

TÉRÁBRÁZOLÁS AZ AGYI DIAGNOSZTIKÁBAN ÉS A MŰVÉSZETBEN

Pásztor Emil

az MTA rendes tagja, Semmelweis Egyetem Budapest, professor emeritus
Idgesebészeti Tudományos Intézet – epasztor@monor.net.hu

A kétdimenziós röntgenképek és a háromdimenziós komputer-tomográf képeinek vizsgálatakor arra gondoltam, hogy a térábrázolás kialakulása a művészettörténetben is nyomon követhető. Míg a művész a térábrázolásával az adott tárgy vagy alak térbeliségének illúzióját akarta kelteni, az orvosi diagnosztikában a térbeli ábrázolás új lehetőségeket, pontosabb műtéti megoldásokat tett lehetővé,

A perspektívaábrázolás a reneszánszban született meg; kiteljesedése a XVII. századra tehető. A képkalkotó diagnosztikus vizsgálatok csak röntgen felfedezésével (1895) kezdődtek, síkbeli megjelenítésük alig háromnegyed évszázadig tartott, újabb tíz év múlva megvalósult a térbeli ábrázolás. Érdekes lenne megvizsgálni, hogy a háromdimenziós CT kifejlesztésekor figyelembe vették-e a művészet hasonló megoldásait, a reneszánsz művész-matematikusaik munkásságát – vagyis: a művészi térábrázolás segítette-e az agyi képkalkotó diagnosztikus vizsgálatok kidolgozását.

A lényeg a vizuális információ. Szemünkkel vizsgáljuk a röntgenképet vagy a CT-felvételt, a festményt vagy a rajzot, függetlenül attól, hogy kognitív folyamatokat kell-e elindítaniuk, vagy esztétikai hatást kell-e kelteniük. Kezdetben tehát a fénytani, biológiai, anatómiai, fiziológiai és

pszichológiai vonatkozások játszanak szerepet.

A látás

A szem alapvető funkciói: a tárgy-, a mélység- és a színlátás, a fényérzékelés és a fényerősséghez való alkalmazkodás. Az utóbbi évtizedek kutatásai – főleg a PET-tel végzettek (Gulyás és mtsai) – kimutatták, hogy az emberi agykéreg mintegy ötven százaléka szerepet játszik a vizuális érzékelésben, amelyet tehát nem egyszerűen a szem optikai rendszere: egyetlen idegpálya és egyetlen agykérgi (a látókérgi) terület, hanem legalább két pályarendszer és számos egymástól elkülönült, független funkciójú terület bonyolult együttműködése tesz lehetővé. A retina sejtsíkjában a fény fotokémiai folyamatokat indít, a fényenergia ingerületet kelt. A látásban szerepet játszó egyéb struktúrák jól szervezett hierarchiában kapcsolódnak egymáshoz; ennek egyes részei anatómiai és élettani tulajdonságaik alapján feldolgozási szintekre oszthatók, amelyek egyre bonyolultabb módon reprezentálják a valóságot. Magasabb szinteken az idegsejtek receptív mezeje egyre nagyobb és bonyolultabb szerveződésű. Az elsődleges látókérgi területről az információ másod-, harmadrendű stb. látókérgi területekre irányul, amelyeken a

leghatásosabb fényinger rendszerint már bonyolultabb alakzat.

A vizuális inger értelmezésében jelentős szerepet játszik a tapasztalat, a tudatos elem. A retinára vetülő kép valódi, kicsinyített és fordított állású, ám egyenes állásúnak érzékeljük, mert a tapasztalataink ezt a helyzetet igazolják; a látóközpontok és az agy egyéb részeinek együttműködése ilyen képet hoz létre tudatunkban. Voltaképpen úgy látunk, mintha középpűt lenne egyetlen szemünk – ezt Hermann von Helmholtz (1821-1894) *küklöpsz-szemnek* nevezte. A két látómező nagyrészt fedi egymást. A közös területen a két szem retinájának sejt szintig lebontott, összetartozó, identikus pontjai találhatóak. Emellett a retina és a rávetülő kép egyaránt kétdimenziós, így a térlátásra vonatkozó ismereteinknek kétdimenziós vetületek értékelésén kell alapulniuk. Egyesek szerint a látás oly szoros kapcsolódik a gondolkodáshoz, hogy a gondolkodás egyik formájának is tekinthető. „A bölcsnek szemei vannak a fejében” (Prédikátor Salamon könyve 2.15.).

A tárgyak mélységdimenziójának felismerése, a térbeli (sztereo-) látás a két szemmel való nézés eredménye. A két szem helyzete, illetve a két szemtengely eltérése enyhén különböző képeket hoz létre a két retinán és az agyban, amely elemzi, értékeli és összegezi azokat. A térlátást a tapasztalaton kívül objektív fiziológiai jelzések is segítik:

1. Egy tárgy távolságának megítéléséhez a két szemtengely által bezárt szög ad jelzést; közelebbi tárgynál a szög nagyobb. Erről a szemmozgató izmok működéséből származó afferens ingerek pontos jelzésül szolgálnak.

2. A tárgy távolodásakor az éles látás érdekében a szemlencse domborúsága is változik. A megfelelő pontra való beállás a szemfenéken keletkező kép minőségére

történő reakció. Az alkalmazkodóképesség kb. 12 dioptria.

3. Egy tárgy binokuláris fixálásánál a retina identikus pontjainak térbeli vetülete azon a köríven nyugszik, amely a fixált pontot és a szemek csomópontját metszi. Az ettől eltérő távolságban lévő tárgy pontok képei *disparat* helyre kerülnek. A távolabbiak egyszerű, a közelebbiek keresztzett kétszempontot alkotnak. Ewald Hering (1834-1918) szerint ennek az élettani disparationak látókérgi értékelése eredményezi a térbeli látást (*stereopsis*, más elnevezésekkel mélységlátás, plasztikus látás, térérzékelés, háromdimenziós látás).

4. Közelebbi tárgy elmozdulása a látóirány nagyobb megváltozásával jár. Ez a mozgásra vonatkoztatva azonos az 1. pontban ismertetett jelzéssel.

Vannak olyan, elsősorban pszichológiai alapokon nyugvó adatok – ún. *mélyégi információk* –, amelyek akkor is segítik a térérzékelést, ha csak egy szemmel nézünk:

1. Két hasonló tárgy közül a közelebbit nagyobbabbnak észleljük.

2. Két egyforma tárgy közül távolabbiabbnak érezzük azt, amelyik a képen magasabban áll.

3. Az összetartó vonalak távolodó párhuzamosaknak látszanak.

4. Ha két azonos tárgy egyike részben takarja a másikat, akkor a takaró tárgy közelebbinek látszik.

5. Ha apróbb, egyforma tárgyak tömeget alkotnak, akkor a távolabbiak kisebbnek és egymáshoz közelebb állónak látszanak.

6. Egymás mögötti tárgyak méretcsökkenése távlati hatást vált ki.

7. A távolabbi tárgyak színe tompább és kékes árnyalatú.

Látási illúziók akkor keletkeznek, ha a látvány az idegrendszer számára ellent-

mondó jeleket indukál. Az erősebb jel győz, ám az ellentmondás is tudatosul. Néhány ismertebb illúzió:

1. Ha egy ábra sok olyan elemet tartalmaz, amelyek a perspektíva érzékeltetésére szolgálnak, akkor az ábrát akkor is perspektivikusnak „óhajtjuk” látni, ha nem az.

2. Egy szürke tárgy világosabbnak tűnik fekete környezetben, mint fehérben.

3. Egyforma hosszúságú, egymásra merőleges vonalak közül a függőleges hosszabbnak tűnik, mint a vízszintes.

4. A villanykörte fehéren izzó szála vastagabbnak látszik, mint amilyen a valóságban.

5. Párás levegőben egy viszonylag távoli tárgy távolabbinak látszik, mint tiszta időben.

6. Egy pálca piros fényvel fehér lapra vetett árnyéka zöldes színű.

7. Felületes ránézésre bizonyos ábrák rajzait térbelinek látjuk annak ellenére, hogy ilyen térbeli ábrák nem is léteznek.

A látás és az ahhoz társult gondolkodás tehát becsapható. Ennek egyik oka, hogy a gondolkodás elsősorban asszociatív jellegű, és a gyorsaság érdekében elhanyagolásokkal működik.

A valóság hű ábrázolása

Évezredekken át „egyszerűbb” volt egy térbeli testet, például egy szobrot megalkotni, mint ugyanazt a tárgyat síkban, valóság-hűen ábrázolni. Ugyanakkor a geometriának az az ága, amelyet topológiának¹ nevezünk, a sík és a tér viszonylatában érdekes megállapításokat tesz. Eszerint számtalan konvex, szabályos síkidom van, vagyis olyanok, amelyek csúcsaiban ugyanannyi (két) él fut össze. Annak a követelménynek azonban, hogy minden csúcsban ugyanannyi él fusson össze és minden lapot

ugyanannyi oldal határoljon, a térben csupán öt alakzat felel meg: a tetraéder, a kocka, az oktaéder, a dodekaéder és az ikozaéder.

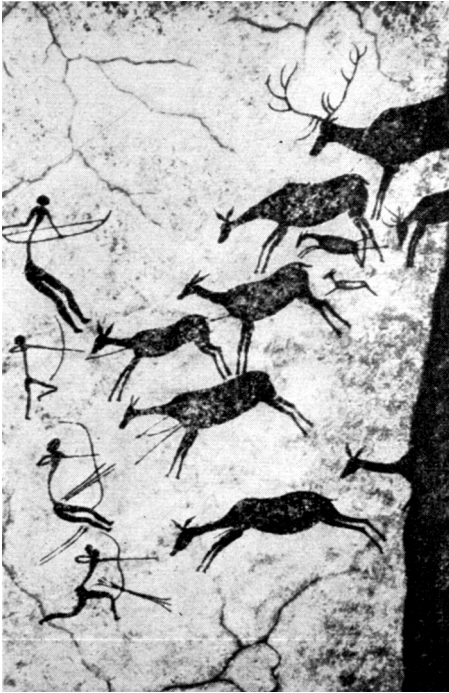
Péter Rózsa a következőket írja: „Síkbeli elképzeléseinket tehát nem szabad minden gondolkodás nélkül átvinni a térre: a térben sokminden másképp van. (...) azt vártuk, hogy itt több lehetőség lesz, mint a síkban, például még sokkal változatosabb fajtái a szabályos idomoknak. És íme: a szabadabb lehetőségek egyesek számára éppen keményebb feltételeket jelentenek, hiszen a feltételek megszabásában is nagyobb a szabadság. Egy test csúcsában nemcsak két él futhat össze, mint síkidomaink csúcsaiban, hanem akárhány él és egyúttal bármiféle lapok is, akár 30 él is található az egyik csúcsában, míg a másikban 3, és míg az egyik lapja háromszög, a másik akár harmincszög is lehet. Hogy egy test ne élhessen e gazdag lehetőségekkel, hogy ne legyen, csak egyetlen választása, hogy kénytelen legyen beérni ugyanannyi éllel minden csúcsban, minden lapja körül, az nagyon erős megszorítás. Mindössze 5 test viseli el.”

A kérdés, hogy egyszerűbb-e egy tárgyat a térben létrehozni, mint síkban megjeleníteni, bennünket elsősorban a látás szempontjából érdekel, vagyis hogy egy test szemlélése nagyobb vizuális élményt jelent-e, mint ha ugyanazon test „élethű” rajzát nézzük.

Térábrázolás a művészetben

Az ősi barlangfestmények emberábrázolásai erősen vázlatosak. A Mezopotámia előtti idők edénytöredékein geometrikus formákból épülnek fel az emberalakok. A IV. évezredből származó pecséthengereken az emberi testet profilban ábrázolták. Az *ideoplasztikus* egyiptomi festészet ún. *főnézetben* ábrázolta az emberi test minden részletét.

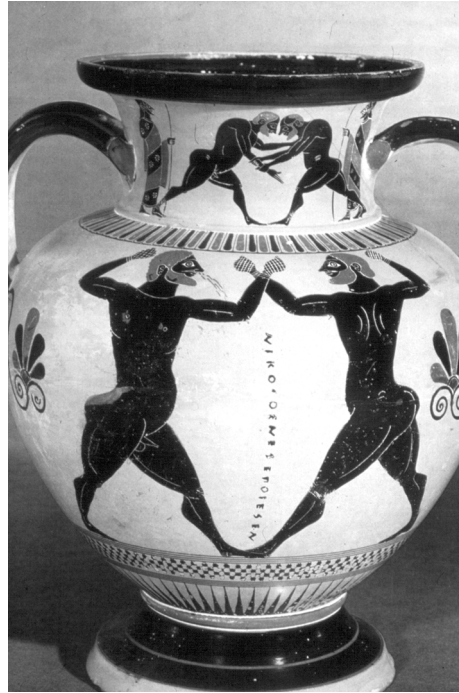
¹ A topológia valaminek a struktúráját vizsgálja és írja le, anélkül, hogy a méreteivel törődne. Egységes elméletének megalkotója Jules Henri Poincaré (1854-1912).



Szarvasvadászat – barlangfestmény a kelet-spanyolországi Valltortából

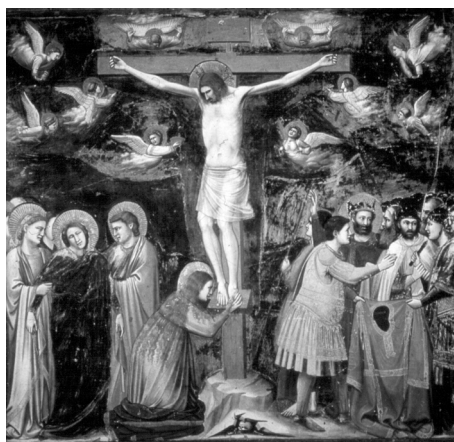
Kétségtelen, hogy egyszerűbb egy ember profilját megrajzolni, mint a szembenéző arc árnyalatait. A karakter profilban talán jobban érvényesül; a karikatúrák többsége is profil. Tisztán „matematikailag” gondolkodva kijelenthetjük: minthogy az élőlények teste szemből nézve általában szim-

A balszamosztást végző Anubisz sakálisten – szigorú profilábrázolás (XIX. dinasztia)



Fent: Feketealakos váza: szigorú főnézeti ábrázolás – lent: vörösalakos váza; a főnézeti ábrázolás kizárólagosságának megtörése, a szatír jobb lábfeje *szemből* látható.



Giotto: *Krisztus keresztfeszítése*

metrikus, oldalról pedig nem, az adott számú vonalat tartalmazó profil általában több információt tartalmaz, mint az ugyanennyi vonalból álló *en face* ábrázolás.

Görögországban a feketéalakos vázafestési technika egészen a klasszikus kor (i. e. V-IV. sz.) elejéig követi a kétdimenziós profilábrázolás szabályait. A vörösalakos technika korszakában jelennek meg a mélységábrázolás csirái. Egy, az V. sz. elején készült amforán ábrázolt szatír jobb lába szemből látszik – megjelenik a *rövidülés*.

Az ókori Rómában is alkalmazták térillúziót keltő elemeket, főleg épületbelső-

Mantegna: *Keresztlevétel* – a rövidülés mesteri ábrázolása

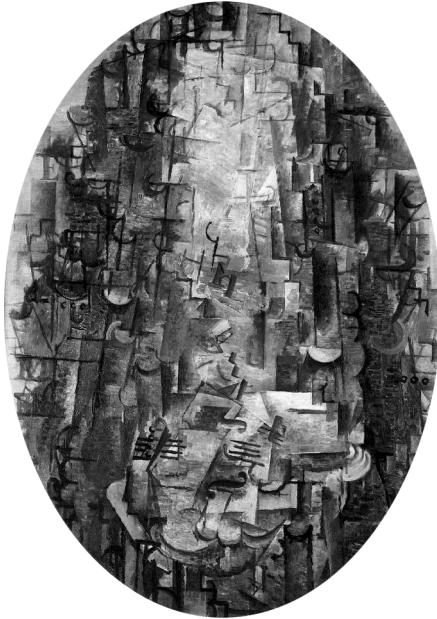


ben. Bizánc is megpróbálkozott a távlati ábrázolással. A románkori freskókon a térábrázolás háttérbe szorult. A gótikában az itáliai Pietro Cavallini (aktív 1273-1308) volt az első, aki árnyékolás alkalmazásával tette plasztikussá a figurákat.

A reneszánsz festői pontosabban akarták ábrázolni a világot. A perspektíva-tan (*perspectiva* – tiszta látás) mérföldkö volt a festészetben, mivel olyan új technikát kínált, amellyel síkban is létrehozhatták a térillúziót. Giotto (1266-1337) *Fides* című festménye (1306) egy gótikus szobor újszerű festői ábrázolása. Giotto a bizánci festészet és a gótikus szobrászat szellemét, a kor új látásmódját és a bizánci szépségeideált tudta egyesíteni, s egyszersmind a perspektívus ábrázolás első mesterévé vált (a padovai Cappella degli Scrovegni all' Arena; a Szűzanya és Krisztus életéről készített freskók).

A mélységábrázolás problémáját érdekesen fejtegeti Molnár C. Pál: „... a mélységábrázolás egyre inkább ingerelte a művészi alkotásvágyat. (...) Az egész képalakítás elvonatkoztató szellemi művelet, illúziókeltés, igazi alkotó tevékenység, amelyben alsóbbrendű eredők segítségével, azok kombinálásával magasabbrendű fogalmak jönnek létre. Ez a plasztikus művészetek *matematikai* jellege. A síkbeli alkotóelemek két dimenziójának megfelelő kombinálásával a síkból látszati tér lesz. A kép síkja térré alakul. Ez az ábrázolás mágikus ténye.”

A festmény a valóságos tér és forma látszati jegyeivel állítja elő a harmadik dimenziót. A mélységi látszat jegyei csak a valóság tapasztalata alapján sugallnak teret, távlatot. A térhatást elősegítő fogások: vonaltávlat, rövidülés, fény-árnyék, színek, a formák világossági és sötétedési foka, valör, tónus. A sztereo-látás érzetét elősegítő fogások: a körvonalak bizonytalanná tétele, a körvonalak kettőzése, vibrálása.



Braque: *Férfi hegedűvel* – „Minden egész eltörött” (Ady)

GiOTTO művészete a tudománynak is szolgálatára volt; előkészítette Nichole d'Oresme 1360. évi fölfedezését: a tudományos adatok grafikus (diagramos) ábrázolását. A perspektíva geometriai szabályai alapján tökéletesebbé vált a térképkészítés technikája, ami a földrajzi felfedezéseket segítette elő. Masaccio (1401-1428), a mélységábrázolás mestere, a firenzei Santa Maria Novella templomnak készített *Szent-háromság* (1427) című festményén azt a látszatot keltette, mintha a templom falát kivágták volna, és Krisztus már a falon túl helyezkedne el. Mantegna (1431-1506) *Halott Krisztusa* a rövidülés ábrázolásának utánozhatatlan remeke. Számunkra szakmailag is érdekes mestermű Rembrandt (1606-1669) képe, a *Dr. Nicolaes Tulp anatómialeckéje*.

A modern művészet részben szakított a korábbi elvekkel és megoldásokkal. A térábrázolásban is változás következett be: újra megjelent a szecesszió szimbolikájá-

nak kifejezésére igen alkalmas, kétdimenziós ábrázolás. Az előképek Hokusai (1760-1849) és Utamaro (1753-1806) fametszetei, amelyek árnyalatlan színeikkel allegorikus, szimbolikus világot jelenítettek meg. Rabinovszky szerint a szecessziót követő absztrakt stílus egyik eszköze „a háromkiterjedésű perspektíva feladása a síkba való vetítés kedvéért: hogy szilárdabb legyen a mű hatása, a maradandóság érzetét keltse, amikor a csalóka valóságábrázolástól eltávolodik.” Abból kiindulva, hogy a téma részeit a rájuk legjellemzőbb vetületben kell bemutatni, a témát darabokra bontó és újra összerakó kubizmus szintén elővette a kétdimenziós ábrázolást. Paul Klee alapítójele: „Az új művészet nem tárgyakat formál, hanem tárgyak érzetét és tárgyak által felkeltett érzeteket. A régi mesterek iskolájának vége. A művész nem az önmagában vett természetet adja vissza, hanem a természeti törvényt.”

Két- és háromdimenziós ábrázolás a koponya képalkotó diagnosztikájában

Az 1970-es évekig az agy és a gerincvelő diagnosztikus vizsgálómódszereinek minden képi ábrázolása kétdimenziós volt. A kóros elváltozások síkbeli képeken kerültek a szemünk elé. Az „egyszerű” röntgenképek² és a kontrasztanyagot röntgenfelvételek képei egyaránt dimenzió-redukcióval készülnek, vagyis a térbeli alakzat síkban jelenik meg. További probléma, hogy a fej röntgenképén csak a koponyacsontok látszanak, mert az agy, a *liquor* (agyvíz) és az erek a sugár elnyelése szempontjából együttesen sem adnak a csonthoz viszonyított jelentős kontrasztkülönbséget. Jól ki

² Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) a később róla elnevezett sugárzást 1895-ben fedezte fel. A röntgensugár felhasználása a gyógyászatban diagnosztikus és terápiás célból történik. A diagnosztikus alkalmazáson belül átvilágítást és felvételezést végeznek. Mi jelenleg a diagnosztikus célú felvételekkel foglalkozunk.



A röntgenfelvételeken csak a koponya csontjai, s nagyrítkán az elmeszesedett agydaganatok (jelen esetben is) látszanak.

rajzolódik ugyanakkor az esetleges agyálományi elmeszesedés és koponyacsont-destrukció.

A meszes daganat térbeli alakzat, így a vetületekből az idegsebésznek el kellett képzelnie annak valódi formáját és méretét, és gondolatban el kellett helyeznie azt a térben, a koponyán belül. Nyíl- és oldalirányú felvételek tanulmányozása alapján általában be tudtuk határolni, hogy a daganat milyen kiterjedésű, és hol helyezkedik el. Ám mivel agyi elmeszesedések ritkán fordulnak elő, és a röntgenképen maga a betegség nem látszik, a daganat koponyaüri elhelyezkedését illetően továbbra is fennállt a bizonytalanság. Csupán azok az adatok álltak rendelkezésünkre, ame-

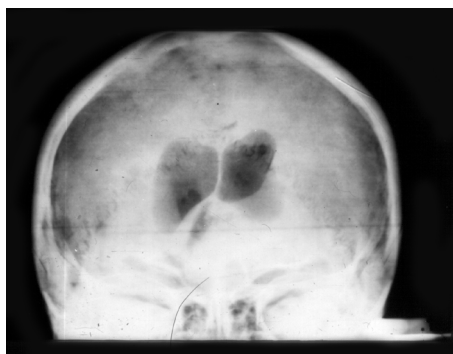
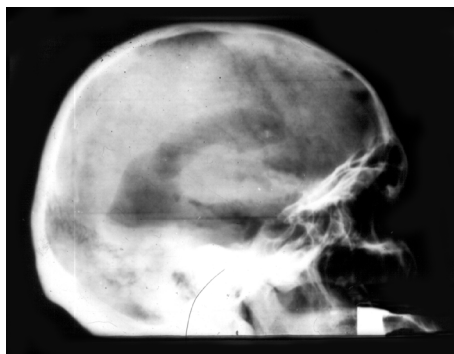
lyek az idegrendszeri károsodás tünetei (bénulások, beszédzavar, epilepsziás roham bevezető tünetei) alapján határozták meg a betegség agyi lokalizációját (lokalizációs tételek, „lokalizációs tan”³). Az 1880-as években meginduló idegsebészeti műtétekhez harminc éven keresztül csak a *lokalizációs tan* szolgáltatott adatokat a behatolás helyét és a betegség koponyaüri elhelyezkedését illetően.

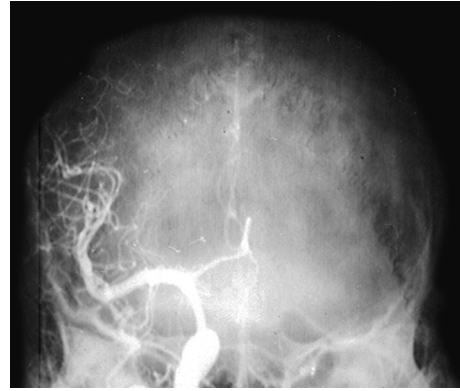
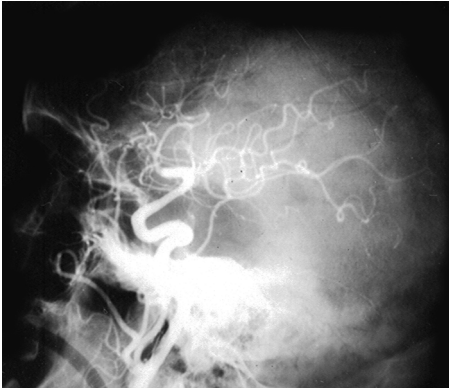
A negatív és pozitív kontrasztanyagok röntgenvizsgálatok újabb lehetőséget s egyben minőségi változást hoztak a térfoglaló koponyaüri betegségek helyének meghatározásában. Az agykamrákból az agyvizet lebecsátottuk, azokat levegővel töltöttük fel – Walter Edward Dandy (1866-1946) 1918 és 1919 –, és így készítettük a röntgenfelvételt.⁴ Ez a módszer egy fél év-

³ A „lokalizációs tan” kidolgozása Paul Broca (1824-1880) felfedezésével kezdődött, aki 1861-ben a beszédközpont helyét (jobbkezes egyénnél) az agy bal homloklebenye alsó tekervényének hátsó harmadába helyezte. További vizsgálatok a különböző agyi funkciók agykérgi reprezentációinak területeit határozták meg.

⁴ Az agykamrák levegővel való feltöltése (ventriculographia) kisebb agyműtétet jelentett, mert a koponyán végzett furaton keresztül kanült vezetünk az agykamrába az agyvíz levezetésére és a levegő beadására. A másik módszer (pneumoencephalographia, PEG) alkalmazásakor gerinccsapolással történt az agyvíz-levegő csere. Ezeket a vizsgálatokat viszonylagos veszélyességük miatt ma már nem szabad végezni.

PEG – a kamrarendszerbe juttatott levegő sötét foltjainak eltorzult formája a daganat helyére utal (koponyaalapi daganat oldal- és előlnézeti képe)





Érfestés – az erek helyzetének eltolódása jelzi a daganat helyét (koponyaalaapi daganat oldal- és előlnézeti képe)

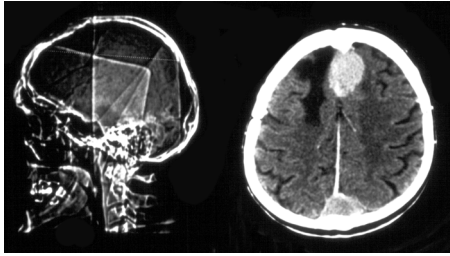
századra biztosította e vizsgálatok uralkodó szerepét. Rövidesen megjelent egy újabb, zseniális diagnosztikus módszer, az agyi erek röntgen-árnyékot adó kontrasztanyagos megjelenítése – Egas Moniz (1874-1955) 1927 –, amely máig használatos, nélkülözhetetlen vizsgálat.⁵ A kamrákba adott levegő, illetve az erekbe juttatott jódos oldat a röntgenképen jól látható kontrasztkülönbséget idéz elő, s ezáltal a levegővel feltöltött kamrák „negatív” képe, illetve az agyi erek „pozitív” képe tisztán kirajzolódik a felvételen.

E módszerek révén új helyzet állt elő, bár továbbra is kétdimenziós röntgenképeket kellett elemeznünk. Míg korábban a koponyaüregben belül a daganat képét egyáltalán nem láttuk, legfeljebb a ritka, elmeszesedett daganatok árnyékát, az említett vizsgálatokkal minden térfoglaló elváltozás (daganat, vérömleny, tályog) esetében észleltük a kamrarendszer részeit

⁵ Az agyi erek kontrasztanyagossal feltöltéssel történt ábrázolása röntgensugárral (angiographia) ma már nem a daganat helyének meghatározását szolgálja, mert erre kevésbé invazív módszerek állnak rendelkezésünkre (CT, MR), viszont nélkülözhetetlen az agyi érbetegségek kimutatásában, sőt a mai modern technika lehetőséget ad az éren belüli manipulációkra (például a kóros ér elzárására), vagy gyógyszereknek a körülírt érzékszervbe juttatására, trombus oldására (*trombolysis*).

vagy az agyi erek torzulását, amit a betegség okozott – a betegség, például a daganat virtuális képe, indirekt jelként minden esetben értékelhető lett. A helyes értékeléshez viszont ismernünk kellett az agykamrák és agyi erek normális alakját és helyzetét, mert azok torzulásából következtettünk a közvetlenül nem látható, a torzulást okozó betegség elhelyezkedésére, a koponya ürterében való helyére. Így a daganat helyének meghatározása lényegesen biztosabbá vált, de ehhez is szükség volt arra a képességre, hogy a több síkban készített kétdimenziós képekből el tudjuk képzelni a patológiás folyamat térbeli elhelyezkedését.

A gyorsan de nagyon is tudatosan lezajló gondolati folyamatot (a háromdimenziós kóros elváltozásnak a több síkban ábrázolt kétdimenziós képek alapján a koponya ürterében való elhelyezését) segítette, hogy ismertük a karteziánus koordináta-rendszer alapján működő és a XX. század elején előbb állatkísérletekben, majd az emberen végzett sztereotaxiás vizsgálatokat és műtéteket. Sztereotaxiás vizsgálatkor a koponyán belüli célpont térbeli helyzete a koordináta-rendszer paramétereivel meghatározható, és ha szükséges, a beavatkozás pontos helyeként, a célpontot repro-

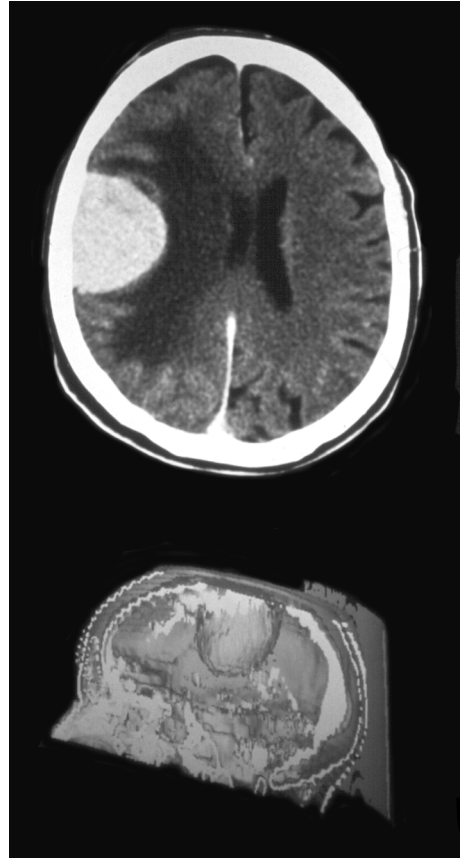


CT-felvétel – a koponya középvonalában elhelyezkedő két daganat látható. A bal oldali ún. *topogram* a felvételen ábrázolt metszetek síkjainak „térképe”.

dukálni lehet.⁶ Sztereotaxiás műtétkor egy finom szonda bevezetésével elektrolízissel, termokoagulációval vagy sugárzó izotóppal végzünk a célpontban rendszerint néhány milliméteres szövetroncsolást. Ilyen beavatkozásokkal többek közt a kóros mozgások megszűnése, fájdalomcsillapítás érhető el. Az agy betegségének szövettani vizsgálata, a mintavétel szintén sztereotaxiás beavatkozással történik, de ma már CT-vel vezérelt módon (Fedorcsák és mtsai). A *gamma-kés* (radio-sebészet) alkalmazásakor szintén sztereotaxiás célzással koncentráljuk a kobaltsugárzást (Várady és mtsai., Szeifert és mtsai).

Végül meg kell említenünk egy ritkán és kevés helyen alkalmazott eljárást, amely a röntgenképek térszerű látását tette lehetővé: a röntgen-sztereográfiás vizsgálatot. Ezt Merrill C. Sosman, a világhírű idegsebész, Harvey Cushing (1869-1939) röntgenológus munkatársa dolgozta ki az 1920-

⁶ A szerzőkről elnevezett Horsley-Clarke-készülékek a kísérleti állatfajok, majd az ember koponyájához illeszkedő alakúak voltak. Az agyi struktúráknak megfelelő sztereotaxiás atlaszokat is kidolgozták. Állatoknál külső referenciapontokat használtak (szemgödör csontos széle, külső hallójárat). Embernél, a fejformák nagyfokú diverzitása miatt, belső referenciapontokat (agyi struktúrákat, PEG-gel vagy VG-vel meghatározott commissura anteriori és posteriori) alkalmaztak, és igen pontos célzást értek el. Sztereotaxiás műtétet emberen 1947-ben Spiegel és munkatársai végeztek először.

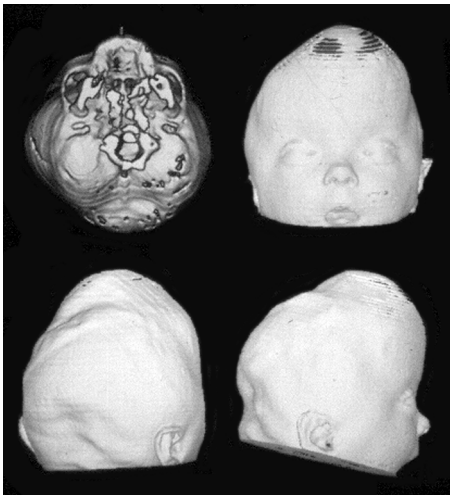


Fent CT-, lent 3DCT-felvétel ugyanarról a daganatról. A 3D ábrázolásnak a mindennapi gyakorlatban nincs különösebb jelentősége.

as években. A fejről egy 12 °-kal elfordított második röntgenfelvételt is készítettek és a két képet megfelelő szemüveggel vizsgálták.

Új világ a diagnosztikában

Az agyi diagnosztikában új korszakot jelentett a komputertomográf megjelenése; az agyi kóros elváltozás síkban ábrázolt, direkt képe láthatóvá vált. A CT-felvétel, bár szintén röntgensugárral készül, más, mint a röntgenkép, mert a CT dimenzióredukció nélküli szeletképeket készít, így mintegy valóságos leképezést eredményez. A szelet-



A 3DCT-nek a koponyafejlődési rendellenességek műtéti korrekciójánál van óriási jelentősége

képek adattömbbé szerkesztődnek, vagyis koordináta-rendszerben történő analízis eredményéről van szó.

Mindez úgy történik, hogy a scanning-egység a fej körül elfordulva, több száz projekcióval, 1-8 mm szeletvastagságban ad vékony sugárryalábot (röntgensugárforrás), és veszi fel az áthatolt sugármennyiséget (a fej túloldalán lévő detektor). Egy réteg területe több mint százezer pontra (négyzetre) osztott, és a körbejárás következtében ugyanazon ponton sokszor halad át a sugár. A csont és az agyi struktúrák, az agyvíz és a vérrrel telt erek szöveti sűrűségüknek megfelelően nyelik el a röntgensugarat. A számítógép képes kiszámítani az egyetlen pontban (négyzetben) elnyelt sugármennyiséget, és ennek megfelelő kontrasztú (szűrkeségű) pont-képet készít. Végül a különböző kontrasztosságú pontokból olyan kép áll össze, mintha a koponyaalappal párhuzamos síkban készítenénk a fejről (a koponyacsontokról és az agyról) metszetet.

Lényegében tehát egy test síkokra való felbontása, analízise történik, s elvileg nincs dimenzió-redukció (a gyakorlatban a sze-

letek vastagsága miatt valamelyes mértékű mégis van). A hagyományos CT-nél az adattömbből másodlagos, az eredetitől eltérő, más síkú képek is rekonstruálhatók, amelyek egymástól elkülönülten, torzítatlanul jelennek meg kétdimenziós kép formájában – ám tudnunk kell, hogy az egyszerű röntgenképtől eltérően a CT kétdimenziós adataira hordozza a háromdimenziós információt, csak az nem látható.

A CT-képen nemcsak a koponyában elhelyezkedő rendellenesség méretét, alakját és sugárelnyelő képességét láthatjuk közvetlenül, de a daganat jó- vagy rosszindulatú jellegére vonatkozóan is kaphatunk adatokat. A képsíkok ismeretében a daganat legnagyobb kiterjedésének síkja meghatározható, ami nagy segítséget jelent a műtéti behatolás optimális helyének kijelölésében.

Kezdetben az MR⁷, a SPECT⁸ és a PET képei is kétdimenziósan kerültek elénk. E vizsgálati eljárások diagnosztikus jelentőségét nem óhajtom részletesebben tárgyalni, mert megállapítható, hogy térábrázolási és

⁷ Az MR (Magnetic Resonance, mágneses rezonanciás tomográfia) nem röntgensugárral, hanem az ún. mágneses magrezonanciás jelenség alapján működik, amelyért Isidor Isaac Rabi 1944-ben Nobel-díjat kapott. A vizsgálati eljárást korábban kémiai analízisre használták. A páratlan nukleonszámú atommagnak mágneses momentuma van, amely külső mágneses térben rendeződik. A rendezett atommagok elektromágneses sugárral gerjeszthetők, majd relaxációjuk alatt válaszjel nyerhető. A válaszjel a protonok két relaxációs folyamatának időállandóitól és a protonok sűrűségétől függ. A különböző szövetekben ezen három tényező más és más, ez adja a képalkotás kontrasztját. A felvétel síkokban történik, de ez a CT-től eltérően bármely síkban kivitelezhető. Ennek a régen felfedezett vizsgálati módszernek biológiai diagnosztikai alkalmazását a CT-nél kidolgozott számítástechnikai eljárás alapozta meg.

⁸ A SPECT (Single Photon Emission Computer Tomograph) és a PET (Positron Emission Computer Tomograph) az élő szövetekbe juttatott izotópok sugárkibocsátását érzékeli és képezi le, azaz a SPECT az agy különböző területének vérátáramlásáról, a PET az agyszövet anyagcsere-viszonyairól ad felvilágosítást több-síkú képek formájában.

háromdimenziós számítástechnikai vonatkozásaik alapvetően azonosak a CT-ével.

A tudomány és technika minden vívmányát felhasználjuk a diagnosztikus térábrázolásban. A kérdés a reneszánsz festőknél is tudományos kihívásnak számított, ők is a kor technikai fejlettségének megfelelő eszközöket használták a feladat megoldására.

A korábban logikai rendszerekből álló geometriát elsősorban az itáliai festő-matematikusok alakították a tér tudományává: megteremtették a perspektíva tanát. Amikor a tárgyak képsíkra történő vetületét megadott arányok szerint számítják ki, a geometriai szerkesztést és a numerikus számítását kapcsolják össze. Az új tan legjobb összefoglalását Piero della Francesca (1420 körül -1492), a XV. század egyik festőóriása, a kor legjobb geométere adta *De Prospectiva pingendi* és *De quinque corporibus regularibus* című műveiben. Nem ismerte ugyan a derékszögű koordináta-rendszert, de módszerével több mint száz évvel megelőzte Descartes-ot.

A festők segédeszközöket is használtak, például a lyukkamerát vagy a hálót. Tájépeknél a helyszínen egy lyukkamerával papírra vetítették a látványt, s ezt a vázlatot használták a műteremben befejezendő festményhez. Háló használatkor a tárgyat a látósugárral vetítették a hálóra, s ezt azután átmásolták a festményre. E technikát több művész is megörökítette: Dürer (1471-1528) rézmetszete a mandolin képének megszerkesztéséről, vagy az idősebb Jean Cousin (1490-1560/61) fametszete a fekvő emberi test projekciójáról.

A XV. századtól sok festő dolgozott együtt matematikusokkal. Leone Battista Alberti (1404-1472) ismertette a perspektíva törvényeit és a szem sztereolátását – *Della pittura* (1435), *Ludi mathematici* (1450).⁹

⁹ Leone Battista Alberti két építészeti tankönyve Mátyás király könyvtárában a Corvinák között is szerepelt.

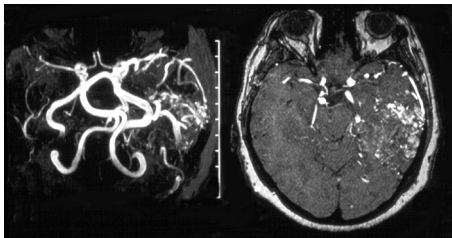
Feszegette a projektív geometria kérdéseit – ezeket később Girard Desargues (1591-1661) és Gaspard Monge (1746-1818) tisztázták.¹⁰ Ifjabb Albrecht Dürer (1471-1528) is képzett matematikus volt (*Underweyssung der Messung mid dem Zyrkel und Rychtscheyd*, 1525).¹¹ Fontos geometriai gondolatai a térgörbe (helix) – a tárgyak egymásra merőleges síkokra történő vetítése.

A háromdimenziós képalkotás a festészetben és az orvosi diagnosztikát szolgáló tomográfok (CT, MR, SPECT, PET) esetében is a képek olyan szintézise, amely az emberi látást szimulálja. A háromdimenziós diagnosztikus képek készítésénél az a cél, hogy a szeletekre darabolt és analizált képet újraegyesítsük – ezt a feladatot a gép képes megoldani, de az emberi látás és gondolkodás nem. Egy ismeretlen alakú, szeletekre vágott tárgyat nem tudunk felismerni és összerakni, a gép viszont igen.

A háromdimenziós CT-képek lehetőségét adnak a tárgy pontosabb megítélésére; olyan kvantitatív méréseket tesznek lehetővé, amelyek például a sugárterápia precíz megtervezése szempontjából alapvetőek. A komputer „ismeri” a térbeli belső adatokat is, így a mérések a tárgy belsejében is pontosak. Valósághű ábrázolás nélkül nem végezhető jó minőségű rekonstrukciós és plasztikai műtét, például a fejlődési rendellenességen alapuló koponyatorzképződések műtéti korrekciója. Háromdimenziós ábrázolás szükséges a nyílt mágneses műtöben történő munkához és

¹⁰ A projektív geometria azt kutatja, hogy melyek azok a tulajdonságok, amelyek a vetítés okozta torzuláskor sem mennek veszendőbe. Például a körnek minden „projektív” tulajdonsága sértetlenül átmegy a belőle vetítéssel keletkezett kúpszeletekre is. Elnyúlhat az árnyék, akár a végtelenbe is: mégsem szakadhat el egészen a gazdájától (Péter Rózsa).

¹¹ Dürer családja a Békés megyei Ajtós községből származott; idősebb Albrecht Dürer 1455-ben költözött Nürnbergbe, ahol ifjabb Albrecht Dürer, a legnagyobb német festő és grafikus született.



MR angiográfiás felvétel, amely kontrasztanyag nélkül is mutatja a kóros érelváltozást

a később említendő újabb terápiás beavatkozásokhoz is.

A számítógépes térbeli rekonstrukcióra alapvetően kétféle módszert dolgoztak ki:

1. A felület-rekonstrukció, amikor a kiválasztott struktúrának (csontok, tumor stb.) az adott irányból látott felületét ábrázoljuk, átlátszatlanul, nem törődve azzal, ami a felszín mögött van (mintha a fény visszaverődése következtében látnánk a tárgyat).

2. A volumen-rekonstrukció, éppen ellenkezőleg, az adott struktúrák teljes belső szerkezetét ábrázolja, kvázi-átvilágítás módszerével (mintha egy röntgensugár világitaná át a tárgyat). Ez utóbbi esetben az ábrázoláshoz nemcsak a felszínt alkotó voxeleket¹² használjuk fel, hanem a projekció sugarába eső összes voxel értékét, amit természetesen kiegészítünk valamilyen átlátszósági paraméterrel is. Ha ezeket az értékeket egyszerűen átlagoljuk, röntgenképszerű ábrázolást kapunk. A volumen-rekonstrukciónak egy speciális formája a CT- és MR-angiográfiánál a használt maximumintenzitás-projekció, ahol a vetítősugár mentén haladva az összes voxel megviz-

gáljuk, de csak a maximális értékűt, a legvilágosabbat vesszük figyelembe a projekciós képen. Ezek a legvilágosabb pontok nagy valószínűséggel az erek alkotói, így végül is az érszerkezet vetületi képét kapjuk.

A leggyakrabban használt felület-rekonstrukciónál a térhatást a festészetben is használt árnyékolási technikával, valamint a perspektív vetítés elvének kihasználásával végezhetjük. Az árnyékolást a számítógép programja alapvetően azon az elven végzi, hogy a felszínnek elkészíti az ún. *gradiens képét*, ami azt szimulálja, mintha a megfigyelő felől érkező fényt legjobban az a felületelem verné vissza, amely merőleges a látósugárra, legkevésbé pedig az, amelyik párhuzamos vele. A térélményt segíti az ún. *távolságkódolás* is, vagyis a távolabbi felületelem sötétebb lesz. Az árnyékolási technikát tükrözi az egyik legnagyobbat CT-MR gyártó cég, a Siemens kifejezése a felület-rekonstrukcióra: *Shaded Surface Display (SSD)*.

A CT háromdimenziós ábrázolásánál legegyszerűbb a csontok érzékeltetése, mert azok denzitásuk alapján a CT-képből könnyen szegmentálhatók.

Az agyfelszín rekonstrukciója az MR háromdimenziós ábrázolásával a legjobb, mert a liquor-agy kontraszt elég nagy. Speciális és leggyakoribb alkalmazása mégis az MR-angiográfia.

Háromdimenziós megjelenítés esetében a szeletképek konstrukciójával a tárgyat körül lehet járni, belsejébe be lehet hatolni, lehetségessé válik belső részeinek vizsgálata, és abban mérések végzése.

A 3D-képek további előnyei:

1. a centrális projekciós hatás nem érvényesül,
2. a káros szuperpozíciók eltávolíthatók,
3. olyan szöveti struktúrák is megjeleníthetők, amelyek különben csak kontrasztanyaggal feltöltve vizsgálhatók (például MR-angiográfia).

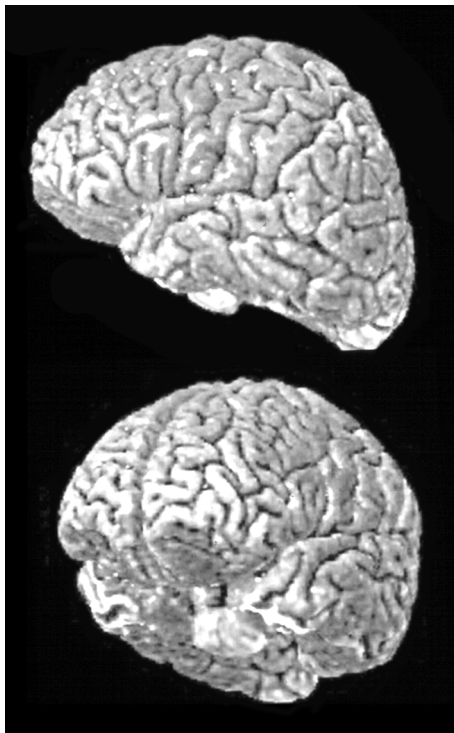
¹² A pixel a digitális képek (számok formájában tárolt képek) legkisebb eleme kétdimenziós megjelenítésben (négyzet); a voxel pedig háromdimenziós megjelenítésben (kocka). Minden pixelt (képpontot) egy szám jellemzi, amely a piros, a zöld és a kék színek erősségét összevonva adja meg. Annál finomabb a kép felbontása, minél több képpont jut egységnyi területre. A megjelenítés minőségét az egy hüvelykre jutó pixelek számával jellemzik. Színes fotó nyomtatásánál 1200 dpi (dot/inch – pont/hüvelyk) már jó részletgazdaságot ad.



3D felvétel – „belső táj”; az agy alapi érrendszer

A CT és az MR sztereo-megjelenítését mégsem rutinszerűen alkalmazzuk, hanem az említett speciális esetekre: a sugárkezelések dózisének számítására, rekonstrukciós és plasztikai műtétek tervezésére, kontraszt nélküli érfestésekre, bonyolult érkonglomerátumok térbeli tisztázására stb. A rutinvizsgálatra maradnak a kétdimenziós képek, mert egyszerűbben és gyorsabban elvégezhetők. Így továbbra is szükség van a térbeli képi gondolkodásra, amely

A 3D MR speciális felvételével az agyi tekervények tökéletesen vizsgálhatók



előfeltétele a diagnosztikának, de a koponyaüregben végzendő biztos manipulációnak is.

Láthattuk, hogy korunk matematikusai és számítógépes programtervezői a háromdimenziós ábrázoláshoz, a térlátás illúziójának eléréséhez, a térben elhelyezkedő test látszati jegyeinek megvalósításához felhasználták a művészek évszázadokkal korábban feltalált térábrázolási technikáit.

A számítástechnika korának hajnalán a lassú processzorok, a kevés memória és az első grafikus kártyák csak egyszerűbb, rajzfilmhez hasonló kétdimenziós ábrázolásra voltak alkalmasak. Háromdimenziós ábrázoláskor a rendszer apró sokszögekből (poligon), egyenes vonalak határolta síklapocskákból építi fel a térbeli alakzatokat. Minél több poligont használnak, annál részletgazdagabb a kép, de annál nagyobb számítástechnikai teljesítményre van szükség. Az újabb, ún. *felületalapú* grafikával dolgozó grafikus kártyák az ábrázolt tárgyának csupán a néző felé forduló oldalán megjelenő részleteit dolgozzák ki, így sok számítást takarítanak meg.

A tudományban napjainkban játszódik le az a folyamat, amely ismét szükségessé tette térbeli struktúrák síkká alakítását és ekképpen történő vizsgálatukat. Az agy háromdimenziós MR-vizsgálatakor a kérgi struktúrák analizéséhez rengeteg számítást kellett végezni. A barázdák és tekervények bonyolult felszínének síkká alakítása után egyszerűbbé válik a kérgi struktúra vizsgálata, a síkká való átalakítás ugyanakkor rendkívül bonyolult matematikai feladat (Haker és Jólesz közlése az interneten, 2001).

A mindennapi élet is igényel kétdimenziós vizuális élményeket. Az olvasást csak nehezítenék a térben ábrázolt betűk. Egy táj képét szívesen nézzük sztereo-megjelenítésben, de a térképet síkábrázolásban tudjuk jól használni. A mindennapi élet a

célnak megfelelően használja mind a két-, mind a háromdimenziós ábrázolási formákat.

*A műtét alatti kontroll:
a legnagyobb probléma*

Mint láttuk, az információelmélet, a számítástechnika és az ipari technika a modern képkalkoló eljárások és a háromdimenziós ábrázolások megteremtésével magas színvonalra emelte a műtét előtti diagnosztikát. Ettől a szinttől messze elmaradt a beavatkozások műtét alatti kontrollja, a műtét *alatti* diagnosztika. A műtét után a vizsgálatok (CT, MR) újra elvégezhetőek, ám a műtétben csak több nagyságrenddel gyengébb hatású vizsgáló módszerekkel voltunk képesek kontrollképeket készíteni (pl. röntgenkép-erősítő berendezéssel, újabban ultrahanggal). Sürgető szükség volt arra, hogy a műtét alatt is hasonló minőségű képkalkoló eljárásra támaszkodhassunk, pontosan követhessük a műtét alatt történeteket, hogy például egy infiltráló daganat eltávolításakor elértük-e a szükséges radikálisítást. Ekkor jött a zseniális megoldás: a nyitott mágneses műtő és a videó-regisztrációs eljárás. Ez a berendezés lehetővé teszi a műtét alatti MR-vizsgálatot és azt, hogy például a daganatot ábrázoló műtét előtti MR-képre szuperponálják a műtét alatt készült ugyanolyan minőségű MR-képet. Mindez háromdimenziós ábrázolásban úgy jelenik meg, hogy az agy ép és kóros struktúrái más-más színnel ábrázolódnak és a térben jól elkülöníthetők. A nyitott mágneses műtőben a műtét alatti történések teljesen objektíválhatók, nyomon követhetők és az új műtéti megoldások is (fókuszált ultrahangsebészet) ellenőrizhetők. Az utóbbi évtized e legjelentősebb tudományos eredményeinek kidolgozása a Harvard Egyetem Sebészeti Tervezési Laboratóriuma és a General Electric közös kutatásaként, a magyar származású Jólesz Ferenc vezetésével történt.

Összefoglalás

A szellemi és anyagi kultúra fejlődésében a vizuális impresszióknak nagy jelentőséget tulajdonítanak. Hatásosan fejt ki véleményét Kassák Lajos (1887-1967): „... aki lát, annak a képek talán még többet tudnak elmondani, mint a szavakba foglalt beszéd. Emlékszem rá, az optikai beszéd társadalmi jelentőségéről mennyit vitatkoztunk 10-15 év előtti írók és festők Bécsben, Prágában, Berlinben és Párizsban. Szent hitünk és érvek légiójával alátámasztott meggyőződésünk volt, hogy kultúrfejlődésünk vonala hirtelen kitérővel az akusztikai területről az optika területére kanyarodott.”

A különböző korokban a képkalkoló diagnosztikában és a festészetben is felmerült az igény a háromdimenziós ábrázolás technikájának kidolgozására. Mára a háromdimenziós ábrázolás nemcsak a korábbi célok megvalósulását tette lehetővé, de megoldott diagnosztikus feladatokat is: megvalósította a műtéti beavatkozás *online* ellenőrzését, és további terápiás beavatkozások kidolgozására adott lehetőséget (irradiációs dózistervezés, plasztikai műtétek, nyitott mágneses műtő, MR-angiográfia). Ugyanakkor a mindennapi gyakorlatban ma is kétdimenziós képeket elemzünk, és gondolatban helyezzük el a kóros elváltozást a koponyaürben. A virtuális lokalizáció könnyebb, ha több paraméter áll rendelkezésünkre. Képkalkoló diagnosztikus vizsgálatainknál az igényeknek megfelelően a két- és a háromdimenziós ábrázolási mód is használatos. A számítástechnikai szakemberek jól tudták hasznosítani azokat a megfigyeléseket és technikákat, amelyeket a régi festők és „festő-matematikusok” dolgoztak ki a térábrázolás megvalósításához.

A festészetben évszázadok szellemi energiáját fordították a térábrázolás technikájának kidolgozására. A XIX-XX. század a művészetben más irányú változást hozott.

A modern művészet nemcsak visszahozta a síkábrázolást, de szinte tagadta a háromdimenziós ábrázolás létjogosultságát. Az új eszmék talaján Henri Matisse (1869-1954) és a Fauve-ok így fogalmaztak: „a pontosság még nem igazság”, a szintetisták pedig kijelentették, hogy *a művészi munka nem expresszív, hanem reprezentatív.*

Nem szakmánk és feladatunk művészettörténeti kérdésekkel foglalkozni, de

ésre kellett vennünk, hogy a térábrázolás kérdésében milyen érdekes párhuzam, és néha ellentét található a képképző diagnosztikus vizsgálatok és a képzőművészetek között.

Kulcsszavak: térlátás, térábrázolás, síkábrázoló művészet, képképző diagnosztika, reneszánsz festő-matematikuskok, (komputerizált) 3D-s képképző

IRODALOM

- Broca, Paul (1861): Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé; suivies d'une observation d'aphémie. Bulletin de la Société Anatomique, Paris **6** 330-357.
- Budó Ágoston – Mátrai Tibor (1999): *Kísérleti fizika*. III. kötet, Optika és atomfizika. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.
- Dandy, Walter Edward (1918): Ventriculography following the injection of air into the cerebral ventricles. Annals of Surgery, Philadelphia, **68** 5-11.
- Dandy, Walter Edward (1919): Röntgenography of the Brain after the Injection of Air into the Spinal Canal. Annals of Surgery, Philadelphia, **70** 397-403.
- Fedorcsák Imre – Sipos László – Slowik Felicia – Osztie Éva (1998): CT vezérelt sztereotaxiás biopszia jelentősége és szerepe az idegsebészetben. Tapasztalataink 523 eset kapcsán. Orvosi Hetilap **139**. 475-478.
- Gulyás Balázs – Pásztor Emil (1998): Sztereotaxia, sztereotaxiás atlaszok, sztereotaxiás idegsebészet. Orvosképzés. **16**, 162-171.
- Gulyás Balázs – Roland, Per E. (1998): Visual Cortical Regions Involved in Stereovision. In: Gulyás Balázs – Ottoson, David – Roland, Per E. (eds) *Functional Organisation of the Human Visual Cortex*. Pergamon Press, Oxford
- Haker, Steven – Jolesz Ferenc (2001): Physics Today Online, **9**.
- Horsley, Sir Victor – Clarke Robert Henry (1908): The Structure and Functions of the Cerebellum Examined by a New Method. Brain **1**, 45-124.
- Jólesz Ferenc – Kikinis, Ron (1996): Új radiológiai módszerek sebészeti alkalmazása. LAM. **6** (Suppl.) S1-S16.
- Kassák Lajos (1987): Anyám címére. Magvető, Bp.
- Klee Felix (1975): Paul Klee élete, munkássága, hátrahagyott feljegyzések és kiadatlan levelek alapján. Corvina, Budapest
- Martos János – Nagy István – Deák György (1991): CT Investigation of the Craniocervical Junction: A Three-dimensional Study. Neuroradiology **33**, (Suppl.) 490.
- Molnár C. Pál (1976): Monumentális festészet. In: Solymár István (szerk.) *A képzőművészet iskolája*. 115-116. Képzőművészeti Alap Kiadóvállalata, Budapest
- Moniz, Egas (1927): L'encephalographie artérielle son importance dans la localisation des tumeurs cérébrales. Revue de Neurologie. **2**: 72-90. 342, 729.
- Pásztor Emil – Vajda János (1995): *Idegsebészet*. Medicina, Budapest
- Péter Rózsa (1999): *Játék a végtelennel*. Matematika kívülállóknak. Typotex, Budapest
- Rabinovszky Máriausz (1988): *Művészet és válság*. Corvina, Budapest
- Röntgen, Wilhelm Conrad (1895): *Über eine neue Art von Strahlen*. Sitzungberichte der Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft in Würzburg **137**. 132-141.
- Russell, John (1974): *The Meanings of Modern Art*. Harper & Row, New-York
- Spiegel, Ernst A. – Wycis, Henry T. – Marks, M. – Lee, Arnold J. (1947): Stereotactic Apparatus for Operations on the Human Brain. Science **106**, 349-350.
- Szeifert György – Major Ottó – Fazekas Ilona – Nagy Zoltán (2001): Effects of Radiation on Cerebral Vasculature: A Review. Neurosurgery **48**, 452-453.
- Tóth Katalin (2000): *A fény* – MozaWEB I.1., <http://www.mozaik.info.hu/MozaWEB/Feny/index.htm>. Mozaik Oktatási Stúdió, Szeged
- Várady Péter – Prasad, Dheerendra – Nyáry István – Vajda János – Steiner, Ladislau (1999): Gamma-kés idegsebészet. Orvosi Hetilap **140**, 331-345.
- Vörösmarthy Dániel (2002): *A szemüvegrendelés elmélete és gyakorlata*. Medicina, Budapest