

Ricostruzione di immagini da proiezioni radiografiche

Mediante una tecnica che combina in forma matematica serie di radiografie riprese da diverse angolazioni è possibile ottenere immagini tridimensionali degli organi interni

di Richard Gordon, Gabor T. Hermann e Steven A. Johnson

Fino a pochi anni fa, il medico aveva a sua disposizione pochi mezzi per conoscere la struttura tridimensionale e la disposizione degli organi e dei tessuti sani e ammalati all'interno del corpo del paziente. La palpazione, le immagini radiografiche di tipo convenzionale, i traccianti radioattivi e la chirurgia esplorativa sono senz'altro utili, ma presentano molte limitazioni. Oggi, invece, la medicina sta entrando in un'era in cui le strutture interne del corpo divengono molto più accessibili per mezzo di procedimenti non invasivi che potrebbero rivoluzionare la medicina pratica, così come nel XIX secolo avvenne in seguito all'introduzione dell'uso degli anestetici e delle tecniche di sterilizzazione. In molti ospedali di tutto il mondo sta entrando in funzione un particolare procedimento detto ricostruzione da proiezioni. Si tratta di una tecnica che combina in forma matematica immagini riprese ai raggi X da diverse angolazioni fornendo immagini tridimensionali degli organi interni.

Nella radiografia convenzionale, i raggi X divergono da una sorgente e passano attraverso il corpo proiettando su un'apposita lastra o pellicola radiografica un'immagine delle ossa, degli organi, delle zone di iperdiafania (spazi d'aria) e di eventuali tumori presenti. Questa tecnica ha tuttavia una grossa limitazione: sulla pellicola le strutture si sovrappongono ed è talvolta difficile, se non impossibile, distinguere l'una dall'altra. Ciò è particolarmente grave nel caso in cui la densità ai raggi X di una struttura differisce solo leggermente dalla densità della struttura vicina, come spesso avviene nel caso di un tumore e del tessuto nel quale è insediato.

Nel tentativo di superare questa limitazione, il medico esegue spesso un

certo numero di radiografie sotto diverse angolazioni. Questa procedura qualitativa sta ora per essere soppiantata da una nuova tecnica quantitativa, che combina matematicamente serie di radiografie in modo da ottenere una rappresentazione tridimensionale della struttura interna. Disponendo di queste informazioni estremamente importanti, la diagnosi diventa più precisa e può fornire una guida più sicura alla mano del chirurgo o alla irradiazione terapeutica di un tumore.

I metodi matematici di ricostruzione delle immagini partendo da proiezioni diverse trovano applicazione in una serie di prove al di fuori del campo della medicina. Per esempio, in microscopia e nelle prove industriali non distruttive, la struttura interna tridimensionale può venire ricostruita partendo da immagini proiettate ottenute non solo coi raggi X, ma anche con le radiazioni luminose, gli elettroni e i protoni.

Metodi simili vengono impiegati in astronomia per ricostruire immagini a due dimensioni di corpi celesti partendo dalle rispettive emissioni radio e di raggi X (si veda l'articolo *Radiogalassie giganti* di Richard G. Strom, George K. Miley e Jan H. Oort in «Le Scienze» n. 88, dicembre 1975). Procedimenti analoghi potrebbero essere alla base del nostro modo di percepire visivamente il mondo che ci circonda.

La riscoperta di un metodo

La storia di queste tecniche ricostruttive ebbe inizio nel 1917 con la pubblicazione di una relazione da parte del matematico austriaco J. Radon, nella quale egli dimostrava che un oggetto a due o tre dimensioni poteva essere ricostruito unicamente da una serie infinita di tutte le sue proiezioni. A questo risultato sono giunti successiva-

mente matematici, radioastronomi, specialisti in microscopia elettronica e radiologi. Fin dal 1922, parecchi radiologi, indipendentemente l'uno dall'altro, escogitarono un'altra tecnica basata sui raggi X per ricreare una struttura tridimensionale, tecnica che però è abbastanza diversa dalla ricostruzione da proiezioni. Questa tecnica, nota come stratigrafia, è tuttora in uso presso tutti gli ospedali importanti e rappresenta il metodo tradizionale per ottenere informazioni tridimensionali. Nella maggior parte degli apparecchi per stratigrafia, la sorgente di raggi X si sposta in una direzione e simultaneamente la pellicola radiografica si sposta nella direzione opposta. Il paziente è posto tra la sorgente e la pellicola. Se si considera il corpo del paziente come costituito da una serie di piani paralleli alla pellicola, esiste solo un piano la cui immagine proiettata rimane fissa rispetto alla pellicola mentre quest'ultima si muove, ragione per cui tale piano risulta anche perfettamente a fuoco sulla pellicola mentre gli altri si presentano sfumati.

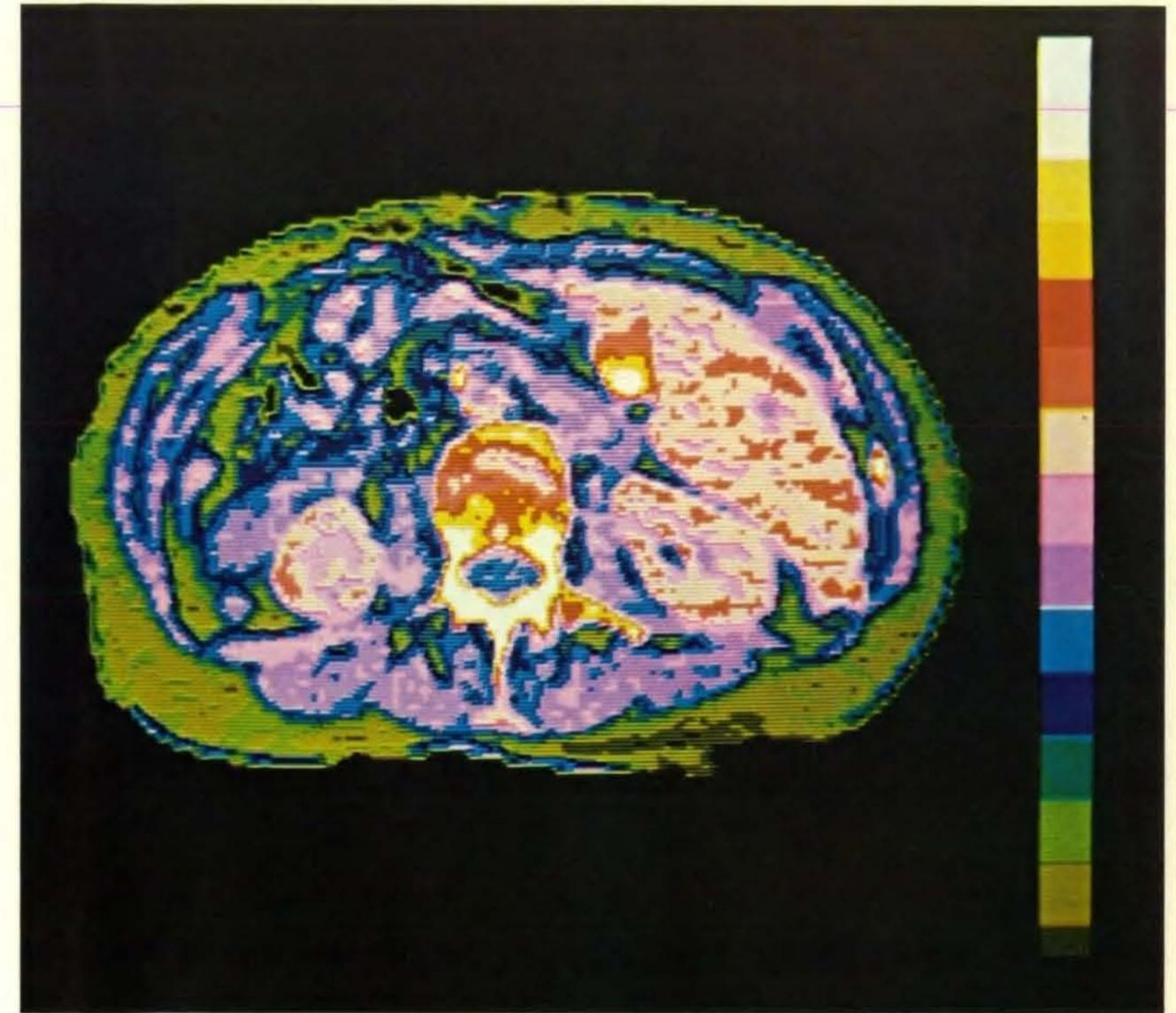
Se Radon e i primi realizzatori di stratigrafie si fossero resi conto dell'esistenza di un problema comune, molti degli sviluppi realizzati negli ultimi anni sarebbero forse stati anticipati di mezzo secolo. C'è però da dire che il pieno sfruttamento delle tecniche di ricostruzione avrebbe dovuto attendere l'arrivo sulla scena dei moderni calcolatori, in quanto ciascuna ricostruzione richiede innumerevoli elaborazioni.

Per avere un'idea dei calcoli necessari consideriamo il caso della ricostruzione della struttura del cervello che immaginiamo contenuto all'interno di un cubo ideale di 20 cm di lato. Per poter rappresentare anche i piccoli particolari, dobbiamo arrivare a una risoluzione di 2 mm, il che significa che

dovremmo ricostruire il tessuto cerebrale sotto forma di una serie di piccoli cubi di 2 mm di lato. Otterremmo così il cervello sotto forma di un grosso cubo costituito da $100 \times 100 \times 100$, ossia da un milione di piccoli cubetti. Anche servendoci di un calcolatore digitale ad alta velocità che impiegasse $1/20$ di secondo per elaborare i calcoli relativi a ciascun cubo, occorrerebbe più di mezza giornata per eseguire una completa ricostruzione del cervello.

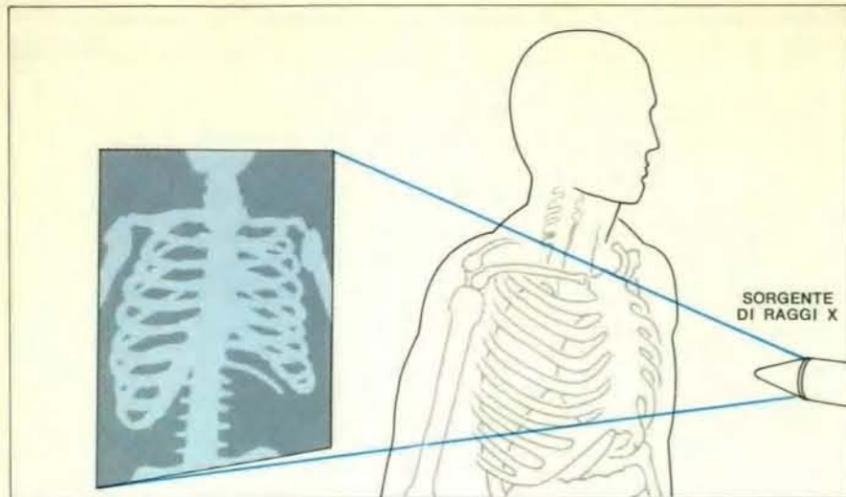
Fortunatamente esistono dei sistemi per semplificare la procedura: per esempio, i raggi X possono essere collimati in modo da attraversare il corpo del paziente in un fascio di raggi paralleli mentre il paziente (o l'apparecchiatura) si muove a intervalli regolari intorno a un asse. Se venisse ripresa un'immagine fotografica in corrispondenza di ciascuna posizione, ossia per ciascuna proiezione, le strutture del corpo del paziente che giacciono su un

piano perpendicolare all'asse di rotazione, verrebbero registrate come una unica linea sottile. Misurando la densità dei raggi X lungo tale linea su ciascuna immagine, è possibile isolare l'informazione ricavata dal piano desiderato. Possiamo così ricostruire un unico piano bidimensionale e disporre l'una sopra l'altra una sequenza di tali piani per ottenere un'immagine a tre dimensioni. Con questo metodo la riduzione del tempo di elaborazione di-

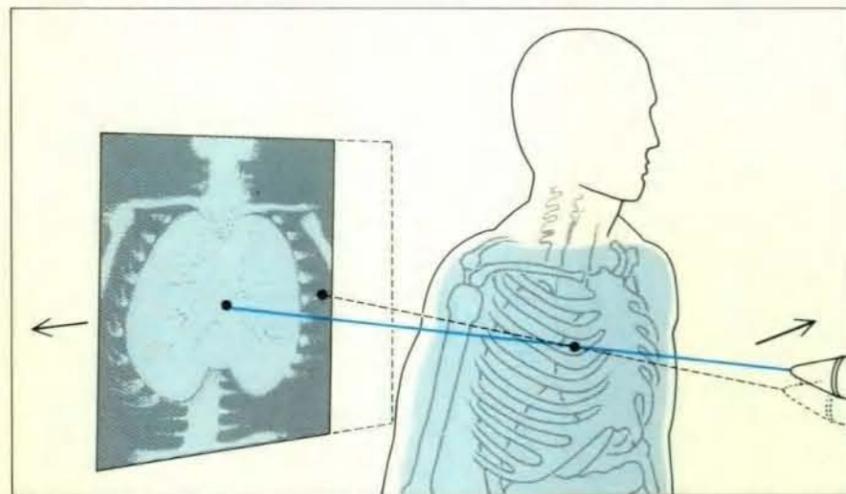


In questa figura è illustrata la sezione trasversale dell'addome di un paziente, ottenuta mediante ricostruzione da proiezioni di raggi X. Questa sezione è vista dalla stessa prospettiva dell'illustrazione di copertina, ossia da sopra la testa del soggetto. La striscia verticale a destra è la chiave per il riconoscimento della densità ai raggi X dei tessuti della sezione. Il bianco rappresenta la densità maggiore, il nero la densità minore e i vari colori le densità intermedie. Le zone bianche al disotto della parte centrale della sezione rappresentano la colonna vertebrale. Le ampie zone a colori chiari che vanno dalla parte superiore destra alla parte inferiore destra corrispondono al fegato. L'area chiara vicina all'estremità superiore del

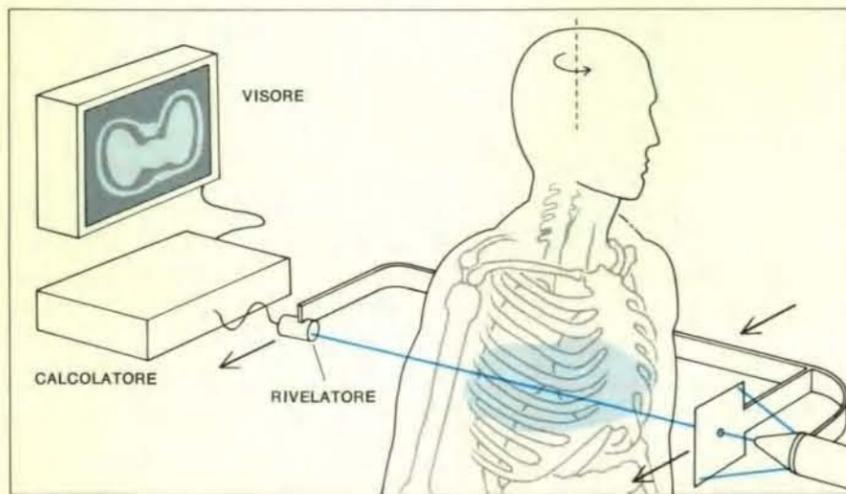
fegato è la cistifellea che qui contiene un colorante opaco ai raggi X per migliorare il contrasto. Le due aree tondeggianti a destra e a sinistra della colonna vertebrale sono i reni. Le piccole aree scure che si estendono dalla parte superiore sinistra alla parte inferiore sinistra corrispondono a sezioni del tratto intestinale. Questa immagine, come quella di copertina, è stata ottenuta col Delta Scanner costruito dalla Ohio-Nuclear nel corso di uno studio di Ralph J. Alfidi, della Cleveland Clinic Foundation. L'immagine ha richiesto 180 diverse proiezioni ai raggi X, eseguite a intervalli di un grado l'una dall'altra lungo un semicerchio. La dose totale di raggi X era all'incirca la stessa necessaria per l'esecuzione di una singola radiografia convenzionale.



Una radiografia convenzionale viene ottenuta facendo in modo che i raggi X passino attraverso il corpo del soggetto e vadano a impressionare una lastra fotografica.



Una stratigrafia viene ottenuta facendo muovere, durante l'esposizione, la sorgente di raggi X in una direzione e la pellicola in un'altra. Nell'immagine proiettata, solo un piano del corpo rimane fisso rispetto alla pellicola e gli altri piani sono sfuocati.



La ricostruzione da proiezioni si ottiene montando la sorgente di raggi X e un rivelatore di raggi X su una intelaiatura e muovendoli all'esterno del corpo. L'intelaiatura viene anche fatta ruotare intorno al corpo secondo una successione di angoli. I dati registrati dal rivelatore sono elaborati mediante uno speciale programma. Il calcolatore fa apparire una immagine tridimensionale sullo schermo di un tubo a raggi catodici.

pende dalla nostra abilità nel saper isolare i pochi piani di nostro interesse. La tecnica di ricostruzione di un'immagine tridimensionale si riduce quindi alla tecnica di ricostruzione di un'immagine a due dimensioni o sezione trasversale, partendo dalle sue proiezioni unidimensionali.

Ogniquale volta si applica un qualsiasi metodo di ricostruzione a un nuovo numero finito di dati reali (in contrasto col numero infinito di proiezioni richieste dal teorema di Radon) si ottengono delle ricostruzioni che, nella migliore delle ipotesi, sono delle approssimazioni della effettiva struttura dell'oggetto. Inoltre si è trovato che la precisione relativa dei vari metodi matematici dipende dalla natura dei dati raccolti. Per verificare la precisione di un particolare metodo, possiamo ricostruire un oggetto la cui struttura è già nota. Possiamo cioè prendere qualsiasi immagine a due dimensioni, considerarla come « immagine di prova », calcolarne le proiezioni unidimensionali sotto vari angoli, eseguire la ricostruzione e confrontare l'immagine così ricostruita con l'originale.

Il metodo per sommatoria

Un metodo semplificato, ma abbastanza elegante, per ottenere una ricostruzione approssimata è quello per sommatoria. Grazie alla sua semplicità, esso può essere realizzato fotograficamente o anche con una matita e un righello. Nel metodo per sommatoria, si ottiene la densità di ciascun punto dell'immagine ricostruita sommando le densità di tutti i raggi che passano per quel punto. Per esempio, se l'immagine di prova è costituita da un unico punto, e se si ricavano da essa tre proiezioni, la ricostruzione assume la forma di una stella a 6 punte (si veda l'illustrazione nella pagina a fronte). La stella conferma la grossolanità del metodo per sommatoria: si tratta della « funzione di diffusione di un punto » di questo particolare metodo di ricostruzione. Un metodo esatto di ricostruzione dovrebbe ricostruire un punto sotto forma di un punto, e non sotto forma di una stella. Si deve tuttavia ricordare che un metodo che risulta valido nel ricostruire un punto sotto forma di un punto può anche non essere necessariamente un metodo valido per ricostruire immagini più complesse.

Le proiezioni unidimensionali di immagini di prova più complesse possono essere eseguite fotograficamente facendo muovere l'immagine di prova lungo un pezzo di pellicola sotto un certo

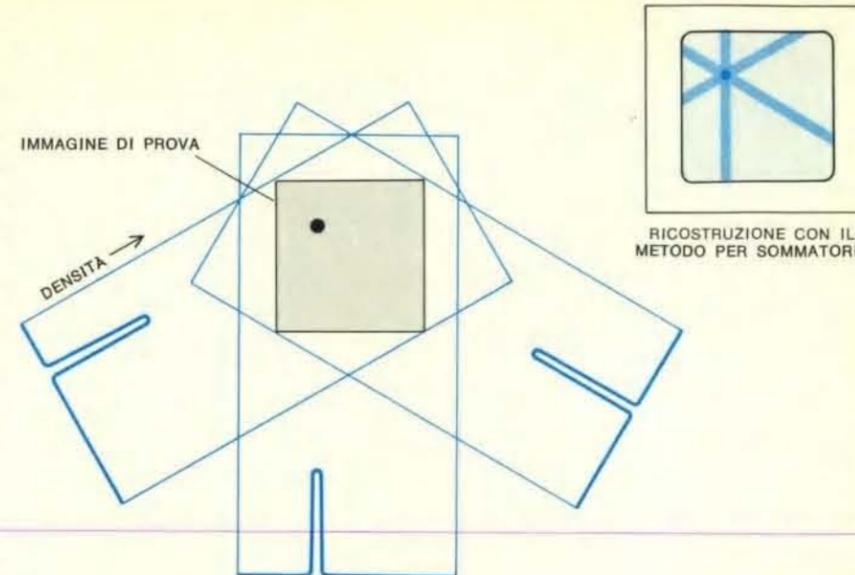
angolo mentre si espone il film alla luce (si veda l'illustrazione in alto a pagina 78).

La proiezione viene registrata sotto forma di una serie confusa di striature parallele sulla superficie del film, la densità di ognuna delle quali corrisponde alla densità integrata dell'immagine sotto quel particolare angolo. È quindi possibile sovrapporre fotograficamente le immagini delle striature su un altro pezzo di pellicola. La precisione della ricostruzione aumenta con l'aumentare del numero di immagini utilizzate. Le immagini delle striature possono a loro volta essere approssimate mediante una serie di linee parallele, le cui distanze siano inversamente proporzionali alla densità proiettata dell'immagine di prova (si veda l'illustrazione in basso a pagina 78). Le immagini generate dalla sovrapposizione di linee presentano un aspetto mazzato. È possibile osservare che qualsiasi immagine, attraverso la ricostruzione approssimata col metodo per sommatoria, può dar luogo a un aspetto mazzato dello stesso tipo.

Possiamo inoltre vedere che ciascun punto in una stratigrafia di tipo classico è in effetti la somma dei raggi passanti per il corrispondente punto del piano nella posizione di messa a fuoco migliore. Possiamo quindi affermare che l'immagine stratigrafica si forma mediante un procedimento che dal punto di vista matematico è identico al metodo per sommatoria. E poiché gli ospedali hanno già effettuato considerevoli investimenti in apparecchiature stratigrafiche, potrebbe valere la pena di applicare i metodi di ricostruzione allo scopo di migliorare la qualità delle stratigrafie.

L'impiego del metodo di ricostruzione per sommatoria allo scopo di ottenere un'informazione tridimensionale che sia quantitativamente precisa per le applicazioni mediche, fa sorgere due obiezioni fondamentali. Innanzitutto la ricostruzione è imprecisa in quanto ogni punto dell'originale risulta confuso per la presenza del profilo a stella della funzione di diffusione del punto. In secondo luogo, se prendiamo la ricostruzione e ne calcoliamo le proiezioni, troviamo che non sono le stesse di quelle dell'immagine originale. Per superare entrambi gli inconvenienti, è stato escogitato un metodo algebrico. Il metodo, noto come ART (*Algebraic Reconstruction Technique*), viene utilizzato con un calcolatore digitale.

Come si possono rappresentare in un calcolatore le immagini e le loro proiezioni? Una immagine può essere memorizzata sotto forma di una serie bidimensionale di numeri, ciascuno dei quali rappresenta la densità ai raggi X



Il metodo per sommatoria è una tecnica per la ricostruzione di immagini partendo da una serie di proiezioni. In questo esempio vengono eseguite tre proiezioni di un'immagine bidimensionale contenente un unico punto. Ciascuna proiezione ha una distribuzione unidimensionale della densità dell'immagine di prova, osservata sotto uno specifico angolo. Per questa immagine le proiezioni si presentano uguali per qualsiasi direzione. L'immagine può essere ricostruita dalle proiezioni: la densità di ciascun punto sull'immagine ricostruita è calcolata sommando le densità di tutti i raggi che passano per quel punto. La ricostruzione del punto singolo dà luogo a una stella, ossia a un'immagine risultante dalla intersezione dei raggi. La stella rappresenta la « funzione di diffusione del punto » e mostra le caratteristiche del metodo per sommatoria.

di un piccolo quadratino della immagine. Tale elemento dell'immagine è detto « pixel ». Analogamente, una proiezione unidimensionale dell'immagine può essere memorizzata sotto forma di una sequenza unidimensionale di numeri. Così come la maggiore o minore densità di ciascuna striatura nelle immagini a strisce rappresenta la densità dell'immagine originale di prova lungo una certa linea, allo stesso modo ciascun numero dell'elenco unidimensionale del calcolatore rappresenta la densità totale ai raggi X dei pixel in corrispondenza di una sottile striscia dell'immagine. La densità è detta somma dei raggi.

L'algoritmo ART

L'algoritmo ART, o programma di calcolo, è iterativo: esso inizia con una valutazione preliminare della serie bidimensionale dei numeri che rappresentano un'immagine ricostruita e quindi modifica ripetutamente la valutazione fino a che i valori di densità non smettono di variare. Una possibile valutazione iniziale può essere una serie di zeri, ossia un'immagine di uno spazio completamente vuoto.

Immaginiamo di iniziare un'iterazione. Prendiamo un raggio, o striscia, che attraversi l'immagine in esame, e calcoliamo la corrispondente somma

dei raggi, quindi confrontiamo questo dato con la somma dei raggi ottenuta dall'immagine a raggi X originariamente proiettata. Solitamente i due valori differiscono. Ne calcoliamo la differenza e la suddividiamo tra tutti i pixel intersecati dal raggio. La somma modificata della valutazione corrisponde ora alla somma dei raggi dell'originale. Dato che i raggi di una proiezione incrociano quelli di un'altra proiezione, ciascun calcolo altera parzialmente la corrispondenza delle somme dei raggi ottenuta con le precedenti elaborazioni. Si può comunque dimostrare matematicamente che se si continuano a effettuare successive correzioni in condizioni ideali, l'immagine si avvicinerà a una ricostruzione la cui somma dei raggi saranno identiche alle somme dei raggi delle proiezioni ricavate dall'oggetto originale.

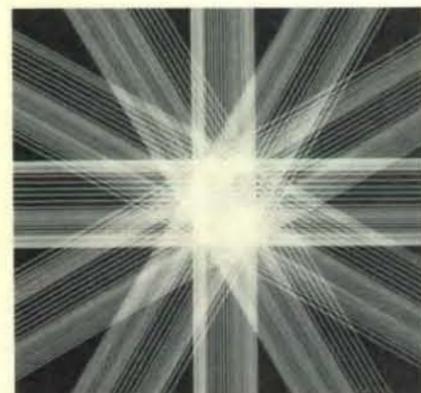
Nel corso di una data iterazione si possono anche incontrare valori negativi per i pixel. Dato che è fisicamente impossibile che una densità ai raggi X sia inferiore a zero, possiamo restringere i valori delle densità disponibili per l'elaborazione con l'algoritmo ART, facendo uguali a zero tutti i valori negativi. I problemi si verificano quando vengono introdotte tali limitazioni: in effetti, un'immagine ricostruita con un ART ristretto o compresso, non è equivalente alla sovrapposizione delle



Le immagini complesse possono essere ricostruite mediante l'equivalente fotografico del procedimento per sommatoria, proposto da B.K. Vainshtein dell'Istituto di cristallografia di Mosca. La proiezione dell'immagine avviene facendo passare una pellicola fotografica sull'immagine mentre la pellicola viene e-

sposta alla luce. Il risultato è un'immagine « striata », ossia una serie di linee parallele con densità pari alla densità totale dell'immagine originale lungo ciascuna linea. Si esegue una serie di tali proiezioni sotto vari angoli, e la ricostruzione viene ottenuta sovrapponendo fotograficamente le immagini striate.

funzioni di diffusione (o stelle) dei singoli punti dell'oggetto originale. Per questo in eleganza matematica anche se guadagniamo in precisione: un ART ristretto dà luogo a ricostruzioni più precise che non la sua versione non ristretta. Nell'elaborazione possono essere introdotte molte altre re-



Una successione di linee parallele può simulare un'immagine striata. La spaziatura fra le linee è minore in corrispondenza delle densità più elevate e maggiore per quelle meno elevate. Queste serie di linee generate dal calcolatore forniscono una ricostruzione mazzata della lettera G.

strizioni fisiche. Per esempio, possiamo conoscere in anticipo il campo entro cui varia la densità ai raggi X di uno specifico tessuto, quale un osso, anche se non ne conosciamo la posizione precisa. In questo caso possiamo alterare il programma ART per adeguarlo all'esigenza specifica: una volta individuate le ossa, possiamo limitare le densità dei loro pixel in modo da farle rientrare nel campo di densità possibili e procedere così a un'elaborazione più accurata della distribuzione delle densità ai raggi X nei tessuti molli.

Non è possibile misurare esattamente le somme dei raggi qualunque sia lo strumento disponibile nella pratica. Ci sono sempre errori sperimentali e variazioni nella misura di intensità dei raggi X, errori e variazioni che si ritrovano nei dati sotto forma di rumore. Un modo per superare la difficoltà è di non insistere nella ricerca della perfetta corrispondenza di ciascuna somma di raggi, ma nel far sì che la corrispondenza venga soddisfatta con una certa tolleranza. A questo scopo, è stata progettata una particolare versione della tecnica di ricostruzione algebrica, l'ART 3.

Oltre alla ricostruzione algebrica, ci

sono molti altri metodi di ricostruzione di immagini partendo dalle loro proiezioni. Uno di essi, noto come il metodo della convoluzione, può essere ricavato dalla formula originale di Radon. Si tratta essenzialmente di una versione modificata del metodo per sommatoria, che si presta a un'elaborazione rapida. Le ricostruzioni possono anche essere elaborate otticamente su un tubo a raggi catodici appositamente studiato, eliminando così la necessità del calcolatore digitale. Un altro metodo di ricostruzione è quello di Fourier, che comporta una trasformazione dei dati ricavati dalle proiezioni in quello che è noto come lo spazio di Fourier. I punti nello spazio di Fourier per i quali non esistono dati vengono stimati per interpolazione. La ricostruzione dallo spazio di Fourier avviene con la trasformazione inversa di Fourier. Né il metodo della convoluzione né quello di Fourier consentono facilmente l'introduzione di limitazioni.

Dalla matematica alla medicina

Come è possibile trasformare questi metodi matematici in strumenti per la diagnosi medica? Occorre innanzitutto

uno strumento per raccogliere i dati delle proiezioni a raggi X. In teoria tali dati potrebbero essere ricavati da una serie di normali radiografie. La verifica del perfetto allineamento delle immagini e il trasferimento dei dati dalle pellicole al calcolatore rappresenta però l'impresa maggiore. Per questo motivo sono stati studiati degli strumenti particolari con calcolatori incorporati.

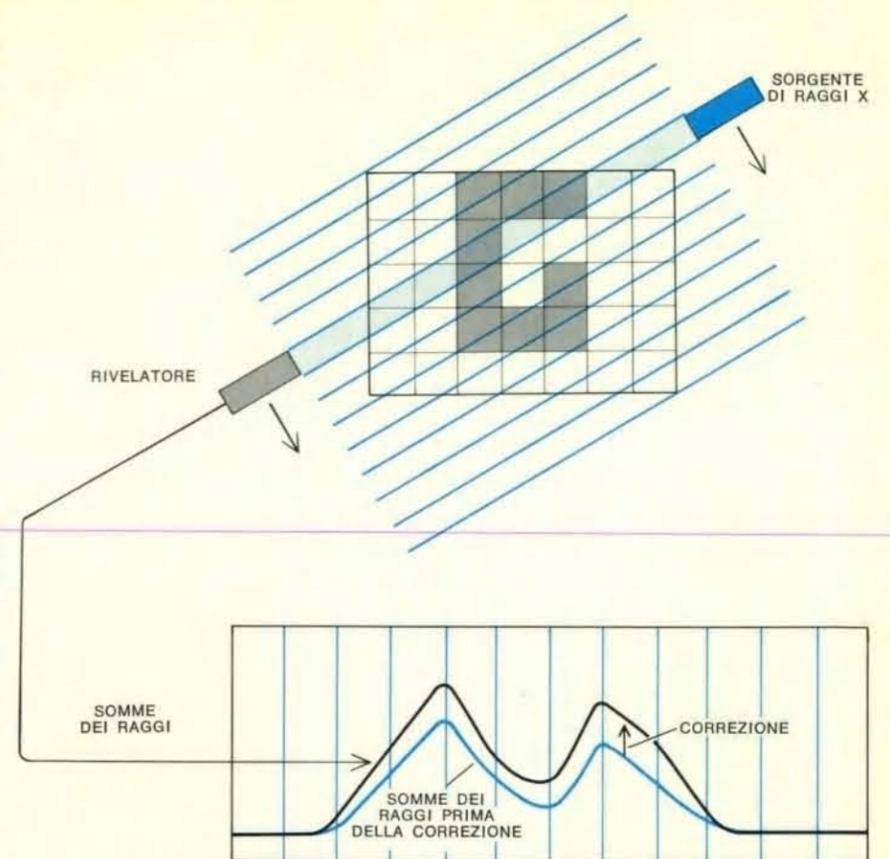
La maggior parte di questi strumenti ricostruisce i piani delle sezioni trasversali del paziente dirigendo su di esso fasci di raggi X collimati.

Il modo più semplice per ottenere dei raggi X collimati consiste nel disporre un collimatore di piombo di fronte alla sorgente dei raggi. Il rivelatore a raggi X si trova dal lato opposto del paziente rispetto alla sorgente e al collimatore. La sorgente, il collimatore e il collettore effettuano quindi la scansione o esplorazione del paziente, in direzione perpendicolare al fascio di raggi X.

Il primo strumento disponibile su scala commerciale per le ricostruzioni di piani di sezioni trasversali del corpo umano è stato l'analizzatore EMI, messo a punto presso i laboratori centrali di ricerca della EMI Ltd. in Inghilterra. L'apparecchio, in gran parte opera di G.N. Hounsfield, è stato in genere ben accolto e viene adottato dagli ospedali di tutto il mondo. Il primo analizzatore EMI venduto negli Stati Uniti è entrato in servizio nel giugno 1973 presso la Clinica Mayo.

Lo strumento è particolarmente studiato per l'analisi e l'esplorazione del cervello. La testa del paziente viene introdotta in una coppa elastica emisferica. Il bordo della coppa è collegato a un lato di una scatola di plastica a tenuta d'acqua. La scatola viene riempita d'acqua, che serve a limitare la differenza fra i segnali a raggi X massimi e minimi ricevuti dal rivelatore. Il rivelatore è un cristallo di ioduro di sodio che emette fotoni di luce visibile quando viene colpito dai fotoni dei raggi X. La quantità della luce emessa dal cristallo viene misurata da un fotomoltiplicatore, collegato a un piccolo calcolatore veloce.

Una proiezione viene registrata campionando l'output del rivelatore in corrispondenza di 160 posizioni ugualmente intervallate lungo una singola direzione di scansione. Le 160 somme di raggi della proiezione vengono immagazzinate in una memoria a dischi magnetici a opera del calcolatore. L'intero apparecchio viene quindi fatto ruotare di un grado attorno alla testa del paziente per ottenere la successiva proie-



La tecnica di ricostruzione algebrica (ART) è stata escogitata per superare l'imprecisione del metodo per sommatoria. ART viene eseguita su un calcolatore digitale, in cui un'immagine viene memorizzata sotto forma di una sequenza bidimensionale di numeri, in cui ciascun numero rappresenta la densità ai raggi X di un pixel, o piccolo elemento dell'immagine (quadrati). Una proiezione unidimensionale dell'immagine viene memorizzata sotto forma di un elenco di numeri, ognuno dei quali rappresenta la somma dei raggi, o densità totale ai raggi X lungo un raggio: una sottile striscia dell'immagine vista sotto un certo angolo (striscia colorata). ART è un metodo iterativo che assegna una serie iniziale di densità ai raggi X all'immagine bidimensionale da ricostruire, calcola la somma dei raggi di ciascun punto lungo una proiezione unidimensionale della immagine, la confronta con la somma dei raggi dell'oggetto reale memorizzata nel calcolatore, calcola la differenza e la divide fra i pixel intersecati dal raggio. L'operazione viene ripetuta fino alla completa ricostruzione dell'immagine.

zione. In 5 minuti vengono raccolti i dati relativi a 180 proiezioni, una per ciascun grado di rotazione a semicerchio intorno alla testa.

Una volta completate tutte le proiezioni, le risultanti 28 800 somme (160 volte 180) vengono elaborate dal calcolatore per formare la ricostruzione di una sezione trasversale della testa del paziente.

L'analizzatore EMI originale usa l'algoritmo ART non ristretto. Il calcolatore richiede 5 minuti e mezzo per elaborare la ricostruzione, che viene quindi inviata a un tubo a raggi catodici sotto forma di un'immagine composta da una serie di 80 pixel per lato.

Il modello più recente dà un'immagine di 160 pixel per lato ed evidentemente utilizza l'algoritmo di convoluzione di cui sfrutta la maggior velocità di elaborazione.

Molte altre aziende e gruppi di ricerca universitari stanno costruendo analizzatori, sia a scopo sperimentale sia per la vendita. La competitività di prezzo e di prestazioni saranno molto importanti per il consumatore di servizi medici. I prezzi degli analizzatori variano attualmente negli Stati Uniti tra i 200 000 e i 700 000 dollari per apparecchio e il costo di ciascuna analisi è, per il paziente, di circa 200 dollari.

Gli analizzatori più recenti comprendono uno strumento per la diagnosi della mammella e altri dispositivi in grado di ricostruire qualsiasi sezione trasversale del corpo.

Attualmente si tende ad aumentare la velocità dell'analisi e a ridurre il numero degli organi mobili (mediante l'impiego di più rivelatori e di un fascio di raggi X a ventaglio).



L'analizzatore EMI, messo a punto dai Central Research Laboratories della EMI, in Inghilterra, è stato il primo apparecchio messo in commercio per la ricostruzione di sezioni trasversali della testa. L'apparecchiatura che circonda la testa del soggetto viene fatta ruotare per consentire l'esecuzione di una serie di proiezioni ai raggi X. La sorgente di raggi che esegue la scansione è contenuta nel grande cilindro a sinistra.

Cosa rivelano gli analizzatori

Il successo degli analizzatori e dei principi matematici sui quali sono basati si spiega confrontando una sezione trasversale di un normale cervello umano con la corrispondente sezione trasversale ricostruita da proiezioni di raggi X (si veda l'illustrazione a pagina 81). La capacità della tecnica ricostruttiva di individuare piccole differenze di densità ai raggi X può rivelare anomalie troppo esigue per poter essere percepite mediante un'unica esposizione ai raggi X. In precedenza era necessario iniettare un liquido opaco ai raggi X nel circolo sanguigno o una bolla d'aria nelle cavità ventricolari del cervello per poter ottenere un contrasto sufficientemente elevato fra due zone determinate, con procedure difficili, laboriose e spesso dolorose per il paziente. Adesso, invece, le ricostruzioni possono facilmente rilevare la differenza fra sangue normale, sangue coagulato, tessuto cerebrale, pannicolo adiposo e liquido cerebro-spinale. L'impiego congiunto di liquidi di contrasto e dei metodi di ricostruzione si è dimostrato un utile strumento diagnostico in molti casi particolari.

La non dannosità della tecnica ricostruttiva, ciò che le sue immagini possono rivelare e l'assenza di qualsiasi effetto collaterale negativo collegato al suo impiego, ne rendono possibile l'applicazione all'analisi o all'esame dei pazienti allo scopo di individuare tumori o altre disfunzioni in uno stadio di sviluppo molto più precoce di quanto non sarebbe possibile con i metodi diagnostici convenzionali. La tecnica di ricostruzione fornisce inoltre un mezzo più preciso per la valutazione delle condizioni del paziente durante e dopo la cura. La dose totale di raggi X è pari o inferiore a quella che viene applicata nella radiografia convenzionale ed è possibile, con l'impiego di adatti algoritmi per ridurre il numero delle proiezioni, arrivare a un'ulteriore diminuzione.

Con gli analizzatori attualmente a disposizione è necessario che le parti del corpo sotto esame vengano tenute perfettamente immobili. Non si può, tuttavia, arrestare il battito cardiaco o costringere il paziente a trattenere il respiro per 5 minuti. In casi particolari, esiste un approccio alternativo per eseguire riprese di strutture che presentano un movimento periodico. Si tratta di un approccio sperimentale su animali compiuto presso la Clinica Mayo, apportando solo piccole modifiche alle apparecchiature cliniche già esistenti.

Ci sono due differenze fondamentali nella disposizione geometrica delle apparecchiature usate in questi esperimenti rispetto al normale analizzatore. La prima consiste nel fatto che i raggi possono divergere in fasci conici da un certo numero di sorgenti fisse e possono attraversare l'intera massa del tessuto da analizzare anziché essere limitati a un piano per mezzo di una sorgente mobile e di un collimatore. La seconda è che la proiezione del tessuto non viene registrata sotto forma di una sequenza unidimensionale di densità ai raggi X, bensì sotto forma di una vera immagine bidimensionale, grazie all'impiego di un apposito schermo di rinforzo accoppiato a una telecamera.

Sezioni trasversali di cuore pulsante

La prima delle ricostruzioni sperimentali presso la Clinica Mayo è stata eseguita su un cuore isolato e perfettamente conservato, in modo da poter confrontare la sezione trasversale ricostruita con la sezione trasversale effettiva. Il cuore è stato appeso a un motore e fatto ruotare entro un fascio conico di raggi X (si veda la figura in alto a pagina 82). Dopo i primi esperimenti incoraggianti, il gruppo di ricerca della Clinica Mayo ha messo a punto un esperimento per eseguire l'intera ricostruzione tridimensionale di un cuore isolato e pulsante. Vengono asportate le pareti del ventricolo destro di un cuore di cane, lasciando solo il ventricolo sinistro, che ha una maggiore struttura muscolare. Un sacchetto di plastica contiene il cuore e i tubi per alimentare le arterie coronarie con sangue ossigenato. L'intero sistema viene fatto ruotare allo stesso modo del cuore conservato. Il sangue pompato dal ventricolo viene miscelato con un liquido di contrasto per aumentarne la densità ai raggi X e viene fatto circolare indipendentemente dal sangue che alimenta le arterie coronarie. Flusso e ritmo sono controllati per mezzo di elettrodi opportunamente disposti.

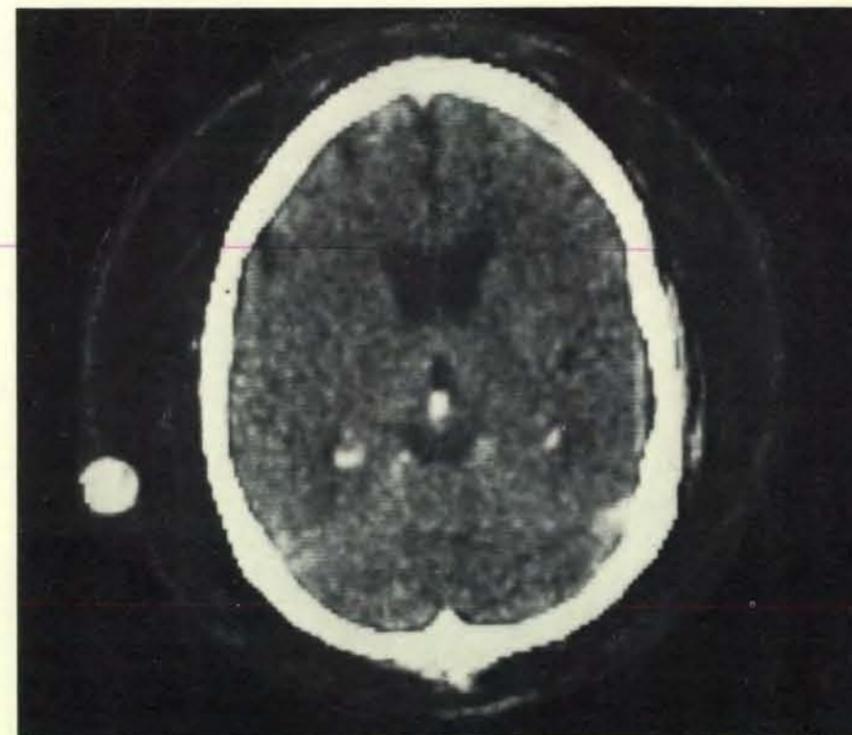
L'esperimento è condotto completamente sotto la guida di un calcolatore, che controlla il battito del cuore, innesca gli impulsi di raggi X provenienti dalla sorgente nei tempi appropriati durante ciascuna pulsazione, raccoglie e memorizza i dati prelevati dal rivelatore dei raggi X e fa ruotare opportunamente il cuore, predisponendolo per le successive proiezioni. In circa due minuti è possibile ottenere una serie di 30-50 proiezioni su un arco di 180 gradi.

Lo stesso calcolatore ricostruisce poi le sezioni trasversali del cuore. Ciascuna sezione richiede due minuti di

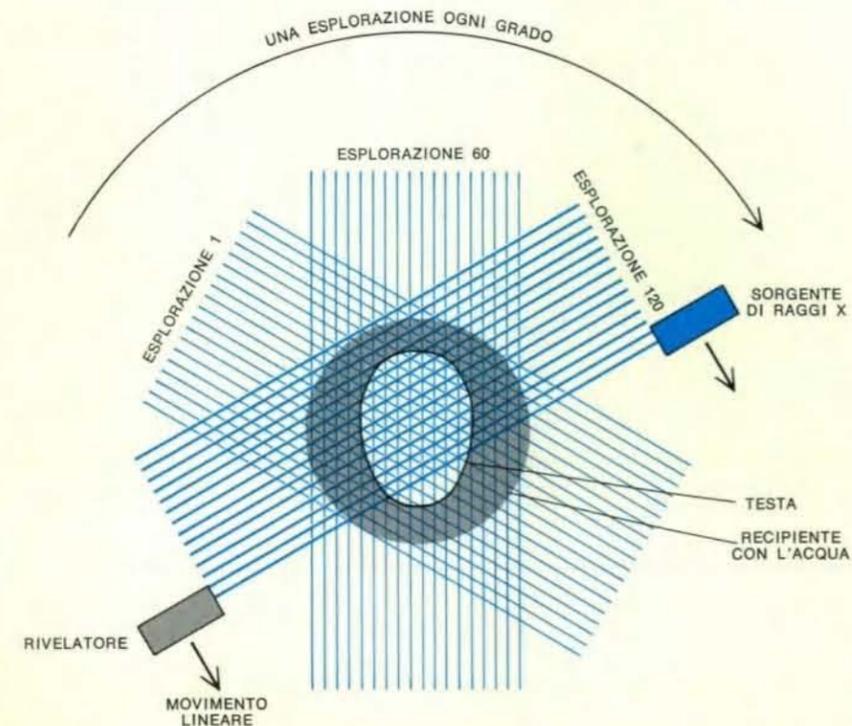
tempo di elaborazione, e viene proiettata sullo schermo di un tubo a raggi catodici sotto forma di immagine quadrata avente il lato di 64 pixel. Il risultato di questa sperimentazione rende ora possibile osservare qualsiasi sezione trasversale di cuore mentre cambia forma durante il battito, oppure esami-

nare tutte le sezioni contemporaneamente come esse appaiono in un dato istante.

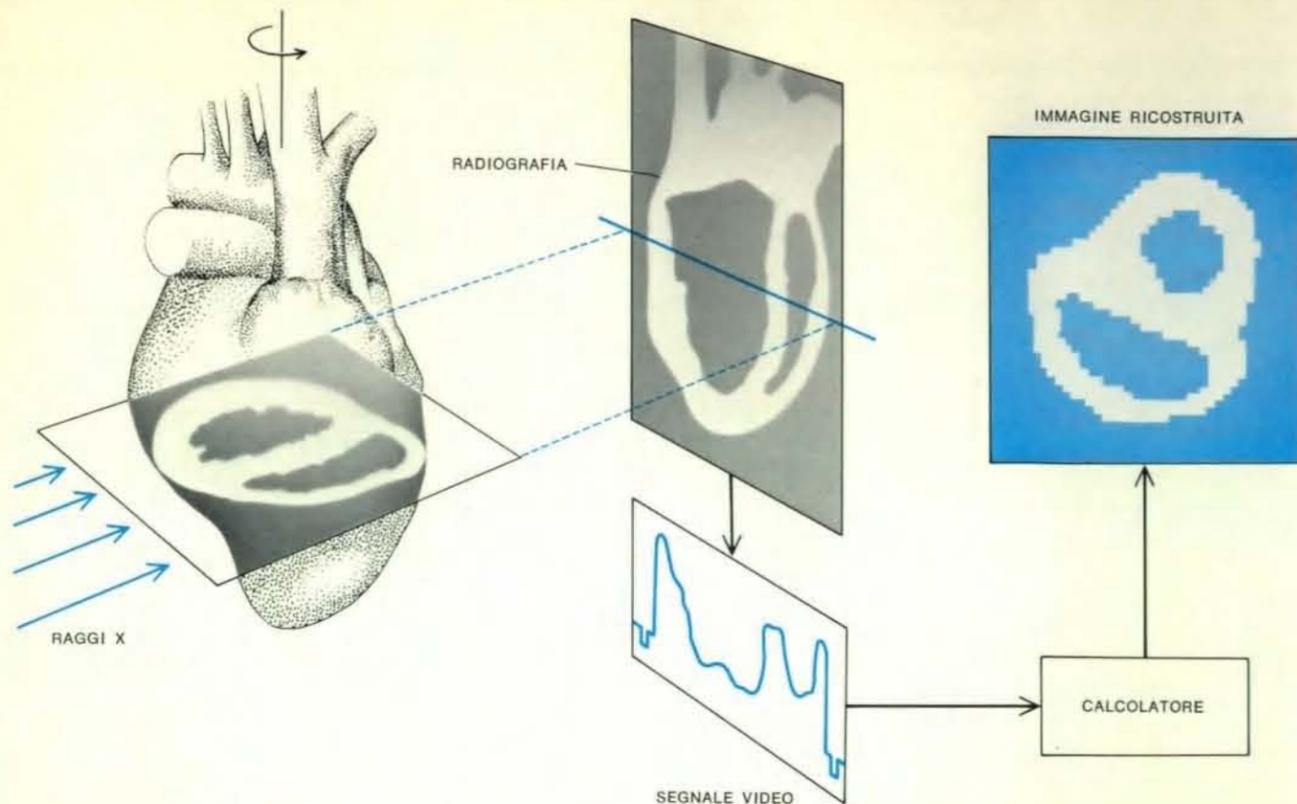
Con questa preparazione si possono misurare la forma tridimensionale e le dimensioni del cuore in funzione del tempo ed è possibile iniziare lo studio delle proprietà dinamiche del cuore sia



Il confronto di due sezioni trasversali illustra il funzionamento dell'analizzatore: una è l'immagine di un cervello ottenuta con l'analizzatore EMI (in alto) e l'altra è la fotografia di una sezione di un cervello ricavata da un cadavere (in basso). È facile confrontare i particolari dei due cervelli. La mechia a sinistra dell'immagine ricostruita corrisponde a un bastoncino di plastica usato per calibrare la densità dei raggi X nell'immagine. L'immagine ricostruita dall'analizzatore si compone di 11.200 elementi ed è stata realizzata nel corso di uno studio eseguito da D.F. Reese della Clinica Mayo.

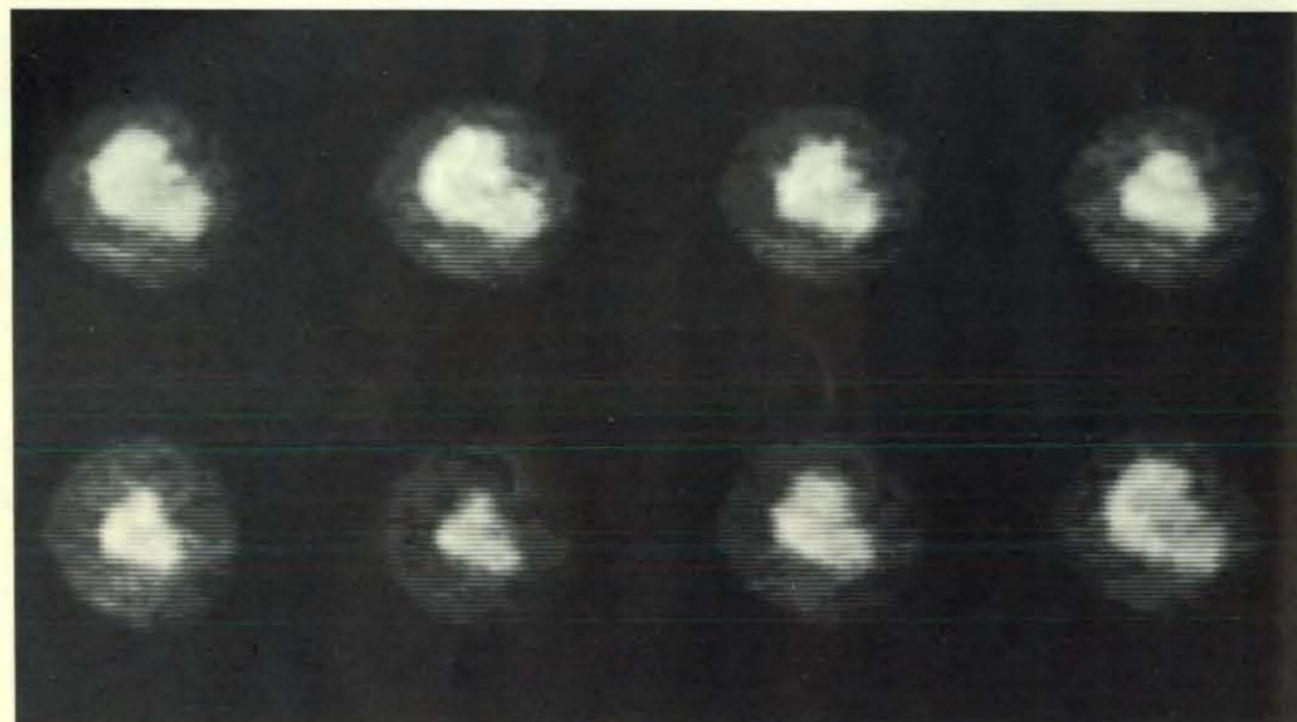


L'analizzatore esegue 160 campionature lungo ogni proiezione. In 5 minuti e mezzo vengono eseguite 180 proiezioni a intervalli di 1 grado intorno alla testa del paziente.



Cuore di cane ricostruito piano per piano secondo il programma ART 3 facendolo ruotare intorno a un asse e illuminandolo con un fascio conico di raggi X divergenti. L'immagine ricostruita a destra, corrisponde alla sezione indicata dalla linea co-

lorata che attraversa la radiografia al centro. La stessa tecnica è stata sostanzialmente adottata per eseguire le ricostruzioni del ventricolo sinistro isolato, ma pulsante, del cuore di un cane (si veda la figura in basso). La ricostruzione è di E.H. Wood.



Il ventricolo sinistro, isolato ma pulsante, è rappresentato in sezioni trasversali a intervalli di 1/15 di secondo nel corso di un singolo ciclo cardiaco. Tutte le sezioni trasversali rappresentano la stessa sezione anatomica, a metà strada tra la base

e l'apice del ventricolo. Le immagini mostrano la contrazione della camera ventricolare sinistra (zona centrale chiara), seguita dalla successiva dilatazione. Le ricostruzioni sono state eseguite da R.A. Robb e da E.L. Ritman della Clinica Mayo.

in condizioni normali sia in condizioni di infermità. Yen-Ching Pao, dell'Università del Nebraska, ha applicato a questi dati un metodo di calcolo preso a prestito dall'ingegneria e noto come «analisi degli elementi finiti» per analizzare la distribuzione delle sollecitazioni e delle deformazioni all'interno delle pareti del cuore. Gli esperimenti eseguiti dal gruppo della Clinica Mayo hanno compiuto ulteriori passi avanti nella ricostruzione di un cuore funzionante e dei polmoni all'interno di un animale intatto vivente. Non è possibile, naturalmente, disporre degli elettrodi nel cuore di un paziente senza correre qualche rischio. Inoltre, il battito spontaneo del cuore non sempre è regolare, particolarmente nei soggetti cardiopatici. È perciò necessario che studi del genere sul cuore e le relative procedure diagnostiche sui soggetti umani attendano la messa a punto di apparecchiature di ricostruzione che siano in grado di registrare i dati delle proiezioni, con riprese eseguite a 1/100 di secondo, al ritmo di 60 ricostruzioni al secondo. Un dispositivo del genere potrebbe essere realizzato utilizzando un gran numero di sorgenti di raggi X e di rivelatori disposti ad arco attorno al paziente e funzionanti in rapida successione. Lo strumento sarebbe indubbiamente molto costoso, dato che ciascuna sorgente di raggi X e il relativo rivelatore costano decine di migliaia di dollari. Solo in questo modo, tuttavia, potrebbe essere ricostruita la circolazione coronarica.

Prospettive

Quantunque la ricostruzione da proiezioni sia in grado di rivelare a tre dimensioni le strutture interne del corpo, essa non è però in grado, almeno per ora, di dare le rappresentazioni molto dettagliate che i medici sono abituati a osservare nelle radiografie di tipo convenzionale.

Questa carenza trae origini da due motivi. Il primo è che per una data dose di raggi X ci sono solo tante informazioni quante se ne possono trarre sotto forma di ricostruzione. Il secondo è che quando il volume all'interno del corpo del paziente viene diviso in pixel sempre più piccoli, il tempo di elaborazione aumenta rapidamente fino a diventare costoso in misura proibitiva. Due sono i fattori che potrebbero ridurre in futuro questi problemi. Innanzitutto gli algoritmi rappresentano un campo di ricerca molto attivo, ragione per cui sarà possibile escogitarne di migliori che rendano possibile estrarre un maggior numero di informazioni strutturali da una data dose di rag-

gi X. Secondariamente, l'eccessivo tempo di elaborazione potrà essere ridotto dai progressi della tecnologia dei calcolatori, ossia da calcolatori per scopi speciali, da calcolatori che sfruttino la luce anziché gli elettroni per trattare le informazioni e da calcolatori «paralleli» (organizzati per eseguire simultaneamente parecchie elaborazioni).

Nuove tecniche applicate ai dispositivi di visualizzazione potranno facilitare la presentazione di notevoli quantità di informazioni tridimensionali. Sarà inoltre possibile ottenere immagini della distribuzione tridimensionale dei singoli elementi chimici registrando l'energia dei fotoni dei raggi X prima e dopo la trasmissione attraverso il corpo del paziente.

I raggi X non sono i soli mezzi che consentono di eseguire proiezioni di strutture all'interno del corpo. Ultrasuoni, raggi gamma emessi da isotopi radioattivi, sia all'interno che all'esterno del corpo, particelle veloci subatomiche generate da acceleratori e anche campi magnetici, rappresentano altrettanti mezzi in grado di fornire un proprio tipo di proiezioni delle strutture interne del corpo. Alcune di queste tecniche sono in grado di discriminare le varie strutture con una sensibilità maggiore di quella dei raggi X. Per esempio, con i campi magnetici sarebbe possibile ricostruire le immagini eliminando tutto salvo il sangue che scorre attraverso il corpo. I metodi matematici sono sostanzialmente identici a quelli descritti per i raggi X.

Esistono altri approcci fisici non basati sulla ricostruzione da proiezioni, che consentono di ottenere informazioni tridimensionali sulle strutture all'interno del corpo. Fra questi citiamo l'olografia acustica e le tecniche basate sulla trasmissione o riflessione di onde ultrasoniche. Ciascuno di questi metodi, compresa la ricostruzione da proiezioni, dà luogo a una mappa delle variazioni di qualche combinazione delle proprietà fisiche dei tessuti all'interno del corpo. Dato che queste proprietà sono a loro volta funzioni dell'anatomia e della fisiologia del corpo, i diversi tipi di immagini ricavate dalle rispettive misurazioni, forniscono informazioni per diversi generi di programmi diagnostici. Man mano che aumenta il numero delle proprietà fisiche misurate, la caratterizzazione diagnostica diventa più specifica, ma tale specificità è accompagnata da complessità e costi crescenti. Sarà perciò necessario valutare accuratamente ciascuna tecnica di formazione dell'immagine (o delle combinazioni di tali tecniche per la formazione dell'immagine) in relazione ai vari scopi diagnostici.

UN VOLUME DI LETTURE DA «LE SCIENZE»

LE SCIENZE
PROBLEMI DI SOCIOLOGIA E DI DEMOGRAFIA
a cura di G. Prandini



Presentazione

I. LO SVILUPPO DEMOGRAFICO E LE SUE CONSEGUENZE

Il controllo dell'incremento demografico dal 1750 al 1850

di W. L. Langer

Verso una stasi demografica mondiale

di T. Frejka

Tendenze demografiche in un villaggio indiano

di C. E. Taylor

La povertà nel mondo

di D. Simpson

Che cosa possiedono i poveri

di O. Lewis

La produzione di alimenti

di L. R. Brown

Un piano mondiale per l'agricoltura

di A. H. Boerma

Gli aspetti politici degli aiuti economici

di G. Myrdal

II. I PROBLEMI DELLE MINORANZE

Esperimenti sulla discriminazione tra gruppi

di H. Tajfel

Il potere sociale dei negri negli Stati Uniti d'America

di J. P. Comer

La rivolta nei ghetti negri

di N. S. Caplan e J. M. Paige

La cultura analfabeta

di G. Harrison e M. Callari Galli

Psichiatria e legislazione nel disadattamento minorile

di G. Leo e B. Iaccarino

La percezione dell'autorità nella preadolescenza

di M. Cesa-Bianchi

III. I PROBLEMI ASSISTENZIALI

L'erogazione dell'assistenza medica

di S. R. Garfield

Problemi dell'assistenza sanitaria in Italia

di G. Berlinguer

I servizi medici in Cina

di V. W. Sidel e R. Sidel

Medicina preventiva ed ergonomia

di A. Grieco, L. Bandini Buti, G. Cortili e C. P. Odescalchi

Prezzo di copertina: L. 3.750

(offerta agli abbonati: L. 3.400)