciascuna nelle lunghezze d'onda corrispondenti al blu, verde, rosso e vicino infrarosso. Le immagini sono state acquisite a una risoluzione di 3 x 3 m per pixel (poi portate a 1 x 1 m solo ai fini della stampa in scala).

In estrema sintesi, la logica del metodo proposto si basa sullo schema proposto in Fig. 1.

Le immagini aeree, come prodotte nel caso del progetto svoltosi in Franciacorta, o da satellite vengono acquisite in un periodo da determinarsi sulla base di un'attenta analisi dei calendari fenologici delle varietà coltivate (indicativamente, in prossimità dell'invasatura e della maturazione) e vengono poi georiferite, ovvero legate ad un sistema cartografico di riferimento.

Nel medesimo periodo, vengono effettuati i rilievi in campagna, sia in merito allo stato vegetazionale della coltura che in merito al livello di maturazione delle uve. Contestualmente al prelievo si effettua una misura della posizione del campione, nel sistema cartografico di riferimento adottato, utilizzando un rilevatore GPS portatile.

Consorzio per la tutela del Franciacorta

La denominazione di origine controllata Franciacorta nasce nel 1967 e con essa il Consorzio che diviene nel 1990 *Consorzio per la tutela del Franciacorta*. Nel settembre del 1995 viene riconosciuta la docg Franciacorta e il doc viene denominato Terre di Franciacorta (bianco e rosso). Nel 2000 il Consorzio viene incaricato dell'attività di tutela e vigilanza sugli associati.

Disciplinare Franciacorta

Uvaggio previsto

Franciacorta: Chardonnay e/o Pinot bianco e/o Pinot nero

Franciacorta Rosè: impiego del Pinot nero non inferiore al 15%

Franciacorta Satèn: assenza del Pinot nero

Produzione massima ad ettaro

Non deve essere superiore a 10 t/ha pari ad un massimo di 65 hl di vino finito. La raccolta deve essere effettuata in modo da non compromettere l'integrità degli acini (quindi a mano).

Tempo minimo di sosta sui lieviti

Minimo 18 mesi sui lieviti per il Franciacorta, e minimo 30 per il Franciacorta millesimato. In commercio rispettivamente dopo minimo 25 mesi il primo e 37 il secondo

Tipologie ottenibili

Le tipologie di sapore ammesse per il Franciacorta sono :
non dosato – extra brut – brut – extra dry - sec – demi sec
Il Satèn è un marchio riservato ai soli soci del Consorzio

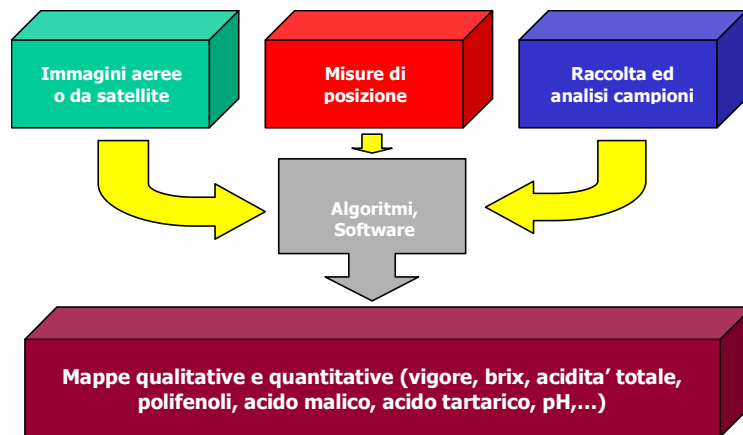


Fig. 1

In questo modo è stato possibile relazionare i dati delle immagini multispettrali con i dati ottenuti dalle analisi sul vigore e sullo stato vegetazionale della vite e dai dati analitici chimico-fisici delle uve prelevate in quella esatta collocazione al fine di stimare i parametri della correlazione esistente tra il vigore vegetativo (ricavato dalle immagini) ed il parametro studiato (produzione potenziale, stato nutrizionale, contenuto zuccherino, contenuto acidico, etc.).

Infine, utilizzando la regressione calcolata, si sono estesi i risultati a tutta la superficie vitata.

Il dato elaborato, totalmente digitale e scaricabile da Internet, si presenta sotto forma di:

- œ mappe, una per ciascun parametro di interesse viticolo ed enologico, facilmente utilizzabili direttamente in campo;
- œ tabulati relativi a ciascun vigneto che descrivono le stesse informazioni contenute nelle mappe, ma sintetizzate per singolo vigneto.

I risultati dello studio hanno offerto ai produttori una esatta stima del volume quantitativo ipotizzato alla vendemmia con circa 40 giorni di anticipo sulla probabile data di inizio della vendemmia garantendo al viticoltore la possibilità di intervenire con le pratiche agronomiche che meglio di altre avrebbero riportato la produzione quantitativa ai valori ritenuti ottimali rispetto ad un preciso obiettivo enologico e una esatta stima della qualità analitica delle uve in prossimità dell'inizio della raccolta.

4. Vendemmie 2001-2002

Per ottenere dati utili alla vendemmia, la ripresa aerea deve essere tassativamente eseguita dopo il completamento dell'invaiaitura per quanto riguarda il rilevamento

della prima immagine del vigore e della produzione, ed il più possibile a ridosso della raccolta per la seconda immagine di vigore da cui ottenere i dati sulla qualità delle uve.

Nel 2001 il dato multispettrale è stato prodotto il 14 agosto, mentre il dato analitico il 16 agosto. All'indomani, il 17 agosto, le mappe tematiche relative al vigore, contenuto acidico e contenuto zuccherino sono state messe in Rete linkate al sito Web del Consorzio per la tutela del Franciacorta

Nel 2002 è stato possibile eseguire due rilevamenti multispettrali e precisamente il 7 luglio è stato svolto il rilievo del vigore (I° dato) e stima della produzione e il 13 agosto rilievo del vigore (II°dato) e stima della qualità delle uve. Il 17 agosto è avvenuta la distribuzione in WEB dei risultati alle aziende socie del Consorzio così da fornire delle indicazioni precise sullo stato di maturazione delle uve destinate al Franciacorta docg al momento di partenza della vendemmia.

L'importanza dei dati per la vendemmia risulta evidente osservando le illustrazioni in Fig. 2.

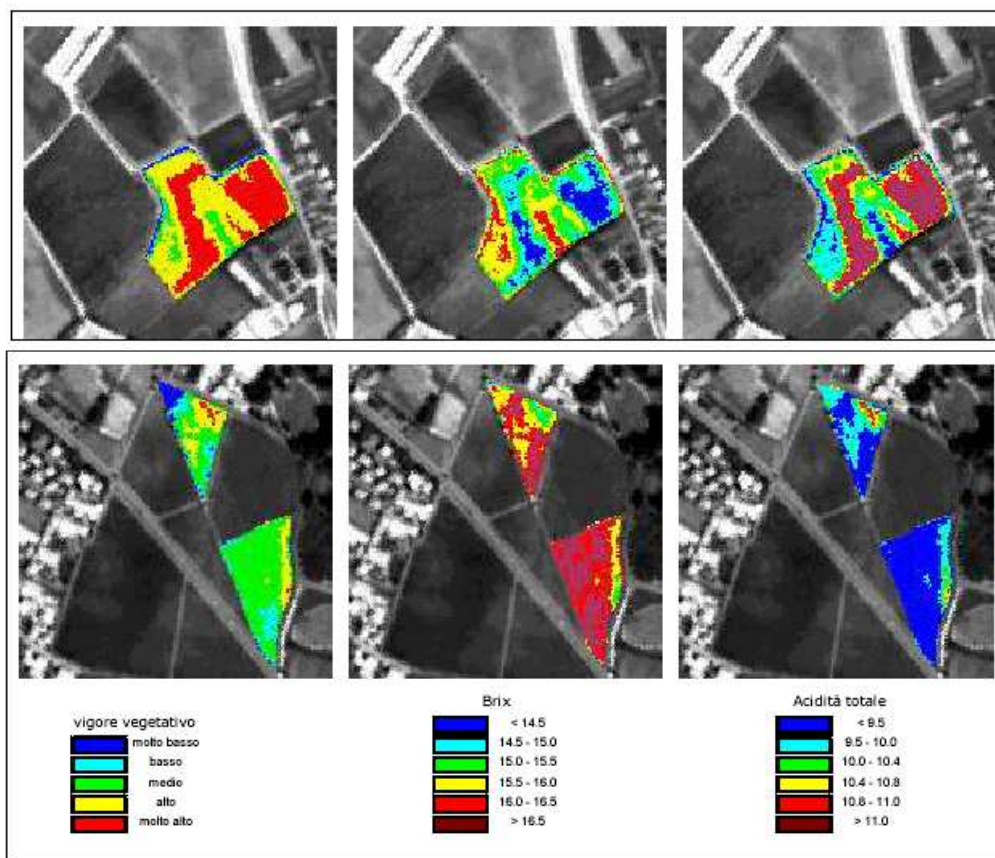


Fig. 2

Non solo sono identificate per ogni vigneto le aree omogenee, ma vengono forniti dati quantitativi (gradi brix, acidità totale) così da consentire con pochi campioni il monitoraggio dei vigneti, e delle diverse aree all'interno di ciascuno di loro, per conoscere non solo lo stato ma anche la dinamica delle curve di maturazione.

Dai dati presentati in figura si nota la distribuzione del livello di vigore del vigneto che è stato classificato per categorie (da basso a molto alto). A tali livelli di vigore sono stati associati i dati analitici del contenuto di zuccheri e del livello acidico prodotti su campioni rappresentativi delle diverse situazioni di vigore del vigneto stesso. Questi dati sono stati elaborati in correlazione al livello di vigore e si è quindi prodotta una funzione in grado di estendere tali correlazioni a tutti i vigneti che si trovano nelle stesse condizioni colturali di quelli usati per campione, ovvero a tutti i vigneti con uguale forma di allevamento, uguale tecnica colturale, uguale unità pedologica.

Tale estensione del dato prodotto a tutti i vigneti in uguali situazioni tecnico-agronomiche è possibile in quanto la Franciacorta dispone di una zonazione viticola condotta nei primi anni '90 che ha mappato il territorio in aree ad omogenea condizione pedologica e quindi ad omogenea condizione ambientale.

Oltre al dato fornito quale servizio alle aziende è risultato interessante verificare le relazioni esistenti tra vigore, zuccheri e acidi. In effetti, nello Chardonnay di Franciacorta risulta più evidente e lineare una correlazione tra vigore ed acidità, mentre risulta meno lineare la correlazione tra vigore e zuccheri come risulta evidente dai grafici di seguito riportati in Fig. 3. Essi si riferiscono alla correlazione esistente rispettivamente tra vigore/brix e vigore/acidità tot, per la classe numero tre identificata nel 2001.

La prova condotta in Franciacorta ha potuto quindi fornire una mappatura del livello di maturazione delle uve Chardonnay destinate alla produzione del Franciacorta DOCG in prossimità della vendemmia. Nel 2001 ad esempio il decreto prefettizio di inizio vendemmia ha fissato per il 16 agosto la data di avvio delle operazioni di vendemmia. Il giorno 17 agosto, le aziende della Franciacorta avevano a disposizione, collegandosi attraverso il sito web del Consorzio www.franciacorta.net al sito web www.precision-farming.com, una precisa mappatura del livello di maturazione dei vigneti oggetto di tale servizio, strumento base per la programmazione delle strategie vendemmiali secondo gli obiettivi produttivi propri di ciascuna azienda, la quale risulta inoltre facilitata anche nel rispetto delle regole imposte dal disciplinare di produzione del Franciacorta DOCG.

5. I vantaggi

L'approccio "classico" all'atto della definizione delle pratiche colturali da realizzare nei singoli vigneti è da sempre improntato (e difficilmente potrebbe essere altrimenti) alla valutazione delle condizioni, e quindi delle esigenze,

“medie” dell’intero vigneto, pur nella consapevolezza dell’esistenza di differenze rimarchevoli nelle condizioni vegetative e produttive delle diverse vigne.

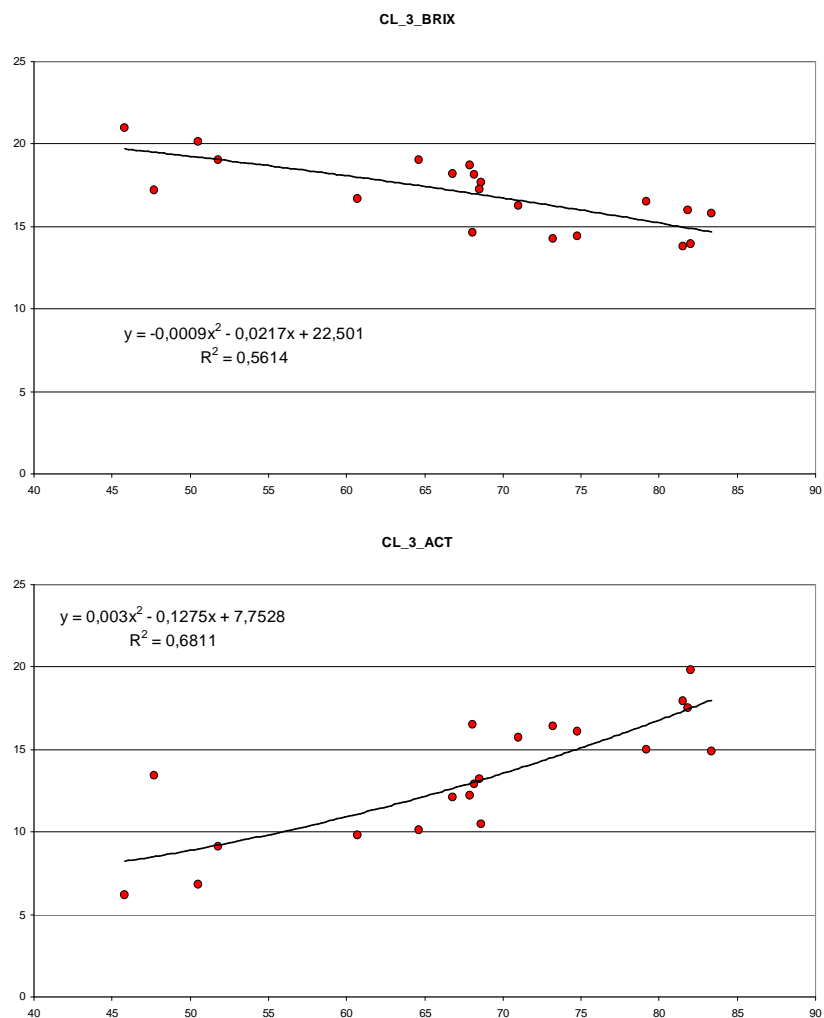


Fig. 3

Analogamente si procede per il grado di maturazione e le analisi delle caratteristiche organolettiche dell’uva al fine di decidere il momento opportuno per la vendemmia. Per di più, in questa fase specifica e decisiva, generalmente si opera verificando non tutti i vigneti, ma alcuni di essi, considerati significativi per estensioni anche vaste.

Tante di queste differenze vanno sicuramente a influire sulla produzione sia a livello qualitativo, sia a livello quantitativo. Ovviamente, sotto il profilo enologico ciò è difficile da rilevare in quanto la lavorazione riguarda l’intera produzione del

vigneto, e non si sofferma certamente all'analisi di quanto prodotto dalle singole piante.

Si ha comunque la certezza di non riuscire mai a ottenere il massimo risultato potenziale di produzione e maturazione.

E' chiaro che una approfondita conoscenza delle unità di suolo, e la dimensione della loro unità minima rilevata è determinante per definire con accuratezza e in modo oggettivo la validità del campione prescelto.

E' altrettanto evidente che, riducendo la dimensione delle unità di suolo, diventa praticamente indispensabile un sistema geografico che, delimitati i vigneti, possa incrociare ed elaborare tutte le informazioni di ciascuno di essi con le unità di suolo, microclassificando e poi sintetizzando a seconda delle esigenze le superfici vitate.

Questo tipo di intervento consente di rendere oggettivamente accurata la scelta dei vigneti test con il metodo tradizionale, ma si rivela di grandissimo aiuto per la ottimale applicazione delle tecniche di telerilevamento.

Contrariamente al metodo tradizionale di campionamento, infatti, non si opera con il prelievo di acini secondo criteri tendenti ad ottenere lo stato medio dell'intero vigneto, ma identificando e analizzando acini provenienti da singole piante. Più è ricca di informazioni e minori sono le dimensioni della unità minima in cui sono classificati i vigneti, più l'elaborazione del dato telerilevato è precisa in termini quantitativi e dettagliata quanto a localizzazione.

La viticoltura assistita da satellite consente così ai viticoltori di definire le pratiche colturali ottimali (irrigazione, potatura, scelta del tipo di impianto, miglioramento dei suoli, fertilizzazione, trattamenti fitosanitari) e di pianificare le strategie di vendemmia non solo per i vigneti nella loro interezza, ma anche per singole porzioni all'interno degli stessi.

Il metodo può essere applicato indifferentemente su superfici grandi o medie, con l'unica variabile del costo, influenzato principalmente dal risparmio di scala realizzabile acquisendo immagini su superfici ampie e riducendo di conseguenza il numero di misure in campo necessarie per ettaro rilevato.

Nel caso di interventi coordinati da Consorzi e Pubbliche Amministrazioni, non va dimenticato che i dati multispettrali acquisiti possono essere utilmente impiegati in altri campi di rilevante importanza nel settore agricolo e forestale ma anche per la tutela delle acque, il censimento delle discariche, la pianificazione territoriale, l'aggiornamento della cartografia.

Bibliografia

1. O. Repetti, "Precisione, rivoluzione annunciata?", *Terra e vita*, n. 13, 2004.
2. Lamb, Weedon, Bramley, "Using Remote Sensing to predict grape phenolics and colour at harvest in a Cabernet Sauvignon vineyard: timing observations against vine phenology and optimising image resolution", *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 2004.

3. Alessandro Castagnoli, Paolo Dosso, “Servizi ad alta tecnologia per la viticoltura di precisione”, *L'informatore agrario*, n. 13, 2002.
4. Mario Fregoni, “La viticoltura con l'aiuto del satellite”, *L'informatore agrario*, n. 13, 2002.
5. Alberto Vercesi, Giancarlo Spezia, Mario Fregoni, “Viticoltura di precisione per le zone viticole ed il vigneto”, *L'informatore agrario*, n. 13, 2002.
6. Fausto Campostrini, Flavio Serina, “Un servizio alle aziende per conoscere la maturazione delle uve Chardonnay”, *L'informatore agrario*, n. 13, 2002.
7. Attilio Scienza, “Viticoltura di precisione: programmare la qualità del vigneto”, *L'informatore agrario*, n. 13, 2002.
8. Hall, Lamb, Holzapfel, Louis, “Optical remote sensing applications in viticulture – a review”, *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 2002.
9. Alessandro Castagnoli, Paolo Dosso, “Viticoltura assistita da satellite”, *L'informatore agrario*, n. 18, 2001.
10. Johnson, Lobitz, Armstrong, Baldy, Weber, DeBenedictis, Bosch, “Airborne Imaging for Vineyard Canopy Evaluation”, *California Agriculture*, Special Issue on Phylloxera, 1996.
11. Lobitz, Johnson, Hlavka, Bosch, “Monitoring phylloxera infestation with airborne digital imagery”, Proceedings, Second International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, vol 3, p. 397, San Francisco CA, 24-27 June 1996.

Spettrometria di immagine nel settore del legno e dell'arredamento

STEFANO MONTI

3B S.P.A.

Via delle Industrie, 1 – 31040 Salgareda (TV),

Tel.: 0422 747053, Fax: 0422 747416

smonti@3bspa.com

1. Introduzione

I materiali utilizzati per rivestimento superficiale di componenti per mobili sono i più disparati, dal laccato al polimerico, dal melaminico al laminato CPL o HPL, dal legno naturale in tutte le sue versioni, massiccio ed impiallacciato.

Questi materiali si distinguono fra loro per le diverse proprietà di resistenza meccanica e di aspetto estetico. Tra le molte componenti che caratterizzano l'estetica di una superficie, il colore e la sua tolleranza sono certamente i più importanti. Tolleranza che nel mobile risulta spesso essere estremamente ristretta in confronto ad altri settori quali ad esempio il tessile o l'automobile.

La figura 1 illustra quanto accadere in pratica accostando su un mobile antine con un'inaccettabile differenza di tonalità:



Fig. 1

Indipendentemente dal materiale di rivestimento utilizzato, una volta stabilito il riferimento di colore, diventa necessario concordare tra produttore e cliente una tolleranza di accettabilità.

Quale ovvia conseguenza diventa essenziale essere in grado di quantificare con precisione le differenze di colore.

A tal proposito, esistono numerosi strumenti e riferimenti normativi che possono adattarsi ad ogni esigenza per quanto riguarda i colori tinta unita e, recentemente, anche i colori metallizzati.

Come in molti altri ambiti legati all'aspetto esteriore, anche il settore del mobile ha da tempo recepito la misurazione del colore delle tinte unite tramite l'utilizzo di spettrofotometri e la quantificazione delle relative differenze secondo i diffusi standard CIEL*a*b*.

Tuttavia, una parte notevole delle superfici per mobile è rappresentata da tinte imitazione legno, specialmente nella versione sintetica.

Si tratta normalmente di film stampati con tecnologia rotocalco su base carta o termoplastico.

In questi casi non esistono metodologie, standard o strumenti riconosciuti finalizzati alla caratterizzazione dell'aspetto dell'immagine nel suo insieme; la complessità di una superficie decorativa rende arduo ogni tipo di approccio alla misura: le venature del legno (naturale come sintetico) presentano diverse gradazioni di colore, sfumature e contrasti che non possono essere quantificate in modo soddisfacente con alcun tipo di spettrofotometro.

Per contro, lasciare il giudizio circa l'accoppiabilità di pannelli o forniture diverse alla valutazione soggettiva è inaccettabile, sia dal punto di vista di chi produce sia del mercato al quale il manufatto è destinato.

Una risposta a questo *empasse* può essere data dalla tecnologia della "Spettrometria di Immagine".

2. Scopo del lavoro

Il problema pratico da risolvere non era tanto la qualificazione assoluta del colore quanto la definizione oggettiva e ripetibile della "sensazione di accoppiabilità".

Leggere differenze di colore nei decorativi sono facilmente individuabili da occhi allenati. E' invece più difficile stabilire con certezza la direzione di queste differenze: il colore è più rosso o piuttosto meno giallo? Più scuro o meno brillante?

Ancora più difficile stabilire una soglia di accettabilità, ovvero il limite oggettivo oltre al quale l'accoppiabilità dei due componenti risulta compromessa.

I primi tentativi di misurazione di colore di superfici decorative utilizzando la tecnologia della "Spettrometria di Immagine" sono stati fatti nel 1999 grazie alla collaborazione tra un'azienda operante nel settore del mobile, la 3B S.p.A. di Salgareda (TV) ed un costruttore specializzato in laser e tecnologie ottiche, la DV S.r.l. di Padova.

Negli anni successivi, mentre veniva portato avanti lo sviluppo e l'affinamento tecnologico dell'apparecchiatura e dei suoi componenti, si svolgeva anche un paziente lavoro di correlazione tra i valori forniti dallo strumento e la risposta soggettiva dell'occhio al presentarsi dei vari casi pratici.

Il presente studio riporta i risultati di questo lavoro di correlazione.

3. Strumentazione utilizzata

Lo strumento utilizzato per le misure è uno Spectral Scanner prodotto dalla stessa DV S.r.l. (Fig. 2), corredato di software Spectral Scanner 1.1, un software di spettrometria d'immagine che consente di acquisire la composizione spettrale di ogni punto dell'oggetto in esame sfruttando uno spettrometro di linea.



Fig. 2

Il software comanda dispositivi di movimentazione meccanica che spostano la linea di vista del sistema ottico e acquisisce in successione un numero fissato dall'utente di *frame* bidimensionali. Interpretando ognuno di questi come un *array* di spettri relativi, punto per punto, ad una linea il Software ricostruisce a video un'intera immagine (linea dopo linea) rendendo accessibili i dati che la determinano; questi vengono presentati in forma grafica spettrale, mediante coordinate $L^*a^*b^*$ numeriche e nello spazio colorimetrico di Munsell.

Supponiamo si debba ricostruire l'immagine di figura 1a nella quale è fittiziamente indicata la linea che lo strumento sta analizzando in un determinato istante; tale linea attraversa 4 campioni di colore uniforme disposti su sfondo bianco e illuminati da una sorgente spettralmente quasi uniforme. In figura 3b è rappresentato in scala di grigi il frame d'intensità acquisito in corrispondenza a tale linea: l'informazione spaziale relativa a ciascun pixel di questa si mantiene in orizzontale (asse spaziale) mentre in verticale (asse spettrale) si passa linearmente dai 400 nm (in basso) ai 700 nm (in alto). L'intensità della luce alle varie lunghezze d'onda che in figura 3b è indicata in scala di grigio viene rappresentata sull'asse y del grafico cartesiano di figura 3c per 4 punti interni ai singoli campioni.

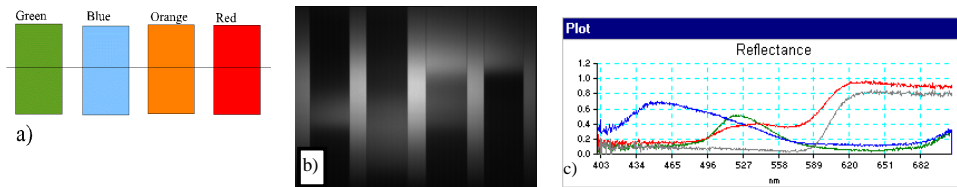


Fig. 3 – Un campione con 4 aree di colorazione uniforme verde, azzurro, arancio e rosso su sfondo bianco (a) e l'immagine spettrale della linea che taglia il campione (b) più chiara dove l'intensità della componente spettrale corrispondente è maggiore, più scura dove detta intensità è minore. I pixel della linea sono in corrispondenza ai pixel orizzontali del frame mentre la dimensione verticale corrisponde alle lunghezze d'onda dai 400 nm (basso) ai 700 nm (alto). Il verde produce alte intensità alle medie lunghezze d'onda, il blu alle basse mentre il rosso e l'arancio alle alte come si nota dai profili verticali (c) indicativi di ciascun colore.

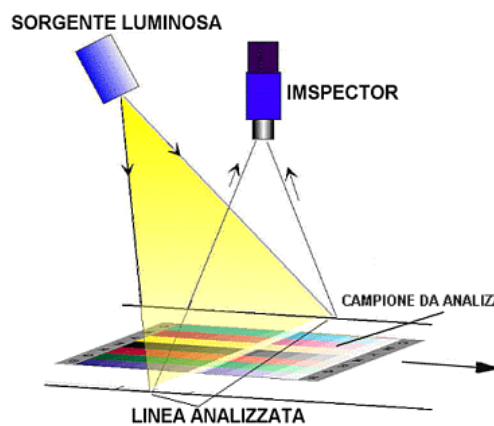


Fig. 4

Tale analisi è ottenuta sfruttando nella configurazione sotto riportata lo spettrometro di linea ImSpector prodotto da Specim Ltd accoppiato con una telecamera monocromatica. Questo dispositivo, il più utilizzato con lo Spectral Scanner, presenta una fenditura d'ingresso che vede una linea del campione attraverso un'opportuna ottica di focalizzazione.

La luce viene poi collimata da un sistema di lenti e dispersa spettralmente da un sistema prisma- reticolo-prisma (Prism Grating Prism PGP) in direzione verticale su un detector bidimensionale a matrice di elementi fotosensibili. Ogni pixel di detto detector acquisisce l'intensità luminosa di una specifica componente frequenziale dello spettro per uno specifico punto della linea in analisi.

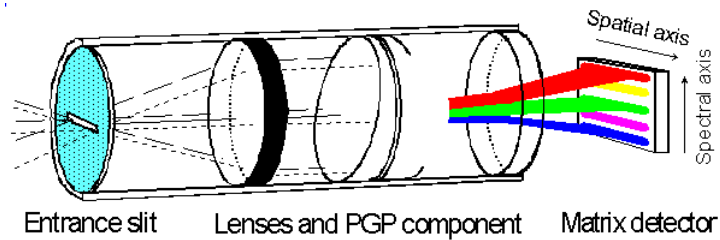


Fig. 5

Il software comanda poi attraverso la porta seriale il movimento del campione o delle ottiche in modo da acquisire, linea dopo linea, l'intera superficie d'interesse. Spectral Scanner ricostruisce così immagini 2D rendendo disponibili gli spettri (con le risoluzioni spettrali e spaziali delle ottiche) di ciascun punto di queste.

4. Correlazione dei valori strumentali con la risposta dell'occhio umano

Con la spettrometria di immagine è quindi possibile quantificare le differenze di colore attraverso normali parametri colorimetrici quali ad esempio le coordinate L, a e b del sistema CIEL*a*b*. Lo Spectral Scanner esegue una scansione della porzione di superficie prescelta e produce numerose misurazioni puntuali. Via software vengono miscelate le coordinate di ogni punto con l'ottenimento di un colore in tinta unita le cui variabili colorimetriche rappresentano la media matematica di ogni singolo pixel (figura 6).

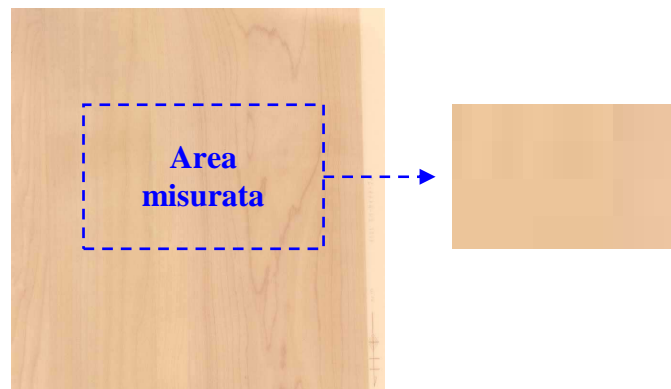


Fig. 6

Tuttavia, all'atto pratico del confronto dei risultati strumentali in Delta E con la risposta visiva su diversi campioni è apparso subito evidente che le sole coordinate L, a e b non sono sufficienti a fornire indicazioni universalmente valide per tutti i colori stampati.

In particolare, si è notato che tale risposta era tanto meno attendibile quanto maggiore era il contrasto della stampa.
 Questo significa che la formula Delta E CIEL*a*b* utilizzata sulle tinte unite si rivela sempre meno adeguata mano a mano che il colore misurato si discosta dalla tinta unita (elevato contrasto).

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad \text{Formula CIEL*a*b* per le tinte unite}$$

Era quindi necessario considerare un nuovo parametro che fosse indice del contrasto, ovvero della differenza tra il decorativo stampato misurato e la tinta unita di pari coordinate L, a e b.
 Nell'area di misura considerata, tale parametro "k" è stato definito come media delle dispersioni di ogni singola variabile, espresse come deviazioni standard:

$$k = \bar{X} [\text{dev.st (L,a,b)}]$$

Le tinte unite hanno "k" ≈ 0; le stampe con "k" compresi tra 0,5 e 1,5 hanno un contrasto basso; stampe con contrasto elevato hanno "k" maggiori di 3 (Figura 7).



Fig. 7

L'esperienza ha evidenziato che nei decorativi a "k" elevato, l'occhio diventa proporzionalmente meno sensibile ed il valore di Delta E CIEL*a*b* ottenuto nella misura strumentale è sempre troppo severo. Questo fenomeno può essere interpretato considerando la difficoltà dell'occhio umano a confrontare punto per punto i decorativi in questione ed il conseguente disturbo causato dal gran numero di variabili in gioco che determina una minore selettività nel giudizio complessivo.

Nei colori a basso contrasto, l'occhio umano conserva invece una sensibilità paragonabile a quella normalmente riscontrata nell'analisi di tinte unite ed in linea con la risposta strumentale di uno spettrofotometro.

Quale ulteriore considerazione, l'occhio percepisce anche differenze di contrasto tra diversi lotti di stampa. Ne consegue che il parametro "k" può essere considerato una variabile al pari di L, a e b.

Si è reso quindi necessario integrare la formula del Delta E inserendo:

A) Una quarta variabile quantificante la differenza di contrasto.

B) Una funzione tale da ridurre il valore del Delta E all'aumentare del contrasto.

La formula proposta è la seguente:

$$\Delta E' = \frac{\sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2 + f\Delta k^2}}{f'k}$$

dove "k" è il contrasto definito dalla media delle deviazioni standard di L, a e b, mentre le funzioni f e f' sono parametrizzate in modo tale da simulare al meglio la risposta dell'occhio umano.

Analogamente, possono essere prese in considerazione altre funzioni diverse da quelle della convenzione CIEL*a*b*. Una proposta basata sul sistema CMC(1:c) potrebbe essere la seguente:

$$\Delta E'_{cmc} = cf \frac{\sqrt{(\Delta L/SL)^2 + (\Delta C/cSC)^2 + (\Delta H/SH)^2 + f\Delta k^2}}{f'k}$$

5. Conclusioni

La tecnica di misurazione del colore proposta si è dimostrata sufficientemente semplice e ripetibile per soddisfare anche le esigenze di un settore selettivo quale quello del legno e dell'arredamento.

La misurazione dei campioni deve essere comunque fatta con una certa attenzione a partire dalla scelta della zona da misurare: questa deve essere di dimensioni e posizione tali da essere rappresentativa del decorativo nel suo insieme. I campioni da confrontare dovranno poi essere misurati esattamente nella stessa zona del cilindro di stampa.

L'utilizzo di uno strumento come lo Spectral Scanner, unitamente all'algoritmo proposto per l'elaborazione dei dati, rappresenta quindi una concreta risposta

all'esigenza di quantificare in modo oggettivo le differenze di colore tra decorativi stampati.

Per quanto empirica, quindi priva di una solida base teorico-scientifica, la formula presentata in questo lavoro permette di simulare in modo soddisfacente la risposta dell'occhio umano.

Bibliografia

1. G. Wyszecki, W. S. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, Second Edition, Wiley and Sons, New York, 1982.
2. Commission Internationale de l'Eclairage, *Colorimetry*, Publication CIE n. 15.2, 2nd edition, Vienna, 1986.
3. R.W.G. Hunt, *Measuring Color*, Ellis Horwood, Chichester, 1982.

Proposta di una stazione a camera digitale e sfera d'integrazione per la misurazione del colore

F. FERMI, C. OLEARI, R. REVERBERI

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA - DIPARTIMENTO DI FISICA,
ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA DELLA MATERIA
Parco Area delle Scienze, 7A – 43100 Parma,
oleari@fis.unipr.it, fermi@fis.unipr.it, reverberi@fis.unipr.it

R. HUERTAS, M. MELGOSA

DEPARTAMENTO DE ÓPTICA, UNIVERSIDAD DE GRANADA
18071 Granada (Spagna)
rhuertas@ugr.es, mmelgosa@ugr.es

La valutazione a vista della differenza di colore tra campioni fisici attuata in cabina di luce si presenta sovente incerta. Una cabina di luce standard, che sia universalmente adottata, non esiste: si usano cabine nere e cabine grigie e tra queste il grigio è spesso differente. Nel tempo il nero è soggetto a degrado ed è fortemente condizionato dalla polvere. Inoltre non esiste un modo comune a tutti gli operatori con cui confrontare i campioni.

In certi settori merceologici, come il tessile, accade anche che i campioni siano proposti fissati con punti metallici su cartoncini e fogli di carta bianca. Il confronto può avvenire giustapponendo i campioni o tenendoli separati.

A seconda dei materiali, i campioni possono offrire una superficie piana o curva.

In generale la luce d'ambiente in cui la cabina si trova non è controllata ed è mutevole con l'ora del giorno e la stagione:

Infine non è certo a quale osservatore standard, CIE 1931 o CIE 1964, corrisponda la situazione visiva considerata.

È ovvio che in questa varietà di situazioni i responsi dei diversi operatori possono essere discordanti.

Qui si propone una stazione, in cui l'osservazione è strumentale, attuata mediante una camera digitale e non più a vista, anche se la visione diretta rimane possibile.

L'illuminazione è diffusa e corrisponde alla misurazione spettrofotometrica diffusa/8° con la possibilità di componente speculare inclusa (SPIN) ed esclusa (SPEX) (Fig. 1a, 1b).

Una camera digitale a colori riprende i due campioni A e B posti a confronto e sotto diverse sorgenti. Ogni singola ripresa può essere controllata a monitor (Fig. 2).

L'immagine digitale permette un confronto numerico tra i colori sotto le diverse sorgenti e quindi è possibile proporre un calcolo del ΔE e dell'indice di metamerismo.

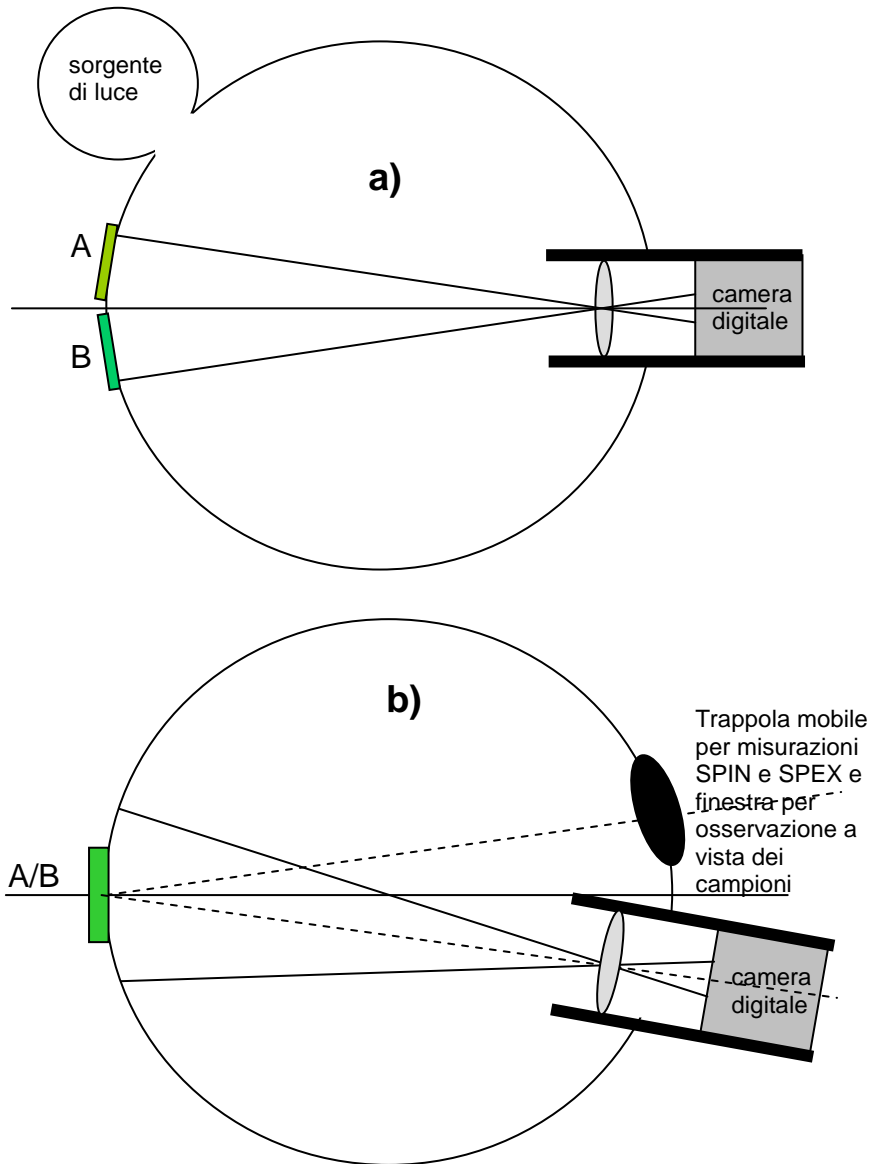


Fig 1a), 1b) – Sezioni ortogonali dello strumento

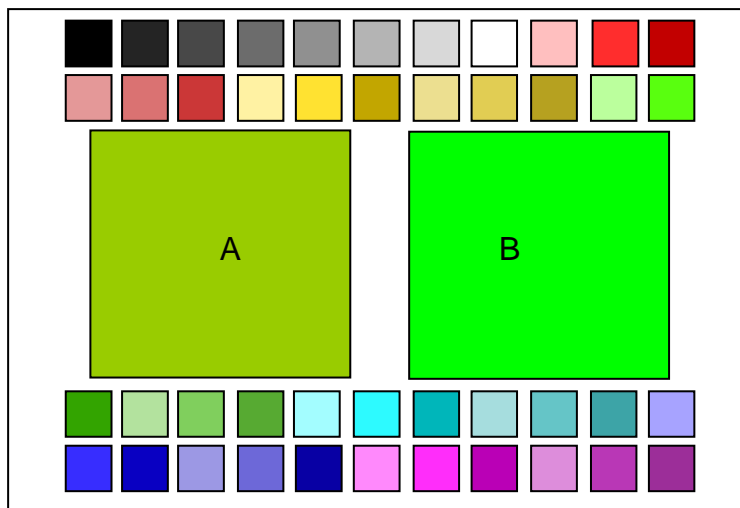


Fig. 2 – Singola immagine catturata dalla camera sotto un particolare illuminante e proposta a monitor. Le due porte, relative ai due campioni posti a confronto, sono attorniate da un adeguato numero di riferimenti fisici, le cui coordinate di colore (X_r , Y_r , Z_r) sono riferibili a un laboratorio metrologico primario. Tali riferimenti servono per la costruzioni delle trasformazioni tra i segnali della camera e lo spazio del tristimolo. Il loro numero in figura è solo indicativo. Significativo è il numero dei campioni "IT 8.7 Scanner Calibration Targets"

La stazione deve essere abbinata a un personal computer dotato di opportuno software e di un monitor tricromatico, che si ritiene debba essere a Tubo a Raggi Catodici (CRT).

La realizzazione di un tale strumento richiede che siano soddisfatte le seguenti richieste riguardanti l'acquisizione dell'immagine:

1. Le sorgenti di luce utilizzate devono riprodurre gli illuminanti standard: le sorgenti A, CWF, TL84, sono quelle commerciali, mentre le sorgenti, che nelle cabine di luce convenzionali simulano la luce del giorno D alle varie temperature di colore proximale, sono piuttosto approssimate e in generale non sono soddisfacenti.
2. La camera digitale deve avere
 - a. sensibilità spettrali prossime a quelle dell'osservatore standard in modo da non presentare fenomeni metameric diversi da quello dell'osservatore standard (le camere correnti non approssimano in modo soddisfacente nessun osservatore standard, d'altra parte approntare camere con tale proprietà è costoso, difficile e non è certo che una camera del genere dia risultati veramente soddisfacenti, visto che le sensibilità spettrali di due dei fotorecettori dell'occhio sono tra loro molto vicine). La soluzione è comunque un compromesso. L'importante è che le tre curve di sensibilità

spettrale abbiano estesa sovrapposizione garantendo così metamerismo nullo per luci spettrali (Fig. 3).

- b. fattore $\gamma = 1$.
- c. obiettivo con trasmittanza uniforme o, nel caso di non uniformità, tale da permettere una adeguata taratura atta ad eliminare la non uniformità col calcolo.
- d. obiettivo privo di distorsioni.

Per la riproduzione su monitor delle immagini acquisite si richiede:

- 3. una frequente taratura del monitor per garantire una riproduzione colorimetrica dei colori;
- 4. un monitor che abbia una riproduzione uniforme in una adeguata regione al centro dello schermo.

Un problema riguardante i monitor tricromatici è la loro impossibilità di riprodurre tutti i colori della realtà. Ma questo problema è secondario in importanza, perché la non riproducibilità riguarda colori poco frequenti in natura, inoltre il calcolo del ΔE e dell'indice di metamerismo rimane possibile anche per colori non riproducibili, purché correttamente misurati.

I veri problemi riguardano l'illuminazione, in particolare l'imitazione della luce del giorno, posta al punto 1), e la camera digitale, le cui risposte spettrali, poste al punto 2.a., devono comportare basso metamerismo strumentale.

Supposto che il punto 2.a. sia risolto, rimane il problema fondamentale, di cui qui si propone una soluzione, noto come *caratterizzazione colorimetrica della camera*. Questo problema consiste nel definire la corrispondenza tra i valori del tristimolo (X_r, Y_r, Z_r) e i segnali (R, G, B) della camera. Secondo la letteratura questo problema viene affrontato in tre modi differenti:

- ∞ tramite la definizione di una "look-up table" seguita da interpolazione [1, 2];
- ∞ tramite una rete neurale [3];
- ∞ tramite trasformazioni non lineari, del tipo [4, 5]

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & - & - & - & m_{1,9} \\ m_{2,1} & - & - & - & - & m_{2,9} \\ m_{3,1} & - & - & - & - & m_{3,9} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \\ R^2 \\ G^2 \\ B^2 \\ RG \\ GB \\ BR \end{pmatrix}$$

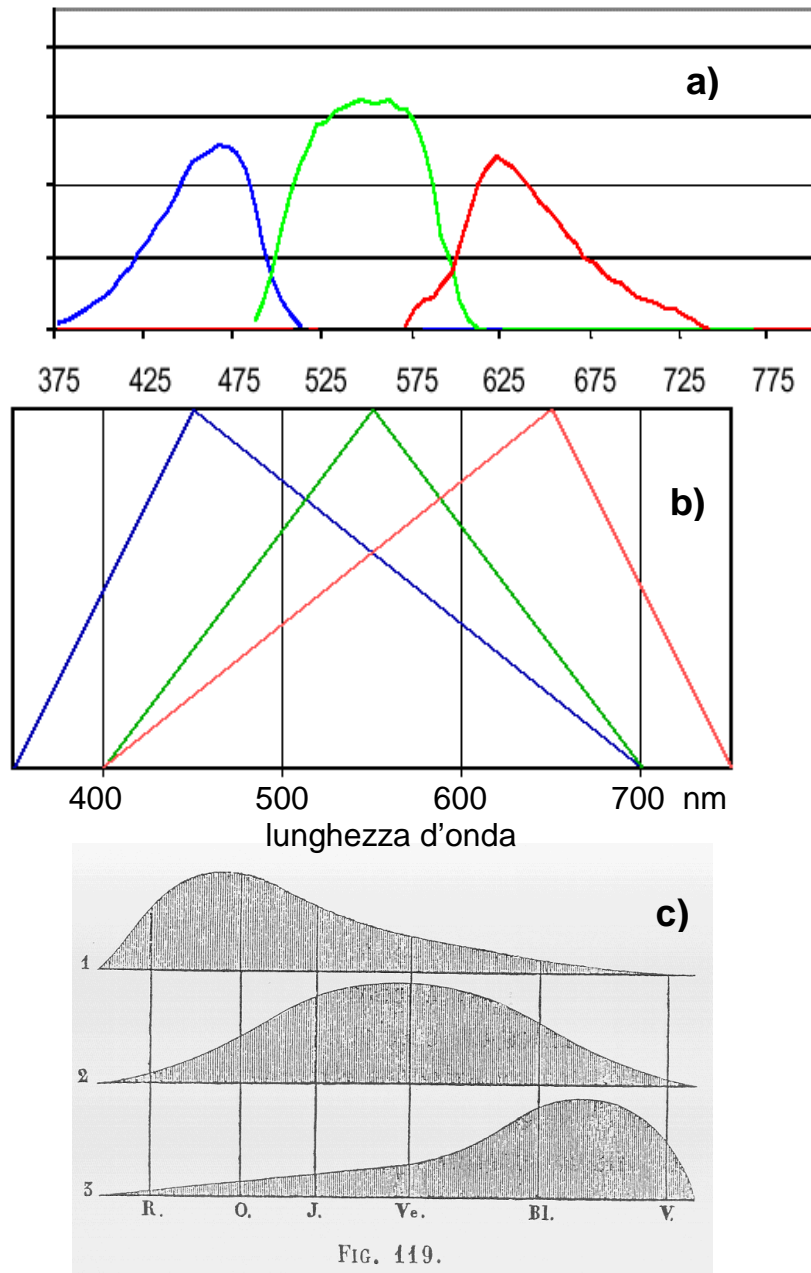


Fig. 3 – **a)** sensibilità spettrali di una tipica camera digitale commerciale, in cui la loro poca sovrapposizione comporta alto metamerismo. **b)** sensibilità spettrali di una camera “ideale” caratterizzata da basso metamerismo. L’esperienza insegna che la camera digitale deve essere scelta tra quelle aventi le sensibilità spettrali dei tre tipi di fotorivelatori fortemente sovrapposti, in quanto le altre sono affette da un metamerismo strumentale eccessivo. **c)** Sensibilità spettrali dei tre tipi di coni ipotizzate da Helmholtz alla metà del 1800.

dove gli elementi di matrice $m_{i,j}$ sono determinati con un processo di ottimizzazione fatto su campioni di colore di riferimento [6, 7, 8].

Tutti questi metodi tendono a dare trasformazioni generali valide per tutti i colori possibili e, proprio in questa pretesa di generalità, sta la debolezza di questi sistemi, la cui soluzione non può essere ugualmente buona per tutti i colori. Qui si propone una soluzione che rinuncia a dare una soluzione valida per tutti i colori ma propone una soluzione lineare locale, cioè per ogni regione dello spazio dei segnali (R, G, B) della camera.

L'apparato e il modo di procedere proposti sono i seguenti. Le porte dei portacampioni nella parte interna della sfera d'integrazione sono affiancate da un insieme N di riferimenti di colore (Fig. 2) che godono delle seguenti proprietà:

- ∞ i riferimenti di colore sono specificati colorimetricamente (X_r, Y_r, Z_r) , $r = 1, 2, \dots, N$, in uguale geometria d/0 e per tutti gli illuminanti considerati e tale specificazione è riferibile a un laboratorio metrologico primario (il numero di colori, 252, e il tipo di colori della tavola "IT 8.7 Scanner Calibration Targets" costituisce l'insieme di colori da cui partire e impostare il sistema);
- ∞ a fissato illuminante, le coordinate dei vari riferimenti di colore costituiscono punti di un reticolo entro il quale si trova la totalità dei colori da misurare.

Ogni misurazione a fissato illuminante avviene secondo i seguenti passi:

1. si considerando le terne (R_r, G_r, B_r) fornite dalla telecamera e relative a tutti i riferimenti di colore posti all'interno della sfera e la terna (R_c, G_c, B_c) relativa al campione da misurare, la quale può essere, a scelta dell'operatore, una terna di valori medi all'interno di una regione definita o una terna associata ai singoli pixel;
2. si calcolano le distanze $\sqrt{(R_c - R_r)^2 + (G_c - G_r)^2 + (B_c - B_r)^2}$ per ogni r e si considerano i tre riferimenti di colore, i, j, k , per i quali le distanze rispetto al colore campione sono le minori;
3. tra le terne (R, G, B) e le (X, Y, Z) esiste una trasformazione lineare \mathbf{T}

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \mathbf{T} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (1)$$

la quale è ricavabile dalle coppie di terne relative ai riferimenti i, j, k ; la determinazione della matrice \mathbf{T} equivale al processo di taratura dello strumento in una regione dello spazio del colore prossima ai tre colori di riferimento i, j, k (V. appendice);

4. la trasformazione \mathbf{T} , operando sulla terna (R_c, G_c, B_c) , fornisce la corrispondente terna (X_c, Y_c, Z_c) che è la misura del colore del campione sotto l'illuminante considerato;
5. si ripetono le operazione dei punti precedenti per tutti gli illuminanti che si intende considerare;

6. dal confronto di misure di coppie di campioni si calcola il ΔE e quindi l'indice di metamerismo secondo le usuali formule;
7. i colori dei campioni specificati sotto i vari illuminanti sono rappresentabili esattamente a monitor, se appartenenti all'insieme dei colori tecnicamente riproducibili (Fig. 4);
8. l'uso di una sorgente UV, da sola o abbinata ad altre sorgenti, permette di valutare la fluorescenza.

La qualità della misura dipende dalla bontà della trasformazione **T** di passaggio tra i due spazi e questa cresce al crescere del numero di riferimenti che affiancano le porte dello strumento ed è affidata alla stabilità delle loro proprietà ottiche. Le derive e l'invecchiamento delle sorgenti di luce, della sfera integrante, della camera digitale con relativa elettronica e la presenza dei campioni di colore (riferimenti e campioni da misurare) dovrebbero influire poco sul risultato finale, poiché questi fenomeni operano contemporaneamente sui campioni e sui riferimenti. Inoltre la qualità del risultato finale dipende anche dalla regolarità del fattore di riflessione spettrale dei campioni da misurare. La generale regolarità del fattore di riflessione dei corpi di cui si vuole misurare il colore ci induce a essere fiduciosi nei risultati di questa tecnica, che, comunque, deve essere verificata sperimentalmente.

I limiti di questa procedura sono dati dal metamerismo strumentale, che è sicuramente diverso da quello dell'osservatore standard.

















	A	B	A	B
A				
D65				
TL84				
.....				

Fig. 4 – Confronto a monitor dei campioni A e B, a contatto e separati, sotto diversi illuminanti.

Appendice

Siano (R_n, G_n, B_n) e (X_n, Y_n, Z_n) , con $n = i, j, k$, le tre coppie di terne relative ai tre riferimenti più vicini al campione di colore in esame. Ogni coppia è connessa dalla trasformazione (1), in cui la matrice \mathbf{T} è incognita. Si ottiene un sistema lineare di 9 equazioni in 9 incognite

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_i \\ G_i \\ B_i \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_j \\ G_j \\ B_j \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_k \\ G_k \\ B_k \end{pmatrix}$$

La soluzione è la seguente

$$\begin{aligned} T_{11} &= \frac{1}{D} \det \begin{pmatrix} X_i & G_i & B_i \\ X_j & G_j & B_j \\ X_k & G_k & B_k \end{pmatrix}, & T_{12} &= \frac{1}{D} \det \begin{pmatrix} R_i & X_i & B_i \\ R_j & X_j & B_j \\ R_k & X_k & B_k \end{pmatrix}, & T_{13} &= \frac{1}{D} \det \begin{pmatrix} R_i & G_i & X_i \\ R_j & G_j & X_j \\ R_k & G_k & X_k \end{pmatrix} \\ T_{21} &= \frac{1}{D} \det \begin{pmatrix} Y_i & G_i & B_i \\ Y_j & G_j & B_j \\ Y_k & G_k & B_k \end{pmatrix}, & T_{22} &= \frac{1}{D} \det \begin{pmatrix} R_i & Y_i & B_i \\ R_j & Y_j & B_j \\ R_k & Y_k & B_k \end{pmatrix}, & T_{23} &= \frac{1}{D} \det \begin{pmatrix} R_i & G_i & Y_i \\ R_j & G_j & Y_j \\ R_k & G_k & Y_k \end{pmatrix} \\ T_{31} &= \frac{1}{D} \det \begin{pmatrix} Z_i & G_i & B_i \\ Z_j & G_j & B_j \\ Z_k & G_k & B_k \end{pmatrix}, & T_{32} &= \frac{1}{D} \det \begin{pmatrix} R_i & Z_i & B_i \\ R_j & Z_j & B_j \\ R_k & Z_k & B_k \end{pmatrix}, & T_{33} &= \frac{1}{D} \det \begin{pmatrix} R_i & G_i & Z_i \\ R_j & G_j & Z_j \\ R_k & G_k & Z_k \end{pmatrix} \\ & & & & D &= \det \begin{pmatrix} R_i & G_i & B_i \\ R_j & G_j & B_j \\ R_k & G_k & B_k \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Affinché D sia diverso da zero occorre che le terne (R_i, G_i, B_i) , (R_j, G_j, B_j) e (R_k, G_k, B_k) siano tra loro linearmente indipendenti.

Ringraziamenti

Questo progetto è stato realizzato nell'ambito del programma di ricerca scientifica "Cofinanziamento MIUR 2002" intitolato "Modellizzazione psicofisica e computazionale della percezione contestuale del colore" e al programma di ricerca "Azioni integrate Italia-Spagna" del MIUR 2003, codice IT928.

Bibliografia

1. P.C. Hung, "Colorimetric calibration in electronic imaging devices using a look-up table model and interpolation", *Journal of Electronic Imaging*, 2, 53-61 (1993).
2. P.C. Hung, "Colorimetric calibration for scanner and media", *Proc. SPIE*, 1448, 164-174 (1991).
3. H. R. Kang and P. G. Anderson, "Neural network application to color scanner and printer calibration", *Journal of Electronic Imaging*, 1, 125-134 (1992).
4. H. R. Kang, "Colour scanner calibration", *Journal of Imaging Science and Technology*, 36, no. 2, March/April 1992.
5. H. R. Kang, M. R. Luo, and P. Rhodes, "A study of digital camera colorimetric characterisation based on polynomial modelling", *Color Res. Appl.*, 26, 76-84 (2001).
6. M.R. Luo, G.H. Cui, C. Li, W. Ji and J. Dakin, "Applying Digital Cameras for Measuring Colours", *AIC Color 2002: Color & Textiles*, Maribor, SI, 121-127 (2002).
7. G.H. Cui, M.R. Luo, R.A. Rhodes, B.Rigg and J. Dakin, "Grading Textile fastness. Part I: using a digital camera system", *Coloration Technology*, (2003).
8. C.Li, G.H. Cui and M.R. Luo. "The Accuracy of Polynomials Models for Characterising Digital Cameras", *AIC Color 2003, Colour Communication and Management*, Bangkok, 166-170 (2003).
9. ColorAIXperts, *Faithful Colors by Multispectral Imaging*, www.color-aixperts.de, 2004.

Filtri ottici variabili per spettrometria multispettrale

ANGELA PIEGARI

ENEA - GRUPPO COMPONENTI OTTICI

Via Anguillarese 301 – 00060 Roma, Tel. 06 30483713, Fax 06 30486364
piegari@casaccia.enea.it

MICHELE DAMI

GALILEO AVIONICA

Via Einstein 35 – 50013 Campi Bisenzio (FI), Tel. 055 8950840, Fax 055 8950611
michele.dami@galileoavionica.it

1. Introduzione

La tecnica della spettrometria ottica si sta sempre più diffondendo dal campo prettamente scientifico alle applicazioni tecnologiche. Ci sono infatti esempi nel settore dell'agricoltura, dell'alimentazione, della sicurezza, dell'ambiente. In molte applicazioni, anche di tipo scientifico, c'è la necessità di portare gli strumenti sul luogo di misura e, a tal fine, il poter disporre di uno strumento compatto e maneggevole offrirebbe notevoli vantaggi applicativi. Nelle missioni di "remote sensing" spaziali, ad esempio, strumenti di massa ridotta e senza parti in movimento risultano essenziali.

Lo scopo del presente contributo è quello di mostrare come l'utilizzo in spettrometri ad immagini di particolari filtri in trasmissione, le cui prestazioni variano linearmente e con continuità lungo una dimensione del filtro stesso, consenta di ottenere strumenti di piccole dimensioni. I filtri attualmente in fase di progetto e realizzazione sono dedicati alle applicazioni spaziali dove le richieste sulle loro prestazioni sono molto stringenti. Saranno quindi riportati i risultati finora ottenuti in questo settore. L'applicazione nel campo della colorimetria non viene qui analizzata in dettaglio ma si può ipotizzare un opportuno spettrometro con un filtro progettato appositamente per tale tipo di misure.

2. Spettrometri multispettrali compatti

La maggior parte dei fotometri, con un filtro o un set di filtri, sono dedicati ad applicazioni in cui la banda spettrale esaminata o le lunghezze d'onda di interesse sono limitate, hanno quindi un uso ridotto; d'altra parte gli spettrofotometri tradizionali da banco ottico sono strumenti di dimensioni relativamente grandi e non possono essere utilizzati in applicazioni in cui il target non è facilmente accessibile. Un filtro con una stretta banda di trasmissione il cui picco si sposta spazialmente e con continuità lungo una direzione del filtro stesso (Figura 1a), consente di costruire un piccolo spettrometro multispettrale senza parti in

movimento. Se infatti il filtro stesso viene accoppiato a un rivelatore CCD (o array detector) come mostrato in Figura 1b, ogni linea di un rivelatore bidimensionale corredato di tale filtro, rivelerà la radiazione in una banda diversa di lunghezze d'onda. Il dispositivo diventa quindi un sensore spettrale di dimensioni molto piccole che può essere incorporato in vari tipi di strumenti a seconda dell'applicazione o semplicemente può far parte di un dispositivo portatile per normali misure di riflessione o trasmissione [1].

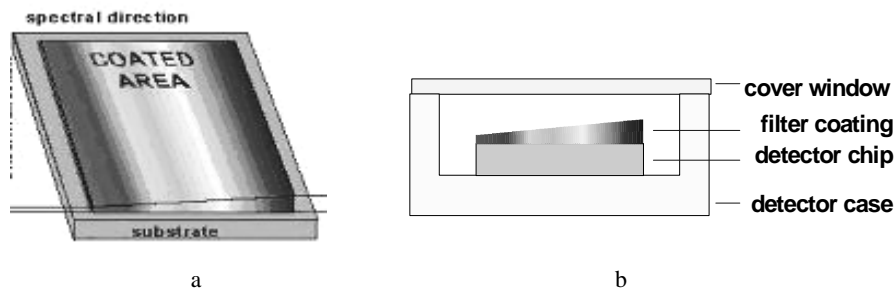


Fig. 1 – a) filtro ottico con picco di trasmissione variabile lungo una direzione, b) filtro variabile accoppiato a un rivelatore CCD

Tali filtri possono essere realizzati mediante la deposizione di materiali a film sottile su un substrato di base che potrebbe essere il detector stesso o una apposita finestra di chiusura realizzata in vetro o quarzo, che sarà poi posizionata e allineata sul detector. I filtri variabili esistono in commercio in due configurazioni [2]: quelli la cui risposta varia lungo una geometria circolare (CVF), e quelli le cui caratteristiche variano linearmente in una direzione (LVF) mentre nella direzione ortogonale le prestazioni rimangono costanti. I filtri variabili più richiesti sono quelli di taglio (long-wave pass) e quelli a banda stretta (narrow band). A seconda delle caratteristiche volute, la costruzione del filtro è più o meno complessa e se le richieste sono particolarmente stringenti diventa difficile trovarli sul mercato.

2.1 Osservazioni della Terra dallo spazio

Una caratteristica chiave degli spettrometri è il range di lunghezze d'onda in cui il dispositivo deve operare. Se questo range è molto ampio aumentano i problemi di realizzazione del filtro ottico. In particolare per i filtri in trasmissione a banda stretta, il rapporto tra massima e minima lunghezza d'onda di funzionamento è minore di 2:1, almeno nei filtri commerciali; per estendere il range spettrale bisogna unire più filtri con inevitabili zone cieche intermedie.

Nel caso della spettrometria d'immagine dallo spazio nel range visibile e vicino infrarosso (VIS - NIR), il range di lunghezze d'onda d'interesse è tipicamente 400-1000 nm quindi un rapporto 2.5:1 notevolmente maggiore di quello usuale. Una seconda fondamentale caratteristica degli spettrometri a immagine è la dispersione spettrale definita come rapporto fra variazione spettrale e spaziale, nella direzione

dello spettro, del picco di trasmissione. Questa grandezza definisce sia la dimensione complessiva del filtro sia la banda spettrale associata ad ogni pixel del rivelatore. Per tipici rivelatori a matrice e per bande spettrali per pixel, dell'ordine di 10 nm, la variazione spaziale del picco di trasmissione deve avvenire in una dimensione minore di 10 nm, mentre la dimensione tipica dei filtri in commercio è maggiore di 12 nm per il singolo filtro.

Queste due richieste molto severe hanno portato allo studio di un nuovo tipo di filtro che potesse soddisfare allo stesso tempo entrambe le esigenze: ampio spettro di funzionamento e alto gradiente spettrale. Unitamente a queste fondamentali caratteristiche ci sono poi altre richieste essenziali per tale applicazione quali:

- ∞ larghezza della banda di trasmissione <10 nm
 - ∞ trasmissione media fuori banda <0.5%
 - ∞ trasmissione di picco pari a circa 70%
 - ∞ variazione della trasmissione di picco nella direzione uniforme <1%
 - ∞ stabilità rispetto a variazioni di temperatura
- ed altre caratteristiche tipiche per applicazioni nello spazio.

Le prestazioni sopra elencate possono essere d'interesse anche in altri campi applicativi, quindi si riportano qui di seguito il progetto messo a punto per ottenere tale tipo di filtro e la descrizione delle tecniche realizzative.

2.2 Progetto e realizzazione del filtro

Il metodo classico per ottenere filtri in trasmissione a banda stretta è quello di usare strutture del tipo Fabry-Perot e cioè filtri costituiti da due superfici riflettenti separate da uno spaziatore. Tale tipo di filtro viene tipicamente realizzato con un "coating" multistrato a film sottili su un opportuno substrato. I singoli film sono di materiali dielettrici alternati e con spessori opportunamente calcolati, a seconda del loro indice di rifrazione e della lunghezza d'onda di riferimento λ_0 , alla quale si vuole posizionare il picco di trasmissione. La curva di trasmissione del dispositivo appare teoricamente come mostrato in Figura 2a, dove si è scelto $\lambda_0=600$ nm. Il problema di questi filtri è dato dalla zona di bloccaggio, fuori banda di trasmissione, che è piuttosto limitata per cui è difficile coprire un ampio spettro di funzionamento a meno di usare filtri aggiuntivi (Figura 2b). Ciò si traduce nel dover incrementare il numero di strati nel coating con conseguenti problemi realizzativi. Bisogna infatti tener presente che la risposta del filtro deve poi essere variata lungo la superficie del dispositivo e la presenza di molti strati rende tutto molto più complicato dal punto di vista pratico. Per questo motivo in commercio non è facile trovare filtri variabili con ampi spettri di funzionamento.

Con un tale tipo di filtro si potrebbe coprire un range di funzionamento da 450 a 700 nm facendo spostare il picco di trasmissione, mostrato in Figura 2b, sia verso lunghezze d'onda più corte sia verso lunghezze d'onda più lunghe con una semplice variazione dello spessore del coating stesso. Il risultato apparirebbe come mostrato in Figura 3.

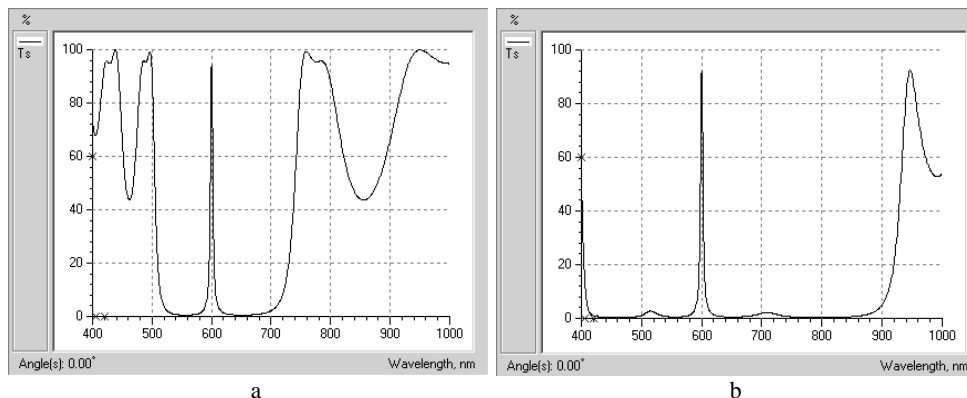


Fig. 2 – Trasmittanza di un filtro a) Fabry-Perot tutto dielettrico a 19 strati, b) con l'aggiunta di due filtri di bloccaggio per un totale di 19+38 strati

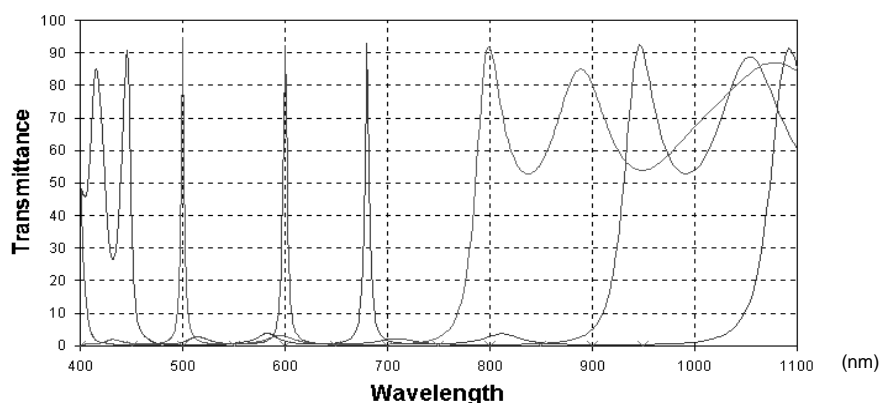


Fig. 3 – Trasmittanza di diversi filtri Fabry-Perot aventi diverse lunghezze d'onda di picco λ_0

L'esigenza di coprire un largo range spettrale (rapporto 2.5:1) con un unico filtro ha portato ad un diverso approccio per la progettazione del filtro variabile. In particolare il filtro che viene proposto è costituito da strati di materiali dielettrici e metallici. Si sfrutta il principio secondo il quale se ad uno strato metallico viene eliminata la riflessione, creando un matching del suo indice di rifrazione con il mezzo circostante, si ottiene un'elevata trasmissione a quella lunghezza d'onda alla quale si realizza tale matching. In tal caso la trasmissione a tale lunghezza d'onda sarà limitata soltanto dall'assorbimento dello strato metallico [4]. Lo strato metallico dovrà essere quindi molto sottile, tipicamente minore di 100 nm. Anche il tipo di metallo va opportunamente scelto a seconda delle lunghezze d'onda d'interesse. Nel VIS-NIR il metallo con caratteristiche migliori è l'argento a causa del suo elevato rapporto k/n , dove n è l'indice di rifrazione reale e k è il coefficiente d'estinzione. Una volta stabilito lo spessore del film di argento, che

tipicamente è intorno ai 50 nm, bisogna eliminare la riflessione su entrambi i lati e a tal fine andranno inseriti due coatings tra l'argento e i mezzi circostanti (substrato e aria). Si può calcolare il numero e lo spessore degli strati costituenti tali coatings in modo abbastanza semplice [4] e il risultato dipenderà dalla lunghezza d'onda di riferimento λ_0 . La risposta ottica in trasmissione e riflessione sarà del tipo mostrato in Figura 4. Come si può vedere dalla figura, le prestazioni peggiorano a lunghezze d'onda più lunghe, inoltre la banda di trasmissione è troppo larga rispetto alle richieste. Con un'opportuna azione di ottimizzazione del filtro si può fare in modo che la banda di trasmissione risulti più stretta e che la trasmissione fuori banda venga ridotta. Inoltre nel processo di ottimizzazione, che viene eseguito con opportuni programmi di calcolo, bisognerà imporre che il numero di strati non cambi al variare della lunghezza d'onda di riferimento. Il risultato finale è mostrato in Figura 5 dove è riportata la risposta di un filtro metallo-dielettrico, con uno strato di argento e 26 strati dielettrici alternati di ossido di silicio e ossido di afnio, per varie lunghezze d'onda di picco. Come si può vedere la zona di bloccaggio fuori banda copre tutto il range richiesto e la larghezza della banda di trasmissione è minore dell'1% di λ_0 .

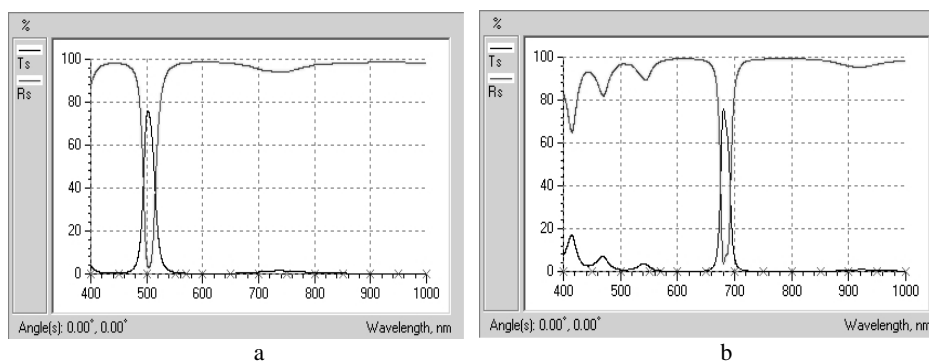


Fig. 4 – Trasmittanza T (—) e riflettanza R (—) di due filtri metallo-dielettrico a) con $\lambda_0=500$ nm e 13 strati, b) con $\lambda_0=680$ nm e 17 strati

Per realizzare in pratica il filtro linearmente variabile (LVF) bisognerà variare, lungo una direzione del substrato, lo spessore del coating ed in particolare degli strati dielettrici in esso contenuti, con una legge lineare. Tale variazione sarà correlata alla variazione desiderata della lunghezza d'onda del picco, come mostrato nell'esempio di Figura 6. La variazione di spessore di ogni singolo strato dipenderà dal suo indice di rifrazione, così per esempio nell'intervallo di lunghezze d'onda 400-1000 nm, per l'ossido di silicio si andrà da circa 70 nm a circa 170 nm mentre per l'ossido di afnio si andrà da circa 50 nm a circa 120 nm, lungo una dimensione del substrato.

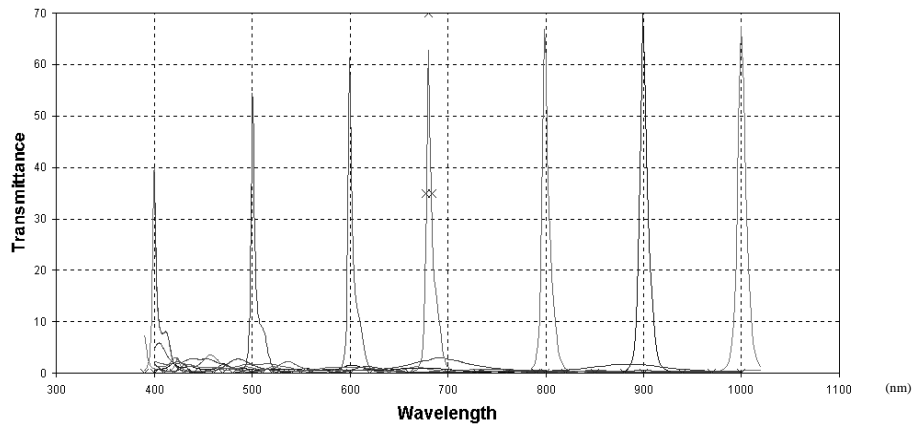


Fig. 5 – Trasmittanza teorica di un filtro variabile ottenuto con un coating metallo-dielettrico di 27 strati su un substrato di vetro (la larghezza di banda a metà altezza a $\lambda_0= 680$ nm è di 5 nm)

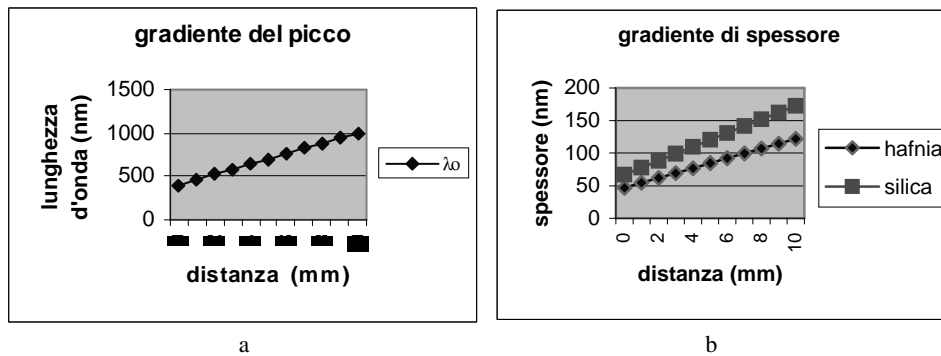


Fig. 6 – Variazione lineare a) di λ_0 e b) conseguente variazione degli spessori dei film di SiO_2 e HfO_2

Per realizzare queste variazioni spaziali dello spessore bisognerà introdurre nel sistema di deposizione dei film, delle opportune maschere che, muovendosi durante la fase di deposizione, consentano di ottenere uno spessore con la variazione voluta entro una dimensione di pochi millimetri. A questo fine è utile aver progettato un coating con un numero non troppo elevato di strati per ridurre gli errori di fabbricazione. Si può calcolare comunque, mediante opportune simulazioni, che l'errore sui singoli spessori non deve essere maggiore dello 0.5% pena lo spostamento e la diminuzione non accettabile del picco di trasmissione, come mostrato in Figura 7.

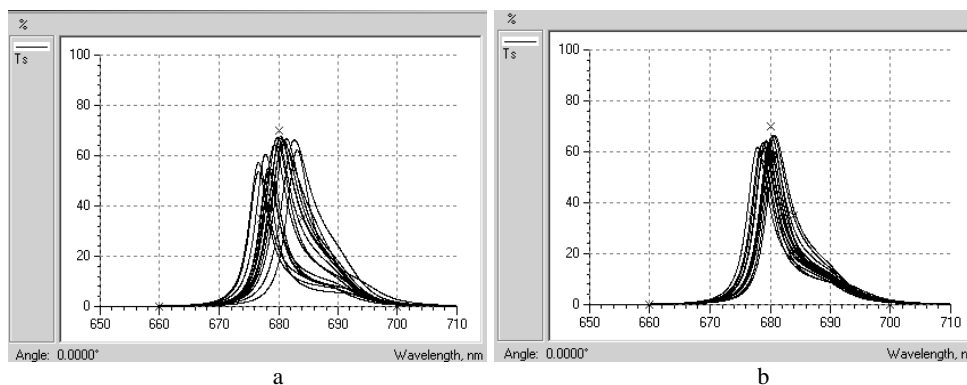


Fig. 7 – Effetti sul picco di trasmissione del filtro di Fig.5 di errori di spessore di: a) 1%, b) 0.5% con distribuzione random su tutti gli strati

Altri peggioramenti delle prestazioni possono poi derivare dall'accoppiamento del filtro al rivelatore e dall'utilizzo del dispositivo all'interno di specifici strumenti.

2.3 Caratteristiche e limiti di uno spettrometro basato su filtri variabili

La peculiarità di uno spettrometro basato su un filtro ottico variabile è la eliminazione del componente che realizza la dispersione spettrale (grating o prisma) e del relativo sistema ottico associato. Nel caso del filtro variabile è sufficiente montare e allineare direttamente davanti al detector il filtro stesso. In questo modo la radiazione ottica in ingresso viene integrata sulle colonne della matrice CCD, dopo essere stata selezionata nella banda spettrale dalla zona del filtro attraversata. Poiché la trasmissione della lunghezza d'onda di picco cambia linearmente nella direzione delle righe del rivelatore, in ogni singola acquisizione, "frame" del CCD, si acquisisce un intervallo spettrale per ogni colonna del rivelatore.

Nel singolo frame le diverse colonne del rivelatore corrisponderanno a parti diverse del target a lunghezze d'onda diverse. Solo quando sarà eseguita una scansione completa del target stesso pari alla dimensione spettrale del rivelatore, risulteranno acquisite tutte le immagini spettrali del target. La regione di spazio esaminata è definita dalle caratteristiche del sistema ottico e dalla dimensione del rivelatore.

La Figura 8 mostra lo schema di uno spettrometro di questo tipo dedicato ad applicazioni spaziali. La ricostruzione bidimensionale dell'immagine avviene in questo caso sfruttando il movimento relativo fra satellite e target. La direzione delle colonne del rivelatore, che rappresentano la dimensione spaziale del filtro, proiettate verso il target, è in questo caso perpendicolare alla traccia sul target dell'orbita del satellite (Figura 9). Viene quindi acquisita una striscia bidimensionale indefinitamente estesa nella direzione del moto del satellite. Questo tipo di uso implica notevoli constraints relativamente: alla velocità di lettura del frame che deve essere sincrono con la velocità sul target del satellite, alla

dimensione della memoria di bordo per contenere i dati acquisiti e alla velocità di trasmissione dei dati a terra.

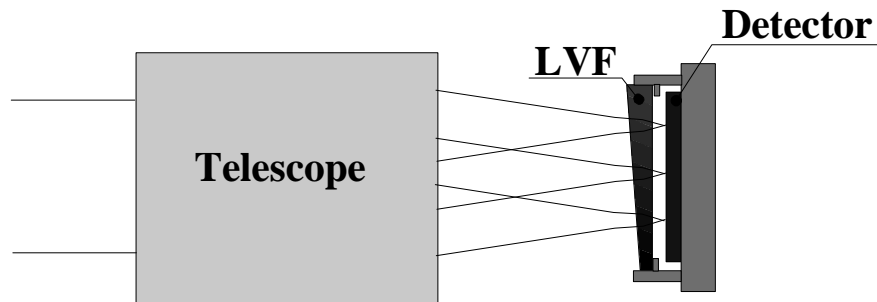


Fig. 8 – Schema dello spettrometro

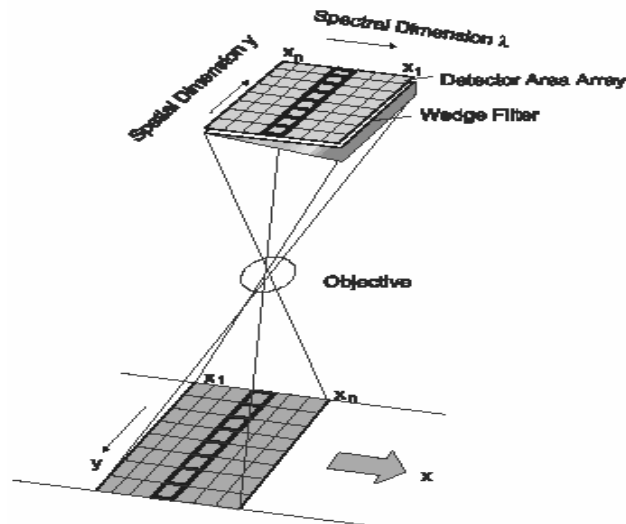


Fig. 9 – Movimento relativo del rivelatore (in alto) e del target

Per quanto riguarda l'obiettivo ottico viene utilizzato un telescopio, realizzato tutto a specchi, che focalizza sul piano focale, dove è situato il rivelatore, l'immagine del target considerato all'infinito.

Un altro aspetto caratteristico è la separazione fra il filtro e l'area sensibile del rivelatore questa è necessaria nel caso di applicazioni spaziali per evitare danneggiamenti durante le vibrazioni del lancio non potendo incollare direttamente il filtro sul rivelatore a causa di problemi di outgasing e di trasmissione spettrale degli adesivi, stress termomeccanici indotti da salti termici e materiali diversi incollati tra loro. Le caratteristiche spettrali di questo spettrometro sono elencate nel paragrafo 2.1.

Si ritiene possibile utilizzare il filtro variabile anche per spettrometri ad immagine per l'osservazione di target al finito. In questo caso le principali modifiche che si renderebbero necessarie riguardano:

- ☞ la sostituzione del telescopio con un obiettivo. Le caratteristiche di questo obiettivo dovrebbero essere definite in base alla risoluzione ottica e il campo di vista totale richiesti, tenendo anche conto delle dimensioni del rivelatore CCD. Il singolo frame corrisponderebbe ad una zona del target in esame, otticamente coniugata ad una colonna del rivelatore.
- ☞ L'immagine iperspettrale si otterrebbe traslando l'intero strumento in maniera sincrona con la lettura del rivelatore, in direzione delle righe del rivelatore e per una distanza corrispondente a tanti passi quanti sono i pixels del rivelatore; ogni passo pari alla interdistanza dei pixels del rivelatore.
- ☞ Le caratteristiche spettrali, per quanto riguarda in particolare la risoluzione spettrale, potrebbero essere migliorate ottenendo una larghezza della banda di trasmissione <5 nm.
- ☞ Inoltre il filtro potrebbe essere direttamente posto in contatto con la superficie sensibile del rivelatore non essendo più applicabili i requisiti dovuti alle vibrazioni e in questo modo risulterebbero migliorate le prestazioni dello spettrometro riguardo alla luce diffusa e alle immagini spurie che derivano dalla separazione fra filtro e superficie del detector.

3. Conclusioni

Le caratteristiche qui descritte del filtro ottico variabile, e conseguentemente del dispositivo ad esso connesso, sono quelle richieste per applicazioni per spettrometria d'immagine dallo spazio, dove le specifiche sono particolarmente severe e non trovano riscontro sul mercato attuale. Ciò nondimeno si è dimostrata la possibilità di progettare un filtro ad-hoc per una specifica applicazione con uno spettro di funzionamento molto ampio. Il dispositivo potrebbe essere d'interesse anche per altre applicazioni tipo la colorimetria, dove la possibilità di disporre di spettrometri di piccole dimensioni risulterebbe utile per misure fuori dal laboratorio e vicino agli oggetti da analizzare.

Bibliografia

1. J.P. Coates, "New Microspectrometers", *Spectroscopy*, 15, 2000, pp.21-27.
2. D.W. Morelli, "Variable filters", in: *Interference Filter Handbook*, OCLI, California, 1998, www.oci.com.
3. A. Piegari, V. Janicki, "Metal-dielectric coatings for variable transmission filters with wide rejection bands" *SPIE Proc.*, Vol. 5250, 2003.
4. H.A. Macleod, *Thin film optical filters*, Macmillan Publishing Company, New York, 1986.

Estimating Surface Reflectance Functions from Tristimulus Values

SILVIA ZUFFI

ITC CNR, UNITÀ STACCATA DI MILANO
Via Bassini, 15 – 20133 Milano, Tel. 0223699557, Fax: 0223699543
zuffi@itc.cnr.it

RAIMONDO SCETTINI

DISCO, UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO BICOCCA
via Bicocca degli Arcimboldi, 8 - 20126 Milano
schettini@disco.unimib.it

1. Introduction

Information about the spectral reflectance of a color surface is useful in many applications. It can, for example, be helpful in simulating the change in appearance of a colored object under changing illuminants in CAD applications; or provide the input of computer programs for the matching color formulation of paints, inks, plastics, and textiles; or serve as input for many general computer graphics applications that require a wavelength-based approach to specify colors.

Unfortunately, the surface reflectance is not often specified; most of the time, surface color information is given as RGB or XYZ tristimulus values.

We address here the problem of estimating plausible reflectance spectra from tristimulus values for a variety of representations of reflectance functions through linear models. The main assumptions of our work are that the illuminant spectrum is known, that reflectance spectra are smooth functions of wavelength in the range of reflectance values between 0 and 100, and that no phenomena of fluorescence occur. Linear models represent reflectance functions with a good to high degree of accuracy, depending on the number of basis functions considered. There are many studies on the dimensionality of linear models based on Principal Component Analysis (PCA) for real reflectance spectra approximation. In general, for natural surfaces, a dimension of 6 to 9 bases is considered sufficient 1-3, while, for skin reflectance, three basis functions are enough 4. Most of the methods available for the estimation of reflectance from tristimulus values assume it is possible to represent the spectral reflectance functions with a three-dimensional linear model, e.g. 57, do not allow the simultaneous exploitation of tristimulus values referred to different illuminants, and employ a fixed pre-defined set of basis functions to model reflectance spectra. Unfortunately, using three PCA basis functions to estimate a reflectance spectrum from tristimulus values may still not offer a good solution. While the reflectance spectrum obtained may be perfectly metameric with

respect to the unknown spectrum under the given illuminant and with the given observer, it may exhibit poor colorimetric matching with a different illuminant or observer, indicating that the underlying spectral match required has not been obtained. Since the spectral matching cannot be addressed directly, a method that allows the synthesis of a surface reflectance spectrum by taking into account colorimetric information referred to different illumination or observation conditions can increase the similarity between the estimated and the unknown reflectance spectrum.

We have applied genetic algorithms to formulate the problem of reflectance estimation for the simultaneous optimization of several constraints. We have also investigated, in the framework of the proposed method, the performance of different basis sets for reflectance function representation.

In Section 2 we provide a formal formulation of the problem addressed. Section 3 describes the basis functions considered here, while Section 4 is a brief overview of the genetic algorithm proposed. The performance of the algorithm and of the basis functions is examined in Section 5, where standard datasets are used for benchmarking.

2. Problem Formulation

A color stimulus is related to the CIE XYZ tristimulus values by the following equations:

$$\begin{aligned} X &= K \int_{\lambda} R(\lambda) I(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= K \int_{\lambda} R(\lambda) I(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= K \int_{\lambda} R(\lambda) I(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

where $R(\lambda)$ is the reflectance spectrum, $I(\lambda)$ is the illuminant's spectral power distribution, $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ and $\bar{z}(\lambda)$ are the color matching functions that define the CIE 1931 standard colorimetric observer. If the reflectance function is represented in the range of $[0,1]$, and a luminance of 100 is attributed to the light source in the scene, then the normalization factor K is:

$$K = \frac{100}{\int_{\lambda} I(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

Equation (1) indicates that an infinite number of different reflectance functions may generate the same tristimulus values. The reflectance function may be expressed through a linear model as a weighted sum of a set of basis functions:

$$R(\lambda) = \sum_{j=1}^{\tilde{N}} w_j b_j(\lambda) \quad (3)$$

where \tilde{N} is the number of bases in the linear model, $b_j(\lambda)$ is the base function of index j , and w_j is the corresponding weight. We have considered $\lambda_{min}= 400$ nm, $\lambda_{max}= 700$ nm and $\Delta\lambda= 10$ nm here. Approximating the three integrals in equations (1) as summations over a limited range of wavelengths, and applying equation (3), the tristimulus values equations become:

$$\begin{aligned} X &= K \sum_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \sum_{j=1}^{\tilde{N}} w_j b_j(\lambda) I(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y &= K \sum_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \sum_{j=1}^{\tilde{N}} w_j b_j(\lambda) I(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z &= K \sum_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \sum_{j=1}^{\tilde{N}} w_j b_j(\lambda) I(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{aligned} \quad (4)$$

We must now find the weights in equation (4), given the tristimulus values and assuming that no fluorescence occurs. Once the weights have been estimated, the reflectance spectrum can be computed using equation (3). We considered different types of basis sets, all of which require the estimation of a variable number of parameters.

3. The Basis Set Considered

The different sets of basis functions experimented included those obtained by Principal Component Analysis performed on the datasets studied and Gaussian basis functions.

3.1 Principal Component Analysis

Principal Component Analysis allows the computation of basis functions for linear model representation. A PCA basis set corresponds to directions having maximum variance in the data space; the idea is to account for the direction in which the measured data has the most variance. The use of PCA implies the assumption that the distribution of the data has a Gaussian form.

The number of components needed to accurately represent a set of reflectance spectra depends on the characteristics of the data set. The reflectance spectra of most objects found in nature are smooth functions of wavelength; the same is true of spectra produced using photography, printing, or paints. These spectra can, therefore, be accurately represented by a limited number of basis functions⁸.

Various studies have estimated that three to seven principal components will provide a satisfactory reconstruction of the reflectance spectra in most cases, while increasing the number does not guarantee a better performance⁹.

We have set the number of basis functions at six, in accordance with Maloney², who has demonstrated that a linear model with as few as six basis functions provides essentially perfect fits for almost all natural surface spectral reflectance functions. Consequently the reflectance function here is represented by the following equation:

$$R(\lambda) = \sum_{j=1}^6 A_j b_j(\lambda) \quad (5)$$

where $b_j(\lambda)$ is the basis function of index j , and A_j is the corresponding weight.

3.2 Gaussian Basis Functions

Angelopoulou et al. ¹⁰ have used an approximation of reflectance spectra with Gaussian functions to model skin reflectances. A Gaussian basis set has also been used by Dupont ¹¹. We considered a basis set composed of 15 Gaussian functions obtained with the following equation:

$$g_j(\lambda) = \exp\left[-4 \ln(2) \frac{(\lambda - \lambda_j)^2}{40}\right] \quad j = 1..15 \quad (6)$$

where λ_j ranges from 400 to 700 with a step of 20. The reflectance function is represented by the equation

$$R(\lambda) = \sum_{j=1}^{15} D_j g_j(\lambda) \quad (7)$$

where D_j are the fifteen weights of the linear model to be estimated.

We refer to this basis as the ‘‘Fixed Gaussian’’ case (FG). We have also investigated a ‘‘Variable Gaussian’’(VG) approach, in which the reflectance function is modeled using a constant term and three Gaussian functions:

$$\begin{aligned}
R(\lambda) = & E_0 + E_1 \exp \left[-\frac{\left(\frac{\lambda - \lambda_{\min}}{L} - E_2 \right)^2}{E_3^2} \right] + \\
& + E_4 \exp \left[-\frac{\left(\frac{\lambda - \lambda_{\min}}{L} - E_5 \right)^2}{E_6^2} \right] + E_7 \exp \left[-\frac{\left(\frac{\lambda - \lambda_{\min}}{L} - E_8 \right)^2}{E_9^2} \right]
\end{aligned} \tag{8}$$

where the unknowns are the weights E_0 , E_1 , E_4 , and E_7 , the mean terms E_2 , E_5 , and E_8 , and the terms E_3 , E_6 , and E_9 correlated with the standard deviation.

4. Genetic algorithms

Genetic algorithms (GA) are a general method for solving optimization problems, inspired by the mechanisms of evolution in biological systems (see e.g. 12, 13 for an introduction to GA and their applications). In the basic genetic algorithm, every candidate solution is represented by a sequence of binary, integer, real, or even more complex values, called an individual. A number of individuals are randomly generated as an initial population. The GA then iterates a procedure that produces a new population from the current one, until a given "STOP" criterion is satisfied. At each iteration, the value of a suitable "fitness" function is computed for every individual in the current population; the goal of the GA is to generate an individual with the best value of fitness. Given the problem described in Section 2, and assuming that only a triplet of tristimulus values is available, fitness is the squared sum of the perceptual differences between the CIELab values computed on the input color and those computed on the estimated reflectance spectrum, plus a term of range violation, with no perceptual meaning, to account for the bounds the solution must respect in order to match physical reflectance properties:

$$fitness = \left[(L^* - L_{input,III}^*)^2 + (a^* - a_{input,III}^*)^2 + (b^* - b_{input,III}^*)^2 \right]_{III} + \delta_1(R(\lambda)) + \delta_2(R(\lambda)) \tag{9}$$

where $\delta_1(R(\lambda)) = D_1 \left[\max_{\lambda} (R(\lambda)) - 100 \right]$ iff $\max_{\lambda} (R(\lambda)) > 100$, else $\delta_1(R(\lambda)) = 0$ and $\delta_2(R(\lambda)) = -D_2 \min_{\lambda} (R(\lambda))$ iff $\min_{\lambda} (R(\lambda)) < 0$, else $\delta_2(R(\lambda)) = 0$.

Parameters D_1 and D_2 must be positive, and define the weight in the optimization function of the range violation error with respect to the colorimetric perceptual error. In our experiment we set $D_1 = D_2 = 1$. No term of smoothness has been

considered in the fitness function: the smoothness of the reflectance spectrum is not an issue, due to the characteristics of the linear model basis employed. Many different spectra can generate the same XYZ triplet. If we assume that the tristimulus values referred to different illuminants are also known, a more effective fitness function can be designed:

$$f = \sum_{k=1}^K \left[(L^* - L_{input, Ill_k}^*)^2 + (a^* - a_{input, Ill_k}^*)^2 + (b^* - b_{input, Ill_k}^*)^2 \right]_{Ill_k} + \delta_1(R(\lambda)) + \delta_2(R(\lambda)) \quad (10)$$

where K is the number of illuminants considered, and the other symbols are those used in equation (9).

5. Experiments and Results

Different data sets of reflectance functions have been used for benchmarking: the Macbeth ColorChecker Chart, the whole Munsell Atlas 14, a set of 120 Dupont paint chips 15 and a set of 1000 silk color samples 16. The following experiments were performed. For each dataset, given $R(\lambda)$ we computed the tristimulus values for three illuminants: D65, A, and F2. Then, for each type of basis set, we estimated the weights of equation (4) by means of a genetic algorithm using the fitness function described in (10). We conducted three experiments for each basis set and for each dataset: one considering only the D65 illuminant, a second considering the D65 and the A illuminants, and a third considering all three illuminants (D65, A and F2). The results for the different basis sets are described in Section 3.

We computed four basis sets by applying Principal Component Analysis to the datasets used for benchmarking. We then estimated the reflectance spectra for each dataset, using the corresponding basis set. Table 1 reports the statistics of results obtained using the PCA basis set of each dataset considered.

In Table 1, the results are reported as average error, maximum error and standard deviation of the distance in CIELAB space between the coordinates of the measured and the estimated spectra under the illuminants D65, A, and F2. The spectral mismatch is reported as the mean absolute error between reflectance spectra. For each dataset, the first row reports the results for the estimation, assuming the tristimulus values for the D65 illuminant are available. In this case, the colorimetric error ΔE D65 is low, while colorimetric errors for the A and F2 illuminants are larger, and indicate that the estimated spectra are metameric with respect to the original ones. The use of two or three illuminants, as reported in the second and third row of each dataset, reduces the difference between colorimetric errors. As a consequence, the spectral error is also reduced. Table 2 reports the statistics of results obtained using the fitness in equations (10), and the FG basis set. Table 3 shows the statistics of the results obtained employing the VG basis set.

Tab. 1 – Statistics of results obtained using the PCA basis set of each of the dataset considered (MAE = mean absolute error, avg = mean value, M = maximum value, sdv = standard deviation)

PCA	ΔE D65			ΔE A			ΔE F2			MAE		
	avg	M	sdv	avg	M	sdv	avg	M	sdv	avg	M	sdv
Macbeth, D65	0.00	0.09	0.02	2.72	8.24	2.01	2.26	6.20	1.52	3.19	5.82	1.58
D65,A	0.19	0.60	0.14	0.20	0.51	0.14	0.75	1.79	0.54	2.15	5.11	1.10
D65,A,F2	0.18	0.66	0.14	0.26	0.94	0.20	0.32	1.02	0.27	1.66	5.50	1.03
Munsell, D65	0.00	0.08	0.01	1.67	9.73	1.50	1.32	8.69	1.18	1.81	8.57	1.30
D65,A	0.13	0.87	0.11	0.14	1.06	0.12	0.90	7.54	0.84	1.82	7.58	1.22
D65,A,F2	0.18	2.21	0.17	0.29	1.90	0.24	0.27	2.14	0.23	1.25	4.64	0.70
Dupont, D65	0.06	0.72	0.13	3.85	22.9	4.77	3.16	16.8	3.43	2.81	7.38	1.43
D65,A	0.35	1.55	0.36	0.40	2.62	0.48	2.28	17.9	2.98	1.98	6.10	1.13
D65,A,F2	0.47	2.68	0.58	0.77	7.55	1.07	0.79	6.35	1.09	1.48	5.69	0.79
Silk, D65	0.01	0.38	0.04	1.92	8.34	1.52	1.85	8.70	1.27	2.01	8.80	1.54
D65,A	0.23	1.13	0.18	0.24	1.54	0.19	1.28	7.72	1.17	1.66	7.96	1.21
D65,A,F2	0.28	1.29	0.21	0.46	3.17	0.37	0.47	2.49	0.36	1.55	7.77	1.14

Tab. 2 – Statistics of results obtained using the Fixed Gaussian basis set (MAE = mean absolute error, avg = mean value, M = maximum value, sdv = standard deviation)

Fixed Gaussian	ΔE D65			ΔE A			ΔE F2			MAE		
	avg	M	sdv	avg	M	sdv	avg	M	sdv	avg	M	sdv
Macbeth, D65	0.13	0.45	0.11	3.87	9.13	2.60	3.19	5.67	1.51	5.68	10.2	2.94
D65,A	0.45	1.03	0.23	0.43	1.06	0.22	1.92	4.25	0.96	3.66	9.04	1.95
D65,A,F2	0.45	1.11	0.24	0.53	2.25	0.44	0.69	1.76	0.42	3.09	7.45	1.72
Munsell, D65	0.12	0.81	0.10	4.44	14.3	2.90	3.47	10.0	1.82	6.43	18.3	3.57
D65,A	0.38	1.62	0.21	0.36	1.33	0.19	1.67	6.21	0.98	3.35	11.7	1.98
D65,A,F2	0.41	1.67	0.26	0.46	1.87	0.27	0.58	2.17	0.32	2.59	8.36	1.54
Dupont, D65	0.19	2.56	0.33	3.16	11.3	2.15	2.36	9.58	1.48	5.28	16.2	3.45
D65,A	0.49	2.68	0.40	0.47	2.05	0.40	1.51	3.79	0.80	3.41	11.9	2.26
D65,A,F2	0.53	2.57	0.43	0.64	2.28	0.46	0.73	2.60	0.50	2.96	7.31	1.89
Silk, D65	0.16	1.43	0.16	3.71	14.3	2.52	3.08	9.88	1.66	5.17	15.8	2.84
D65,A	0.43	2.40	0.27	0.42	2.46	0.26	1.68	6.58	0.99	3.79	10.8	1.99
D65,A,F2	0.51	3.57	0.35	0.55	2.37	0.32	0.66	2.88	0.36	3.42	10.6	1.76

Tab. 3 – Statistics of results obtained using the Variable Gaussian basis set (MAE = mean absolute error, avg = mean value, M = maximum value, sdv = standard deviation)

Variable Gaussian	ΔE D65			ΔE A			ΔE F2			MAE		
	avg	M	sdv	avg	M	sdv	avg	M	sdv	avg	M	sdv
Macbeth, D65	0.00	0.01	0.00	1.93	7.50	2.03	1.71	7.38	2.04	2.95	9.01	2.40
D65,A	0.24	0.75	0.23	0.23	0.62	0.21	1.43	4.09	1.37	2.67	9.84	2.42
D65,A,F2	0.43	1.49	0.43	0.45	1.76	0.52	0.56	1.51	0.47	2.35	6.26	1.71
Munsell, D65	0.00	0.25	0.01	2.26	11.2	1.89	1.77	10.4	1.52	3.10	15.2	2.05
D65,A	0.18	1.02	0.16	0.18	1.44	0.18	0.94	10.9	0.87	2.08	10.6	1.54
D65,A,F2	0.26	2.79	0.27	0.30	2.34	0.28	0.38	2.88	0.32	1.85	9.61	1.33
Dupont, D65	0.04	1.07	0.12	3.20	18.5	3.17	2.16	9.83	1.96	3.87	11.7	2.36
D65,A	0.32	2.70	0.43	0.37	3.95	0.61	1.25	4.24	1.05	2.98	12.4	2.26
D65,A,F2	0.41	3.92	0.50	0.50	5.03	0.69	0.53	2.45	0.50	3.02	10.6	2.35
Silk, D65	0.01	0.73	0.05	3.08	11.5	2.15	2.43	12.4	1.90	5.14	17.5	2.84
D65,A	0.28	2.50	0.28	0.30	4.22	0.38	1.52	12.0	1.44	3.68	12.5	2.23
D65,A,F2	0.42	4.72	0.48	0.47	5.55	0.52	0.62	5.00	0.63	3.16	10.4	1.94

The Variable basis set performs better here than the Fixed set of Gaussian functions, as can be observed by comparing Tables 2 and 3.

6. Conclusions

We have addressed the problem of synthesizing a spectral reflectance function given the standard CIE 1931 tristimulus values and representing the unknown reflectance functions with linear models. In particular, we have investigated different types of basis functions for the linear model, and different datasets for benchmarking. No single set of basis functions can perfectly model all reflectance functions. Our results confirm that PCA basis sets provide the most effective approach to the problem. These results also indicate that when a suitable set of reflectance data for the calculus of PCA basis functions is lacking, a Gaussian basis set may be satisfactorily employed instead.

References

1. J. Cohen, "Dependency of the spectral reflectance curves of the Munsell color chips", *Psychonomic Science*, vol. 1, pp. 369-370, 1964.
2. L. T. Maloney, "Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with a small number of parameters", *J Opt Soc Am*, vol. 3, pp. 1673-1683, 1986.
3. T. Jaaskelainen, J. Parkkinen, and S. Toyooka, "A vector-subspace model for color representation", *Journal of the Optical Society of America A*, 7, 725-730, 1990.
4. Q. Sun, M. D. Fairchild, "Statistical Characterization of Spectral Reflectances in Spectral Imaging of Human Portraiture", *The IS&T/SID Ninth Color Imaging Conference*, November 2001.
5. Y. Sun, F. D. Fracchia, T. W. Calvert, M. S. Drew, "Deriving Spectra from Colors and Rendering Light Interface", *IEEE Computer Graphics and Applications*, July/August 1999.
6. F. Cheng, W. Hsu, T. Chen, "Recovering Colors in an Image with Chromatic Illuminant", *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 7, no. 11, November 1998.
7. R. Schettini, "Deriving spectral reflectance functions of computer-simulated object colors", *Computer Graphics Forum*, vol. 13 (4), 1994.
8. G. Sharma, H. J. Trussel, "Digital Color Imaging", *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 6, no. 7, July 1997.
9. D. Connah, S. Westland, M.G.A. Thomson, "Recovering spectral information using digital camera systems", *Journal of Coloration Technology*, 117, 309-312, 2001.
10. E. Angelopoulou, R. Molana, Rana, K. Daniilidis, "Multispectral Skin Color Modeling", *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE Computer Society Press, pp. 635-642, December 2001.
11. D. Dupont, "Study of the Reconstruction of Reflectance Curves Based on Tristimulus Values: Comparison of Methods of Optimization", *Color Research and Application*, vol. 27, no. 2, April 2002.
12. M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, MIT Press, 1996.

13. D.E. Goldberg, *Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison Wesley, 1989.
14. <http://www.it.lut.fi/ip/research/color/database/database.html>
15. http://www.cs.sfu.ca/~colour/data/colour_constancy_synthetic_test_data/index.html
16. ISO/TR 16066:2003, Standard object colour spectra database for colour reproduction evaluation (SOCS).

Caratterizzazione di soluzioni operative per spettrofotometri di medio – basso costo

GIULIO D'EMILIA, ELENA DI CARLO

DIPARTIMENTO DI ENERGETICA, FACOLTÀ DI INGEGNERIA DI L'AQUILA
67040 Roio Poggio – AQ, Tel: 0862.434324
demilia@ing.univaq.it, edicarlo@ing.univaq.it

1. Introduzione

L'attenzione all'ambiente rappresenta per le imprese un obiettivo sia in termini di crescita e sviluppo, sia in termini di immagine e accettabilità sociale. Oggi l'acqua, sia essa di scarico, superficiale o potabile, è uno dei beni più preziosi e pertanto viene tutelata da un'ampia e dettagliata normativa nazionale ed europea.

I sistemi produttivi si concretizzano spesso in realtà piccole e distinte, per cui richiedono un monitoraggio diffuso sul territorio e con costi delle singole stazioni di misura ridotti.

Gli aspetti da approfondire nella realizzazione di una strumentazione in grado di monitorare le grandezze di interesse e gli elementi che costituiscono un pericolo per la salute dell'uomo e dell'ambiente, riguardano la capacità di effettuare un'analisi in continuo, che dia risultati affidabili, con ridotti problemi di manutenzione, che permetta una conoscenza in tempo reale dei dati da analizzare e che sia gestibile con facilità.

Metodi di misura della concentrazione di inquinanti in acqua, basati su misure spettrofotometriche, sono ormai molto diffusi sia per applicazioni tipicamente di laboratorio, sia con riferimento a sistemi operanti in sito [1-2].

Nelle applicazioni di monitoraggio ambientali questi ultimi appaiono sempre più interessanti da un punto di vista applicativo e per la sempre maggiore diffusione [3-5].

Le problematiche che si riscontrano nello sviluppo di sistemi di misura di questo tipo riguardano la difficoltà di realizzare una strategia in grado di confrontarsi con una mappa di fonti di inquinamento fortemente distribuita sul territorio e perciò delocalizzata.

I più comuni spettrofotometri che realizzano misure colorimetriche, infatti, sono strumentazioni di notevoli dimensioni, di costo elevato e il cui utilizzo è preferibile nei laboratori.

L'impiego di spettrofotometri miniaturizzati, di costo contenuto, che usino fibre ottiche per consentire un utilizzo della strumentazione anche a distanza dell'apparecchiatura stessa, è una soluzione di possibile interesse per una realtà fatta di piccole e medie imprese [6-7].

Poiché sistemi di misura di questo tipo sono caratterizzati da dimensioni ridotte, basso costo, interfacciati a semplici sistemi di acquisizione e, operando in campo,

sono affetti da grandezze di influenza difficilmente prevedibili, appare importante caratterizzare in maniera chiara le loro prestazioni, attraverso caratteristiche metrologiche quali l'accuratezza, la sensibilità, la ripetibilità, la riproducibilità, definite in maniera operativamente efficiente, allo scopo di poterne verificare l'utilizzabilità nelle diverse possibili situazioni applicative.

Per questo fine, il presente studio ha lo scopo di sviluppare una metodologia atta a caratterizzare una catena di misura basata su uno spettrofotometro compatto, sensore a fibra ottica e sonda di misura miniaturizzata, con il fine di qualificare differenti componenti di possibile impiego in spettrofotometri di medio – basso costo per misure continue di inquinanti in acqua.

Sono stati confrontati più spettrofotometri e differenti configurazioni di sonde.

L'analisi di tutte le possibili informazioni derivanti dalla taratura utilizzando spettrofotometri da laboratorio di elevate prestazioni verrà utilizzata per ottenere, anche attraverso riscontri incrociati tra differenti gruppi di misure, informazioni non solo sulle catene di misura nel loro complesso, ma anche sulle diverse possibili configurazioni atte a potere essere utilizzate in applicazioni di monitoraggio ambientale e di processi industriali e con costi di interesse anche per piccole realtà operative.

Tutto ciò anche attraverso un'analisi di mercato organizzata come una matrice, con riferimenti incrociati a cui si può attingere per trovare risposte rapide a problematiche e richieste di realtà industriali.

L'indagine sperimentale è stata effettuata con riferimento alla valutazione della concentrazione di metalli in acqua, in particolare ferro.

Nella procedura di taratura verranno evidenziate, attraverso la valutazione delle diverse cause di incertezza, di linearità, di ripetibilità, del campione, meccaniche, ottiche, etc., le differenze metrologiche in apparecchiature così diverse tra loro e la cui identificazione è indispensabile per la scelta e il corretto utilizzo della strumentazione.

Nell'articolo saranno, infine, approfondite considerazioni atte a comprendere come l'analisi delle indicazioni sperimentali possa permettere di ottenere anche indicazioni utili nella progettazione delle configurazioni di misura, attente alle prestazioni, ma anche ai costi complessivi della strumentazione.

2. La strumentazione impiegata

2.1 Lo spettrofotometro da laboratorio

Come sistema di riferimento è stato impiegato uno spettrofotometro VARIAN modello Cary1E a doppio raggio, che opera nell'UV-VIS, con monocromatore e doppio chopper. Il primo chopper, rotante, divide i raggi che vanno al campione e al riferimento focalizzandoli sul centro delle celle del campione e del riferimento, il secondo chopper fa sì che i raggi uscenti colpiscano il rilevatore nella stessa posizione e con lo stesso angolo.

Le sorgenti di luce sono:

1. Lampada al bromuro di tungsteno nel visibile;

2. Lampada al deuterio nell' UV.
Il cambio lampada è computerizzato.
Il rivelatore è un fotomoltiplicatore.

2.2 Lo spettrofotometro compatto

La catena di misura utilizzata comprende: uno spettrofotometro compatto [7], le fibre ottiche, le lenti di trasmissione e ricezione, la cella di misura contenente il fluido in esame, un computer portatile (PC).

Per interfacciare il PC allo spettrofotometro, è stata usata una scheda di acquisizione dati. La catena di misura è schematizzata nella figura 1.

La sorgente luminosa presente nello spettrofotometro è realizzata utilizzando due LEDs [8-9], opportunamente accoppiati e lanciati in fibra ottica.

Uno dei LED ha spettro di emissione nominale con il massimo alla lunghezza d'onda del rosso intorno a 660 nm, l'altro è un LED "bianco", con radiazione prevalente nel blu ed è drogato con elementi elettro-fluorescenti i quali, eccitati nella radiazione del blu, producono un *plateau* nello spettro alle lunghezze d'onda intermedie tra il verde e il giallo.

Le sorgenti sono termoregolate per funzionare ad una temperatura costante che può essere selezionata tramite il software di controllo. Il sistema di termoregolazione consiste in una cella Peltier bipolare che garantisce il raffreddamento e il riscaldamento dei LEDs. Questo permette di ottimizzare stabilità di potenza e di frequenza di emissione dei LEDs stessi.

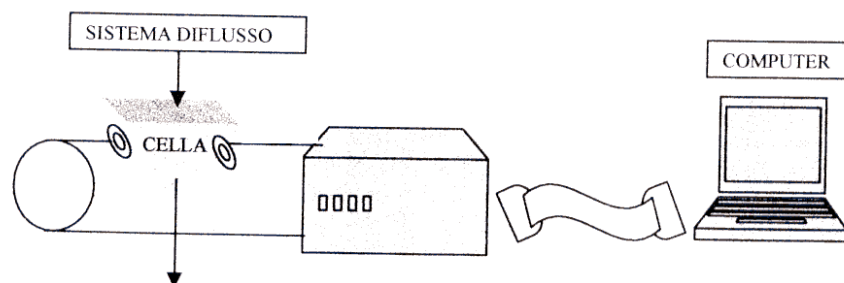


Fig. 1 – Catena di misura: Computer, Scheda di acquisizione dati, Spettrofotometro, Fibre Ottiche, Cella di Misura

Il sistema di controllo consente di impostare due correnti di alimentazione delle sorgenti, tali che con misure relative alla cella piena di acqua deionizzata, il "bianco", l'uscita corrisponda in un caso ad un segnale vicino alla saturazione dei fotorilevatori dello spettrofotometro e l'altro alla metà del primo.

Questa regolazione ha permesso di ottimizzare la sensibilità della catena di misura. Gli spettri di emissione, rispettivamente per la corrente maggiore e quella minore, sono rappresentati nelle figure 2a e 2b.

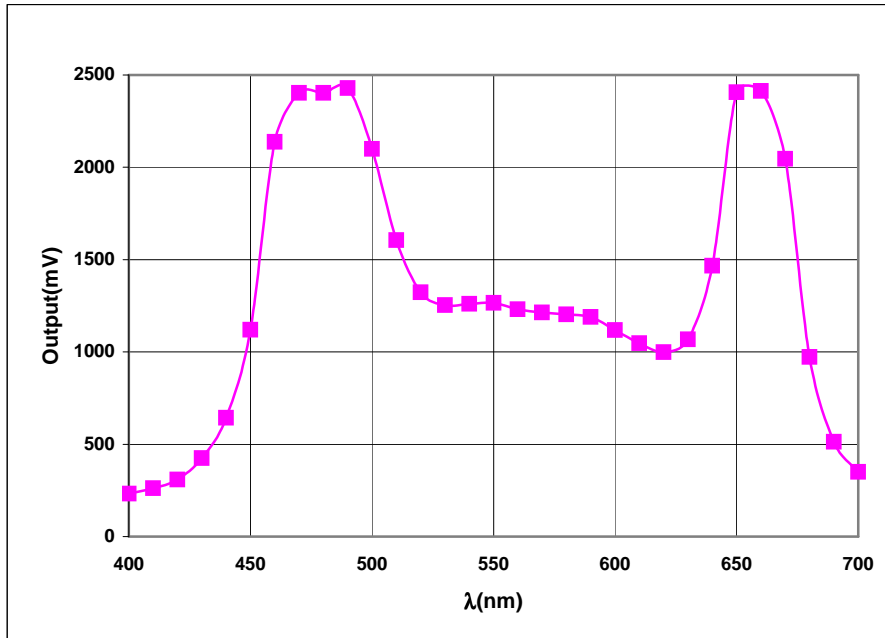


Fig. 2a – Spettro della sorgente: Segnale di riferimento ottenuto impostando la corrente massima

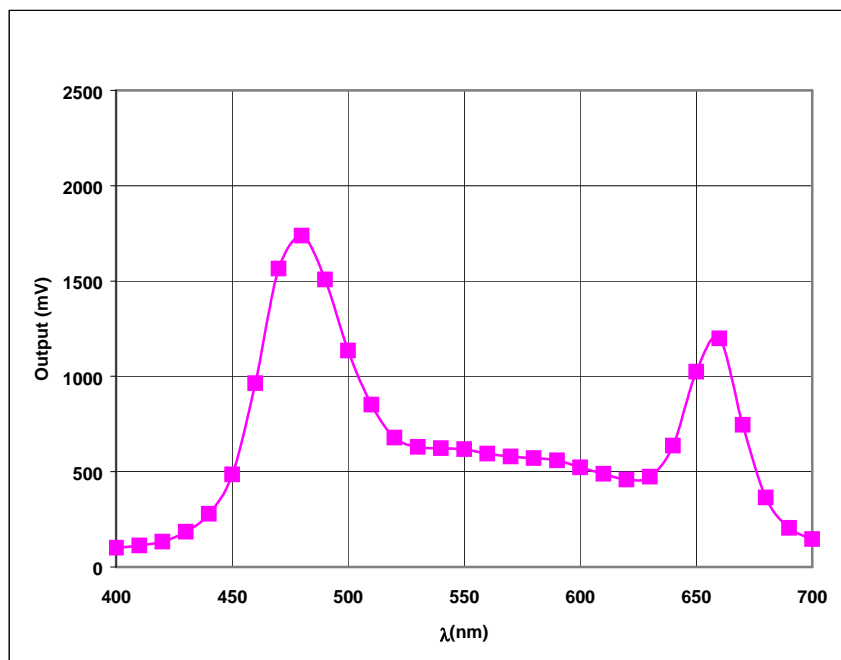


Fig. 2b – Spettro della sorgente: Segnale di riferimento ottenuto impostando la corrente minima

Le fibre ottiche impiegate sono a step index e sono costituite da tratti di diverse dimensioni: il primo tratto, a partire dalle sorgenti fino al punto di connessione è di dimensioni 105/125 μm , questa fibra confluisce in un secondo tratto che trasmette il segnale a distanza all'ingresso della cella di misura e ha dimensioni maggiori: 400/430 μm .

Questo secondo tratto è connesso con una lente GRIN; essa è posta all'ingresso della cella di misura e garantisce la creazione, grazie alla ridotta lunghezza focale, di un fascio collimato proveniente dalla fibra che attraversa il campione.

Il terzo tratto di fibra ottica è quello che trasmette il segnale dalla cella al fotorilevatore, infatti raccoglie il fascio luminoso, intercettato dalla seconda lente GRIN alla fine del percorso ottico nella cella, ed entra direttamente nello spettrofotometro per trasmettere il segnale da analizzare; ha dimensioni: 105/125 μm .

2.3 Cella a flusso continuo a basso costo

La soluzione che deve essere analizzata scorre in una semplice cella di misura a pareti piane e parallele, realizzata in cianacrilato per assicurare la trasparenza del materiale alla radiazione luminosa e per rendere trascurabili le perdite di potenza ottica dovute alla riflessione della luce. La cella di misura ha struttura rigida e i canali di alloggiamento delle fibre ottiche sono stati realizzati in modo da garantire l'allineamento ottico del fascio di luce, la porta di ingresso del fluido è posta nella parte superiore della cella di misura e chiusa in modo da assicurare la stabilità del sistema, nella parte laterale della cella è disposto un canale di uscita dell'aria necessario durante le operazioni di lavaggio e di riempimento della cella.

La cella qui descritta è mostrata nella figura 3. Il percorso ottico è di 15 mm.

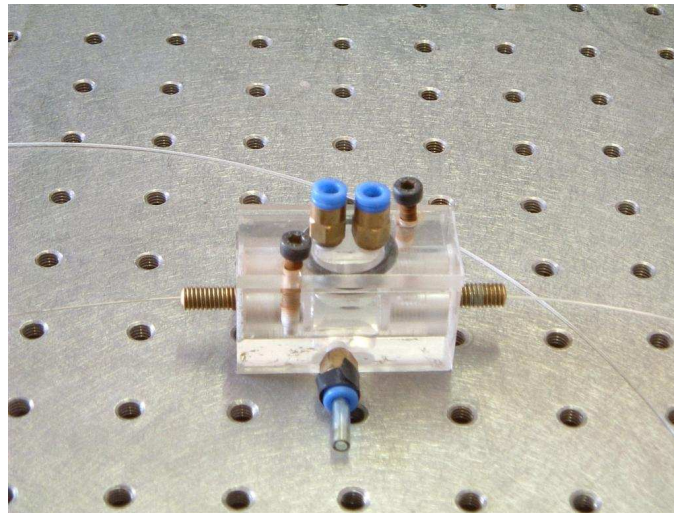


Fig. 3 – Cella di misura a flusso continuo

Nel seguito del documento questa configurazione strumentale sarà indicata come: Spettrofotometro con sonda di Tipo 1).

2.4 Cella ad immersione

La sonda ad immersione prevede un allineamento stabile delle fibre ottiche mediante l'utilizzo di componenti commerciali di pregio per l'allineamento ottico. Il percorso ottico all'interno della cella è di circa 50 mm [7, 10].

Nel seguito del documento questa configurazione strumentale sarà indicata come: Spettrofotometro con sonda di Tipo 2).

2.5 Spettrofotometro miniaturizzato con cella ad immersione

Si tratta di uno spettrofotometro della stessa classe e con le medesime prestazioni nominali dello spettrofotometro compatto utilizzato finora con la sonda ad immersione di cui sopra.

Nel seguito del documento questa configurazione strumentale sarà indicata come: Spettrofotometro Tipo 3).

3. Metodologia di taratura e risultati delle prove

Evincere dai dati sperimentali di taratura l'effetto sull'incertezza complessiva di misura delle diverse possibili cause di incertezza e dei diversi componenti, richiede mettere a punto procedure che permettano di evidenziare i diversi contributi all'incertezza, in particolare quelli strumentali, quelli ambientali, quelli, ovviamente, legati anche all'operatore.

Anche la definizione rigorosa delle caratteristiche metrologiche di interesse e della procedura con cui sono valutate pare aspetto metodologico importante, in quanto significa far riferimento a situazioni fisiche ed operative ben definite, la cui conoscenza appare determinante per l'efficacia di strategie di confronto.

Le principali informazioni che si sono volute ricavare dall'esame dei grafici di taratura e delle assorbanze alle diverse lunghezze d'onda riguardano l'accuratezza, la sensibilità, la risoluzione di banda passante, in particolare per lo spettrofotometro miniaturizzato, che permettono di valutarne le migliori condizioni di misura e i possibili interventi migliorativi.

Per costruire una retta di taratura dei diversi spettrofotometri impiegati, sono stati preparati quattro campioni a titolo noto di ferro utilizzando un campione essiccato di tricloruro di ferro (FeCl_3) con il quale si realizza una soluzione madre e da questa per successive diluizioni, si ottengono dei campioni a diverse concentrazioni. Una soluzione di acqua deionizzata viene considerata come soluzione di riferimento, nel seguito chiamata "bianco".

I quattro campioni di ferro vengono fatti reagire colorimetricamente con il tiocianato di potassio, subito dopo vengono messi in apposite cuvette e analizzati dallo spettrofotometro stesso.

La stima dell'incertezza complessiva degli spettrofotometri, viene calcolata considerando tutte le componenti dell'incertezza che contribuiscono a quella totale:

- ∞ incertezze sulle concentrazioni dei campioni e sul bianco, stimate tenendo conto delle componenti dell'incertezza sulle grandezze di interesse: purezza dei sali, massa di reagenti utilizzati e volume dei recipienti;
- ∞ incertezza di ripetibilità dello spettrofotometro, stimata eseguendo prove ripetute sui singoli campioni;
- ∞ incertezza di linearità, stimata dalla retta di taratura dello strumento.

Riguardo la ripetibilità, è utile svolgere alcune considerazioni di carattere operativo. Per ripetibilità si intende [11], in generale, il grado di concordanza tra i risultati di successive misurazioni dello stesso misurando condotte in modo da mantenere normalmente identici: procedimento di misura, operatore, strumento per misurazione, luogo, condizioni di utilizzazione e ripetizione delle misure entro un breve periodo di tempo.

Nel caso delle misure effettuate con lo spettrofotometro compatto, le prove di ripetibilità sono state eseguite pensando anche alla metodica di operazione in un prototipo di stazione automatica di misura messa a punto dagli autori [12] ed anche alla necessità di avere prove indipendenti tra di loro; tale modalità di valutazione della ripetibilità appare tra le più conservative.

Campioni a disposizione per la valutazione della ripetibilità della catena di misura:

- ∞ campione di ferro a concentrazione nota;
- ∞ bianco di riferimento: acqua deionizzata.

Metodologia per la valutazione della ripetibilità della catena di misura:

- ∞ 10 acquisizioni dello spettro del campione di ferro intervallate da 10 acquisizioni dei valori dello spettro del bianco. Dopo ogni acquisizione dello spettro del campione di ferro, il campione viene prelevato dalla cella di misura, questa viene opportunamente lavata e viene inserito il campione di riferimento di cui si acquisisce il nuovo spettro;
- ∞ calcolo dell'assorbanza come logaritmo, con segno negativo, del rapporto tra lo spettro del campione e lo spettro del bianco acquisito immediatamente prima.

Vale la pena evidenziare che un approccio di questo tipo, sia da un punto di vista metodologico, che di modalità di presentazione dei risultati, risulta molto efficace anche in sede di validazione del metodo di misura.

I risultati di alcune delle prove di taratura effettuate sia sullo spettrofotometro da banco che per quello miniaturizzato sono riassunti nella tabella 1.

Dal paragone con i dati valutati per lo spettrofotometro da banco e i dati valutati per lo spettrofotometro miniaturizzato con sonda tipo 1), si evince che l'incertezza totale di quest'ultima configurazione è superiore in maniera significativa rispetto all'incertezza relativa dello spettrofotometro da banco: occorre comunque sottolineare che appare adeguata allo svolgimento di molte azioni di monitoraggio ambientale e di processo in un gran numero di applicazioni di interesse industriale. Appare interessante notare che i rapporti tra le incertezze corrispondenti, linearità e ripetibilità, tra spettrofotometro compatto e quello da banco si mantengono simili. Le rette di taratura per spettrofotometro da banco e miniaturizzato sono

rappresentate nel grafico della figura 4. Si noti che la sensibilità dei due strumenti è diversa, in particolare è maggiore quella dello spettrofotometro compatto, a causa del cammino ottico più lungo nel caso della sonda miniaturizzata.

Tab. 1 – Spettrofotometro compatto e Spettrofotometro da banco: Caratteristiche metrologiche

	Spettr. compatto sonda tipo 1		Spettr. da banco		C _{Fe} (mg/l)
	A	Inc.(mg/l)	A	Inc.(mg/l)	
Inc. di Linearità	0,011	0,07	0,001	0,008	
Inc. del Campione		0,00016		0,00014	0
		0,005		0,005	0,75
		0,01		0,01	1,49
		0,02		0,02	2,98
		0,03		0,03	4,48
Inc. di Ripetibilità	0,029	0,18	0,002	0,01	0
	0,021	0,13	0,002	0,01	0,75
	0,030	0,18	0,003	0,02	1,49
	0,035	0,21	0,005	0,03	2,98
	0,030	0,18	0,007	0,05	4,48
Inc.Tot.Spettr.	0,031	0,19	0,002	0,01	0
	0,024	0,15	0,003	0,02	0,75
	0,032	0,19	0,003	0,02	1,49
	0,037	0,22	0,005	0,03	2,98
	0,031	0,19	0,007	0,05	4,48

Anche il confronto degli spettri di assorbanza dei due sistemi di misura può fornire informazioni utili alla valutazione delle prestazioni complessive e, quindi, alla identificazione dei componenti più importanti per l'incertezza complessiva di misura. Per esempio, dai grafici delle assorbanze, figure 5, 6, si può vedere come le "code" degli spettri, comprese tra i 400-450 nm e tra i 650-700 nm, mostrino una diminuzione più netta dell'assorbanza nel caso dello spettrofotometro da banco, questo, probabilmente, perché nel caso dello spettrofotometro compatto non è possibile assicurare una risoluzione di banda passante costante. La risoluzione di banda passante del microspettrofotometro è di 10 nm, ma quella effettiva tende leggermente ad aumentare al di fuori del *plateau* compreso tra i 450-650 nm. Il comportamento spettrale dipende da molti parametri, geometrici, legati alla dimensione dello spettrofotometro, ottici, legati alle sorgenti e loro lunghezza d'onda, e al comportamento delle fibre ottiche nelle diverse possibili situazioni operative. Questi aspetti, che esulano dalla presente indagine, richiedono ulteriori cautele nel momento in cui il campo di lunghezze d'onda di interesse coinvolga anche queste situazioni.

Un approccio simile a quello precedentemente descritto è stato usato per confrontare le prestazioni di differenti configurazioni di spettrofotometro compatto, quali quelle descritte nel paragrafo 2.

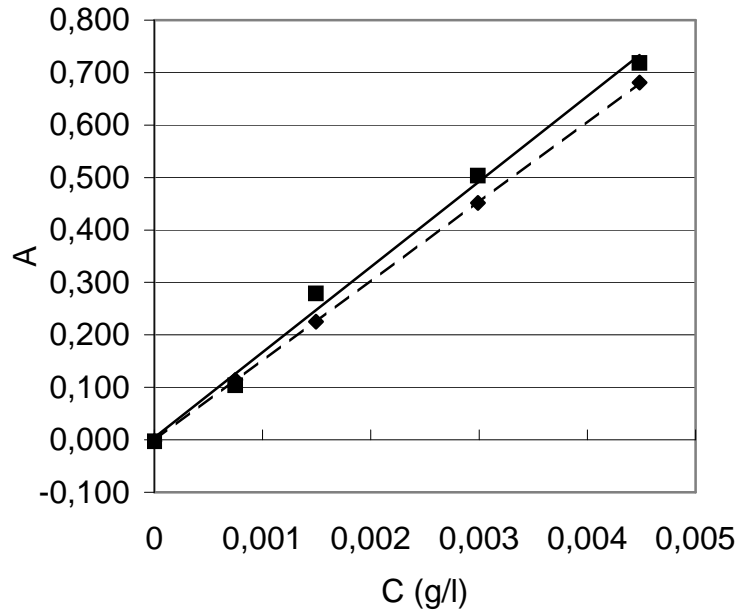


Fig. 4 – Rette di taratura:
 — Spettrofotometro compatto; - - - Spettrofotometro da banco

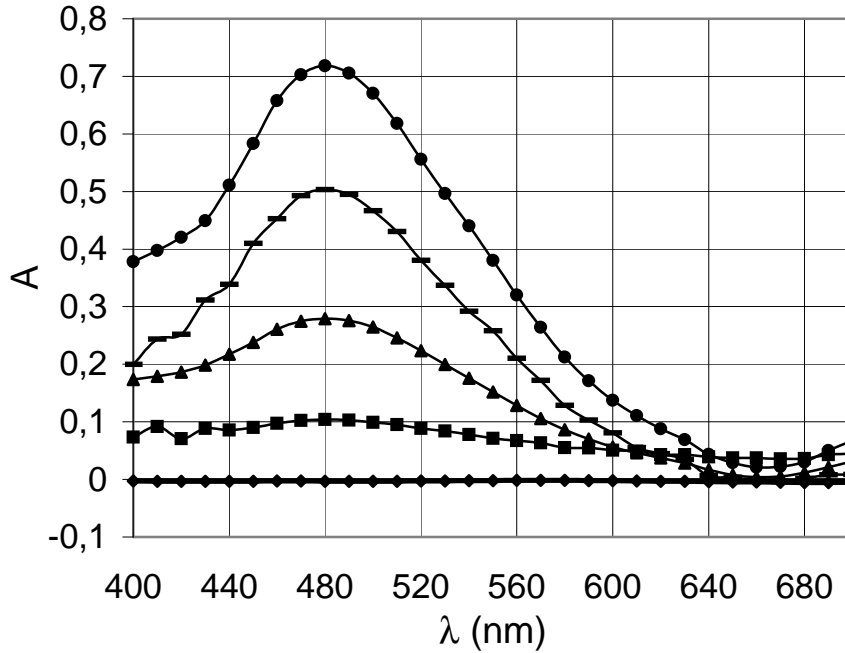


Fig. 5 – Assorbanze Spettrofotometro compatto

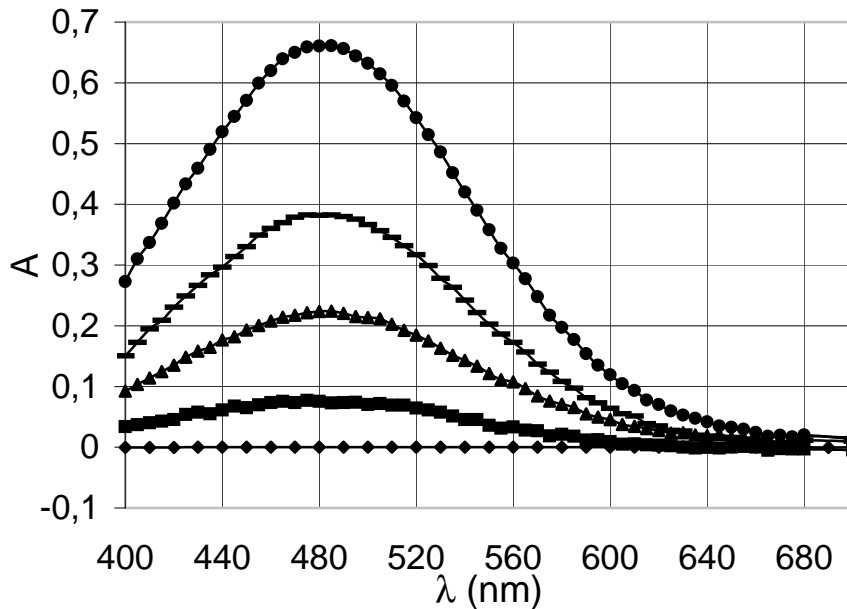


Fig. 6 – Assorbanze Spettrofotometro da banco
 ◆ Bianco; ■ Fe 0,74 mg/l; ▲ Fe 1,49 mg/l; — Fe 2,98 mg/l; ● Fe 4,48 mg/l

I dati della tabella 2 mostrano che, se si prende in considerazione, per esempio, il contributo di incertezza di ripetibilità, l'utilizzo di una sonda ad immersione, tipo 2), migliora fortemente l'accuratezza del sistema, portando questa caratteristica vicino a quella dello spettrofotometro da banco, precedentemente citato.

Tali prestazioni vengono mantenute anche con spettrofotometri miniaturizzati della stessa classe, confermando una riproducibilità delle caratteristiche di misura tra gli spettrofotometri miniaturizzati usati in questo lavoro.

Tab. 2 – Contributi all'incertezza di ripetibilità per diverse configurazioni di spettrofotometri e sonde

Tipologia	Inc. Rip. (A)
Tipo1	0,029
Tipo2	0,003
Tipo3	0,002

Questi dati mostrano come la catena di misura utilizzata possa essere ottimizzata con interventi migliorativi che vadano ad interessare soprattutto la cella di misura, nel caso si abbia interesse a ridurre l'incertezza di ripetibilità.

La contropartita è nel maggiore costo di realizzazione, nelle maggiori dimensioni e quindi riduzione della versatilità di impiego, nel maggiore necessario uso di reagenti, se necessari.

Risulta molto utile, comunque, avere una valutazione chiara, oggettiva ed obiettivamente quantificabile dei vantaggi e degli svantaggi che le diverse soluzioni comportano, in modo da potere sempre identificare soluzioni che possano risultare fortemente specializzate e quindi, più facilmente accettabili in un mondo quale quello delle piccole realtà operative in cui le spese per la strumentazione di controllo e processo non sempre sono viste come strettamente indispensabili.

4. Conclusioni

La valutazione degli effetti delle principali cause di incertezza di misura di spettrofotometri di medio-basso costo, basata sulle informazioni derivanti non solo dalla loro taratura ma anche dalla elaborazione di opportune metodiche di prova, è stata utilizzata per valutare le principali caratteristiche metrologiche di catene di misura spettrofotometriche, aventi differenti celle per la misura della concentrazione di inquinanti in acqua, in particolare metalli pesanti. Le prove effettuate sono state usate anche per verificare la possibilità di evidenziare attraverso opportune campagne di prova e metodiche di elaborazione dei dati il contributo alle prestazioni complessive della catena di misura di specifici componenti, in particolare le celle di misura per misure in continuo, che possono essere differenziati in funzione delle contingenti esigenze operative e di budget complessivo. L'aspetto innovativo è nella metodologia utilizzata per la caratterizzazione di una strumentazione spettrofotometrica, che prevede non tanto l'accettazione in *toto* di un'apparecchiatura fornita da una casa costruttrice, ma la capacità di scegliere, in base alle proprie esigenze, la strumentazione che più soddisfa le prerogative d'interesse, andando ad economizzare sugli aspetti che possono essere di scarsa utilità per l'applicazione specifica. Questa possibilità appare interessante soprattutto nell'ottica di finalizzare la definizione delle configurazioni sperimentali alle necessità di budget in un contesto applicativo di interesse per piccole realtà aziendali.

Nota

Parte del lavoro è stato svolto nell'ambito del progetto formativo del P.O.R. Abruzzo 2000-2006: "Borse di studio per avviare giovani laureati in settori di ricerca mirata allo sviluppo tecnologico di imprese abruzzesi". Borsista: Dott. Ing. Elena Di Carlo.

Bibliografia

1. F. Baldini, "Optical fibre chemical sensors for environmental and medical applications", *Optical Sensors and Microsystems*, New York, 2000.
2. A. G. Mignani, F. Baldini, "Fibre – optic sensors in health care", *Phys. Med. Biol.* 42 (1997) 967 – 979.

3. Joao Carlos de Andrade, Julio Cesar Rocha e Nivaldo Baccan, "Sequential spectrophotometric determination of chromium (VI) and chromium (III) using flow injection analysis", *Analyst*, vol 110, pp.197-199, 1985.
4. Suwaru Hoshi, "The simple and rapid spectrophotometric determination of trace of chromium (VI) after preconcentration as its colored complex on chitin", *Talanta*, 47 (1998) 659-663.
5. Anna Grazia Mignani and Andrea Azelio Mencaglia "Direct and Chemically-Mediated Absorption Spectroscopy Using Optical Fiber Instrumentation". *IEEE Sensors Journal*, vol. 2, no. 1, February 2002.
6. Ocean Optics Spectrometer: S2000 Miniature Fiber Optic Spectrometer, USB2000-UV-VIS Miniature Fiber Optic Spectrometer, HR2000 High-resolution Miniature Fiber Optic Spectrometer.
7. Progetto finalizzato MADESS II, "Spettrofotometri a fibra ottica". CNR-Istituto di Fisica Applicata 'Nello Carrara', Firenze. Prodotec srl, Firenze.
8. R. James Berry, Jay E. Harris, Ronald R. Williams "Light-Emitting Diodes as Sensors for Colorimetric Analyses", *Applied Spectroscopy*, Volume 51, Number 10, 1997
9. Raffaele Ilardo "I Diodi LED".
10. SERQUA, IFAC "Sensori optoelettronici per l'ambiente", Progetto Regionale di Azioni Innovative, Regione Toscana. 2002-2004.
11. ISO 1993. International Vocabulary of basic and general terms in metrology.
12. Giulio D'Emilia, Emanuela Natale, "On-line fully automated measurement of Cr(VI) concentration in water by a fiber optic probe: measurement accuracy improvement and evaluation", SPIE Paper 5459 – 39, PHOTONICS EUROPE, Strasburgo, Francia, 26-30 Aprile 2004.

Scanner spettrofotometrico per la digitalizzazione di quadri e altre opere d'arte di superficie piana

Gianni Antonioli, Fernando Fermi, Claudio Oleari, Remo Reverberi

UNIVERSITÀ DI PARMA, DIPARTIMENTO DI FISICA

INFM-UNITÀ DI RICERCA DI PARMA

Parco Area delle Scienze, 7A – 43100 Parma, www.fis.unipr.it/~fermi
cognome@fis.unipr.it

1. Introduzione

Gli scanner sono strumenti destinati alla cattura di immagini digitali di soggetti in bianco e nero o a colori, di superficie piana o tridimensionali, di caratteristiche assai diverse. Lo scanner di cui parleremo è concepito per lavorare con soggetti colorati di superficie piana, ma può operare anche in caso di superficie curva se questa si riconduce ad un insieme di immagini parziali di superficie piana.

La ripresa di immagini mediante la cattura e la successiva composizione di immagini parziali, è una procedura che si presenta ogni volta che si desidera catturare un'immagine con alta risoluzione spaziale. Il problema non sembra costituire un grave ostacolo. Esistono programmi di mosaicatura in grado di ricostruire in modo soddisfacente tanto le immagini piane quanto le immagini curve. Tuttavia, i programmi funzionano bene solo se le immagini parziali sono riprese con adeguata qualità tecnica. L'esperienza ci ha insegnato che la ricostruzione del mosaico non dà risultati soddisfacenti se le immagini parziali hanno diversa luminosità specialmente nei contorni delle immagini da sovrapporre. Questo implica una corretta misura del fattore di riflessione spettrale, la mancanza di distorsioni spaziali e la stabilità della risposta dello scanner nel tempo.

La cura dei dettagli tecnici dello scanner è quindi di fondamentale importanza per ottenere buoni risultati. Di primaria importanza sono il preciso allineamento ottico e meccanico dei componenti dello scanner e la sua taratura spettrale. Per esempio, nel caso della misurazione spettrofotometrica del colore, uno spostamento rigido di 1 nm sulla scala delle lunghezze d'onda comporta una differenza di colore superiore ad un'unità colorimetrica nello spazio CIELAB [1].

Il funzionamento dello scanner ottico spettrofotometrico da noi costruito, è stato descritto in precedenti articoli [2, 3]. L'ultimo di questi [4] appare in altra parte di questo volume. In questo articolo non ci addentreremo nuovamente nella descrizione dei principi di funzionamento dello scanner se non per quanto lo riterremo necessario ai fini della comprensione di ciò che andremo a discutere. Metteremo invece l'accento sugli aspetti tecnici che determinano la qualità delle immagini catturate.

2. Generalità

Richiamiamo brevemente i principi di funzionamento dello scanner.

La catena delle parti di cui è composto un sistema di cattura delle immagini, in particolare uno scanner, è la seguente:

1. Sistema di illuminazione;
2. Scena da riprendere;
3. Obiettivo fotografico;
4. spettrometro;
5. camera digitale;
6. sistema elettronico di elaborazione dei segnali forniti dalla camera digitale, comprendente una scheda di acquisizione, un computer, un programma di acquisizione e un monitor.

In Fig. 1 mostriamo la vista schematica delle parti ottiche più significative dello scanner e cioè l'obiettivo, lo spettrometro e il sensore della camera digitale. Questi tre componenti sono accoppiati rigidamente.

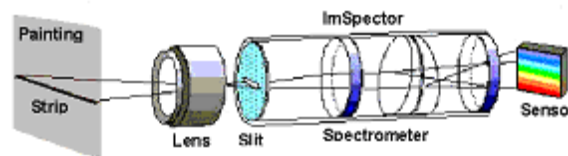


Fig. 1 – Schema della catena ottica dello scanner per la ripresa di immagini spettrali

L'obiettivo del sistema focalizza un'area della scena sul piano della fenditura d'ingresso dello spettrometro, ma solo la luce riflessa dalla striscia coniugata con i punti della fenditura d'ingresso entrerà nello spettrometro.

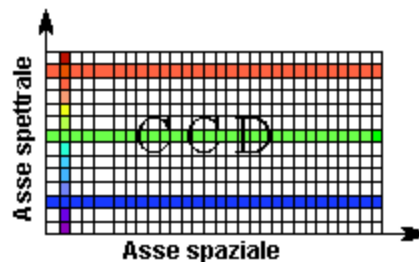


Fig. 2 – Posizione dell'immagine della fenditura d'ingresso sul sensore dovuta alla lunghezza d'onda della luce (asse spaziale). La colonna corrisponde agli spettri della luce riflessa dai pixel della striscia della scena.

La luce entrante dalla fenditura è dispersa dallo spettrometro e rifocalizzata sul CCD della camera digitale in modo che l'immagine della fenditura risulti parallela alle righe dei pixel del sensore. Se questo è vero, si possono individuare nel sensore due assi di coordinate: l'asse spaziale lungo le righe di pixel del sensore e l'asse spettrale lungo le colonne come mostrato in Fig. 2.

L'acquisizione dei segnali del CCD di un quadro (frame) della camera digitale, dopo la preliminare ripresa di un quadro nero e di un quadro bianco di riferimento, consente di ottenere l'immagine spettrale di una piccola striscia della scena i cui punti sono coniugati dall'ottica ai punti della fenditura. L'acquisizione dell'immagine avviene acquisendo tante strisce parallele della scena in successione durante la scansione. Tuttavia, per ottenere un'immagine accettabile occorre che la direzione della scansione sia perpendicolare alla fenditura dello spettrometro e quindi perpendicolare alla direzione spaziale del CCD.

Tutto ciò implica il preliminare allineamento geometrico delle parti ottiche, la taratura dell'asse spettrale e la taratura dell'asse spaziale.

3. Allineamenti geometrici

Il primo aggiustamento geometrico riguarda l'allineamento della fenditura dello spettrometro con le righe dei pixel del CCD della camera digitale. La procedura consiste nel monitorare in tempo reale l'immagine della striscia di una superficie bianca illuminata con una lampada spettrale per esempio una lampada a mercurio. Non è richiesto alcun particolare bianco e nessuna uniformità dell'illuminazione. È comunque necessario illuminare tutta la striscia monitorata dallo scanner. Consideriamo una riga di emissione della lampada spettrale. Se la fenditura dello spettrometro non è allineata alle righe di pixel del CCD questa apparirà come in Fig. 3.

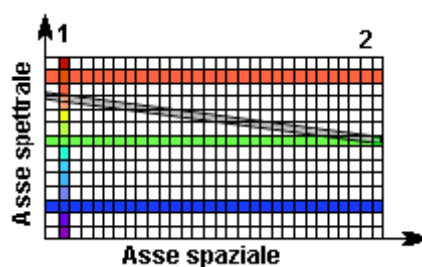


Fig. 3 – Posizione dell'immagine della fenditura dello spettrometro sul CCD della camera digitale quando non è allineata con l'asse spaziale del CCD

Siccome una riga di emissione della lampada spettrale possiede una ben precisa lunghezza d'onda, se si confrontano gli spettri corrispondenti a colonne estreme del CCD come la 1 e la 2 di Fig. 3, otterremo due bande di emissioni identiche ma in posizioni diverse della scala spettrale. Mediante il monitoraggio in tempo reale di questi spettri è possibile portarli a sovrapposizione ruotando lo spettrometro rispetto alla camera digitale. A questo punto si sarà ottenuto l'allineamento dello

spettrometro al CCD della camera. Naturalmente, nel caso di una lampada a mercurio avremo più righe di emissione ma quanto detto si verificherà per ciascuna di esse. L'immagine dei segnali del CCD per un bianco illuminato con una lampada spettrale a mercurio è presentata in Fig. 4.

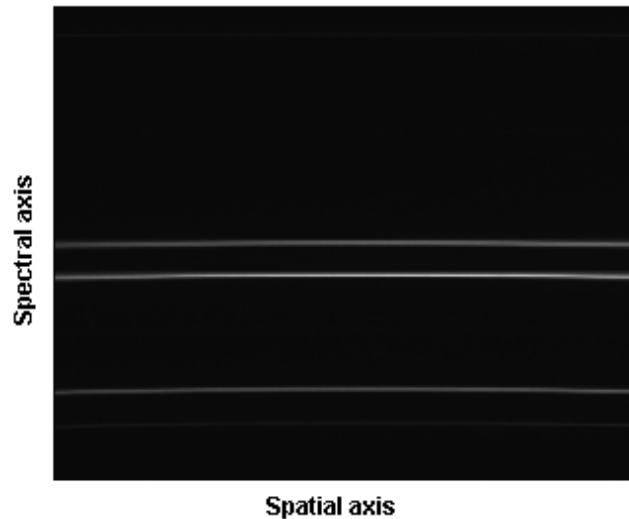


Fig. 4 – Immagine di una striscia di un bianco illuminata con una lampada spettrale al mercurio

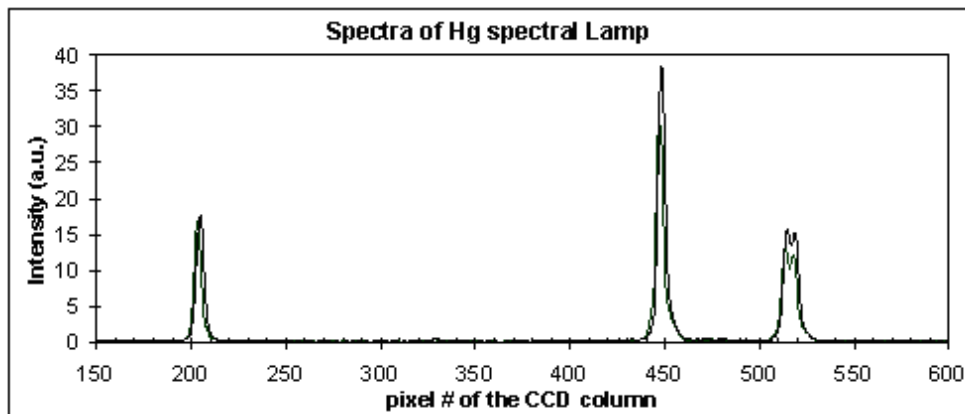


Fig. 5 – Spettri ottenuti considerando due colonne ai bordi del CCD della camera

Gli spettri di due colonne del CCD prese ai bordi dell'immagine di Fig. 4, sono mostrati in Fig. 5. Come si può notare gli spettri sono difficilmente distinguibili e denotano un buon allineamento. Tuttavia un'analisi più approfondita dei dati rivela

che gli spettri sono spostati di 1 pixel, cioè di $\Delta\lambda=0.4$ nm, un valore che non crea problemi particolari.

Il secondo allineamento riguarda la posizione dell'asse spaziale del sistema spettrometro-camera rispetto alla direzione di scansione. In questo caso occorre fare in modo che la fenditura del sistema spettrometro-camera digitale sia perpendicolare alla direzione di scansione dello scanner che, nel nostro caso, è generalmente verticale. Per raggiungere lo scopo bisogna disporre di una mira, avente riferimenti geometrici tra loro perpendicolari. Essa deve essere collocata in un piano verticale facendo in modo che i riferimenti verticali della mira siano perfettamente allineati sulla verticale. Un esempio di mira è mostrato in Fig. 6.

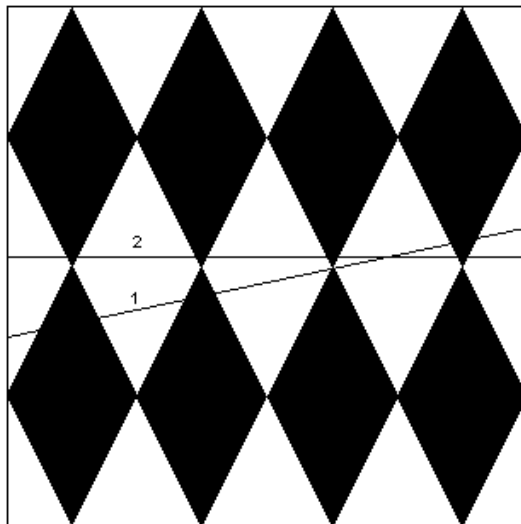


Fig. 6 – Esempio di target utilizzabile per l'allineamento dell'asse spaziale del sistema spettrometro-camera digitale perpendicolarmente alla direzione di scansione

Le linee 1 e 2 disegnate sul target sono due ipotetiche strisce della mira, catturate dallo scanner. La striscia 1 denota un cattivo allineamento mentre la striscia 2 denota un buon allineamento. Le immagini presentate dal vivo dalla camera digitale mostreranno strisce verticali scure in corrispondenza delle intersezioni delle linee con le losanghe nere. Se l'allineamento è cattivo le strisce saranno di spessore diverso, in caso contrario saranno di uguale spessore. L'allineamento si raggiunge ruotando rigidamente il sistema spettrometro-camera digitale fino ad ottenere l'immagine voluta. Il controllo fine si fa misurando la larghezza delle strisce con l'accuratezza di un pixel. L'immagine corrispondente al caso della linea 2 di Fig. 6 è mostrata in Fig. 7.

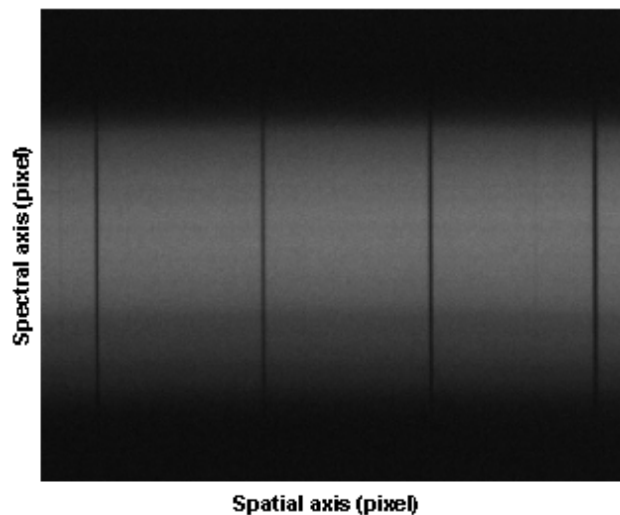


Fig. 7 – Immagine fornita dalla camera digitale di una striscia della mira nel caso 2 di Fig. 6

4. Taratura spettrale dello scanner

La taratura spettrale dello scanner si fa misurando gli spettri di emissione di lampade spettrali di cui sono note le lunghezze d'onda delle loro righe di emissione tabulate in molti manuali. Le lampade spettrali da noi usate sono quelle al mercurio, al cadmio e al neon.

Si procede come in occasione del primo allineamento e si ottengono immagini come quelle di Fig. 4 relativi alla lampada a mercurio.

Dalle immagini possiamo ottenere gli spettri di emissione delle lampade e da essi ricaviamo la tabella che correla i picchi delle righe di emissione con il numero corrente del corrispondente pixel del CCD. A questo punto si assegna la corretta lunghezza d'onda alle righe di emissione utilizzando le tabelle reperibili nei manuali. Questa operazione richiede molta attenzione perché le assegnazioni non sono semplici a causa della bassa risoluzione spettrale dello scanner che opera la convoluzione di righe adiacenti. Il risultato di questo lavoro è mostrato in Fig. 8. L'equazione riportata sul grafico è quella del polinomio di secondo grado che approssima meglio la distribuzione dei punti. R , è il residuo della regressione. Da questi dati si nota che la dispersione dello spettrometro è molto lineare perché il coefficiente del termine di secondo grado del polinomio è abbastanza piccolo. Il suo peso si fa sentire alle lunghezze d'onda corrispondenti agli alti valori del numero del pixel corrispondente. I coefficienti del polinomio sono memorizzati in un file utilizzato dal programma di acquisizione per la linearizzazione della scala dell'asse spettrale.

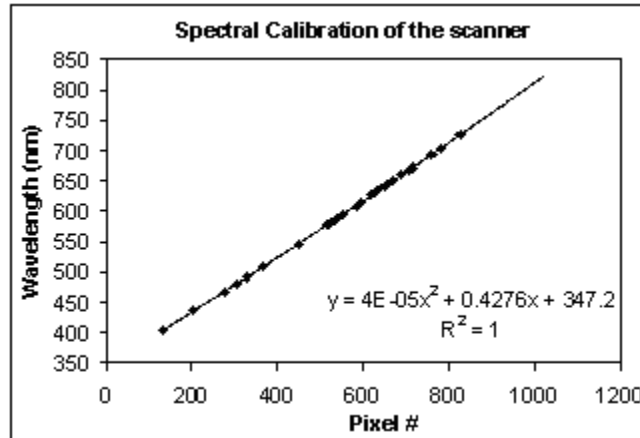


Fig. 8 –Taratura dell’asse spettrale dello scanner ottenuto dalla misurazione degli spettri delle lampade spettrali al mercurio, al cadmio e al neon. Il polinomio di secondo grado è quello che approssima meglio la distribuzione dei punti. R , è il residuo della regressione.

5. Linearità dell’asse spaziale

Il controllo della linearità dell’asse spaziale serve a stabilire se lo scanner riproduce fedelmente le forme, ossia se cattura immagini distorte della realtà. Questo controllo consente anche di conoscere l’unità di misura dell’asse spaziale che occorre fornire al programma nella determinata condizione di cattura delle immagini. La procedura per ottenere la misurazione della linearità dell’asse spaziale, consiste nel riprendere il profilo del segnale spaziale del CCD monitorando la luce riflessa da un regolo scientifico con graduazione millimetrica.

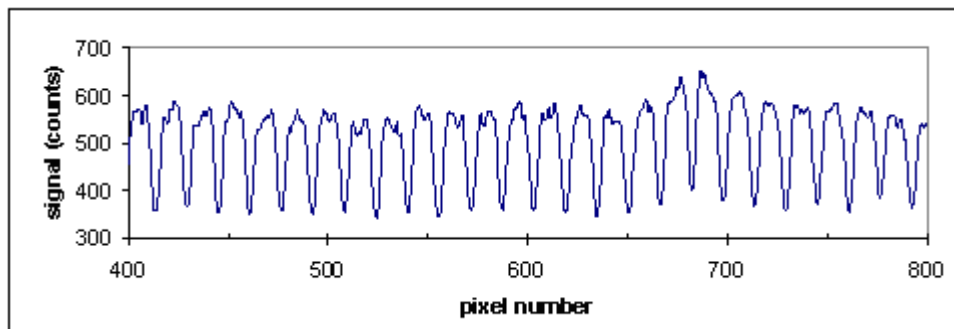


Fig. 9 – Profilo del segnale lungo l’asse spaziale di un regolo graduato con tacche da 1 mm. I picchi negativi del profilo corrispondono alle tacche millimetriche del regolo.

La luce riflessa dalle tacche di graduazione è inferiore a quella delle altre parti del regolo ed appariranno come picchi negativi del profilo spaziale dei segnali. Il

profilo di intensità spaziale del regolo è riportato in Fig. 9. La posizione dei picchi in funzione del numero dei pixel corrispondenti è mostrata in Fig. 10.

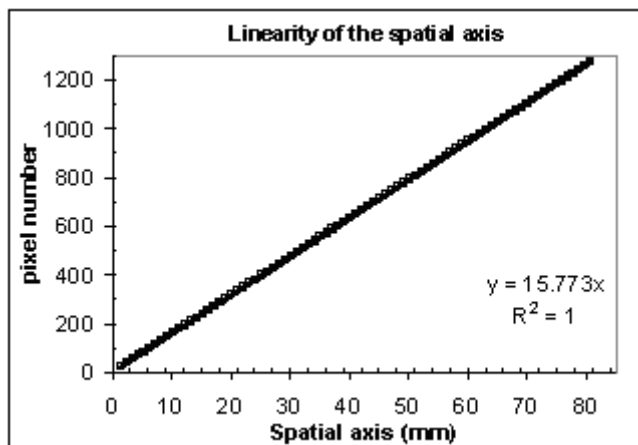


Fig. 10 – Controllo della linearità dell’asse spaziale. Il grafico presenta la dipendenza del numero del pixel dall’asse spaziale dalla corrispondente posizione millimetrica del regolo. La funzione riportata sul grafico è ottenuta con una regressione lineare. R , è il residuo della regressione.

La Fig. 10 dimostra senza ambiguità che l’asse spaziale è lineare. L’equazione che compare sul grafico è ottenuta con una regressione lineare e, se consideriamo anche l’incertezza della misurazione otteniamo l’uguaglianza $1\text{mm}=16\pm 1\text{pixel}$, nelle condizioni di misurazione.

6. Linearità della risposta in funzione dell’intensità luminosa

L’ipotesi che la risposta del sistema al variare dell’intensità luminosa sia lineare, è fondamentale per la corretta misurazione del fattore di riflessione spettrale. La linearità della risposta determina inoltre l’indipendenza della misurazione dalla disuniformità dell’illuminazione, dalla risposta della camera digitale e dell’elettronica di acquisizione nonché dalla trasmissione ottica del sistema [3].

Il rapporto fra le intensità di luce riflessa da un bianco o da un nero può essere di 100:1 anche se, in generale, i bianchi e i neri di un dipinto riflettono rispettivamente meno dell’80% e più del 2%. La linearità deve essere accertata su tutto l’intervallo spettrale di interesse.

La misurazione della linearità della risposta è stata condotta mediante la misurazione del fattore di riflessione spettrale delle mattonelle certificate da NPL comprendenti il bianco, tre mattonelle di grigio e il nero per un rapporto di intensità luminosa di 250:1. I risultati ottenuti sono mostrati in Fig. 11.

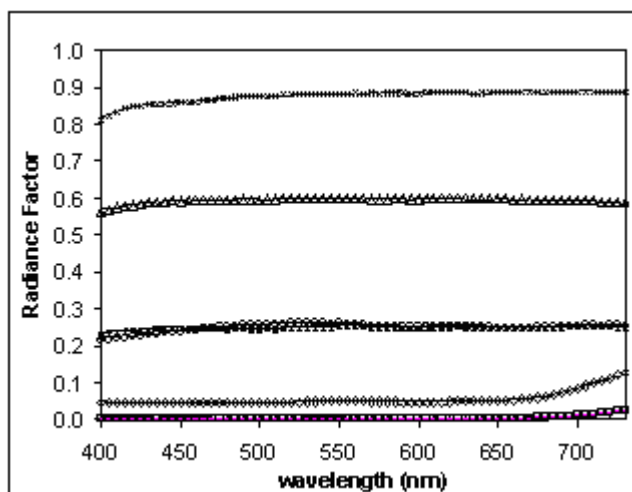


Fig. 11 – Misurazione della linearità della risposta dello scanner al variare dell'intensità luminosa. Il grafico riporta i fattori di riflessione spettrale delle mattonelle certificate da NPL e misurati dallo scanner. Il rapporto di intensità esplorato è di 250:1. I simboli indicano i valori certificati, le linee continue gli spettri misurati.

In Fig. 11 si può notare che gli spettri misurati sono praticamente indistinguibili dagli spettri certificati su tutto l'intervallo di lunghezze d'onda considerato. Possiamo quindi concludere che la risposta del nostro scanner è lineare.

7. Stabilità dei segnali nel tempo

La misurazione di immagini ad alta risoluzione spaziale può richiedere qualche ora. In genere, per eseguire queste misurazioni si prendono parecchie immagini parziali da cui si ricostruisce l'intera immagine. Per la ripresa delle immagini è comodo e spesso necessario utilizzare i segnali di riferimento nero e bianco utilizzati per la prima immagine parziale. È quindi molto importante verificare se esistono derive dei segnali nel tempo.

Abbiamo eseguito due controlli, il primo riguarda la stabilità dei segnali di buio, il secondo la stabilità del sistema di illuminazione. In entrambi i casi abbiamo controllato, ogni 5 minuti, il valore dei segnali di un certo numero di pixel del CCD della camera digitale per un tempo totale superiore alle 3 ore.

Il segnale di buio è stato ottenuto coprendo l'obiettivo con un tappo nero. Nella Fig. 12 mostriamo, a titolo esemplificativo, i valori misurati di alcuni pixel del sensore. Come si può notare, i segnali non presentano alcun fenomeno di deriva per almeno tre ore.

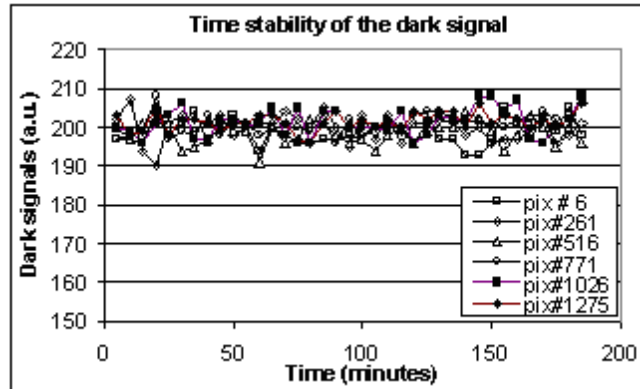


Fig. 12 – Stabilità del segnale di buio misurato ogni 5 minuti per circa tre ore esemplificato mostrando i valori di alcuni pixel.

Accertata la stabilità del segnale di buio nel tempo, abbiamo accertato la stabilità nel tempo dell'irradianza spettrale del sistema di illuminazione. La prova consiste nel monitorare il livello dei segnali generati dalla luce, prodotta dal sistema di illuminazione, riflessa da una superficie bianca. Il livello dei segnali era regolato circa alla metà del valore di saturazione.

Il risultato è mostrato in Fig. 13 per un certo numero di pixel.

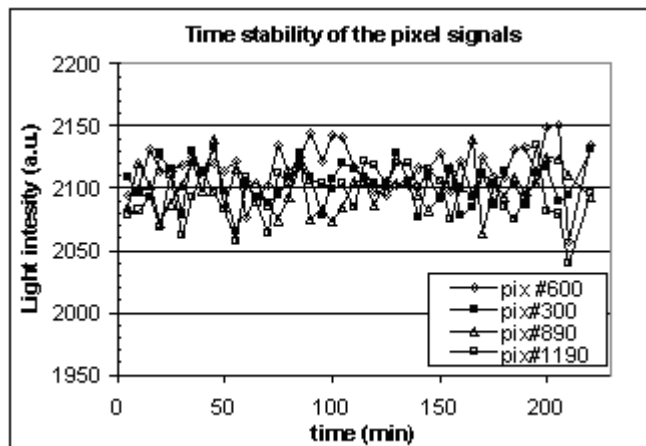


Fig. 13 – Stabilità dell'irradianza del sistema di illuminazione dello scanner. I segnali sono stati catturati ogni 5 minuti.

La Fig. 13 non richiede commenti. I segnali non mostrano alcuna deriva in un arco di tempo superiore alle 3 ore. Un'analisi statistica più puntuale lo conferma. Si può quindi affermare che l'irradianza generata del sistema di illuminazione risulta molto stabile per tempi superiore alle tre ore.

8. Prestazioni dello scanner

Le prestazioni dello scanner, per quanto concerne la misurazione del colore e la risoluzione spaziale, sono descritte in altra parte di questo quaderno [4].



Fig. 14 – Anonimo fiammingo: "*Alessandro Farnese*", Miniatura fine '500. Olio su pergamena incollata su tavola, cm 19.2 x 15.4. Dettaglio della testa ad ingrandimento 1:2.

Ci limitiamo qui a presentare, per ragioni pratiche, il dettaglio di un'immagine ripresa presso la Galleria Nazionale di Parma riprodotta in gradazioni di grigio. Anche se il colore non viene visualizzato, è possibile apprezzare sia la gradazione dei grigi sia il dettaglio spaziale.

9. Conclusioni

Abbiamo cercato di analizzare con un certo dettaglio sia i problemi della messa a punto dello scanner sia alcune caratteristiche tecniche che influiscono sulla qualità tecnica delle immagini.

Da una parte abbiamo cercato di mettere in evidenza le relative difficoltà o se si vuole la semplicità della messa a punto dell'apparecchiatura, dall'altra sia la linearità dell'asse spaziale, che garantisce l'assenza di distorsioni, sia la linearità della risposta al variare dell'intensità luminosa, che garantisce la qualità della riproduzione del colore. Abbiamo inoltre messo in evidenza la stabilità della risposta dello scanner nel tempo, che garantisce l'uniformità delle immagini parziali necessaria per la loro corretta mosaicatura.

Abbiamo infine mostrato il dettaglio del ritratto in miniatura di Alessandro Farnese, per mettere in evidenza la qualità delle immagini che possono essere catturate con lo scanner da noi sviluppato.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano la Fondazione della Cassa di Risparmio di Parma per il sostegno finanziario che ha reso possibile la realizzazione del progetto e la Soprintendenza alle Belle Arti di Parma e Piacenza, per il sostegno dato al progetto e per la concreta collaborazione che ha reso possibile verificare le prestazioni dello strumento sul campo.

Bibliografia

1. F. Fermi, R. Fava, "Colorimetric measurements performed on CRT phosphors" *Rivista della Staz. Sper. del Vetro*, 1, 53 (2000).
2. G. Antonioli, F. Fermi, C.Oleari, R.Reverberi, M. D'agostini, A. Dall'Ava, F. Rampazzo, "Monitoraggio dello stato di conservazione sulle opere del Parmigianino mediante misurazione dell'apparenza della superficie pittorica e implicazioni illuminotecniche", *Atti Convegno Internazionale di studi su "Parmigianino e il manierismo europeo"*, Parma, Italia, 2002, p.158.
3. G. Antonioli, F. Fermi, C. Oleari, R.Reverberi, "Spectrophotometric scanner for imaging of paintings and other works of art", *Proc. of The Second European Conference on Colour Graphic, Imaging and Vision*, Aachen, Germany, 2004, p.219.
4. G. Antonioli, F. Fermi, C.Oleari, R.Reverberi, "Scanner ottico iperspettrale per la spettroscopia d'immagine", in: A. Raggi (a cura di), *Tecnologie multispettrali – Aspetti teorici ed applicativi*, Centro Editoriale Toscano, Firenze, 2004, pagg. 10-24.

Sistema multispettrale ad immagine per la caratterizzazione spettroradiometrica di opere d'arte e la valutazione delle condizioni di illuminazione

NATALIA BO

POLITECNICO DI TORINO
Viale Duca degli Abruzzi, 24 – 10129 Torino
bo@ien.it

PAOLA IACOMUSSI, GIUSEPPE ROSSI

ISTITUTO ELETTRTECNICO NAZIONALE "GALILEO FERRARIS"
Strada delle cacce, 91 – 10135 Torino, Tel. 011 3919228, Fax: 011 346384
iaco@ien.it – rossig@ien.it

1. Introduzione

In questo articolo è descritto il sistema multispettrale ad immagine (*MIR, Multispectral Image Radiometer*) realizzato presso l'Istituto Elettrotecnico Nazionale (IEN) per la misurazione, in loco, del fattore spettrale di riflessione delle superfici di opere d'arte.

I dati acquisiti permettono sia la verifica di eventuali degradi e/o variazioni nel tempo delle caratteristiche misurate sia la definizione delle caratteristiche illuminotecniche dell'impianto di illuminazione per l'esposizione delle opere, al fine di ottimizzarne la resa dei colori nelle condizioni espositive.

Infatti, partendo dai dati spettrali misurati, lo studio di come viene percepita l'opera d'arte in diverse condizioni di illuminazione permette la progettazione di un impianto di illuminazione che:

- assicuri, al pubblico, la fruizione dell'opera nelle migliori condizioni di visibilità;
- garantisca il rispetto dei vincoli normativi di preservazione della stessa (relativi alle condizioni di illuminazione).

In particolare, la metodologia sviluppata allo IEN identifica la sorgente, o la combinazione di sorgenti, che garantisce la miglior resa dei colori, rispetto a una ipotetica condizione di illuminazione assunta come riferimento e dedotta, per esempio, sulla base di accurate indagini storiche o secondo specifiche indicazioni dell'artista.

2. Il sistema multispettrale ad immagine

Il sistema multispettrale ad immagine MIR (figura 1), progettato e realizzato presso l'IEN, evoluzione di un originario progetto [1], è composto di due sottosistemi, diversi nelle caratteristiche di risoluzione dimensionale e spettrale



Fig. 1 – Vista parziale del MIR. Si notano il sistema goniometrico, lo spettrografo e il rivelatore CCD del primo sottosistema. Coperti dal monocromatore il laser e il sistema goniometrico per il riferimento dimensionale. Il secondo sottosistema e i proiettori per l'illuminazione sono installati separatamente.

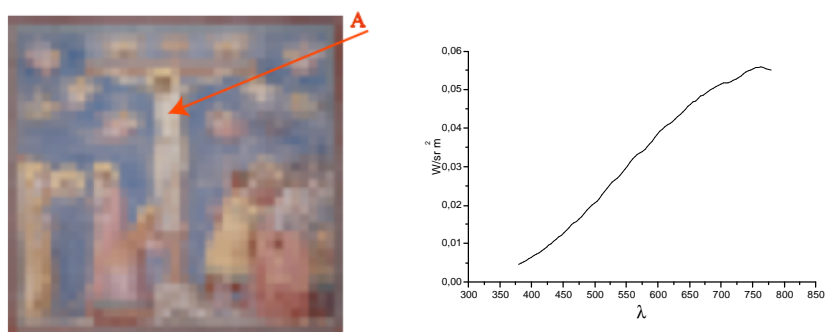


Fig. 2 – Esempio di immagine acquisita a bassa risoluzione dimensionale e alta risoluzione spettrale con il primo sottosistema (“gruppo monocromatore”). A sinistra l'immagine acquisita (riprodotta a colori) e a destra, per esempio, lo spettro della radiazione riflessa dal punto A.

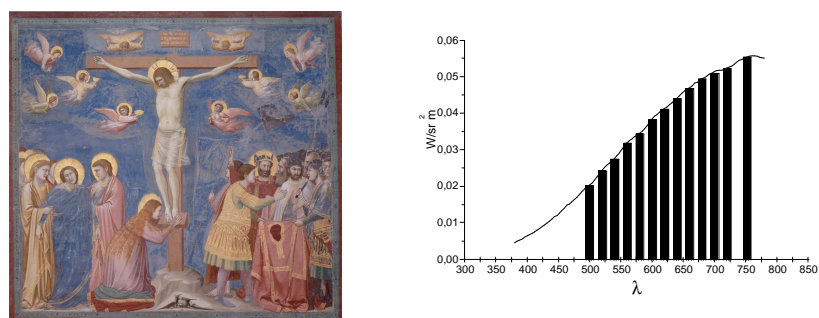


Fig. 3 – Esempio di immagine acquisita ad alta risoluzione dimensionale e bassa risoluzione spettrale con il secondo sottosistema (“gruppo fotografico”). A sinistra l'immagine acquisita (riprodotta a colori) e a destra esempio di serie di acquisizioni spettrali riferite, per esemplificazione, allo spettro della radiazione riflessa dal punto A della figura 1.

(figura 2 e 3), ma entrambi capaci di misurare il fattore spettrale di riflessione di una superficie.

In realtà i due strumenti misurano direttamente il coefficiente spettrale di radianza q , definito come rapporto tra la radianza (in una data direzione di osservazione) di una superficie e l'irradiazione sulla stessa. Questo parametro, indicato spesso con l'acronimo BRDF (BidiRectional Reflectance Function), è quello usato nell'algoritmo IEN per la progettazione dell'impianto di illuminazione.

Se necessario, il fattore di riflessione ρ , definito come rapporto tra il flusso energetico riflesso e quello incidente, può essere facilmente calcolato, noto q , se si ipotizza o si conosce come la superficie riflette la radiazione incidente nelle diverse direzioni dello spazio (ad esempio se la superficie può essere considerata una superficie di Lambert).

I risultati sono memorizzati in una matrice a tre dimensioni: righe, colonne e fogli. Righe e colonne corrispondono alle dimensioni lineari della superficie misurata, il foglio contiene le informazioni spettrali a una data lunghezza d'onda. In altri termini ogni foglio contiene una "immagine" dei valori del coefficiente di radianza della superficie misurata a una determinata lunghezza d'onda.

Completano il MIR un dispositivo per generare un riferimento dimensionale e due proiettori con lampade ad incandescenza per l'illuminazione dell'opera da misurare

2.1 Il primo sottosistema

Il primo sottosistema indicato per brevità col nome di "gruppo monocromatore" è composto da:

- uno spettrografo a immagine con obiettivo fotografico di 50 mm di lunghezza focale;
- un sensore CCD di tipo scientifico, di 256 x1024 pixel, raffreddato ad azoto con un'otturatore elettromagnetico radiale, per regolare i tempi di esposizione;
- uno specchio, montato su tavole goniometriche motorizzate, in grado di ruotare su due assi tra loro perpendicolari e con il centro di rotazione sull'asse ottico dello spettrografo.

L'obiettivo fotografico focalizza l'immagine inquadrata sul piano della fenditura d'ingresso dello spettrografo mentre la superficie sensibile dal sensore CCD coincide con il piano focale di uscita. La zona di superficie da misurare, corrispondente alla zona inquadrata, viene determinata, previo un allineamento non critico del sistema rispetto all'opera, con la rotazione dello specchio. Per particolari esigenze di campo inquadrato e di distanza superficie-rivelatore, l'obiettivo può essere sostituito con uno di lunghezza focale opportuna, previa ritaratura del sistema.

Lo strumento risultante ha un'elevata risoluzione spettrale, essendo basato su uno spettrografo a immagine a doppio reticolo (1200 linee/mm e 600 linee/mm) e permette di coprire tutto il campo del visibile e del vicino infrarosso. Normalmente le misurazioni sono eseguite con risoluzione di 1 nm, integrando la lettura di più

pixel della matrice CCD. Purtroppo le caratteristiche dell'ottica interna dello spettrografo limitano la risoluzione dimensionale che è possibile raggiungere: non tutte le 256 righe spettrali sono tra loro indipendenti ed è quindi necessario suddividere l'immagine in gruppi di 5 – 8 righe del CCD, secondo la riga del CCD considerata. Il problema può essere risolto inquadrando zone più piccole di superficie, ma ciò allunga sensibilmente i tempi di misura. Pertanto, considerate le caratteristiche spettrali dei pigmenti usati dagli artisti [2], si è preferito associare al primo sistema un secondo dispositivo con caratteristiche complementari e sviluppare un algoritmo in grado di integrare i due insiemi di risultati in un'unica matrice con elevata risoluzione spettrale e dimensionale.

2.2 Il secondo strumento

Il secondo sottosistema, indicato per brevità col nome “gruppo fotografico”, è composto da:

- un banco ottico di tipo fotografico della Linhof;
- un filtro sintonizzabile a cristalli liquidi montato in fronte a un obiettivo con lunghezza focale pari a 50 mm, munito di otturatore in corrispondenza del centro dell'obiettivo;
- un sensore CCD ad elevata dinamica, di 1024x1024 pixel, raffreddato mediante un sistema ad effetto Peltier e con la sensibilità aumentata dal costruttore, nella zona del blu.

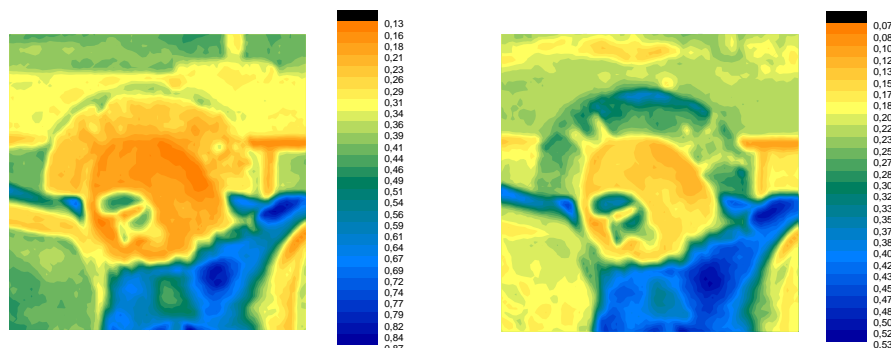


Fig. 4 – Esempio di immagini acquisite con il secondo sottosistema (“gruppo fotografico”). Le immagini sono riprodotte in falsi colori e visualizzano la radiazione riflessa a 480 nm (sinistra) e a 540 nm (destra). La grandezza diagrammata (in unità arbitrarie) corrisponde al segnale di uscita del CCD.

Il filtro sintonizzabile, posto davanti all'obiettivo, permette di acquisire immagini della regione inquadrata, selezionando la lunghezza d'onda della radiazione trasmessa nell'intervallo compreso tra 400 nm e 720 nm (figura 4).

Il filtro sintonizzabile offre alcuni vantaggi rispetto all'uso tradizionale dei filtri interferenziali, peraltro provati sperimentalmente in una precedente versione del sistema [3]:

- è possibile sostituire numerosi filtri interferenziali con un unico elemento, evitando l'uso di ruote portafiltri motorizzate, che, per il loro ingombro, non permettono di piazzare il filtro nella posizione otticamente migliore;
- nel caso di radiazione incidente da direzioni diverse rispetto alla normale al filtro, la banda passante si attenua ma non si deforma, come accade per i filtri interferenziali (figura 5).

Per contro il filtro sintonizzabile attenua maggiormente le lunghezze d'onda più corte del campo operativo e presenta al suo interno un polarizzatore. Ambedue i problemi possono essere facilmente aggirati comportando un allungamento dei tempi di acquisizione. Questa non rappresenta una limitazione del MIR, essendo i tempi di acquisizione del primo sottosistema sostanzialmente più lunghi e operando, i due dispositivi, in parallelo.

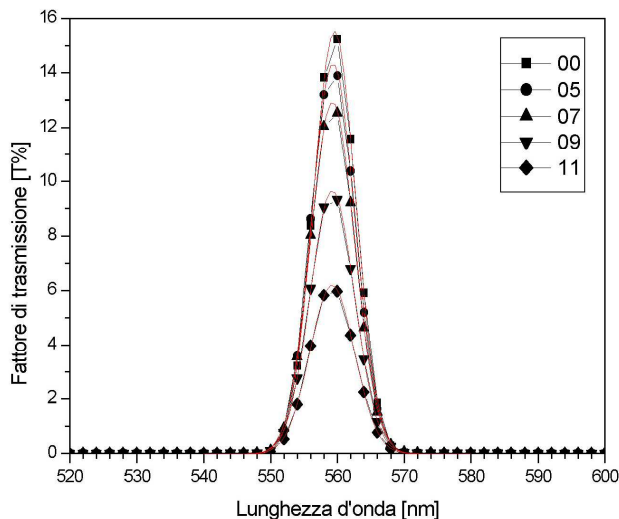


Fig. 5 – Variazione del fattore di trasmissione del filtro sintonizzabile al variare dell'angolo di incidenza (tra 0° e 11°) alla lunghezza d'onda di 560 nm (destra).

Il secondo strumento non raggiunge la risoluzione spettrale del precedente (il filtro è meno selettivo dello spettrografo presentando una larghezza di banda compresa tra i 4 e i 10 nm al variare della lunghezza d'onda centrale), ma presenta una migliore risoluzione dimensionale, grazie ad una matrice CCD più grande ed all'ottica con prestazioni migliori rispetto a quella dello spettrografo.

2.3 I dispositivi ausiliari

Il dispositivo per il riferimento dimensionale è composto da una sorgente laser a bassissima potenza e da un secondo specchio montato su un supporto goniometrico, simile a quello già descritto.

Determinare un riferimento dimensionale sull'opera misurata è indispensabile al fine di correggere eventuali distorsioni prospettiche (non sempre è possibile acquisire le immagini con lo strumento perfettamente perpendicolare al campo inquadrato) e per conoscere la distanza strumento-punto misurato, parametro indispensabile per la misurazione del fattore di riflessione, come descritto nel seguito.

Il riferimento dimensionale è ottenuto tracciando, al buio o in presenza di ridotta radiazione naturale, una griglia "virtuale" sulla superficie in misura dell'opera d'arte. Il laser proietta un punto luminoso sulla superficie in esame e lo specchio, ruotando, sposta tale punto in successive posizioni con angolazioni note. Durante la rotazione dello specchio la sorgente laser viene spenta, pertanto visivamente si osserva una successione di punti, lampeggianti per alcuni millisecondi, sulla superficie inquadrata.

Contemporaneamente i due sottosistemi acquisiscono ciascuno una immagine della superficie inquadrata, mantenendo un tempo di esposizione pari al tempo necessario all'equipaggio goniometrico per terminare la scansione.

Essendo note le distanze tra il centro di rotazione dello specchio del sistema laser e i punti nodali dei due obiettivi dei sistemi di acquisizione spettrale, per via trigonometrica e individuando i pixel dei CCD che hanno inquadrato i vari punti luminosi, si perviene alla distanza strumento-superficie misurata, alla determinazione della forma di quest'ultima e alla possibilità di correggere prospetticamente le immagini acquisite. La potenza del laser usato è estremamente ridotta e non può danneggiare l'opera, anche in caso di guasto del sistema elettronico di comando.

I due proiettori illuminano in modo noto l'opera. Si tratta di due sorgenti ad incandescenza, alimentate in corrente continua con un alimentatore stabilizzato in corrente e regolato in modo che la radiazione emessa abbia una temperatura di colore di 2856 K, per simulare l'illuminante A della CIE. Quest'ultimo vincolo non è strettamente necessario, ma assicura una lunga vita alle lampade, che risultano sottoalimentate rispetto alle specifiche del costruttore, e permette di eseguire, sul campo, delle semplici, ma indispensabili, operazioni di verifica sulla taratura della strumentazione, prima di iniziare la campagna di misura. Per il calcolo del coefficiente di radianza è necessario misurare con un radiometro (o luxmetro) l'irradiazione sulla superficie del dipinto o eseguire una misurazione preliminare su un diffusore tarato. Entrambe le operazioni non sono sempre possibili sia perché la superficie in esame non può essere raggiunta con la strumentazione (ad esempio affresco in una chiesa), sia per problemi di sicurezza e/o di eventuale danneggiamento della stessa opera. Per questo motivo l'irradiazione sulla superficie caratterizzata può essere stimato attraverso la conoscenza della ripartizione dell'intensità luminosa dei proiettori e della loro distanza dalla superficie. È richiesto un perfetto allineamento delle sorgenti, operazione effettuata mediante due laser di puntamento, anch'essi di bassissima potenza, ognuno meccanicamente solidale con il proprio proiettore. I due proiettori

vengono piazzati a distanza fissa rispetto al MIR e i fasci generati dai due laser fatti confluire su un unico punto centrale della superficie in misura.

La ripartizione dell'intensità luminosa delle sorgenti è misurata, ad ogni cambio lampada, presso il laboratorio di goniometria dell'IEN, facendo riferimento a un sistema C γ avente per asse principale l'asse generato dal fascio laser [4].

Con tutte queste precauzioni la maggior fonte di incertezza sulla valutazione dell'irradiazione risiede nella presenza di interriflessioni tra la superficie illuminata e le pareti del locale, ove si esegue la misura. Operando sul campo, il contributo delle interriflessioni viene ridotto cercando di illuminare esclusivamente la superficie interessata e stimato con un opportuno software, che necessita di una serie di misurazioni di illuminamento condotte in punti accessibili dell'ambiente. In ogni caso è attualmente allo studio un sistema goniometrico a proiezione che, pur necessitando di tempi più lunghi di acquisizione, dovrebbe ridurre ulteriormente l'influenza di questa fonte di incertezza.

3. La procedura di misura

La procedura di misura è completamente automatizzata ed inizia al termine dell'allineamento del sistema e dell'inquadratura della superficie da misurare ottenuta mediante la rotazione dello specchio, per il "gruppo monocromatore", e la regolazione del banco ottico, per il "gruppo fotografico".

I due gruppi lavorano in parallelo e la procedura evolve secondo i seguenti passi.

1. Acquisizione dell'immagine inquadrata (proiettori accesi):

gruppo monocromatore: il reticolo di diffrazione interno dello spettrografo è ruotato nella posizione zero (pertanto lavora come uno specchio) e la fenditura di ingresso non è inserita. Sul piano del CCD si forma l'immagine del campo inquadrato e ad ogni pixel del rilevatore è associato un elemento della superficie inquadrata (figura 6 in alto).

gruppo fotografico: il filtro sintonizzabile è posizionato sul verde e acquisisce una immagine di riferimento che permette di associare ad ogni pixel del rilevatore una zona definita della superficie inquadrata.

2. Acquisizione del riferimento dimensionale (proiettori spenti):

i due gruppi lavorano nelle condizioni prima descritte, ma i tempi di acquisizione sono pari al tempo di scansione per la generazione del reticolo e il filtro sintonizzabile è regolato sulla lunghezza d'onda del laser.

3. Acquisizione dei dati spettrali (proiettori accesi):

gruppo monocromatore: si ruota il reticolo di diffrazione all'ordine superiore, viene inserita la fenditura di ingresso ed il sistema lavora come elemento dispersivo permettendo di acquisire lo spettro della radiazione incidente (figura 6 in basso). La superficie in misura viene selezionata mediante la rotazione dello specchio in modo da coprire tutto il campo inquadrato, nel primo passo, con una serie di sezioni verticali consecutive (figura 6 al centro). Il numero di tali sezioni dipende essenzialmente dalla risoluzione dimensionale, nella direzione orizzontale,

desiderata per l'immagine finale. Come già accennato la risoluzione dimensionale, nella direzione verticale è limitata dalle caratteristiche ottiche dello spettrografo. gruppo fotografico: il filtro sintonizzabile è regolato sulle lunghezze d'onda desiderate e per ognuna di queste viene acquisita una immagine con il tempo di esposizione più opportuno, al fine di sfruttare tutta la dinamica del rivelatore. Generalmente si esegue la misura a passi di 10 nm nel campo del visibile coperto dal filtro. In questo caso la risoluzione dimensionale è definita dall'ingrandimento dell'obiettivo e quindi dalla sua lunghezza focale e dalla distanza di ripresa.

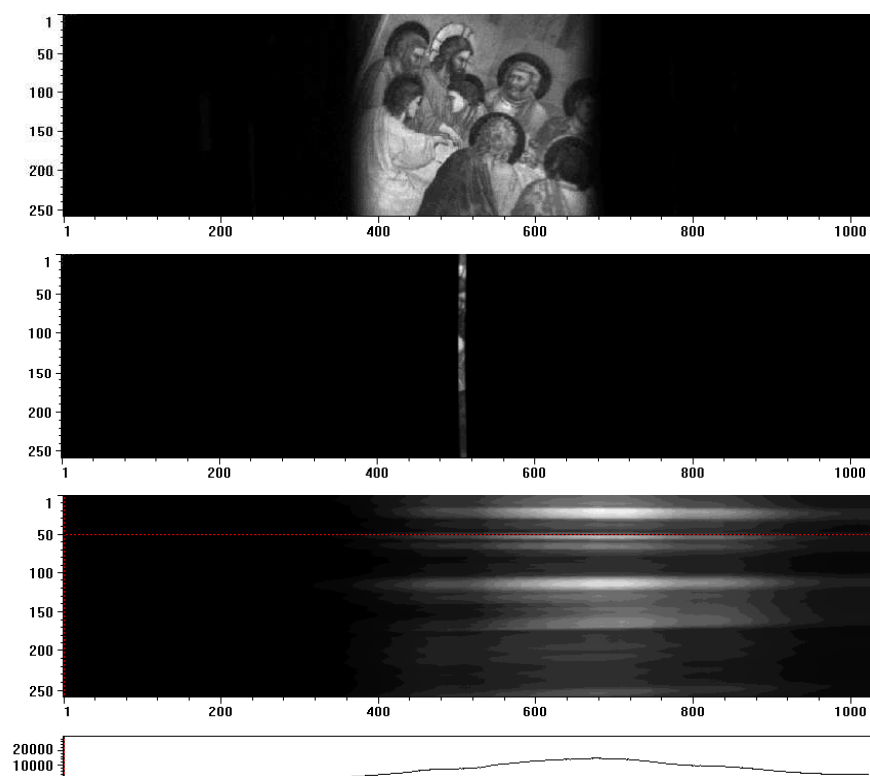


Fig. 6 – Esempio di successione delle immagini acquisite con il gruppo monocromatore. In alto: immagine con reticolo nella posizione zero e fenditura aperta. Al centro: la fenditura è stata chiusa e la rotazione dello specchio ha permesso di individuare la fascia verticale desiderata di misura (comprendente parte del volto di Cristo). In basso: la misurazione spettrale ottenuta con la fenditura inserita e il reticolo in posizione 1. Il grafico cartesiano diagramma i valori dei pixel del sensore individuati dalla riga rossa. Negli altri grafici ascisse e ordinate rappresentano le colonne e le righe della matrice del CCD.

Tutte le acquisizioni dei rivelatori CCD, escludendo quelle del secondo passo, sono ottenute sottraendo, all'immagine acquisita, una immagine ottenuta, nelle stesse condizioni operative, con l'otturatore chiuso, al fine di compensare il segnale di buio dei rivelatori.

4. La procedura di taratura

La procedura di taratura è piuttosto complessa e viene eseguita in laboratorio, cercando di imitare le probabili condizioni operative dello strumento sul campo (distanza del campo inquadrato, tempi di esposizione, ecc.). Sul campo è prevista una verifica, con campioni precedentemente tarati presso il laboratorio di gonioreflettometria dell'IEN.

La taratura riguarda due aspetti:

- quello radiometrico: per ogni pixel occorre determinare la sensibilità alla lunghezza d'onda di misura e, nel caso del gruppo monocromatore la lunghezza d'onda di misura, che potrebbe non essere la stessa per tutti i pixel sulla stessa colonna;
- quello geometrico: ad ogni pixel deve essere associata la direzione di misura considerando le distorsioni ottiche del sistema (gruppo fotografico e gruppo monocromatore con reticolo nella posizione 0).

Inoltre occorre valutare la presenza di immagini fantasma e, nel caso dello spettrografo, l'influenza delle aberrazioni ottiche sulle correlazioni esistenti tra i canali spettrali misurati.

La procedura di taratura è derivata dalla metodologia sviluppata all'IEN per la caratterizzazione dei rivelatori CCD per applicazioni fotometriche [5] e si basa sulla possibilità di illuminare un ridotto numero di pixel con una radiazione di lunghezza d'onda nota. Attualmente viene usata una sorgente con filtri interferenziali e il laser già descritto per realizzare la griglia per il riferimento dimensionale.

L'incertezza di misura del coefficiente di radianza è compresa tra il 3% e l'1% e dipende dalle condizioni operative di acquisizione.

5. Calcolo delle condizioni di illuminazione

Generalmente, nel caso delle opere d'arte, l'impianto di illuminazione dovrebbe permettere al pubblico di apprezzare i capolavori artistici nelle condizioni desiderate dall'artista o in quelle nelle quali l'artista ha sviluppato la sua opera e compiuto le sue scelte creative.

Anche quando lo spazio espositivo è completamente diverso dall'originale è importante la fedeltà nella percezione dei colori rispetto alle condizioni di riferimento.

Il metodo generalmente utilizzato per scegliere le sorgenti luminose si basa sul calcolo dell'indice di resa dei colori R_a ; un algoritmo sviluppato dalla CIE [6] per valutare le differenze nella resa dei colori tra due sorgenti luminose, di cui una considerata di riferimento, rispetto ad un insieme di colori specificati. Questo gruppo di colori standard è formato da otto o da quattordici colori di cui si

conoscono le caratteristiche spettrali. Per calcolare il valore di R_a è quindi sufficiente conoscere lo spettro di emissione delle due sorgenti.

L'indice di resa dei colori è utilizzato dai costruttori per individuare, con un unico valore, le caratteristiche di resa dei colori di una lampada. In questo caso fornisce indicazioni approssimative, utili in applicazioni non particolarmente critiche, ma presenta alcuni limiti, che diventano importanti nel caso di impianti con esigenze particolari. Il calcolo di R_a si basa infatti su una serie di colori e di fattori spettrali di riflessione scelti a priori e che potrebbero non essere presenti nell'opera. Inoltre il metodo vincola la scelta della radiazione di riferimento e, ovviamente, non tiene conto delle inter-riflessioni delle pareti che sono attorno all'oggetto e che possono modificare lo spettro della radiazione incidente sull'opera e influenzare le condizioni di fruibilità della stessa.

Per questi motivi si è sviluppato un metodo di calcolo basato sulla misurazione del fattore di riflessione spettrale ottenuta con il MIR.

Utilizzando i dati spettrali forniti dal MIR si calcola la resa dei colori, secondo l'algoritmo CIE, ma considerando esclusivamente i colori effettivamente presenti nell'opera, per un gruppo di sorgenti, ed eventuali sovrapposizioni di due o più sorgenti. Inoltre poiché l'obiettivo che si vuole raggiungere è quello di riprodurre il più fedelmente possibile le condizioni di visione in cui l'opera è stata creata, la scelta della sorgente di riferimento è particolarmente importante.

E' infatti spesso impossibile conoscere le reali condizioni di lavoro di un artista specialmente per le opere molto antiche. Però è molto probabile che l'artista lavorasse utilizzando la luce solare, passante attraverso una finestra o, se il sole non raggiungeva il luogo di lavoro, della luce riflessa da uno specchio. Per questo motivo l'illuminante D_{65} viene spesso preso come riferimento. Ovviamente, se possibile, si considerano i fattori di riflessione o trasmissione degli oggetti utilizzati per l'illuminazione originale. Questo compito è sempre difficile, ma nel caso di opere fisse (affreschi) è possibile ipotizzare, con un buon grado di attendibilità, la radiazione incidente.

Nel calcolo della reale percezione dei colori occorre considerare ancora tre punti molto importanti:

- i livelli di illuminamento richiesti dalla normativa, generalmente notevolmente differenti da quelli ipotizzati, anche inconsciamente, dall'artista;
- la presenza di sfondi od oggetti che possono modificare la percezione dei colori [7];
- l'influenza delle operazioni di restauro che possono aver modificato drasticamente il fattore spettrale di riflessione dei pigmenti originali.

I primi due punti sono stati considerati variando l'algoritmo di calcolo secondo gli ultimi modelli colorimetrici CIE, mentre il terzo punto, allo stato attuale della ricerca è stato affrontato esclusivamente con alcune misurazioni preliminari di tipo gonioradiometrico in laboratorio su alcuni pigmenti commerciali.

Risulta quindi particolarmente importante l'ultimo passo del metodo IEN, consistente nella costruzione di immagini fotorealistiche ottenute tenendo conto

delle caratteristiche spettrali della sorgente luminosa, dell'opera illuminata e dell'ambiente circostante. Le immagini, costruite utilizzando un algoritmo di tipo radiosity opportunamente modificato, sono visualizzate su un monitor CRT calibrato [8]. In questo modo è possibile ottenere immagini colorate estremamente accurate e valutare la validità del progetto illuminotecnico attraverso un controllo soggettivo (figura 7).

In particolare l'algoritmo radiosity modificato dello IEN tiene conto di:

- sorgenti di illuminazione reali (dimensioni della sorgente, distribuzione dell'intensità luminosa) e degli spettri delle sorgenti;
- reali proprietà di riflessione di muri e oggetti inseriti nell'ambiente (BDRF e BDTRF dei materiali) e della superficie dell'opera da illuminare;
- e fornisce risultati
- sull'illuminazione dell'oggetto calcolata sulla base della distribuzione spettrale della componente diretta, ossia del solo flusso che, emesso dalla sorgente, colpisce direttamente l'opera;
- sul contributo delle inter-riflessioni presenti nell'ambiente;
- sull'illuminazione dell'oggetto considerando tutti i contributi di radiazione incidente.

Per la visualizzazione fotorealistica le coordinate cromatiche dell'oggetto illuminato, calcolate dai dati spettrali prima descritti, attraverso modelli CIE, sono convertite in valori RGB per la visualizzazione finale su un monitor CRT tarato.



Fig. 7 – Esempio di immagine ricostruita. A sinistra illuminazione ottenuta con sorgente con temperatura di colore correlata di 4800 K; destra con temperatura di colore correlata di 6500 K. La corretta rappresentazione dei colori è possibile solo su monitor tarato.

6. Un esempio reale: gli affreschi della cappella degli Scrovegni

Il metodo IEN precedentemente descritto è stato, ad esempio, utilizzato per lo studio, realizzato in collaborazione con l'Università di Padova, dell'impianto di illuminazione degli affreschi di Giotto del XIV secolo nella cappella degli

Scrovegni di Padova. Da questa analisi sono stati ricavate anche le illustrazioni che esemplificano i vari passi della procedura di misura e di elaborazione dei dati.

Il sistema MIR è stato utilizzato per misurare il coefficiente spettrale di radianza di cinque affreschi (figura 8) e si è supposto che l'artista lavorasse con la luce solare diurna in modo da utilizzare l'illuminante D_{65} come sorgente di riferimento.

Per lo studio dell'impianto sono state considerate 30 sorgenti luminose commerciali e per ogni sorgente analizzata e per ogni possibile coppia di combinazioni delle stesse, sono state calcolate le coordinate cromatiche e le differenze cromatiche rispetto al riferimento. La coppia di lampade TL965 and HQIT ha dato il miglior risultato, fornendo valori significativamente più consistenti rispetto a quelli delle stesse lampade prese singolarmente. Per problemi realizzativi dell'impianto e di uniformità di illuminamento si è selezionata una combinazione di sole lampade fluorescenti, molto vicina alle condizioni ottimali.

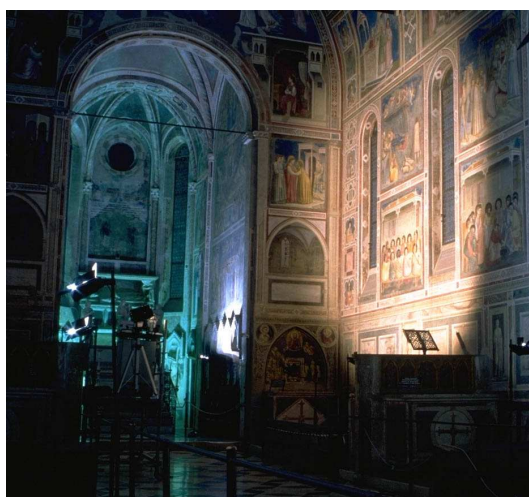


Fig. 8 – Il sistema MIR nella cappella degli Scrovegni.

7. Conclusioni

Il sistema multispettrale ad immagine per la misura del fattore spettrale di riflessione ed il metodo di calcolo IEN rappresentano un ottimo strumento per progettare impianti di illuminazione delle opere d'arte. La combinazione di questi due elementi permette di valutare le caratteristiche di una sorgente luminosa sulla base di dati oggettivamente misurati e di individuare le migliori condizioni di visione per il pubblico, nel rispetto delle esigenze di conservazione delle opere d'arte.

L'incertezza di misura del sistema permette l'utilizzazione dello stesso anche per scopi di documentazione dello stato di conservazione delle opere d'arte.

Bibliografia

1. G. Rossi, Paola Iacomussi, M. Sarotto, P. Soardo, "A new imaging spectroradiometric system", Proceedings of the IMEKO TC4 Symposium on Development in Digital Measuring Instrumentation, Naples, 1998.
2. Ralph Mayer, *The artist's handbook of materials & techniques* (Fifth edition revised and expanded by Steven Sheehan), Faber and Faber, London –Boston, 1991.
3. P. Iacomussi, G. Rossi, P. Soardo, L. Fellin, "A new method for studying lighting design for works of art", Proceedings of LUX EUROPA - 9th European Lighting Conference, pp. 66-69, Reykjavík, (Iceland), June 2001.
4. CEN EN13032-1 "Lighting Applications — Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires — Part 1: Measurement and file format", 2004.
5. G. Rossi, G. Fusco, P. Soardo, "The Calibration of CCD Matrix Detectors for the Measurement on Photometric Materials and Lighting Installation", Proceedings of 23rd session of the CIE, New Delhi, 1995.
6. Commission Internationale de l'Eclairage, Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources, CIE 13.3.
7. P. Iacomussi, G. Rossi, M. Vio, "Test on subjective colour evaluation for museum application", Proceedings of the Conference on Colour and Visual Scales 2000, NPL, 2000.
8. G. Rossi, P. Iacomussi, A. Salatiello, L. Zoppi Brega, "Algoritmi per la valutazione delle condizioni di illuminazione di opere d'arte" Proceedings of AIDI National congress, San Remo, 1996.