

CT S DUÁLNÍ ENERGIÍ ZÁŘENÍ: ZOBRAZENÍ MUSKULOSKELETÁLNÍHO SYSTÉMU

DUAL-ENERGY CT: IMAGING OF THE MUSCULOSKELETAL SYSTEM

nové zobrazovací metody

Jiří Ferda
Jan Baxa
Eva Ferdová
Boris Kreuzberg

Klinika zobrazovacích metod
LF UK a FN v Plzni

Přijato: 20. 12. 2009

Korespondenční adresa:

doc. MUDr. Jiří Ferda, PhD.
Klinika zobrazovacích metod
LF UK a FN v Plzni
Alej Svobody 80, 304 60 Plzeň
e-mail: ferda@fnplzen.cz

SOUHRN

Ferda J, Baxa J, Ferdová E, Kreuzberg B. CT s duální energií záření: zobrazení muskuloskeletálního systému

Nový způsob zobrazení CT se dvěma různými energiemi záření umožňuje nové způsoby analýzy získaných dat. Jedním z nejnovějších aplikací CT s duální energií záření je muskuloskeletální zobrazování. Spektrum klinicky použitelných aplikací zahrnují posouzení distribuce jódu ve tkáních při hodnocení perfuze tkání; analýza přítomnosti na proteiny bohatých strukt, jako jsou vazy, šlachy a chrupavka; a dále analýza tkání na přítomnost urátových depozitů u dně. V přehledovém sdělení jsou představeny a diskutovány možnosti zobrazení a klinické využití jednoho každého způsobu analýzy CT s duální energií záření v muskuloskeletálním zobrazování.

Klíčová slova: CT s duální energií záření, muskuloskeletální zobrazování, dna.

SUMMARY

Ferda J, Baxa J, Ferdová E, Kreuzberg B. Dual-energy CT: imaging of the musculoskeletal system

A novel application of the X rays with two different energies during CT examination allowed new analysis of acquired data. One of the newest applications of the dual-energy CT is musculoskeletal imaging. The spectrum of clinically usable applications covered iodine distribution assessment in evaluation of the tissue perfusion; subtraction of the skeleton, analysis of the protein-rich tissues like ligaments, tendon and cartilage; and the analysis of the tissue uratic deposits in gout. In the preview article, there are listed and discussed the imaging and clinical potential of each kind of dual-energy CT analysis in musculoskeletal imaging.

Key words: dual-energy CT, musculoskeletal imaging, gout.

ÚVOD

Výpočetní tomografie představuje excelentní metodu k zobrazení struktury kosti i ostatních osifikovaných nebo kalcifikovaných tkání. Zatímco tkáň obsahující vápník se výrazně odlišuje od ostatních díky vysoké absorpci, ve tkáních měkkých jsou absorpční rozdíly ve spektru rentgenového záření celkem malé. Díky těmto minimálním odchylkám v absorpci záření je považována výpočetní tomografie za obecně málo vhodnou k zobrazení svalů, šlach, vazů a chrupavek. Rozdíly v absorpci v měkkých tkáních může zvýšit intravenózní podání jódové

kontrastní látky, nicméně jde jen o tkáň dobře prokrvené, jako jsou svaly nebo hypervaskularizované nádory.

Od roku 2007 je možné ve výpočetní tomografii rutinně používat zobrazení pomocí dvojí energie záření (tzv. dual-energy CT či DECT), její první aplikace byly v posuzování distribuce jódu ve tkáních a dále v subtrakci skeletu z CT angiografie, méně byla využívána metodika k chemické analýze materiálů – k posouzení složení urolitiázy (1, 2). Zobrazení měkkých tkání s analýzou kolagenu je nejnovější technikou využívající DECT.

V prezentovaném sdělení se zabýváme možnými aplikacemi metodiky DECT v muskuloskeletálním zobrazení a jejich klinickým využitím a našimi praktickými zkušenostmi.

ZÁKLADNÍ METODIKA VYŠETŘENÍ

Expozice

Při zobrazení měkkých tkání pomocí DECT využíváme dvou-zdrojový systém (dual-source CT, či DSCT) pracující v režimu duální energie (Somatom Definition DSCT, Siemens Healthcare, Forchheim, Německo). Tkáně jsou simultánně prozařovány dvěma zdroji záření X a záření je registrováno dvěma detektorovými soustavami (1). Soustava A pracuje s napětím na rentgenové trubici 140 kV, soustava B s napětím 80 kV. Jsou získány dvě sady dat odpovídající vyšší energii a nižší energii záření. Akvizice dat každou soustavou využívá úhrnné kolimace doplněné tzv. Z-samplingem $2 \times (32 \times 0,6 \text{ mm})$ rezultující v získání dvojice 64 datových stop na každé otočení rotoru gantry o 360 úhlových stupňů. Data jsou rekonstruována pomocí algoritmu se středním potlačením rozhraní speciálně určeným pro analýzu DECT. Kromě sad dat pořízených s energií odpovídající 140 kV a 80 kV jsou rekonstruována data také odpovídající běžně používané energii 120 kV (3). Obrazy příslušné 120 kV jsou vypočítány spojením hrubých dat pořízených 140 a 80 kV v poměru 3 : 1. V oblasti hlavy a krku a dle volných částí končetin je celková expoziční dávka shodná s expozicí běžnou při vyšetřování jednodrožovým CT přístrojem, neboť je možné partikulární dávky výrazně snížit. V oblasti trupu a pletenců je nutné, pokud je použit dvouzdrojový přístroj první generace, celkovou dávku zvýšit o jednu třetinu až jednu polovinu.

Aplikace kontrastní látky

Při zobrazení duální energií záření muskuloskeletálního systému aplikujeme jódovou kontrastní látku intravenózně jen v případech zobrazení nádorových onemocnění nebo při současném zobrazení cév v dané oblasti – při CT angiografii. V případě intravenózní aplikace kontrastní látky používáme kontrastní látku s vysokým obsahem jódu – iomeprol s koncentrací 400 mgI/ml (Iomeron 400, Bracco, Milano, Itálie). Vysoký podíl jódu zkvalitňuje podmínky pro kalkulaci distribuce jódu v tkáni.

Analytické rozhraní

Ve speciálním analytickém softwarovém rozhraní je provedena analýza dat, jednotlivé algoritmy se liší podle požadovaného typu analýzy, nicméně vždy jsou k postprocessingu používány dvě sady dat pořízené nižší a vyšší energií záření. Podstatné jsou dva základní typy algoritmů pro datovou analýzu tří materiálů a dvoumateriálový (1, 2, 4). Pro oddělení prvku s vysokým atomovým číslem ze směsi je používán algoritmus rozdělení pro tři materiály se dvěma uzlovými body a charakteristikou chemického prvku – tuk, měkké tkáně a jód případně kalcium (obr. 1 a 2). Pro chemickou analýzu měkkých tkání jde používán algoritmus rozdělení pro dva materiály s jedním uzlovým bodem (obr. 3 a 4). Výsledkem je kalkulace mapy koncentrace analyzovaného materiálu v jednotlivých voxelech. Tyto mapy je možné dále použít pro

kvantifikaci obsahu daného materiálu, vizualizaci pomocí barevných map nebo pro trojrozměrné zobrazení.

ZÁKLADNÍ POSTUPY V ANALÝZE DAT DECT

Analýza distribuce jódu

Při akvizici dat je aplikována kontrastní látka, pokud jde o zobrazení při podezření na krvácení do měkkých tkání, nebo jde o zobrazení cévního zásobení v oblasti apendikulárního skeletu. Jódová kontrastní látka je podána tak, aby byla zachycena arteriální, respektive pozdní arteriální fáze nástřiku k.l. Při posuzování syčení nádorové tkáně kontrastní látkou je vhodnější časování pro zachycení fáze žilní.

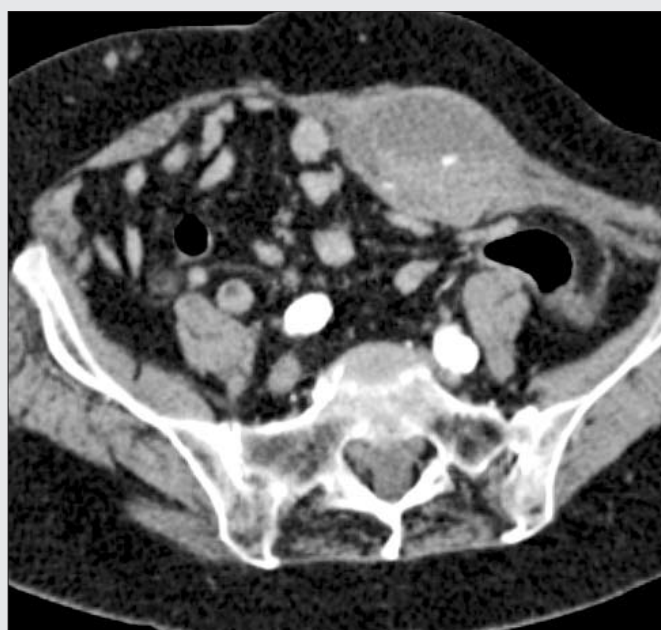
Pro analýzu distribuce jódu je používána metoda rozdělení pro tři materiály, kdy uzlovými body je tuk, měkké tkáně a jód. V každém voxelu je vypočtena hodnota denzity, která v jednom každém z voxelů je hodnotou přidanou jódem ke genuinní hodnotě tkáně (1, 2, 5, 6). Takto je vypočtená mapa distribuce jódu a mapa virtuálního nativního zobrazení, složením map vzniká obraz vzhledu běžného CT zobrazení po aplikaci kontrastní látky ekvivalentní použití 120 kV. Obě z map slouží i ke změření denzity tkáně nezávislé na obsahu jódu i ke kvantifikaci obsahu jódu. V mapě distribuce jódu jsou kromě vlastního jódu zahrnuty i ostatní prvky s vysokým (respektive vyšším) atomovým číslem, mezi něž v CT diagnostice patří i kalcium; ovšem kalcium je zahrnuto i do mapy virtuálního nativního zobrazení. Kromě hodnocení úrovně nasycení měkkých tkání jódem lze při komparaci mapy distribuce jódu s mapou virtuálního nativního zobrazení odlišit dokonce infiltraci trabekulární kosti hypervaskularizovaným nádorem (2, 4).

Při zobrazení muskuloskeletálního systému je tedy DECT analýza distribuce jódu vhodná pro nádory muskuloskeletálního systému, bez provedení nativního zobrazení lze určit úroveň nasycení nádorové tkáně kontrastní látkou. Pokud nádor infiltruje trabekulární kost, je možné podle mapy distribuce jódu odlišit oblasti nádorem infiltrované od oblastí bez infiltrace, jinak nepostizitelnou ani provedením „klasického“ nativního i postkontrastního vyšetření.

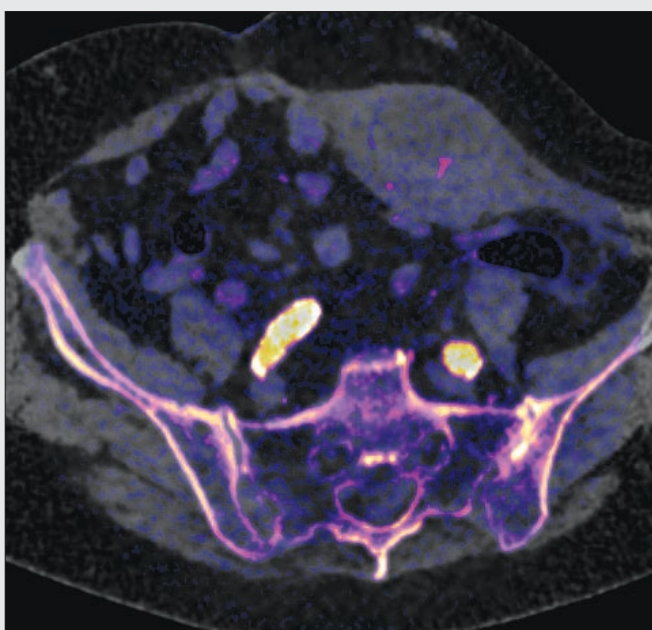
Kromě diagnostiky muskuloskeletálních nádorů je DECT metodikou vhodnou k vizualizaci aktivní krvácení do tkání (7, 8). Typickými případy jsou hematomy u nemocných s předávkováním antikoagulační léčby nebo poranění cév, případně krvácení spojené s rupturami výdutí. Mapa distribuce jódu potlačuje „signál“ měkkých tkání bez obsahu jódu, a tím se zvýrazňuje denzita kontrastní látky unikající z cév (7) a rovněž se zobrazuje obsah jódu v krvi v hematomu (8). Obě tyto známky jsou přímým důkazem aktivity krvácení.

Subtrakce skeletu

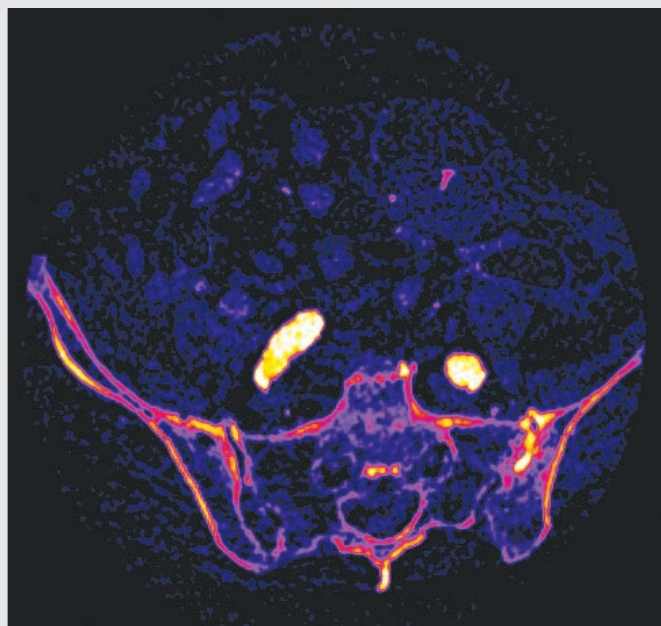
Absorpční vlastnosti kalcia, a tím vlastnosti sloučenin obsahujících ve vazbě vápník se na jedné straně odlišují od jódu – jód má ve tkáních extrémní pokles v denzitě při použití 140 kV v porovnání s denzitou při použití 80 kV. Na druhou stranu se značně odlišují od organických sloučenin bez obsahu prvků s vyšším atomovým číslem. Subtrakce skeletu je využívána k lepšímu zobrazení cévního zásobení v oblasti končetin (9, 10).



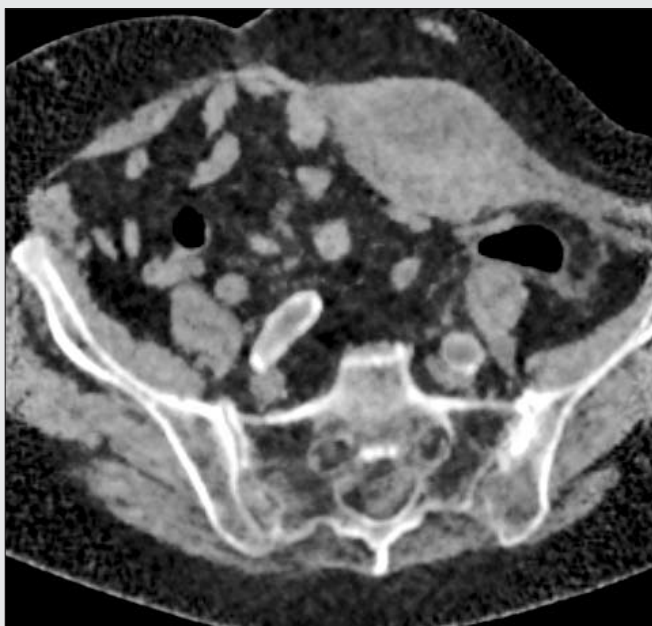
▲ Obr. 1A



▲ Obr. 1B



▲ Obr. 1C



▲ Obr. 1D

Obr. 1. Krvácení do přímých břišních svalů s aktivní extravazací. A – obraz ekvivalentní k 120 Kv; B – fúze mapy distribuce jódu a virtuálního nativního obrazu; C – mapa distribuce jódu; D – virtuální nativní obraz

Fig. 1. Active bleeding into the abdominal wall muscles. A – image equivalent to 120 kV; B – fusion of the iodine distribution map and virtual unenhanced images; C – iodine distribution map; D – virtual unenhanced image

ZOBRAZENÍ VAZŮ, ŠLACH A CHRUPAVEK

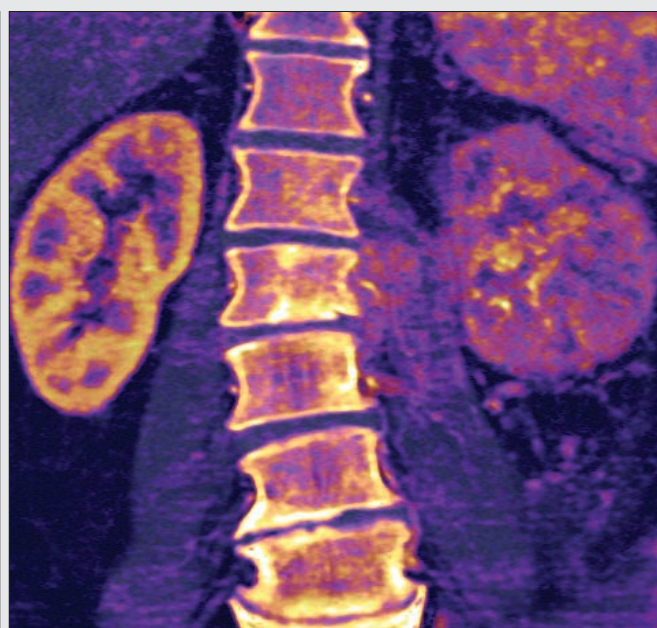
Ligamenta, šlachy a chrupavky obsahují v poměru k ostatním měkkým tkáním vysokou koncentraci prvků s relativně vyšším atomovým číslem. Jedná se především o síru, která je přirozenou součástí aminokyselin s vysokým výskytem v kolagenu, dále jde o prvek přítomný v relativně vysoké koncentraci v chrupavce. Analýzou materiálové dekompozice je obdobně jako mapa distribuce jódu vytvořena mapa distribuce kolagenu a jemu podobných substancí (11). Tato mapa se stává

vlastně zobrazením, ze kterého je odstraněn vápník, tudíž skelet. Kromě odstranění skeletu, je mapa distribuce kolagenu při fúzi s voxely obsahujícími kalcium použitelná také k potenciaci kontrastu šlach v trojrozměrných zobrazeních ruky a nohy. Díky izotropnímu zobrazení prostoru se submilimetrovým rozlišením je dosaženo vysoké kvality trojrozměrného modelu dané anatomické oblasti.

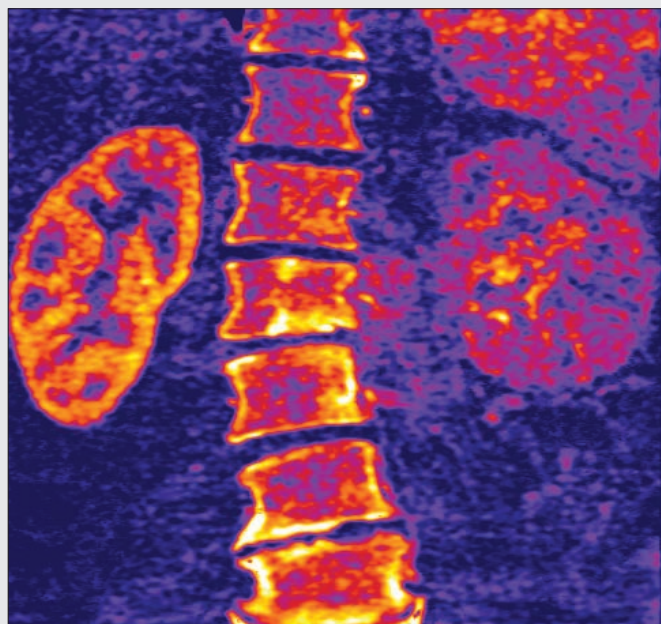
Praktickými aplikacemi je vizualizace silných šlachových struktur v oblasti kolene – ligamentum patellae, fibulární kolaterální vaz, v oblasti bérce je to především zobrazení Achillovy šlach. V případě poranění těchto struktur v rámci



▲ Obr. 2A



▲ Obr. 2B



▲ Obr. 2C



▲ Obr. 2D

Obr. 2. Infiltrace obratlových těl bederní páteře hypervaskularizovaným renálním karcinomem. A – obraz ekvivalentní k 120 kV; B – fúze mapy distribuce jódu a virtuálního nativního obrazu; C – mapa distribuce jódu; D – virtuální nativní obraz

Fig. 2. Infiltration of the lumbar spine bodies with hypervascularized renal cell carcinoma. A – image equivalent to 120 kV; B – fusion of the iodine distribution map and virtual unenhanced images; C – iodine distribution map; D – virtual unenhanced image

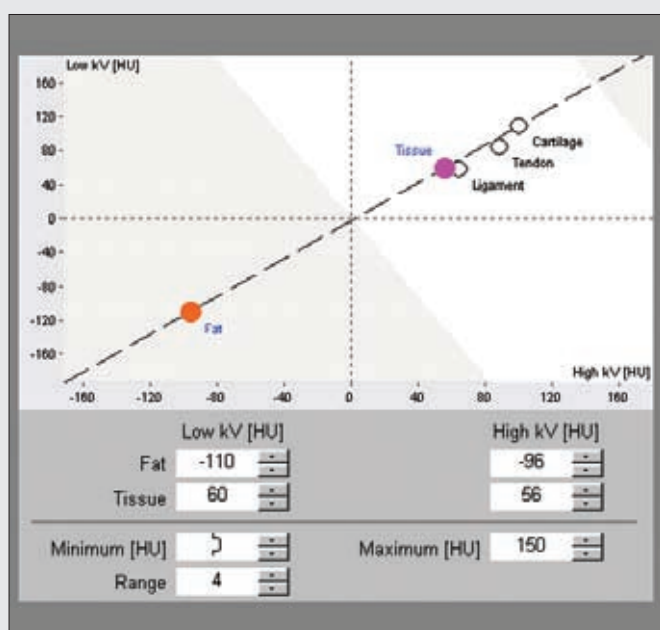
závažných poranění, je možné takto nahradit zobrazení magnetickou rezonancí, nicméně zobrazení jemnějších struktur, jako jsou tibiální kolaterální vaz kolena nebo patelární retinacula DECT, selhává (11). Za magnetickou rezonancí ve většině případů DECT zaostává.

Pomocí barevné stupnice použité pro vizualizaci koncentrace kolagenu a jemu podobných substancí lze zobrazit patologické stavy související s relativním poklesem obsahu proteinů. Zatím ve fázi prvních pokusů je použita analýza dat DECT k vizualizaci degenerativních změn chrupavky, především chondrálního edému. Chondrální edém je typický zvýšením obsahu vody, což se projeví poklesem koncentrace látek charakteru proteinů.

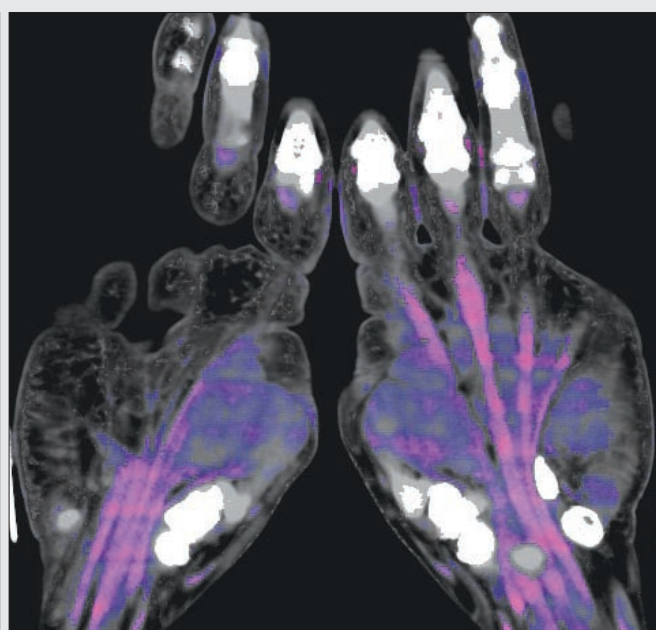
Vzájemný vztah DECT k analýze stavu chrupavky pomocí relaxometrie v magnetické rezonanci není dosud znám a je pravděpodobné, že dávka záření snižuje možnosti širšího klinického uplatnění metody. V případech, kdy je magnetická rezonance kontraindikována, se může stát, že půjde v budoucnu o alternativní metodu zobrazení chrupavky.

ZOBRAZENÍ URÁTOVÉ ARTROPATIE

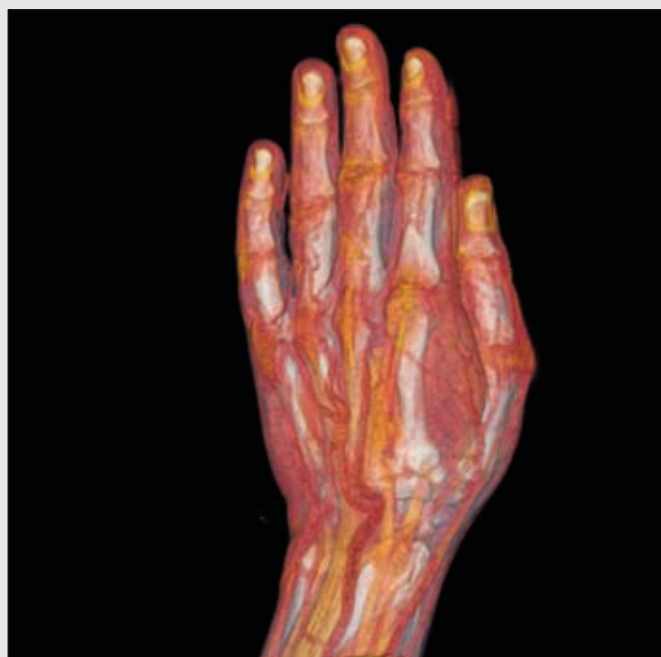
Urátová artropatie je nejčastějším postižením kloubů krystalickými depozity. První klinické pokusy se zobrazení pomocí



▲ Obr. 3A



▲ Obr. 3B



▲ Obr. 3C



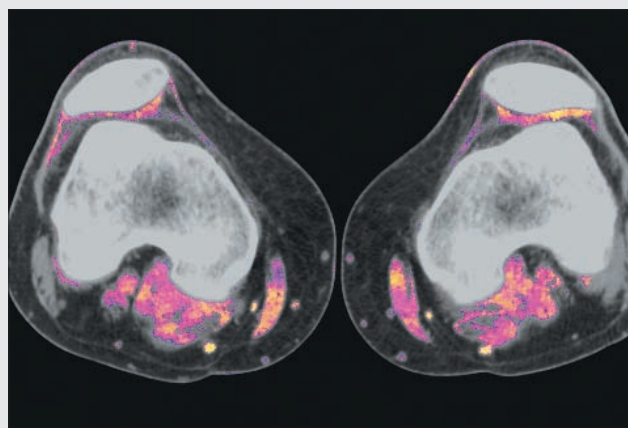
▲ Obr. 3D

Obr. 3. Tkáňová dekompozice pro zobrazení vazů; šlach a chrupavky. A – algoritmus dekompozice; B – mapa distribuce kolagenu; C a D – 3D zobrazení šlach ruky

Fig. 3. Tissue decomposition used in the imagin of ligaments; tendons and cartilage. A – decomposition algorithm; B – map of collagen distribution; C and D – 3D imaging of the hand tendons

DECT byly provedeny již v začátcích pokusů s DECT. Základní myšlenka zobrazení urátových depozitů v kloubních oblastech vychází z jednoho z prvních algoritmů analýzy DECT – chemické analýzy nefrolitiázy. Používán je dvoumateriálový algoritmus, kdy je pomocí rozdílů mezi densitou kyseliny močové a jejích soli při použití záření s nižší energií a při použití záření s vyšší energií patrný nikoliv pokles, ale mírný vzestup density (12, 13). Tento rozdíl odlišuje urátová depozita od kalcifikací, kdy je pozorován při použití vyšší energie záření pokles density. Metoda odlišení urátové a non-urátové nefrolitiázy je

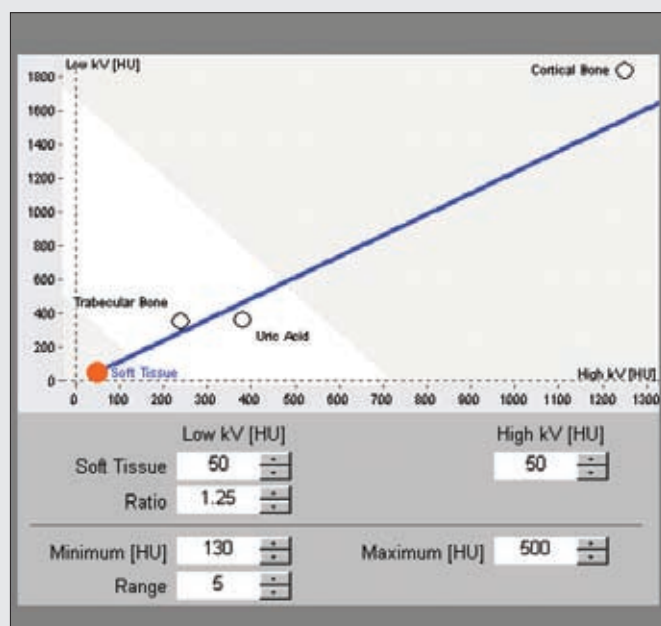
vysoce spolehlivá, v *in vitro* i *in vivo* studiích je dosahováno přesnosti blížící se 100 % (12, 13). Podobným algoritmem je generován obraz distribuce kalcia a urátu, kdy jsou jednotlivé chemické látky odlišeny barevnou mapou. Problémy byly pozorovány s určením chemické povahy drobných konkrémentů velikosti pod 2 mm – nicméně všechny tyto konkrémenty patrné na CT obrazech byly urátové. Podobnými problémy může trpět i analýza depozitů dny, v literatuře však tyto problémy u dny nebyly dosud studovány.



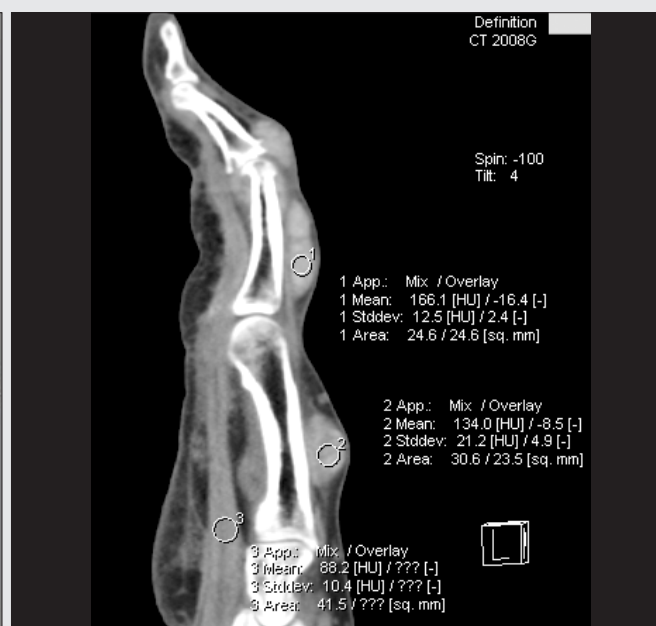
◀ Obr. 4

Obr. 4. Zobrazení degenerativních změn chrupavky na patele a femuru u incipientní gonartrózy u nemocného s patelou typu loveckého klobouku

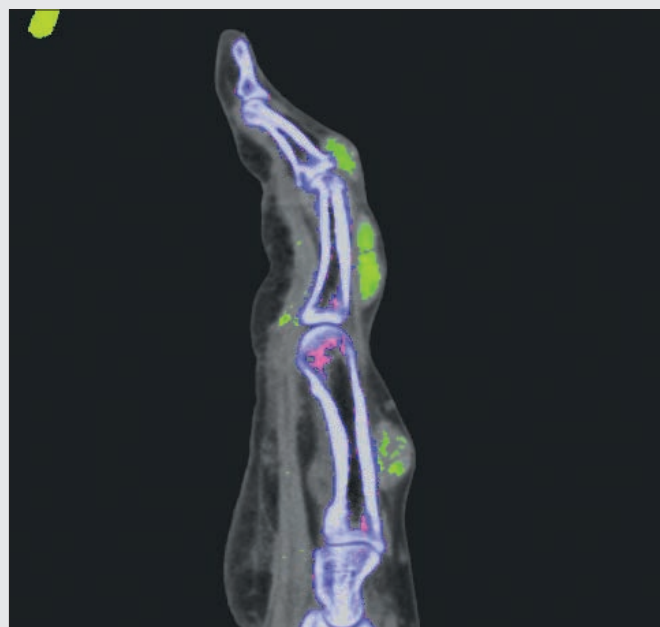
Fig. 4. Imaging of the degenerative changes of the patellar and femoral cartilage in patient with incipient osteoarthritis



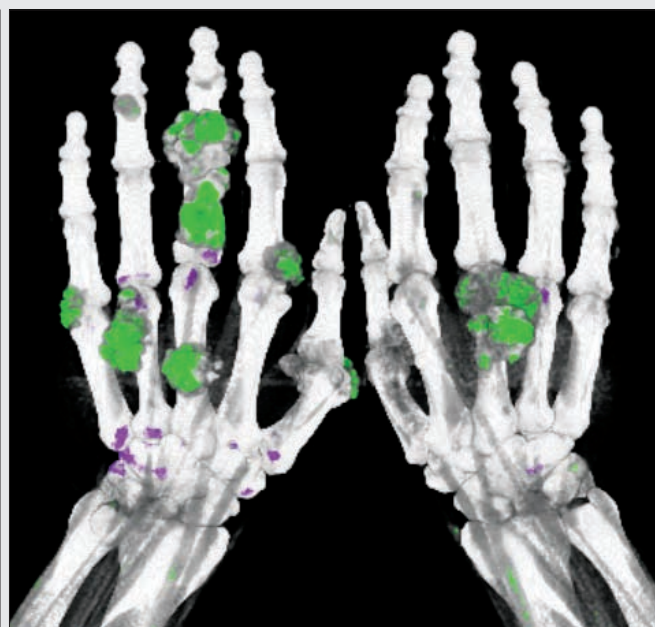
▲ Obr. 5A



▲ Obr. 5B



▲ Obr. 5C



▲ Obr. 5D

Obr. 5. Dna. A – algoritmus dekompozice; B – běžný CT obraz; C – barevné zobrazení přítomnosti urátu; D – 3D zobrazení tofů

Fig. 5. Gout. A – decomposition algorithm; B – obvious mage; C – color-coded image of the urate presence; D – 3D color coded image of the tophaceous gout

DISKUSE

U DECT muskuloskeletálního systému se snad nejvíce dosud projevuje nový trend v CT diagnostice a neodmyslitelně se nabízí srovnání s magnetickou rezonancí.

Současný trend v CT zobrazení je vyjádřitelný je tvrzením, že se jedná o one-stop-shop – tedy je snaha o jedinou, často velmi krátkou akvizici dat s následnou podrobnou analýzou dat, s mnohočetnými rekonstrukcemi obrazů z jediného souboru hrubých dat. Magnetická rezonance jde spíše opačným směrem vývoje – extenzivní používání akvizic dat s různými parametry nejprve nativně poté po podání kontrastní látky. U muskuloskeletálního systému se obvykle zcela diametrálně odlišuje doba vyšetření – CT několik málo sekund, MRI často desítky minut.

Obecně přijímaným tvrzením, že měkké tkáně jsou hůře zobrazitelné pomocí CT, je v současné době možné částečně oponovat výsledky zobrazení pomocí DECT. Magnetická rezonance sice zůstává suverénní metodou k zobrazování svalů, vazů, šlach i chrupavek, ale tím, že pomocí analýzy dat DECT je možné získat velké množství různých kalkulovaných map, začíná se posilovat postavení CT v této oblasti. Zajisté DECT magnetické rezonanci v muskuloskeletálním zobrazení nemůže konkurovat, ostatně není to ani účelem vývoje nových metod CT zobrazení (11). V současné době se stále častěji v diskusích o metodologických inovacích CT hovoří o tzv. „magnetizaci“. Myšleno je to, že jsou získávány často velmi odlišné obrazy svoji kvalitou i výpovědní hodnotou.

Výjimečné postavení zřejmě bude vybudováno v krátké době pro zobrazení dny. První ústní sdělení (Nicolau, Vancouver General Hospital) ukazují, že DECT je přínosnější než punkce kloubu. Jde o první specifickou zobrazovací metodu, která je schopná provést chemickou analýzu krystalických depozit v kloubu, a prokázat, že se jedná o urát (14). První písemné sdělení bylo publikováno i o využití kvantifikace úbytku urátů ze tkání po urátolytické terapii použitím DECT (15). Vzácně byly ústně prezentovány případy kombinace analýzy přítomnosti urátu a CT angiografie s použitím mapy distribuce jódu k průkazu akutního dnového záchvatu, který se projevoval zvýšeným syčením periartikulárních tkání jódem (Thorsten Johnson, Klinikum Grosshadern).

ZÁVĚR

Zobrazení muskuloskeletálního systému pomocí CT s duální energií záření X má v současnosti především tři základní aplikace – semikvantitativní posouzení perfuze tkání pomocí analýzy distribuce jódu vhodnou pro zobrazení muskuloskeletálních nádorů nebo detekce krvácení; použití k subtrakci skeletu ze zobrazení je spíše používáno u CT angiografie v oblasti hlavy a krku, případně pánve a končetin. Chemická analýza přítomnosti urátů ve tkáních má již své klinicky ověřené indikace. Použití analýzy přítomnosti kolagenu je v současnosti jen vzácně zkoušeno, nicméně, při zobrazení tkání v rámci především u traumatických stavů ji lze k vizualizaci šlach, ligament a chrupavky využít, nestane se však konkurencí pro magnetickou rezonanci.

LITERATURA

1. Johnson TR, Krauss B, Sedlmair M, Graser A, Bruder H, Morhard D, Fink C, Weckbach S, Lenhard M, Schmidt B, Flohr T, Reiser MF, Becker CR. Material differentiation by dual energy CT: initial experience. *Eur Radiol* 2007; 17(6): 1510–1517.
2. Graser A, Johnson TR, Chandarana H, Macari M. Dual energy CT: preliminary observations and potential clinical applications in the abdomen. *Eur Radiol* 2009; 19(1): 13–23.
3. Yu L, Primak AN, Liu X, McCollough CH. Image quality optimization and evaluation of linearly mixed images in dual-source, dual-energy CT. *Med Phys* 2009; 36(3): 1019–1024.
4. Liu X, Yu L, Primak AN, McCollough CH. Quantitative imaging of element composition and mass fraction using dual-energy CT: three-material decomposition. *Med Phys* 2009; 36(5): 1602–1609.
5. Sommer WH, Graser A, Becker CR, Clevert DA, Reiser MF, Nikolaou K, Johnson TR. Image quality of virtual noncontrast images derived from dual-energy CT angiography after endovascular aneurysm repair. *J Vasc Interv Radiol* 2010; 21(3): 315–321. Epub 2010 Jan 22.
6. Graser A, Johnson TR, Hecht EM, Becker CR, Leidecker C, Staehler M, Stief CG, Hildebrandt H, Godoy MC, Finn ME, Stepansky F, Reiser MF, Macari M. Dual-energy CT in patients suspected of having renal masses: can virtual nonenhanced images replace true nonenhanced images? *Radiology* 2009; 252(2): 433–440.
7. Stolzmann P, Frauenfelder T, Pfammatter T, Peter N, Scheffel H, Lachat M, Schmidt B, Marincek B, Alkadhi H, Schertler T. Endoleaks after endovascular abdominal aortic aneurysm repair: detection with dual-energy dual-source CT. *Radiology* 2008; 249(2): 682–691.
8. Ferda J, Novák M, Mírka H, Baxa J, Ferdová E, Bednářová A, Flohr T, Schmidt B, Klotz E, Kreuzberg B. The assessment of intracranial bleeding with virtual unenhanced imaging by means of dual-energy CT angiography. *Eur Radiol* 2009; 19(10): 2518–2522.
9. Tran DN, Straka M, Roos JE, Napel S, Fleischmann D. Dual-energy CT discrimination of iodine and calcium: experimental results and implications for lower extremity CT angiography. *Acad Radiol* 2009; 16(2): 160–171.
10. Yamamoto S, McWilliams J, Arellano C, Marfori W, Cheng W, Mcnamara T, Quinones-Baldrich WJ, Ruehm SG. Dual-energy CT angiography of pelvic and lower extremity arteries: dual-energy bone subtraction versus manual bone subtraction. *Clin Radiol* 2009; 64(11): 1088–1096.
11. Sun C, Miao F, Wang XM, Wang T, Ma R, Wang DP, Liu C. An initial qualitative study of dual-energy CT in the knee ligaments. *Surg Radiol Anat* 2008; 30(5): 443–447.
12. Stolzmann P, Kozomara M, Chuck N, Müntener M, Leschka S, Scheffel H, Alkadhi H. In vivo identification of uric acid stones with dual-energy CT: diagnostic performance evaluation in patients. *Abdom Imaging* 2009 [Epub ahead of print].
13. Stolzmann P, Leschka S, Scheffel H, Rentsch K, Baumüller S, Desbiolles L, Schmidt B, Marincek B, Alkadhi H. Characterization of urinary stones with dual-energy CT: improved differentiation using a tin filter. *Invest Radiol* 2010; 45(1): 1–6.
14. Artmann A, Ratzenböck M, Noszian I, Trieb K. Dual Energy CT – a New Perspective in the Diagnosis of Gout. *Rofo* 2010; 182(3): 261–266.
15. Bacani AK, McCollough CH, Glazebrook KN, Bond JR, Michet CJ, Milks J, Manek NJ. Dual energy computed tomography for quantification of tissue urate deposits in tophaceous gout: help from modern physics in the management of an ancient disease. *Rheumatol Int* 2009 [Epub ahead of print].