

4. VON HALLER A., *Bibliotheca Anatomica*. Tomo I, Zurigo, 1774.
5. SINGER CH., *A short history of anatomy and physiology from the Greeks to Harvey*. New-York, 1957.
6. KOELBING H., *Anatomia dell'occhio e percezione visiva nell'opera di G. Fabrici d'Acquapendente*. Acta Med. Hist. Pat. 1988-1989, 1989-1990; 35-36: 29-38.
7. BONUZZI L., *L'immagine del corpo nella medicina padovana e Fabrizio d'Acquapendente*. Acta Med. Hist. Pat. 1987-1988; 34: 9-16.
8. PREMUDA L., *Storia dell'iconografia anatomica*. Milano, 1993 e STERZI G., *Le Tabulae Anatomicae ed i Codici marciiani con note autografe di Hieronymus Fabricius ab Aquapendente*. Anatomischer Anzeiger 1910; 35: 338-348.
9. PREMUDA L., *Storia della fisiologia*. Udine, 1966.
10. PREMUDA L., *Padova nella medicina europea tra Rinascimento e Barocco*. In: SEMENZATO C., (a cura di), *Il teatro anatomico - storia e restauri*. Padova, 1994, p. 9-34.
11. FABRICI AB AQUAPENDENTE H., *Pentatheucos chirurgicum*. Francoforte, 1592.
12. CORRADI A., *Della chirurgia in Italia dagli ultimi anni del secolo scorso fino al presente*. Commentario. Bologna, 1871.
13. WUNDERLICH A., *Geschichte der Medizin*. Stuttgart, 1859.
14. SUDHOFF K., *Geschichte der Medizin*. Berlin, 1922.
15. PAGEL J., *Geschichte der Medizin*. Berlin, 1898.
16. PORTAL A., *Histoire de l'anatomie et de la chirurgie*, 4. Paris, 1772.
17. AA. VV., *Scritti e discorsi nel IV centenario della nascita di Galileo Galilei*. Padova, 1966; BANFI A., *Vita di Galileo Galilei*. Milano, 1962.
18. FAVARO A., *Galileo Galilei a Padova, ricerche e scoperte, insegnamento scolastico*. Padova, 1968. ID., *Galileo Galilei e lo Studio di Padova*, II. Padova, 1966.
19. DE RENZI S., *Storia della Medicina in Italia*. Tomo terzo. Napoli, 1845.
20. PREMUDA L., *Gerolamo Fabrici d'Acquapendente nella storiografia medico-scientifica*. Acta Med. Hist. Pat. 1987-1988; 34:101-117.

Correspondence should be addressed to:
Loris Premuda, Viale XX Settembre, 1 - 34125 Trieste, I.

Articoli/Articles

DAL TAVOLO ANATOMICO ALL'ANATOMIA PER IMMAGINI

VIRGILIO MENEGHELLI, CARLO MACCHI,
GIOVANNA LUPI, FRANCESCO PIERAZZOLI*

Istituto di Anatomia Umana Normale - Università di Padova

*Radiologia - Ospedale Militare di Padova, I

SUMMARY

FROM THE ANATOMICAL DESK TO VIRTUAL ANATOMY

Teaching of gross Anatomy, the oldest between medical sciences, today suffers the lack of cadavers for notomization, therefore this subject is more theoretical than practical in medical school. The computer techniques could be very useful in this field.

Is it possible nowadays to get a software of Virtual Anatomy? The answer is yes

We present in this work a review of the state-of-art of these techniques mainly based on data acquired by computer tomography (CT) or magnetic resonance imaging (MRI) from human.

Serial slices obtained from imaging (CT or MRI) can be reconstructed using computers in order to generate a realistic view of the surface of an anatomical object.

Le giornate celebrative dedicate alle istituzioni scientifiche in Padova nel XVI secolo, ci offrono una occasione di riflessione sullo stato attuale dell'insegnamento e della ricerca nel campo dell'Anatomia umana. È noto infatti che, a partire dagli anni '50, didattica e ricerca anatomica si separano culturalmente¹: da un lato nuovi, emergenti indirizzi di ricerca nell'ambito della biofisica, della biochimica, dell'immunologia e della microscopia elettronica portano le conoscenze morfologiche a livello delle macro-molecole, dall'altro si è continuato ad insegnare una anatomia macroscopica classica basata essenzialmente sui dati,

ormai completi e sempre verificabili, desunti dal cadavere. Negli ultimi decenni intanto la crescente difficoltà di disporre di un numero di salme adeguato alla entità della popolazione studentesca ha creato gravissime difficoltà di funzionamento delle sale settorie, rendendo l'insegnamento della disciplina sempre più teorico. Recentemente la Società italiana di Anatomia, sempre più preoccupata delle gravi penalizzazioni imposte alle discipline di base e soprattutto all'Anatomia umana, nell'ordinamento didattico del Corso di Laurea in Medicina e Chirurgia (Tabella XVIII), ha delineato tre indirizzi sui quali operare per uscire dalla crisi attuale e poter quindi riproporre la centralità dell'Anatomia Umana e soprattutto della Anatomia macroscopica nelle scuole di Medicina:

1) favorire sul terreno legislativo i progetti che possano consentire agli Istituti Anatomici di usufruire, come un tempo, di un grande numero di cadaveri per le esercitazioni di notomizzazione rivolte non solo agli Studenti di Medicina, ma anche alle esercitazioni dei Chirurghi.

2) favorire l'acquisizione da parte dei Docenti di nuovi valori culturali in vista di un nuovo obiettivo didattico: l'insegnamento dell'Anatomia del vivente come riferimento all'anatomia del cadavere, attraverso l'utilizzo di immagini integrate di Radiologia, di Tomografia assiale computerizzata (TAC), di Risonanza Magnetica (RM), di Ecografia, ecc.

3) utilizzare i sistemi informatici multimodali per creare una Anatomia digitalizzata, cioè una Anatomia virtuale che sfrutti tra l'altro l'interattività per coinvolgere gli Studenti onde favorire l'apprendimento e l'auto-esaminazione.

Il presente articolo riguarda soprattutto questo nuovo approccio basato sulla digitalizzazione delle immagini anatomiche e la loro successiva manipolazione con le tecniche informatiche multimodali.

Si può datare intorno agli anni 1988-1990 l'inizio di tali esperienze: il loro rapido evolversi è stato e sarà per il futuro, strettamente legato alla crescita della velocità di elaborazione dei computers disponibili dato che la digitalizzazione di immagini in media e alta risoluzione occupano parecchio spazio nelle memorie. È noto infatti² che nei microprocessori Intel la capacità

dei chip si è raddoppiata dal 1975 ad oggi ogni 18 mesi, avvicinandosi assai alla previsione che Moore fece nel 1975 di un raddoppio ogni due anni. Poiché secondo Bill Gates la cosiddetta legge di Moore resterà valida almeno per altri 20 anni, si prospettano le più rosee previsioni tecnologiche per lo sviluppo di una vera e propria Anatomia umana virtuale con il traguardo di poter disporre di un modello virtuale di cadavere da sottoporre a notomizzazione in via interattiva da parte degli Studenti.

È possibile predisporre oggi un software che realizzi tale scopo? La risposta è affermativa: ne è un esempio il progetto Voxel-Man (vedi più avanti), già in piccola parte realizzato: sezionare interattivamente con l'ausilio di un computer un modello perfetto di un encefalo umano può sembrare magia, ma come scrisse Arthur C. Clarke *any sufficiently advanced technology is indistinguishable from magic*.

Riteniamo utile a questo punto dare breve relazione delle principali realizzazioni di Anatomia digitalizzata.

1) A.D.A.M.

Il progetto A.D.A.M. (Animated Dissection of Anatomy for Medicine) è una realizzazione del 1990-91, multimodale ed interattiva dedicata all'insegnamento dell'Anatomia umana con estensione anche alla patologia ortopedica e ostetrico-ginecologica; è basata su disegni, anche tridimensionali, di buona esecuzione (assai simili a quelli, notissimi, di Netter, editi dalla CIBA) concernenti 18.000 strutture morfologiche del corpo umano, anche con annotazioni delle differenze morfologiche tra popolazioni bianca, nera, gialla e sud-americana. La realizzazione dotata di un buon software che consente animazioni, dissezioni (ovviamente rigidamente predisposte secondo gli strati-disegni e quindi senza alcuna discrezionalità nella scelta del piano di taglio), consente altresì una facile identificazione delle strutture; offre la possibilità di osservarle in visione d'insieme o isolate; consente ancora di aprire finestre per osservare strutture più profondamente situate, ecc.. La parte interattiva del programma permette l'auto-esaminazione per il discente.

A.D.A.M., pur assai diffuso nelle scuole di Medicina essendo tra i tre progetti quello di più vecchia realizzazione, sembra più

adatto all'insegnamento dell'Anatomia in scuole paramediche e/o di Diplomi Universitari (D.U.).

2) *The Visible Human Project* e lo stato attuale della sua realizzazione (*The Visible Man*).

Il progetto in questione prende l'avvio nel 1988 con un fondo federale di 1.400.000 Dollari U.S. presso la National Library of Medicine (NLM - Washington) espressione dei *National Institutes of Health*, sentito il parere favorevole di 150 esperti. Il progetto comprende tre sezioni: 1) *The Visible Man* relativo ad un soggetto di sesso maschile (la sola sezione attualmente completata) e le cui immagini sono disponibili su Internet - su Videodisc o su CD-ROM; 2) *The Visible Woman* (il cadavere ritenuto idoneo, già acquisito, è quello di una donna del Maryland deceduta a 59 anni per disturbi cardiaci); 3) *The Visible Embryo collection*, sezione relativa ad immagini tratte dall'esame di 600 embrioni umani.

L'unica sezione di questo programma attualmente completamente realizzata è la n.1) *The Visible Man*. Direttore del progetto è il Dr. Michael Ackermann; il soggetto scelto tra i 200 esaminati fu quello di un uomo giustiziato mediante una iniezione endovenosa letale, poco dopo la mezzanotte del 5 Agosto 1993; al momento dell'esecuzione le sue condizioni di salute apparivano (come in realtà fu constatato poi che erano) ottime. Per la storia il suo nome era Joseph Paul Jernigan, 39 anni di età. Egli era stato condannato a morte nel 1981 per l'uccisione durante una rapina di un uomo di 75 anni. Dopo aver proposto tutti gli appelli legali possibili contro la sentenza, chiese la grazia che non gli fu concessa; accettò di donare il suo corpo per il progetto in questione; avendo continuato a sperare sino all'ultimo nella commutazione della pena, mai tralasciò di frequentare la palestra del carcere.

Il corpo di J.P. Jernigan raggiunse la città di Denver entro 6 ore dalla morte e così i Ricercatori dell'Università del Colorado furono in grado di eseguire entro tempi assai ridotti le riprese radiografiche, di TAC e di RM. Successivamente il cadavere fu diviso in 4 parti e congelato: da esse furono ottenute 1871 sezioni trasversali dello spessore di 1 mm. ciascuna. Le immagini

da esse ricavate furono digitalizzate dando origine ad un gigantesco database di 15 Gb (per il progetto del corpo femminile, a causa del minore spessore delle singole sezioni - circa mm. 0.3 - si prevede addirittura un database intorno a 40 Gb). È come dire tante immagini quante potrebbero essere contenute in 8.333.333 pagine di stampa; comunque per restare nell'ambito dell'informatica, occorrono due settimane di tempo per visionare completamente l'intero database di *Visible Man* oppure bisognerebbe compattarlo in 25 CD-ROM! La qualità delle immagini è quasi sempre ottima (con qualche eccezione per talune acquisizioni di RM). Una scelta pari a 10.000 immagini (14 Gb) di sezioni assiali, coronali e sagittali, sono disponibili in Videodisc adatto a girare su W.S., oppure in 1 CD-ROM adatto ad hardware Window 3.1, NT (PC) e Macintosh. Il CD-ROM richiede per essere visionato un calcolatore con 16 Mb di RAM e 15 Mb di disco libero, un monitor a colori ed un lettore di CD ROM. Il software non fornisce ricostruzioni tridimensionali, essendo basato su una collezione di immagini di sezioni; pertanto l'utilizzatore non può che percorrerne le sequenze come se fossero le pagine di un atlante: non è possibile pertanto navigare attraverso le tavole, che è come dire che non si possono ottenere sezioni delle strutture rappresentate secondo piani decisi di volta in volta dall'utilizzatore. In ultima analisi tutto il progetto *Visible Human* non è che una immensa banca di dati morfologici a disposizione della Medicina per ulteriori elaborazioni.

3) *Il progetto Voxel Man*

Presso l'Institut für Mathematik und Datenverarbeitung der Medizin (IMDM) dell'Università di Amburgo, è in corso di attuazione la più avanzata e sofisticata applicazione dell'informatica alla Medicina. La filosofia che ha ispirato il gruppo dei Ricercatori tedeschi è quella di coniugare i concetti della grafica computerizzata con l'intelligenza artificiale. La grafica computerizzata consente la creazione di modelli tridimensionali ed interattivi aderenti alla realtà non solo dell'Anatomia umana, ma anche della Fisiologia e, volendo, di altre discipline collegate quali l'Embriologia, l'Anatomia comparata, ecc.. Inoltre in aggiunta e/o al luogo di descrizioni semantiche, lo stato dell'arte

degli strumenti informatici consente di costruire e quindi di visualizzare processi dinamici simulati. Il concetto base del progetto *Voxel Man* è quello di sviluppare un modello a due livelli: uno costituito da una rete semantica concernente la nomenclatura anatomica connessa con un secondo livello frutto di una segmentazione interattiva eseguita a carico di acquisizioni volumetriche RM e TAC su soggetti viventi. I collegamenti tra i due livelli sono strutturati in modo che ad ogni struttura anatomica mostrata sia possibile, quando lo si desidera, veder assegnato il nome, i suoi rapporti anatomici con strutture vicine, la funzione, l'irrorazione arteriosa e quant'altro si volesse predisporre di aggiungere nelle conoscenze di base del sistema (ad esempio, molto opportuni potrebbero essere per le strutture nervose i dati filo- ed ontogenetici, non disponibili attualmente nel progetto *Voxel Man*).

La costruzione della rete semantica (1° livello) è un momento di grande importanza: ci si affida alle cognizioni di Anatomia topografica o regionale per suddividere la parte anatomica oggetto di interesse (R.O.I., Region Of Interest). Ogni regione identificata contiene numerosi *oggetti anatomici* che nel modello volumetrico acquisito tramite RM e TAC (2° livello) sono stati riconosciuti ed isolati (processo di segmentazione). I legami tra la stessa struttura anatomica del modello semantico (1° livello) e quella del modello 3D derivato da RM e da TAC (2° livello), sono strutturati per mezzo di connessioni logiche: ogni *oggetto anatomico* è etichettato secondo la nomenclatura anatomica (anche in più lingue), ma con esclusione dei sinonimi e dei patronimici. Ogni *oggetto anatomico* potrà dunque esibire (ma anche non esibire) il suo nome, che potrà essere collegato su richiesta alle regioni e/o alle funzioni cui appartiene o/e si riferisce per mezzo dei collegamenti *è parte di ...* (es. una circonvoluzione appartiene ad un lobo, il quale fa parte di un emisfero, il quale a sua volta appartiene all'encefalo); ancora è possibile conoscere dal programma, attraverso il collegamento è irrorato da, quale arteria fornisce all'*oggetto* di interesse il sangue arterioso. La funzione dell'*oggetto* può a richiesta essere espressa attraverso altri collegamenti logici, del tipo *fa parte di...*, cioè di un sistema funzionale (il nervo ottico, per esempio, è parte del-

l'apparato visivo) e *proietta a...* o *riceve da...*, essendo notoriamente i collegamenti di per se stessi una informazione funzionale per una struttura nervosa. In termini informatici i *Voxels* (elementi del volume totale preso in considerazione pari a 1 mm³) che costituiscono una determinata acquisizione volumetrica, sono caratterizzati per prima cosa dal livello di densità che li contraddistingue e nello stesso tempo posseggono caratteristiche (detti attributi) relativi alla loro morfologia, funzione, irrorazione, ecc.. È chiaro che uno stesso, determinato Voxel potrà appartenere a diverse collezioni di Voxels (Voxels-sets) pertinenti ai vari campi (domains) presi in considerazione dal programma: morfologia, funzione, vascolarizzazione arteriosa.

K.H. Hohne et al.³ propongono la definizione *volume intelligente* per esprimere sinteticamente la filosofia del loro approccio.

Il software da loro presentato consente all'utilizzatore le seguenti possibilità:

1) scelta praticamente illimitata delle osservazioni ottenibili dal modello 3D, con la possibilità anche di straordinarie visioni endoscopiche ricostruite. Nel video-tape dimostrato durante i lavori, fu mostrato un viaggio animato dentro alla trachea e poi in uno dei bronchi principali e via via sino ai bronchi lobari ed un altro ancora nel rinofaringe, in una delle due narici e nei seni paranasali. È possibile altresì rendere trasparenti alcuni parti per poter osservarne altre che le prime nasconderebbero.

2) si possono ottenere simulazioni di immagini radiologiche senza alcuna restrizione per la proiezione desiderata e per l'orientamento della sezione TAC gradita.

3) accesso immediato espresso in più lingue alle indicazioni (nomenclatura anatomica), alla sistematica anatomica, alle descrizioni predisposte (ipertesti), ai dati dell'istologia, con il solo comando (click) del mouse puntato in qualunque ambito della veduta.

4) ampia possibilità di esportare immagini generate dall'utilizzatore per l'insegnamento e l'apprendimento nel campo della Medicina.

5) stupefacenti simulazioni di dissezioni anatomiche interattive, di prelievi bioptici (stereotassi) e di interventi chirurgici secondo piani e vie di accesso a discrezione dell'utilizzatore.

6) ampie possibilità di osservare i modelli 3D secondo tutte le posizioni ed inclinazioni sino a veder ruotare il modello a 360° per tutto il tempo che si desidera (dimostrazione nel videotape proiettato).

Voxel Man segna l'inizio in Medicina della realtà virtuale: il modello 3D del capo di un soggetto, copia perfetta della testa dell'individuo vivente sottoposto a RM e a TAC realizzato da Hohne e coll.⁴, può essere manipolato un numero infinito di volte per studiare la neuroanatomia e/o per programmare sedute di stereotassi o interventi di neurochirurgia. Ad un certo punto delle nostre manipolazioni abbiamo commesso un errore? Niente è compromesso, si può ricominciare daccapo, senza tema di aver deteriorato il modello! Decidiamo di operare una dissezione secondo un determinato piano? ebbene sulle superfici così ottenute si potranno osservare tutte le strutture interessate dal taglio, con o senza le relative indicazioni semantiche!

L'attività del gruppo per la realizzazione dell'Anatomia Virtuale in Padova.

A partire dal 28 giugno 1994 nell'ambito dell'Istituto Anatomico dell'Università di Padova un gruppo di Ricercatori nel ricordo del loro Maestro Prof. L. Bucciante, Anatomista recentemente scomparso (18.2.1994), promuove iniziative didattiche e di ricerca nell'ambito dell'Anatomia macroscopica mediante l'impiego di tecniche informatiche multimodali. Il gruppo si avvale della seguente attrezzatura:

1) TAC spirale (Tomografia Assiale Computerizzata, acronimo: T.A.C.).

Come è noto nel settore della diagnostica per immagini l'introduzione della TAC ha rappresentato una vera e propria rivoluzione. Infatti nella radiologia tradizionale l'immagine radiografica dipende dall'assorbimento totale del fascio di fotoni x da parte dell'oggetto indagato, ricavandosi in tale modo una rappresentazione di tipo *sintetico* dovuta alla sovrapposizione delle densità relative ad ogni singolo punto.

Le limitazioni sopraccennate di rappresentazione delle singole strutture indagate vengono soltanto in parte superate dalla to-

mografia tradizionale, nella quale si realizza l'immagine di un singolo strato dell'oggetto in ripresa colpito in direzione ortogonale dal fascio di raggi x che si muove in senso inverso, ma sincrono alla pellicola. L'immagine ripresa con tale modalità è di tipo analitico, in quanto riproduce solo gli elementi anatomici compresi nello strato selezionato.

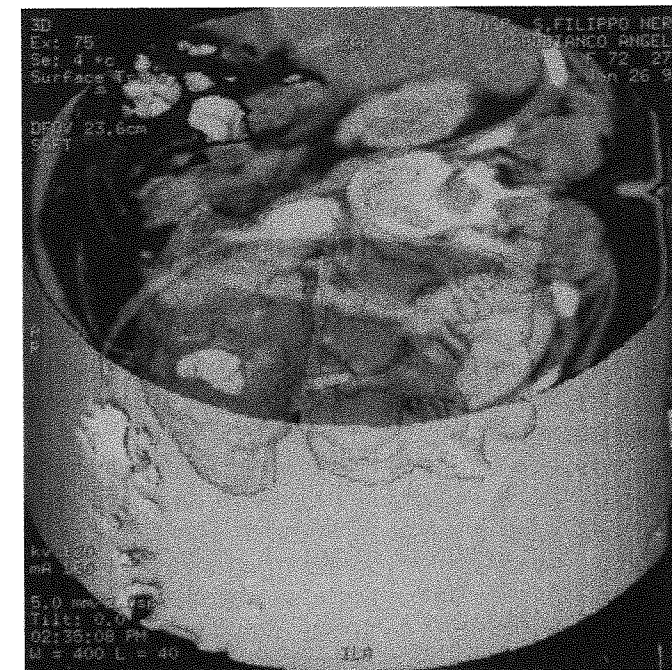


Fig. 1. Immagine ottenuta con tecnica di *trasparenza* di elaborazione digitale e ricostruzione analogica 3D utilizzando *dati grezzi* di un esame TAC spirale con acquisizione volumetrica di una sezione addominale comprendente il tratto lombare. Si riconoscono dai piani dorsali ai ventrali: strutture molli cutanee e sottocutanee, masse muscolari lombari; tre vertebre lombari con: processi spinosi, arco posteriore, canale midollare, corpi e dischi intersomatici; dilatazione fusiforme aneurismatica della aorta lombare e, un po' più cranialmente, tratto dell'arteria mesenterica superiore. Nella parte alta dell'immagine, che corrisponde al settore destro dell'addome, è rappresentata una sezione trasversa del rene destro, del polo inferiore del lobo destro epatico e, anteriormente ad esso, sezioni intestinali, tessuto adiposo e parete anteriore addominale.

Peraltro la TAC ha consentito un vero e proprio salto di qualità offrendoci immagini di tipo analitico, ma riprese in alta definizione, sia sotto il profilo spaziale, che del contrasto.

I modelli recenti di TAC, tra cui quello impiegato dal nostro gruppo, indicati come TAC spirale si sono avvalsi della vertiginosa evoluzione tecnologica tipica della nostra era, sia per quanto concerne la rilevazione delle informazioni che la memorizzazione ed elaborazione elettronica delle stesse e nella loro traduzione in immagini. Nella TAC spirale da noi impiegata un tomografo rotante emette un fascio di raggi x altamente collimato e conformato a ventaglio e a pennello: esso attraversa la sezione corporea di interesse, seguendo in successione numerose, diverse traiettorie. Suddividendo tale sezione in piccole unità di volume ed utilizzando dei sofisticati rilevatori in grado di misurare la graduale attenuazione del fascio (cioè analizzare finemente i diversi livelli di energia), la TAC spirale, grazie alla elevata capacità di calcolo del suo computer, determina il coefficiente di assorbimento ovvero la densità di ogni unità del volume interessato, misurata in unità Housfield. Le immagini che ne risultano sono morfologicamente molto ben definite ed in grado di evidenziare anche strutture anatomiche che differiscano tra di loro per piccolissima variazione di contrasto; sebbene molti tessuti compreso quello nervoso ed il liquido cefalo-rachidiano possono venir ben riconosciuti in queste immagini; va segnalato che l'eccellente contrasto esibito dal tessuto osseo consente, semplicemente agendo sulla soglia di intensità, ottime ricostruzioni 3D del cranio e dello scheletro, a cui, con l'ausilio di un mezzo di contrasto, si può aggiungere il decorso dei grossi vasi colorati secondo tradizione anatomica (in rosso le arterie e in azzurro le vene).

2) La spettroscopia di Risonanza Magnetica Nucleare (R.M.N.).

La spettroscopia NMR (acronimo del termine Nuclear Magnetic Resonance) è diventata negli ultimi anni uno dei mezzi più potenti di indagine strutturale di sostanze, specialmente di quelle più complesse strutturalmente come quelle biologiche organiche e metallorganiche. La spettroscopia NMR è basata su variazioni di stati energetici del nucleo. Non tutti i nuclei sono

attivi, ma solo quelli che hanno un momento magnetico nucleare risultante, cioè un numero dispari di protoni e/o neutroni. Neutroni e protoni hanno numero quantico di Spin uguale a 1/2. I neutroni e, separatamente, i protoni, si appaiano per dare il numero quantico complessivo I. Nuclei come ^{12}C , ^{16}O hanno numero pari di protoni e neutroni per cui $I=0$ e pertanto sono *invisibili* alla spettroscopia NMR. ^1H e ^2H hanno rispettivamente $I=1/2$ e 1; ^{13}C ha $I=1/2$, ^{14}N e ^{15}N hanno rispettivamente $I=1$ e \dots . Un nucleo con I diverso da zero, posto in un campo magnetico di intensità B_0 , assume $2I+1$ livelli energetici la cui differenza energetica DE dipende dalla intensità del campo magnetico applicato.

In linea di principio si possono indurre transizioni fra un livello energetico ed un altro, usando una frequenza compresa nella zona delle onde radio. Una caratteristica di questa spettroscopia è che ogni spettro (che riporta l'intensità dell'assorbimento della radiazione in funzione della sua frequenza) si riferisce alle frequenze di risonanza di una singola specie nucleare, ad esempio ^1H , oppure ^{13}C o ^{31}P , ecc. .

Gli strumenti basati su MRI (Magnetic Resonance Imaging) sono utilizzati per dettagliati studi in campo biomedico e nella diagnostica medica: è molto importante sottolineare che i segnali provenienti dal calcolatore di uno strumento NMI (dedicato alla diagnostica medica) sono segnali in ultima analisi relativi alla quantità e distribuzione soprattutto dell'idrogeno (cioè dell'acqua) negli organismi viventi. Poiché tali segnali si riferiscono non già a sezioni come nella TAC, ma ai volumi indagati nel vivente, sarà possibile costruirne, con l'aiuto del potente calcolatore di una W.S., un modello 3D perfettamente uguale e, come nella realtà, *pieno*, non un modello 3D *vuoto* costruito con le leggi della prospettiva ed il gioco delle ombre. Recenti sviluppi della tecnologia dei sistemi MRI lasciano intravedere la possibilità nel sistema nervoso di poter riconoscere nella sostanza bianca i pacchetti di fibre a decorso coerente nonché le fibre nervose alterate da lesioni anterograde e retrograde; anche la visualizzazione almeno dei più cospicui nuclei grigi del tronco cerebrale potrebbero rientrare tra breve nelle capacità di discriminazione degli strumenti di RMI. Quest'ultimi potrebbero altresì

costituire una valida alternativa alla Tomografia ad emissione di protoni (PET) negli studi di *imaging* funzionale dei centri nervosi.

3) *Work-Station (W.S.) multimodale della G.E. Medical System.*

Trattasi di una stazione di lavoro con un programma particolarmente adatto per studi di morfologia umana e per problemi medici (radiagnostica). Essa impiega un calcolatore della Sun con 128 Mbyte di memoria RAM e 1 Gbyte su disco fisso. Il software (vedi più avanti) in alcuni casi impiega strumenti morfologici (m.o.) secondo algoritmi booleani⁵ capaci di rendere automatiche e quindi rapide e facilmente ottenibili, operazioni che altrimenti comporterebbero un uso separato e dispendioso nel tempo necessario all'impiego dei singoli m.o.. Così questo modulo consente di sovrapporre alle immagini reali di TAC e di RMN, immagini sottratte o non sottratte, con una profondità di immagine fino a 10 bit su un monitor ad alta risoluzione e stabilizzato. Tale W.S. si avvale altresì di una serie di caratteristiche avanzate che vanno dai collimatori elettronici al rinforzo dei bordi, dallo spostamento manuale o automatico del Pixel, alla facile costruzione di maschere e alla integrazione delle maschere. Inoltre possono essere eseguite sullo schermo misure interattive con calibrazione del catetere tramite sfera, per misurare distanze, angoli, dimensione per es. dei vasi, ecc.. Advantage Windows permette il trattamento e la costruzione tridimensionale di immagini generate da unità TAC e RMN, la loro archiviazione e la loro analisi in tempi differiti.

4) *Computer per grafica corredato da Scanner HP DeskScan II Hewlett Packard e da Telecamera (per l'acquisizione di immagini 2D non radiologiche).*

Trattasi di un PC munito di processore Pentium 100 con 16 Mb di RAM ed un disco fisso da 850 Mb disponibili. Lo strumento è corredato da monitor 17" a colori con risoluzione massima 1280x1024 punti, altoparlanti, lettore di CD-ROM (Creative Sound Blaster), sistema di puntamento (mouse) Genius. I programmi per la grafica di base più usati sono il Corel Draw 5.0, l'Aldus Photostyler ed i Paint Shop Pro. 3.0.

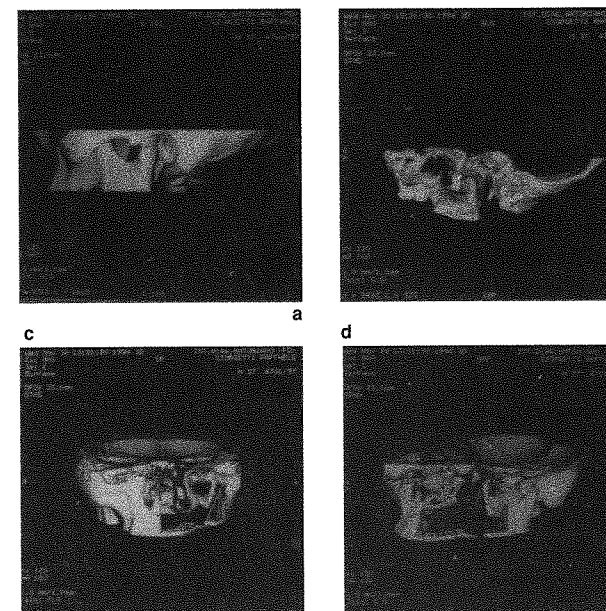


Fig. 2. Immagini ottenute mediante elaborazione digitale e ricostruzione analogica 3D, utilizzando *dati grezzi* di un esame TAC spirale con acquisizione volumetrica, di una sezione dello splanchnocranio.

- a) L'immagine rappresenta una visione laterale dell'articolazione temporo-mandibolare di sinistra. Sono evidenti le strutture ossee secondo una visione esterna.
b) Immagine ottenuta con *erosione* dell'emicranio sinistro, è rappresentata l'articolazione temporo-mandibolare destra secondo una visione dall'interno.
c) e d) Visioni in frontale e in obliqua di strutture anatomiche scheletriche profonde dello splanchnocranio attraverso finestra elettronica.

Procedure d'impiego.

Vengono descritte dettagliatamente solo quelle relative all'impiego della WorkStation (d'ora in poi indicata come W.S.) *Advantage Windows* della General Electric (G.E.) impiegata nella presente ricerca.

Le acquisizioni delle informazioni ottenibili dall'impiego di RM e di TAC vengono memorizzate su disco fisso e successivamente processate con strumenti informatici (d'ora in poi indicati come *morphological operators* o in sigla m.o.) inseriti (implementati) e resi operativi sulla W.S. impiegata.

L'acquisizione dei volumi isotropici può oggi essere facilmente ottenuta dai modelli più recenti di RM in meno di 10 minuti ed anche una TAC spirale può oggi consentire una rapida memorizzazione di dati idonei per ricostruire modelli tridimensionali (3D). Tra quest'ultimi quelli desunti da RM, avendo già una configurazione potenzialmente tridimensionale, sono dei modelli *pieni*, sui quali sarà possibile poi operare sezioni su qualsivoglia piano a discrezione dell'utilizzatore.

Il lavoro di riconoscimento degli oggetti di interesse anatomico e/o chirurgico in seno a dette acquisizioni viene eseguito sulla W.S. da esperti (anatomisti e/o chirurghi assistiti ed aiutati da tecnici e da studenti). Essi si avvalgono dei m.o. sottoelencati per agire sul modello 3D che appare sullo schermo del monitor della W.S., come si trattasse del noto strumentario (coltelli, bisturi, forbici, sondini, ecc.) in uso nelle sale autoptiche o nelle sale chirurgiche sui cadaveri o sui pazienti.

La segmentazione dei volumi acquisiti inizia con la definizione dei limiti dello spazio su cui operare. Ciò è necessario perché una rappresentazione senza tali limiti renderebbe illeggibile la visualizzazione tridimensionale a causa della contemporanea rappresentazione di superfici interne ed esterne rispetto agli oggetti di interesse. Tenuto conto che in teoria sia la RM che la TAC rappresentano gli oggetti anatomici come regioni di intensità omogenea, anche se il range di intensità può essere diverso a seconda del protocollo utilizzato per l'acquisizione, il metodo usato si basa sul concetto assai semplice di regioni isolate dallo spazio, sulle quali applicare le complesse procedure della segmentazione al fine di identificare le strutture anatomiche di interesse (R.O.I). Tali procedure si avvalgono di strumenti informatici che possono essere impiegati manualmente in sequenze definite di volta in volta dall'operatore esperto, ma il cui uso può essere anche automatizzato e lo sarà sempre più in futuro in una sequenza che tien conto anche del tempo di impiego del singolo strumento (algoritmi Booleani) inserito nella sequenza. Così nella stazione di lavoro da noi usata (W.S. Advantage Windows . GE) sono predisposti sia comandi singoli per gli strumenti informatici di erosione e di dilatazione, che comandi complessi. Quest'ultimi sono in grado di ottenere un

impiego dei due m.o. basato su algoritmi Booleani e cioè sequenze erosione-dilatazione e dilatazione-erosione, finalizzate ad ottenere rispettivamente una breccia (apertura) o una sutura (chiusura) di strati e/o di organi che obliterino nel modello 3D quanto si vuole in quel momento evidenziare. Si sottolinea l'importanza per le applicazioni mediche di tali comandi *complessi*, che fanno riparmiare ore ed ore di lavoro eseguendo alla perfezione i tagli e le suture ottenibili in qualunque punto del modello 3D. La *magia* di sezionare e/o di operare la copia perfetta di un corpo umano vivente secondo le vie di accesso via via desiderate dall'utilizzatore poggia largamente su un razionale impiego di questi due m.o.

Elenchiamo qui di seguito i più utili strumenti informatici (m.o.) disponibili sulla consolle della W.S. Advantage Windows: a) mascherature, b) finestre di vario tipo, c) facilitazioni nell'uso e nel controllo del livello di soglia di intensità (uso del Pixel), d) erosione, e) dilatazione, f) apertura (erosione seguita da dilatazione), g) chiusura (dilatazione seguita da erosione), h) Riempimento di regioni e/o cavità (*filling the space*), i) controllo delle componenti o strutture connesse, l) uso di uno scalpello o bisturi (su 2D), g) impiego di filtri di vario tipo e di varia funzione (filtri morfologici per eliminare piccole strutture indesiderate, create da disturbi del fondo, ecc.)

Riteniamo che il modo migliore di spiegare l'impiego dei sopracitati strumenti sia di esporre qualche esempio delle procedure di segmentazione ed uno schema di esecuzione delle sequenze interattive di tali procedure.

Esempio n. 1. Posto che il nostro interesse sia di isolare e studiare la corteccia cerebrale (cioè le circonvoluzioni di un emisfero), costruiamo un modello 3D dell'encefalo; per prima cosa dovremo acquisire da RM il volume di un esame del capo di un soggetto vivente, poi costruire sulla W.S. un modello 3D, includerlo in una maschera adatta. Tale maschera sarà costruita avendo cura di eliminare, per quanto possibile a questo livello, dalla nostra R.O.I. (corteccia cerebrale) le ossa dello splancno-cranio conservando invece dentro alla maschera l'encefalo avvolto dai tessuti molli esterni e dalle ossa del neurocranio. Visualizzando il modello 3D a questa tappa della seg-

mentazione, osserveremo che esso non ci mostra affatto la superficie dell'encefalo (R.O.I). Infatti i tessuti molli esterni ed il midollo osseo, essendo compresi nello stesso range di intensità di grigio della sostanza nervosa, nascondono la nostra R.O.I. di conseguenza una osservazione a questo momento evidenzia, al luogo della corteccia cerebrale, la superficie dei tessuti molli della testa cui soggiace il midollo osseo compreso tra tavolato esterno ed interno della diploe del neuro-cranio. E' necessario ora applicare alcuni strumenti morfologici (m.o.) per isolare la superficie dell'encefalo dalle parti molli esterne e dal midollo osseo: si fa allora agire dapprima l'erosione per eliminare le parti molli; quindi il controllo delle componenti connesse per eliminare il midollo osseo, previa analisi e catalogazione dei vari oggetti presenti nelle visualizzazioni. Grazie poi ad una semplice operazione di selezione dell'oggetto che contiene la nostra R.O.I (l'encefalo, di cui la corteccia cerebrale rappresenta la parte superficiale a livello degli emisferi), vengono eliminati gli altri *oggetti* che non ci interessano (le parti molli ed il midollo osseo). Alla fine, poiché stata adoperata una erosione (m.o. che comporta sempre una riduzione del volume complessivo del modello 3D su cui si applica) occorre adoperare la dilatazione (m.o.) per riportare il volume dell'oggetto *encefalo* ai suoi valori originari. Se del caso, si impiegano anche filtri morfologici per eliminare oggetti indesiderati comparsi come effetti di disturbo del fondo, sempre preceduti da analisi e selezione degli oggetti presenti alle varie tappe del processo di segmentazione teso ad isolare l'oggetto R.O.I. (encefalo). Tutte queste tappe si compiono con l'ausilio della visualizzazione sul modello 3D, che funge da guida per l'operatore (segmentazione interattiva).

Esempio n. 2. La R.O.I. di questo esempio riguarda l'isolamento di strutture interne all'encefalo; anche in questo caso si agisce dapprima come nell' esempio precedente sino alla costruzione del modello 3D. Ora dobbiamo definire precisamente il nostro scopo, cioè la R.O.I.: isolare i ventricoli laterali degli emisferi cerebrali. Trattandosi di strutture cave il principale m.o. da impiegare è il riempimento di spazi o regioni (*filling the space*).

Quando però si aggiusta il livello di soglia della finestra a quello idoneo alla densità dei ventricoli, ci si accorge che molti altri piccoli spazi sono stati riempiti al pari dei ventricoli laterali ed ora creano tante immagini che mascherano in parte quella dei ventricoli: questi spazi riempiti dal m.o. impiegato sono quelli compresi tra le opposte superfici delle scissure, che quindi vengono rappresentati sullo schermo: peraltro essi non sono in connessione con le cavità ventricolari; perciò possono essere facilmente eliminati con il m.o. per il controllo delle regioni o strutture connesse.

I due esempi di segmentazione descritti, illustrano bene la filosofia che sta alla base delle strabilianti possibilità di studio delle strutture anatomiche dimostrate: il primo passo è sempre quello di catturare in una finestra la cui intensità sia in grado di estrarre dal modello 3D la nostra R.O.I. (nel caso degli esempi descritti, si tratta della sostanza nervosa); poiché peraltro molti *oggetti anatomici* (es. midollo osseo) possono rientrare nel medesimo livello di intensità nella scala dei grigi, occorre impiegare i vari m. o. prima descritti, in sequenze logiche atte ad eliminare per tappe successive, uno alla volta i singoli oggetti non interessanti (non R.O.I) eventualmente presenti. Come è ovvio la scelta dei m.o. varia da caso a caso ed è discrezionale (operatore-esperto); l'esecuzione delle varie tappe della sequenza (applicazione di una soglia, uso di filtri, impiego di m.o.) viene condotto in modo interattivo, cosicché ci si possa avvalere dell'aiuto di visualizzazioni successive sul modello 3D, che sta subendo la segmentazione e funge quindi da guida all'operatore esperto mostrandogli singolarmente i vari *guadagni* ottenuti da ogni singolo intervento. Quando poi si osservi la nostra R.O.I. in sequenze filmate ed animate esse sembrano il frutto di una magia (vedi video-tape): un *tocco di bacchetta magica* ed un encefalo si spoglia del suo strato corticale grigio e mostra solamente il sottostante strato bianco: un altro colpo di bacchetta magica e lo strato corticale grigio ritorna e copre nascondendolo lo strato bianco; l'operazione può essere ripetuta tutte le volte che si desidera. Nel video-tape proiettato è stata mostrata anche l'animazione di due polmoni che si privano del parenchima facendo comparire solo l'albero bronchiale, che viene poi ricoperto dal parenchima e così via!

La costruzione dei modelli 3D assistita da computer sulla base di acquisizioni da TAC e/o da RMI, comporta l'intervento di esperti per il riconoscimento delle strutture di interesse in ciascuna immagine. Tali interventi sono assai onerosi sotto il profilo del tempo richiesto e si tende oggi a sviluppare modalità informatiche da applicare automaticamente (vedi come esempio quanto segnalato sugli algoritmi Booleani). Le figg. 1 e 2 allegate mostrano alcuni esempi di strutture generate dal computer sulla base di acquisizioni volumetriche TAC.

BIBLIOGRAFIA E NOTE

- BRECHBUHLER C., GERIG G., KUBLER O., *Surface parametrisation and shape description*. In: Proc. First Conference on Visualization in Biomedical Computing. VBC '92, Chapel Hill, North Carolina 1992, pp. 80-89.
- BRINKLEY J.F., ENO K., SUNDSTEN J.W., *Knowledge-based client-server approach to structural information retrieval: The Digital Anatomist Browser*. Comput. Methods Programs Biomed. 1993; 40: 131-145.
- CARLSEN I.C. ET AL. *Knowledge based interpretation of cranial MR images*. Computer Assisted Radiology, Proc. CAR '91 (eds Lemke H.U., Rhodes M.L., Jaffe C.C. & Felix R.), Springer, Berlin, 1991, pp. 277-282.
- DECLERCK J., SUBSOL G., THIRION I., AYACHE N., *Automatic retrieval of anatomical structures in 3D medical images*. In: Proc. First International Conference on Computer Vision, Virtual Reality and Robotics in Medicine, CVR Med., Nice, 1995, pp. 153-162.
- DEV P., COPPA G. P., TANCREDE E., *Brainstorm: designing an interactive neuroanatomy atlas* (abstract). Radiology 1992; 185: 413.
- EVANS A. C. ET AL. *Anatomical function correlation using an adjustable MRI-based region of interest atlas with positron emission tomography*. J. Cereb. Blood Flow Metab. 1988; 8: 513-530.
- GREITZ T., BOHM C., HOLTE S., ERIKSSON L., *A computerized brain atlas: Construction, anatomical content and some applications*. J. Comput. Assist. Tomogr. 1991; 15: 26-38.
- KEYSERLINGK D.G., NIEMANN K., WASEL J., MAURER K., *Digital brain atlas for structure localization in CT combined with EEG mapping*. Psychiat. Res. 1989; 29: 461-462.
- LEHMANN E.D.M., ET AL., *Computer-aided interpretation of SPECT images of the brain using a MRI-derived 3D neuro-anatomical atlas*. Med. Inform. 1991; 16: 151-166.
- LIPSCOMB K., KITTREL A., *Software gets under your skin*. Physicians Comput. 1991; 9: 14-16.
- MANO I., SUTO Y., SUZUKI M., IIO M., *Computerized three-dimensional normal atlas*. Radiat. Med. 1990; 8: 50-54.
- NIEMANN K., KEYSERLINGK D.G., WASEL J., *Superimposition of an averaged three-dimensional pattern of brain structures on CT scan*. Acta Neurochir. 1988; 93: 61-67.
- NOLTE J., ANGELINE JR Y.B., *The human brain*. Mosby, 1995.
- ROBINSON G.P., COLCHESTER A.C.F., GRIFFIN L.D., *Model-based recognition of anatomical objects from medical images*. Images Vis. Comput. 1994; 12: 499-507.
- SCHALTENBRAND G., WAHREN W., *Atlas for Stereotaxic of the Human Brain*. Thieme, Stuttgart 1977.

SUNDSTEN J.W., Dept. of biological structure - School of Medicine - University of Washington. Cited by (13)

TALAIRACH J., TOURNOUX P., *Co-planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain*. Thieme, Stuttgart 1988.

WAHLAR-LUCK M., SCHUTZ T., KRETSCHMANN H.J., *A new anatomical representation of the human visual pathway*. Graefe's Arch. Clin. Exp. Ophthalmol. 1991; 229: 201-205.

1. MIANI N., *Anatomia galileiana e anatomia virtuale*. Atti del Convegno *L'Anatomia per immagini*. Novara, 5 maggio 1995, p. 49-50.
2. GATES B., *La strada che porta al domani*. Milano, Arnoldo Mondadori, 1995, p. 44.
3. HOHNE K.H., POMMERT A., RIEMER M., SCHIEMANN T. SHUBERT R., TIEDE U., LIERSE, *Anatomical atlases based on volume visualization*. In: NIELSEN G., KAUFMAN A., Proceedings IEEE Visualization '92, IEEE Comp. Soc. Press pp. 115-122, 1992; POMMERT A. PFLESSER B., RIEMER M., SCHIEMANN T., SHUBERT R. TIEDE U., HOHNE K.H. *Advances in medical volume visualization*. In: FEVANG P.A., GIERTSEN C., Proceeding Eurographic '94 State of Art Reports, September 12-16 pp. 111-139, 1994.
4. ID., op cit. nota 3.
5. Si tratta di procedure basate sull'algebra di Boole, che include nel calcolo l'elemento tempo.

Correspondence should be addressed to:
Meneghelli V., Istituto di Anatomia Umana Normale, Via Gabelli, 65 - 35121 Padova, I.