

# Anatomická ilustrace 12.

## Novodobé lékařské zobrazovací techniky

Magdalena Chumchalová

„Dokonale provedené fotografie měly vždy význam pro pochopení světa kolem nás — jak pro vědce, tak pro veřejnost.“  
(redaktor časopisu Science Allen Hammond)

Po druhé světové válce se při sestavování anatomických atlasů začalo plně využívat fotografie a rentgenových snímků. Na konci 80. let 20. stol. pak do medicíny výrazně zasáhly počítače, které změnily nejen způsob diagnostiky a léčby, ale také prostorové pojetí obrazu, neboť dvojrozměrná anatomická zobrazení byla nahrazena virtuálními. Fotografie a technické záznamy, v nichž jsou počítačovou analýzou rentgenových paprsků, pomocí magnetické rezonance či ultrazvuku živé tělesné struktury zobrazeny s velkou přesností, umožňují poznávání vnitřních tělesných pochodů a struktur skrytých lidskému zraku. Přestože mnohé současné zobrazovací metody neslouží primárně k tvorbě obrazů a nesledují umělecké provedení, vznikají tímto způsobem dokumentační díla s velkou estetickou silou.

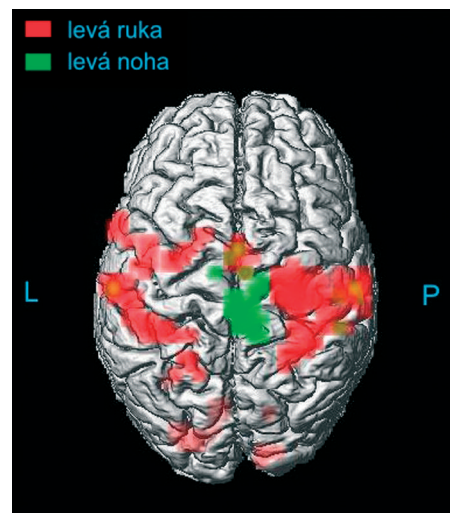
### Pokroky v zobrazování prenatálního vývoje

Rozvoj moderních diagnostických metod ve druhé polovině 20. stol. umožnil vhlédnout do nejranějších okamžiků existence lidského života. Při vyšetřeních se dnes nejen těhotné ženy běžně setkají s technikou ultrazvukové sonografie či echografie, která pracuje s odrazem zvukových vln od tkání s různými akustickými vlastnostmi. Principem ultrazvuku jsou zvukové vlny o průměrné frekvenci asi stokrát nad hranicí slyšitelnosti člověka (2–10 MHz). Čím vyšší kmitočet, tím lepší obrazové rozlišení, proto jsou povrchové struktury zobrazovány s vysokou frekvencí (7–15 MHz), zatímco hlubší struktury s menším kmitočtem (1–6 MHz), avšak s větším hloubkovým průřezem. Vhlédnout sonografem hlouběji do těla je však velmi složité, neboť akustická energie je částečně pohlcena zvukovou absorpcí a ztrácí se. Zvukové vlny jsou tedy vysílány transduktorem (elektromagnetickým zařízením používaným jako zesilovač) a procházejí vrstvami tkání a orgány těla. Jimi jsou odraženy zpět do transduktoru, kde se přijímané vibrace (ozvy neboli echa) mění na elektrické impulzy počítačově zpracované tak, aby na obrazovce vytvořily vidi-

teľný obraz v šedé škále (bílá barva určuje silnou odrazivost a černá slabou). Zobrazený nález pak lze studovat na monitoru, vytisknout jako fotografii (viz obr.) nebo nahrát na videokazetu či DVD.

V poslední době lze rozlišení různých tkání zlepšovat pokročilými fyzikálními a počítačovými postupy, jako je harmonické zobrazování, barevné kódování, trojdimenzionální rekonstrukce apod. Standardní součástí dnešních ultrazvukových přístrojů je využití Dopplerova efektu, který umožňuje zachytit např. směry toku krve a tak zobrazit prokrvení cílové tkáně, měřit průtok krve, rychlost toku či míru zúžení cév. Dopplerovské zobrazování zásadním způsobem změnilo vyšetřování v kardiologii, cévní chirurgii nebo porodnictví. Tento způsob využil na fotografiích německý gynekolog a porodník Rainer Jonas ve své obrazové knize *Der wunderbare Weg ins Leben* (2000), u nás vydané o rok později pod názvem *Zázračná cesta na svět*.

Přestože jsou jednotliví autoři lékařských fotografií většinou anonymní, existují osobnosti, které se svými snímky proslavily. Patří mezi ně legendární švédský fotograf-samouk, filmař, lékař a člen Švédské lékařské společnosti Lennart Nilsson, který během své více než 25leté práce na vědeckých

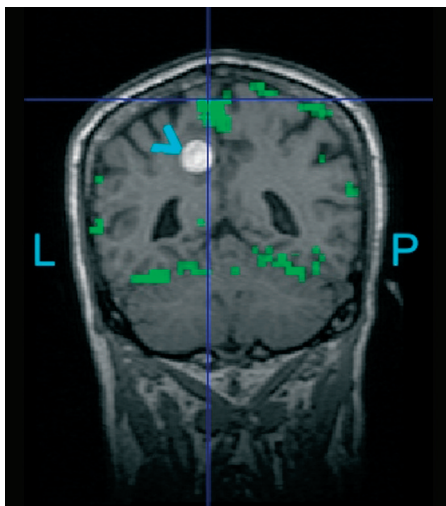


3D (trojrozměrné) zobrazení povrchu mozku vymodelované z ultratenkých skenů magnetickou rezonancí (MR). 3D modely nesoucí anatomickou informaci jsou fúzovány s funkčními mapami. Získáme tak představu o lokalizaci testovaných funkčních oblastí. Vyšetření na obr. ukazuje oblasti mozkové kůry aktivované při pohybu levé nohy a ruky. Orig. P. Bednařík, Fakultní nemocnice U sv. Anny v Brně

a obrazově promyšlených fotografiích uměleckým způsobem zachytil vznikající život. Jeho snímky poprvé publikované r. 1965 na titulu a 16 stranách amerického časopisu *Life* vzbudily stejné nadšení jako cesta člověka na Měsíc. Americké vesmírné sondy *Voyager I* a *II* vypuštěné r. 1977 do vesmíru nesou na svých palubách magnetické pásky s digitálním záznamem jeho fotografií počtů a vývoje člověka před narozením. Nilssonova kniha *A Child is Born* vychází v neustále doplňovaných vydáních a r. 1996 vznikl trojdielný film *Saga of Life* (Sága života), na němž pracoval jako kameraman. K laparoskopickému zachycení vývoje zárodku přímo v matčině těle (skrze stěnu dělohy) použil Nilsson miniaturní fotografické zařízení složené z endoskopu (trubičky z optického vlákna o průměru 2 mm k pozorování lidských útrobních zevnitř) s elektronickým bleskem u hrotu a s objektivem velikosti rýže o ohniskové vzdálenosti 0,4 mm, se širokým úhlem záběru (asi 100°) a s vysokou hloubkou ostrosti. Velmi slabé světlo z optických vláken bylo počítačově zesíleno, takže jasnost jeho endoskopických snímků je neuvěřitelná a zobrazené tváře lidských embryí představují skutečné portréty.

U nás se jako první zabýval embryogenezí lidského zárodku a jejími poruchami odborník na diagnostiku vrozených vývojových vad Jan Evangelista Jirásek. V 60. letech 20. stol. pracoval na metodě vývoje lidského embrya *in vitro* (první dítě ze zkumavky v ČR se narodilo v Brně r. 1980). V Nizozemsku vydal v r. 1983 *Atlas lidské prenatální morfogeneze s barevnými fotografiemi*, na němž pracoval v USA a jenž byl první lidskou embryologií na světě zarna-

Vlevo vyšetření páteře magnetickou rezonancí (MR) — metastáza do třetího bederního obratle s patologickou frakturou a částečnou expanzí do páteřního kanálu ♦ Vpravo znázorněn vztah prokrvené mozkové léze (šipka) a motorických oblastí mozkové kůry získaný vyšetřením funkční magnetickou rezonancí při pohybu pravé nohy (zeleně). Orig. P. Bednařík, Fakultní nemocnice U sv. Anny v Brně



menanou řádkovacím (rastrovacím) elektronovým mikroskopem. Mikroskopicko-anatomický popis tkání, jejichž detaily dokáže zvětšit až několik milionkrát, přinesl ilustrace nového rozměru.

Řádkovací elektronový mikroskop (SEM, ang. Scanning Electron Microscope) pracuje s preparáty naloženými ve formaldehydu či zmraženými tekutým dusíkem a potaženými tenkou vrstvou zlata, přes kterou projíždí svazek elektronů. Vyzářené elektrony vytvářejí trojrozměrná zobrazení, která lze zvětšit 100tisíckrát. Aby však vznikly obrázky zvětšené až 5milionkrát, je nutno připravit extrémně tenký vzorek, skrze který při využití transmisního elektronového mikroskopu (TEM) prochází na fotografickou desku nebo fluorescenční obrazovku elektromagnety zaostřený elektronový paprsek.

K nerozeznání od fotografií nasnímaných mikroskopem jsou micro-MRI snímky získané použitím magnetické rezonance (MR, viz dále) Alexandra Tsiarase publikované v knize From Conception to Birth: A Life Unfolds (Od početí k narození: Zjevení života), které vznikly počítačovou rekonstrukcí, tedy 3D zobrazovací metodou.

### Reálné modely aneb originál versus kopie

Lidské tělo je vnímáno nejen z hlediska estetického, vědeckého či filozofického, ale i eticko-náboženského. Je proto pochopitelná kritika expozic preparovaných lidských těl německého anatoma Gunthera von Hagens či amerického profesora biologie Roye Glovera, že zemřelé lidi neuctivě prezentují jako exponáty se snahou vyvolat senzaci. Stejně tak těla „svlečená“ z kůže vystavená od května 2007 v pražské Lucerně na kontroverzní expozici nazvané Bodies... The Exhibition (Těla... Výstava)

vyprovokovala pobouření a dokonce oficiální protest České anatomické společnosti. Pominu-li velice spornou etickou a estetickou stránku této výstavy, stojí za zmínku použitá metoda konzervace lidských těl objevená na konci 90. let 20. stol. zmíněným G. Hagensem. Nazývá se plastinace a lze pomocí ní připravit suché a prakticky nerozbitné preparáty schopné nahradit skutečnou pitvu pro výuku. Jelikož jsou při tomto postupu voda a tuk nahrazeny jakousi „plastelinou“, je možné se preparátu dotýkat, nepodléhá rozkladu a uchovává si (na rozdíl od preparátů ve formaldehydu) svoji původní barvu. Mrtvé tělo se přemísť do acetonu a následně zmrazí, pak se ve vakuu vloží do tekutého polymeru (křemíkové gumy nebo epoxidové pryskyřice), kde se aceton odpaří a je nahrazen tekutým plastem, který působením tepla, ultrafialového světla a plynu ztuhne.

Současné technologie umožňují vytvořit dokonale a esteticky působivě napodobeniny lidského těla a jednotlivých orgánů. Plastický způsob reprodukce odlišků využívají protézy a lékařské modely určené k výuce a vyráběné ze silikonu, trvanlivého a nerozbitného plastu, hlíny a keramiky, sádry či kovu. Odborníci vydavatelství Klett-Perthes stejně jako firma 3B SCIENTIFIC (<http://www.3bscientific.com>) vytvářejí prostorové anatomické modely, mezi něž patří torza ženského a mužského těla v životní velikosti a reálné hmotnosti složené z desítek vyjímatelných vnitřních orgánů, jež tvoří do sebe přesně zapadající skládačku. Při jejich výrobě se používá způsob vyvinutý v Německu: odlévání sochařsky připravených a výtvarně provedených modelů ve formě, která je po vyplnění plastem vložena do otáčivé pece. Po odlití a přesné montáži všech částí následuje precizní ruční malování svalů a jednotlivých orgánů,

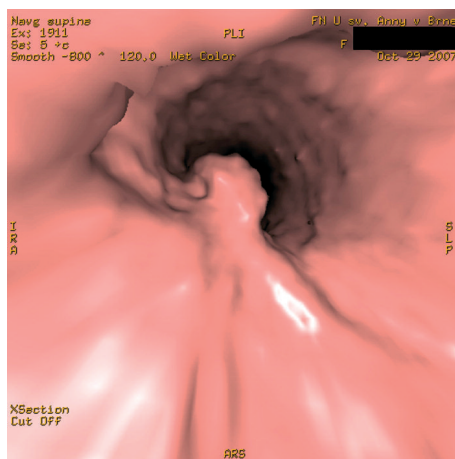
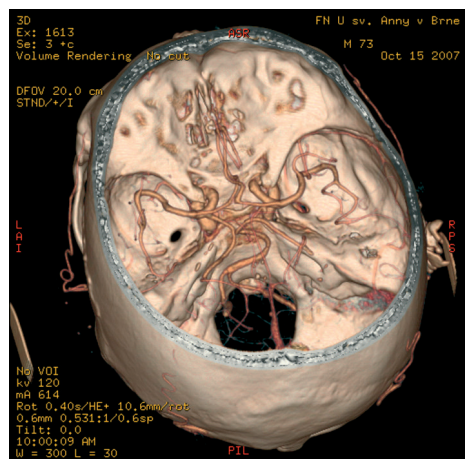
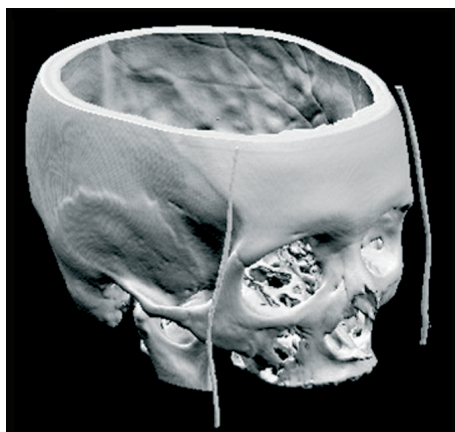
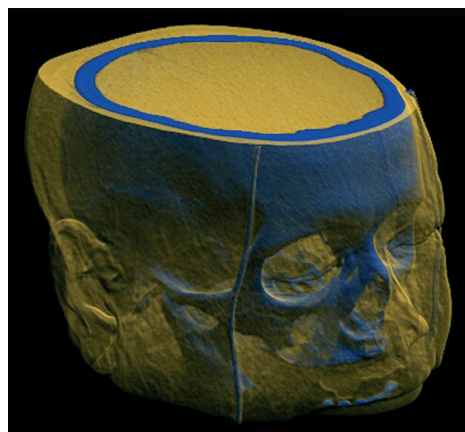
jejichž nerealistická barevnost má zvýrazňující a rozlišující funkci. Současné technologie počítačové podporovaného konstruování nebo rychlé výroby prototypů umožňují výrobu reálných modelů tkání částečně simulujících vlastnosti a chování skutečných tkání (Živa 2007, 1: 40–41). Na [www.biomedical.com](http://www.biomedical.com) si lze prohlédnout příklady takto vytvořených protéz, implantátů či zvětšených plastických rekonstrukcí zhotovených na základě propojení 2D ilustrací s počítačovou modelací.

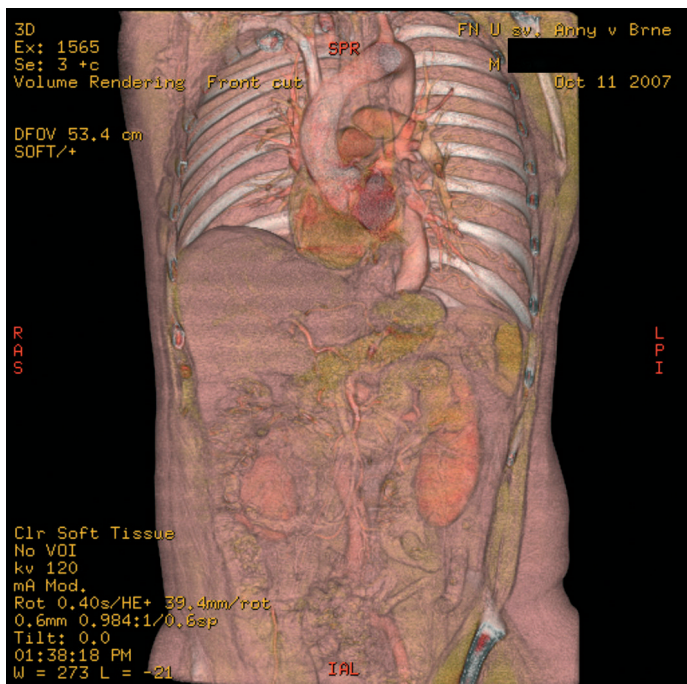
### Diagnostické zobrazovací přístroje

Nástup technické revoluce do medicíny dlouhou dobu symbolizoval rentgen (rtg, podle německého fyzika W. C. Röntgena, 1845–1923), jenž se stal odrazovým můstkem pro vznik většiny současných specializovaných lékařských zobrazovacích technik. Při prostém rtg snímkování (tzv. skiagrafie) se tělo prosvěcuje krátkovlnným zářením (paprsky X, Röntgenovo záření), které po průchodu tělem vytvářejí přímé stínové obrázky v negativu. Výsledný obraz lze vyvolat jako fotografii (rentgenogram) nebo se zobrazuje na televizní obrazovku či monitor počítače. Pevné struktury jako kosti absorbují více rtg paprsků, proto se po vyvolání negativu vyznačují nízkým zčernáním a zobrazují se bíle, zatímco měkké tkáně (např. svaly) mají nižší absorpci, a proto vysoké zčernání, takže jsou to odstíny tmavé. K jasnějšímu zobrazení dutých nebo tekutinou naplněných orgánů slouží kontrastní rentgenové záznamy, při nichž je třeba orgány naplnit „nepřehlednou“ kontrastní látkou. Jednou z hlavních obtíží při rtg zobrazování měkkých tkání jsou malé rozdíly v jejich absorpci X-záření, vedoucí k nízkému kontrastu zobrazení a nemožnosti rozlišení některých struktur. Speciální metodou zvýšení kontrastu je tzv. subtrakční radiografie, spočívající v odečtení dvou snímků těžce oblastí lišících se přítomností a nepřítomností či rozložením kontrastní látky obsahující atomy těžkých prvků, jako je baryum (dutiny, např. žaludek), nebo jódu (cévy) s cílem zvýraznit málo zřetelné anatomické struktury. V 50. a 60. letech se používala filmová subtrakce, při níž se rtg snímek s kontrastní látkou zkominoval a překryl s negativně přefotografovaným snímkem bez kontrastní látky. Tímto maskováním vznikl obraz, na němž bylo vidět pouze struktury naplněné kontrastní látkou. V současnosti se toto děje již ve formě digitální subtrakce, kdy s výsledným obrazem je možno dále manipulovat. Digitální subtrakční angiografie (kontrastní rentgenologické vyšetření cév) umožnila nástup přesné cílené a minimálně invazivní zákroky na srdečních tepnách, v mozku a kdekoli jinde v těle.

Vedle klasického snímkování se do radiologie zařadilo v 70. letech 20. stol. vyšetřování počítačovou tomografií (CT = Com-

*Nahoře 3D rekonstrukce generované z CT dat (počítačová tomografie) projektu The Visible Human Project (viz text). Orig. D. Schwarz, Ústav biomedicínského inženýrství Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně* ♦ *Vlevo dole CT angiografie mozkových tepen. Jde o zobrazení používané při podezření na akutní mozkovou příhodu* ♦ *Malý nádor ve sliznici tlustého střeva v obraze endoskopie vytvořené počítačovou simulací z CT dat, vpravo dole*

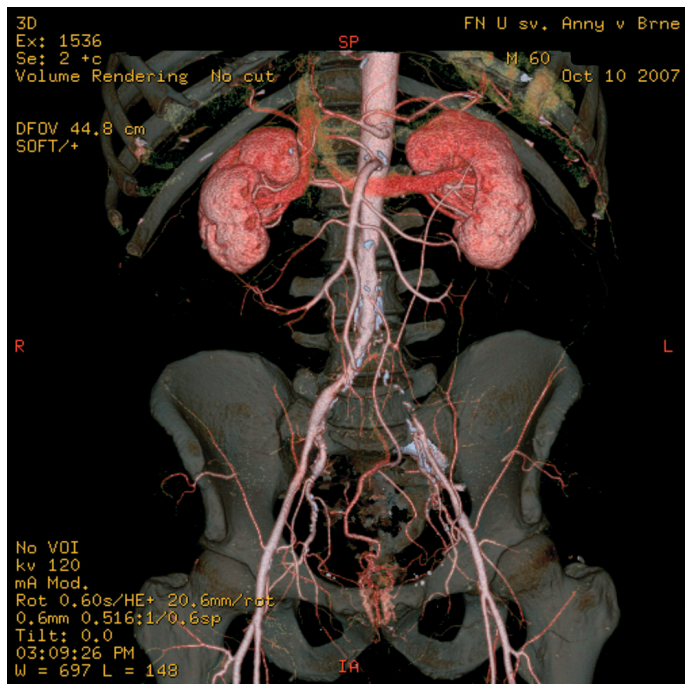




CT vyšetření hrudníku a břišní dutiny s kontrastní látkou ukazuje srdce s aortou a břišní orgány s vaskulaturou

puted Tomography). Za jeho objev získali v r. 1979 anglický elektroinženýr Godfrey Newbold Hounsfield (1919–2004) a americký lékař jihoafrického původu Allan MacLeod Cormack (1924–98) Nobelovu cenu. Používá také Röntgenova záření. Pacient je v daném řezu (řec. tomos = řez) prozářen z nejrůznějších úhlů v jedné rovině. Mnoho průmětů se zachycuje na řadě detektorů. Výsledná data jsou počítačově zpracována tak, že se tkáň v daném řezu rozdělí na jednotlivé prvky (voxely) a ke každému voxelu je přiřazena určitá hodnota absorpce záření (denzita). Ve 2D zobrazení řezu se z každého voxelu stane prvek obrazu (pixel), denzita se pak kóduje stupněm šedi v černobílé škále. Od původního Hounsfieldova principu CT, které nabíralo pomalu data po jednotlivých řezech, se dnes technologie posunula k multidetektorovým strojům produkujícím množství dat ve vynikajícím rozlišení až 0,3 mm. Použitím počítačové grafiky lze zobrazovat řezy v libovolných směrech (průčné, podélné a šikmé) a provádět různé geometrické reorientace, aby se co nejpřehledněji zobrazila požadovaná struktura (viz obr.).

Roku 2003 dostal americký chemik Paul Christian Lauterbur (1929–2007) a britský lékař Peter Mansfield (\*1933) Nobelovu cenu ve fyziologii a medicíně za objev týkající se snímání a zobrazování nukleární magnetickou rezonancí (NMR = Nuclear Magnetic Resonance či zkráceně MR). Tato původně analytická metoda byla později zdokonalena a rozvinuta jako metoda zobrazovací, tedy MRI (Magnetic Resonance Imaging) používaná od 80. let 20. stol. Využívá rozdílného chování jader vodíku, obsazeného a různým způsobem vázaného v tělesných tkáních v silném magnetickém poli. Tyto malé rozdíly vazby a chování lze po mnohonásobném zesílení signálu zobrazit s vynikajícím kontrastním rozlišením jednotlivých tkání. Signál se opět kóduje v černobílé škále. Výborné je zobrazení zejména měkkých tkání s obdobnou denzitou (mozek, mícha, kloubní struktury, svaly),



CT angiografie — uzávěr pánevní tepny. Vlevo je viditelný výpadek v náplni kontrastní látky. Snímky J. Krístka, Fakultní nemocnice U sv. Anny v Brně, pokud není uvedeno jinak



Příklad 2D zobrazení z ultrazvukového sonografu dvouměsíčního embrya. Porodnice Fakultní nemocnice Brno, z archivu autorky

což je trochu slabinou CT vyšetřování. Kromě toho je (na rozdíl od CT se škodlivým ionizujícím zářením) MRI technikou, u níž zatím nebyly žádné škodlivé účinky prokázány. Pacient se položí na pohyblivé lůžko a vsune do snímacího zařízení (tunelu) s velmi silným magnetem.

Zajímavou novou součástí vyšetřování na MR jsou funkční studie. Cílová oblast se měří opakovaně v určených časových úsecích a je tak možné sledovat např. pohyb (srdce, kloubů) či průtok krve značené kontrastní látkou. MR je natolik citlivou metodou, že je schopna zachytit např. i jemné změny prokrvení, které jsou odrazem zvýšené aktivity částí mozku a zobrazit tak mapy mozkové aktivity na různé podněty (viz obr.). V praxi se využívá např. před neurochirurgickými operacemi ke zjištění neurologického postižení, které bude následovat po odstranění nádoru a jeho okolí. Obdobné výsledky dává i 3D zobrazování měření potenciálů na elektroencefalografu (EEG).

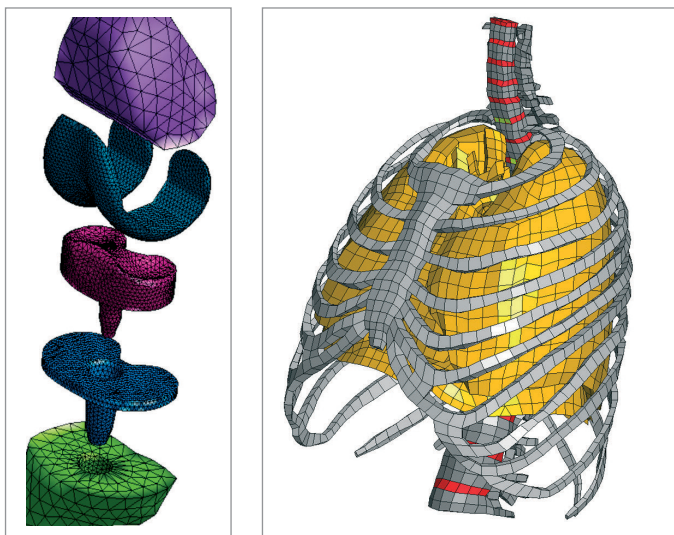
Další metodou je scintigrafie či gamagrafie (zobrazování pomocí záření gama) sloužící k získávání informací o orgánových funkcích a metabolismu. Pacientovi se při ní nitrožilně aplikuje malé množství radioaktivní látky (radiofarmaka), která vstoupí do jeho krevního oběhu či metabolismu a hromadí se v určitých tkáních. Radiofarmakum se rozpadá za vzniku gama záření, jež lze registrovat pomocí gamakamery.

Zabarvení každého pixelu (černobílé nebo barevné) je přímo úměrné radioaktivitě odpovídajícího místa v organismu. Výsledný obraz tak vypadá jako vytečkovaná silueta pacienta s kumulací v místech fyziologického prokrvení a v případném patologickém ložisku.

Gamakameru pomalu rotující kolem těla pacienta a snímající obrazy z různých úhlů využívá také jednofotonová emisní počítačová tomografie (SPECT = Single Photon Emission Computed Tomography). Pomocí počítačové rekonstrukce vytváří obrazy řezů kolmých na osu rotace kamery, z nichž konstruuje prostorové obrazy rozložení radioindikátoru ve vnitřních orgánech.

Metoda pozitronové emisní tomografie (PET) je jednou z nejnovějších a nejcitlivějších zobrazovacích metod. Ve většině aplikací se jako médium používá glukóza radioaktivně značená komponentou vyzařující pozitrony. Značená glukóza se zařadí do fyziologických procesů metabolismu a aktivitu je opět možné měřit a zobrazovat tomograficky, tj. v řezech. Jde zatím o nejcitlivější metodu, která může odhalit patologickou aktivitu např. metastatického postižení uzlin dříve, než se tato zvětší a bude zobrazitelná jinými metodami.

Pro efektivní využití diagnostického zobrazení je nejdůležitější rozlišení abnormálních objektů od ostatní tkáně. Ke zlepšení odlišení charakteru jednotlivých tkání se používají kontrastní látky, které nějakým způsobem modifikují fyzikální princip, na kterém daná metoda funguje. U rtg a CT se používají látky, které blokují, nebo naopak zvýšeně propouštějí paprsky X, u MR substance ovlivňující magnetické vlastnosti (např. mangan, železo), u ultrazvuku materiály s vysokou odrazivostí (echogenitou) pro ultrazvuk, např. ve formě plyných mikrobublinek. Ve velké míře je záměrem označit krev a zobrazit tak prokrvení cílové tkáně, protože záněty a nádory vykazují zvýšené prokrvení a nádor se tak po aplikaci kontrastní látky může jasně zobrazit i ve



*Výpočtové biomechanické modely vytvořené na Katedře mechaniky Fakulty aplikovaných věd a ve Výzkumném centru Nové technologie Západočeské univerzity v Plzni ve spolupráci se společností ESI Group. Vlevo model totální kolenní náhrady, vpravo model hrudníku. Orig. L. Hynčík a L. Čihálové*

tkání, která se původně zdála být zcela homogenní.

Příklady výše zmíněných technik lze shlédnout např. na <http://db2.photoresearchers.com/feature/infocus147> nebo v digitální knihovně anatomických informací ([www.anatomyatlases.org/HumanAnatomy/CrossSectionAtlas.shtml](http://www.anatomyatlases.org/HumanAnatomy/CrossSectionAtlas.shtml)), kde jsou k dispozici anatomické atlasy příčných řezů všech částí lidského těla.

### Virtuální model těla

Barevnost nejvíce odpovídající skutečnosti poskytuje kryosekce (kryo = mráz, nízká teplota, sekce = zde pitva) pracující nikoli *in vivo*, nýbrž se zmraženými vzorky (řezy) skutečných lidských tkání. Jde o postup, jímž byl vytvořen první virtuální model člověka, k jehož počítačovému sestavení poskytlo podklady reálné tělo. V rámci amerického projektu The Visible Human Project® (VHP — Viditelný člověk) se mužské (38letý vrah z Texasu) a ženské mrtvé tělo (59letá anonymní dárnice) na dobu čtyř měsíců zmrazilo v roztoku modré želatiny a vody, kde se vzorek zpevněl, a potom bylo rozřezáno na tenké příčné řezy určené k nafotografování. Vzniklé snímky všech 1 878 částí (1 mm tenkých) mužského těla byly v r. 1994 propojeny, čímž vznikl unikátní model ([www.uchsc.edu/sm/chs/browse/browse\\_m.html](http://www.uchsc.edu/sm/chs/browse/browse_m.html)). Ještě přesnější virtuální žena ([www.uchsc.edu/sm/chs/browse/browse\\_f.html](http://www.uchsc.edu/sm/chs/browse/browse_f.html)) sestavená z více než 5 000 fotografií zachycujících model ve vrstvách tenkých pouze 0,33 mm byla dokončena o rok později. Roku 2000 byly tyto fotografie naskenovány a převedeny do sérií digitálních obrazů ve velkém rozlišení určených k tvorbě trojrozměrných zobrazení. Jednotlivé řezy lze najít na <http://library.med.utah.edu/WebPath/HISTHTML/ANATOMY/ANATOMY.html>.) Projekt probíhal při americké Národní lékařské knihovně ([www.nlm.nih.gov](http://www.nlm.nih.gov)) a byl při něm vyvinut prototyp systému databáze anatomických obrázků a online prohlížeče. Lze zde zobrazit libovolnou rovinu průřezu lidským tělem pomocí navigačních nástrojů. Každá oblast těla může být po-

stupně odkrývána jako kousky skládačky. Do těchto prostorových obrazů virtuálních těl se člověk může zcela ponořit a opakovaně je pitvat.

Podobným způsobem prezentuje lidské tělo interaktivní program s anatomickými strukturami The Visible Human Dissector kombinující přednosti pitvy s technologiemi virtuální reality. Naproti tomu The Visible Human Dataset (VHD) zahrnuje kompletní vzhled do nitra lidského těla statickým způsobem, což je vhodné

zejména pro 2D či 3D digitální atlasy. Data z VHP jsou využita i k tvorbě úplného lidského modelu v rámci evropského projektu CHARM (Comprehensive Human Animation Resource Model), jenž se zaměřuje na poskytování a dodávání prostorově strukturovaných a pohyblivých modelů. Na adrese [http://data.idnes.cz/g/zdravi/prurez\\_clovekem.html](http://data.idnes.cz/g/zdravi/prurez_clovekem.html) je možno shlédnout ukázkou takového dynamického průřezu člověkem a na [www.uchsc.edu/sm/chs/gallery/gallery.html](http://www.uchsc.edu/sm/chs/gallery/gallery.html) lze najít 3D modely a animace s rotujícím lidským srdcem či trupem nebo dolní končetiny s postupně zprůhledňovanými svaly, pod nimiž se ukazují spodní vrstvy.

Digitální údaje VHD byly r. 1997 použity také v elektronické knize Alexandra Tsirase nazvané Body Voyage (3D View of the Human Body by Time Warner Electronic Publishing) představující realistické putování lidským tělem z pohledu chirurga. Obrazy z VHP použil také Thomas McCracken z Oxfordské univerzity, jehož Nový atlas anatomie člověka s CD u nás vyšel r. 2002. Lidské tělo zobrazené v sugestivní virtuální realitě obsahuje přes 2 000 anatomických struktur, které mohou být zkoumány podobným způsobem jako při skutečné pitvě.

Na Univerzitě ve Washingtonu vznikl r. 1994 projekt Digital Anatomist Project (<http://da.biostr.washington.edu/da.html>) motivovaný snahou představit anatomii pomocí modelů, jež by vizualizovaly hluboké anatomické znalosti. Výsledkem je interaktivní atlas mozkových struktur Digital Anatomist: Interactive Brain Atlas od Johna W. Sundstena obsahující 2D a 3D pohledy na lidský mozek včetně animací (<http://da.biostr.washington.edu/DA-ATLASES/Neuroanatomy/DAMovies/hippoYtrans.mov>). Na adrese <http://da.biostr.washington.edu/cgi-bin/DA/imageform> je pak možno studovat sérii počítačově rekonstruovaných obrázků z neuroanatomických atlasů zahrnující virtuální povrchy, řezy, MRI skeny a 3D animace.

### Počítačové modelování na základě medicínských obrazových dat

Při modelování, tedy obrazové prezentaci vícerozměrných modelů, se vytváří matematický popis geometrie povrchu živých tkání. K vytvoření prostorového objektu na základě série prostorově navazujících 2D snímků řezů daným objektem se využívá software pro vizualizaci a 3D rekonstrukci objektů, např. Amira.

Počítačové modelování se skládá ze dvou hlavních částí: rekonstrukce a topologického modelování, jehož základem je tomografický obraz doplněný o mechanické strukturální údaje a kombinaci 2D obrysů s 3D povrchy. Topologické informace určuje model založený na mechanických vlastnostech skutečné anatomické struktury. Prvním krokem je segmentace tkání a struktur z medicínských obrazů. Segmentovaná data je třeba dále převést na odpovídající vektorová data, při čemž dochází ke změně prostorových modelů na geometrické neboli vektorové povrchové modely. Z každé tělní struktury je obkreslovacím přístrojem vytvořeno 500–700 digitálně v obrysech zakreslených fotografií, jež se propojí spojovacími liniemi mezi konturami tvořenými velkým počtem malých trojúhelníků, až vznikne trojúhelníková síť. Data jsou prostorově nespojitá a vektorizací vytvořené geometrické modely vrstevnaté a hranaté, proto je nutné povrchové síť vyhladit. Vzniklé struktury jsou obaleny příslušným povrchem, čímž lze dosáhnout živě a přesvědčivě působícího obrazu daných tkání, jež jsou vystínovány a zprůhledněny tak, aby se zviditelnily struktury pod nimi. Vzniklé geometrické modely lze využít např. pro vývoj biomechanických modelů (viz obr.) sloužících pro výpočet účinků mechanického zatížení na lidské tělo, např. během nárazu automobilu. Geometrická síť se předělá na síť speciálních prvků (např. trojúhelníky a čtyřúhelníky ve 2D a čtyřstěny a kvádry ve 3D), která je vhodná pro výpočet. Těmito prvky se navíc přiřadí mechanické vlastnosti. Pro vytvoření sítě je důležité získat geometrické uspořádání jednotlivých orgánů z načtených CT dat nebo snímků řezů (např. z VHP). Podrobný návod, jak je možné připravit geometrickou síť pro biomechanický model, lze najít na <http://www.kme.zcu.cz/granty/biofrvs/amira.html>. K vytvoření modelu jsou třeba nejen znalosti z anatomie, ale i mechaniky a výpočetní techniky.

Virtuální manipulace s tkáněmi prostřednictvím jejich geometrických modelů se využívají pro plánování operací, simulace chirurgických výkonů (napodobování chování tkání při nebo po operaci), navigace (promítání trojrozměrných rekonstrukcí na obrazovce k lepší představě operátora), návrhy implantátů a náhrad na míru nebo pro výuku a bezpečný trénink lékařů s možností stálého opakování. Geometrické modely se však používají také jako předloha pro tvorbu již zmíněných reálných modelů.

U některých 3D programů je možné uložit vytvořené interaktivní modely na webu ve formátu pro zobrazování a animaci trojrozměrných modelů VRML (Virtual Reality Modeling Language). Internet v současnosti představuje nesmírně cenný zdroj informací s množstvím multimediálních a obrazových dat. Stále výkonnější procesory spolu s důmyslnými matematickými postupy činí z virtuální anatomie interdisciplinární obor vyžadující specializované pracovníky, zároveň však dostupnost a rychlý rozvoj výpočetní techniky umožňuje aplikované a mnohem širší využití těchto anatomických modelů. Vývoj dalšího zdokonalení lékařského zobrazování však ukáže až budoucnost.

*Za poskytnutí obrázků a cenné připomínky k textu děkujeme všem autorům obrázků a zejména J. Krístkovi a J. Provazníkovi.*