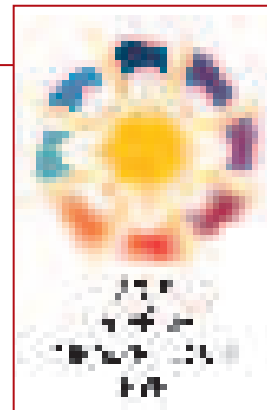


SZIGETI KRISZTIÁN – OSVÁTH SZABOLCS

A kinetikus képkalkotás és a röntgen forradalma



A röntgensugárzáson alapuló képkalkotás az egyik legelterjedtebb diagnosztikai módszer napjainkban. Számos alkalmazása ismert az orvosi, a fogorvosi gyakorlatban, az anyagtudományban és a biztonságtechnikában is. Cikkünkben egy olyan új algoritmust mutatunk be, ami várhatóan jelentős változásokat hoz a röntgenképkalkotások mindennapi felhasználásában. Hogy megértsük ennek az új, kinetikusnak nevezett röntgenképkalkotásnak az alapjait, vissza kell mennünk az időben mintegy száz évet.

Wilhelm Conrad Röntgen 1895. november elején katódsugárcsővel kísérletezve találta meg azt a láthatatlan elektromágneses sugárzást, amely a cső mellett elhelyezett fekete kartonpapírba csomagolt fényképezőlemezen – számára nem megmagyarázható módon – feketedést mutatott annak előhívása után. A számos kísérlet során azt is észre vette, hogy a szobában lévő fluoreszcens festékekkel bevont ernyőn a sugárzás fényfelvillanást okoz. Teszi ezt akkor is, ha a sugárforrás és az ernyő közé falapot, vékony fémlemezt vagy akár a kezét helyezi. Csak a fényfelvillanás intenzitása csökken bizonyos mértékben. Ezt az általa felfedezett sugárzást X-sugárnak nevezte el.

Az első ismert és publikált röntgenkép, amely fontos tudománytörténeti mérföldkő, Röntgen feleségének a kezéről készült 1895. november 8-án, húsz perces expozíciós idővel. A tudós korszakalkotó eredményeit a *Nature* folyóirat is megjelentette 1896-ban. Később számos nyelvterületen tiszteletből az X-sugárzást röntgensugárzásnak nevezték el feltalálójáról. Eredményeinek fontosságát elismerve, Röntgen lett az első fizikai Nobel-díjas 1901-ben, valamint a német császár nemesi rangot is adományozott neki, bár ez utóbbit nem fogadta el.

Ezen tudományos eredmények alapozták meg a radiológiának nevezett orvosi területet. Az új tudományág célja az lett, hogy az emberi testben rejelő anatómiai szerkezeteket és életteni folyamatokat láthatóvá tegye a vizsgáló orvos számára. A röntgensugárzás klinikai gyakorlatba ültetése nagyon gyorsan, szinte évek alatt lezajlott. Minden orvos számára azonnal nyilvánvaló lett a módszer előnye és jelentősége, így a kétdimenziós átvilágítás hatására létrejövő kép, a klinikai diagnosztika elterjedt elemévé vált. Hogy megértsük a módszer lényegét, tegyünk egy kis kitérőt a történelemből a tudományos világba.

A test szöveteinek sugárzáselnyelő képessége a bennük lévő anyagoktól, vagyis pontosabban az anyagok rendszámától függ. Amikor egy átvilágításos röntgenképet készítünk, a röntgenforrásból származó sugárzás áthalad a vizsgálni kívánt objektumon, amelyben a sugárzás egy része elnyelődik, a maradék sugárzás az ernyőn vagy napjainkban inkább egy digitális képrögzítő detektoron elnyelődve képet alkot.

Az átvilágítás során az egymás mögött lévő anyagok elnyelési képességei – idegen szóval denzitásai – összeadódnak, vagyis az átvilágítás során egy úgynevezett szummációs képet kapunk. Ezt a képet mindenki ismeri, hiszen ezt használják

máció elméletét már 1917-ben kidolgozták, de a számolások tényleges elvégzése a XX. század elején még elképzelhetetlen volt a megfelelő számítógépek hiányában. A valódi képkalkotó eszköz, az úgynevezett komputer tomográf (CT) – a görög *tomos* = szelet alapján – csak 1971-ben jelent meg először a klinikai gyakorlatban.

A röntgensugárzáson alapuló képkalkotás jelentősen megváltoztatta az orvosi szemléletet és olyan forradalmi változást hozott, amelyhez hasonló a védőoltások, a genetika és a molekuláris biológia előretörésén kívül nem nagyon ismerünk az orvostudományban. A röntgensugárzás felfedezése azonban nemcsak tudományos



1. ábra. Hosszú expozíciós idejű felvétel készítése helyett több rövid ideig tartó felvétel készül, mindegyikük 10 ms expozíciós idővel. Az átlagkép adja a klasszikus, már régóta ismert röntgenképet, a szórás kép (kinetikus kép) a röntgendetritás változásain keresztül a szervezetben végbemenő mozgásokat ábrázolja

a klasszikus tüdőrontgen esetében vagy egy törés helyzetének meghatározására is. Ha elforgatjuk a testet és több irányból végzük el ezt az átvilágítást, akkor elméletben egy sokismeretlenes egyenletrendszer megoldását követően megkaphatjuk a test minden részének elnyelési értékeit, nem csak a szummációs képet. Ezen módszer alapjául szolgáló Radon-transzfor-

ertelembe volt forradalmi, hanem számos formában új művészeti és esztétikai értéket is teremtett.

Az orvosi képkalkotásban azóta számos más elven működő, a röntgentől jelentősen eltérő képkalkotó eszköz is megjelent (ultrahang, MRI), de a mindennapi klinikai gyakorlatban manapság is a röntgen használata a legelterjedtebb.

Az előnyök mellett fontos megemlíteni, hogy a röntgenképkalkotási módszernek nagy hátránya is van. A röntgensugárzás, mint minden ionizáló sugárzás, képes az életfolyamatok számára fontos makromolekulákat összetartó kémiai kötések eltépni. Az ebből fakadó kockázatokra és kóros elváltozásokra már nagyon korán fény derült. A röntgensugárzással dolgozó orvosok keze tipikus tüneteket mutatott a determinisztikus sugárhatás következtében, a „röntgenkéz” fogalomra vált. A sztochasztikus sugárhatásként jelentkező daganatos megbetegedések és halálások száma is jelentősen megnőtt a röntgensugárzással dolgozó orvosok között. Röntgen 1923-as halála is egy vékonybél-karcinóma következménye volt, ami valószínűsíthetően összefüggött az őt ért röntgensugárzás-terheléssel.

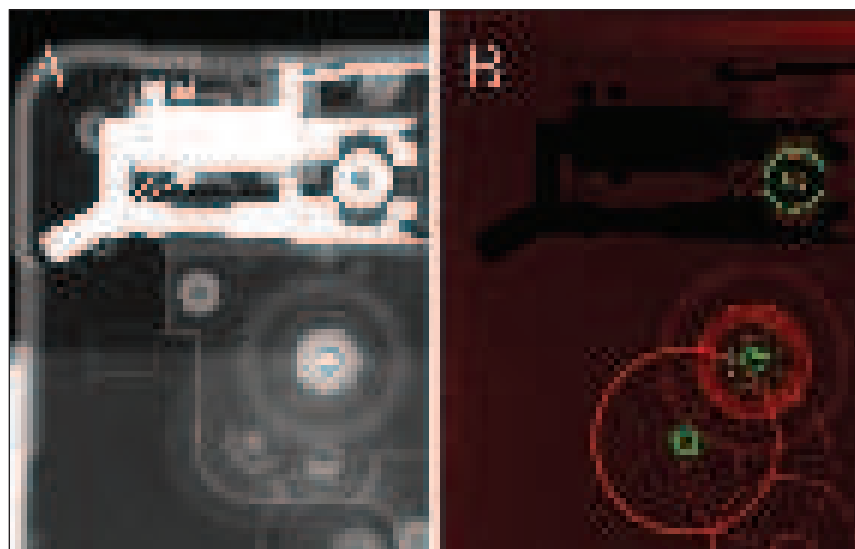
Kiemelkedő fontossága ellenére, a daganatok kialakulásának pontos hatásmechanizmusa még jelenleg sem ismert teljesen. A világszerte végzett számos kísérlet azt támasztja alá, hogy a szervezetet érő

minden képkalkotó orvosi röntgenvizsgálat dózisa szempontjából az ALARA- („As Low As Reasonably Achievable”, vagyis az ésszerűen elérhető legalacsonyabb) elv a meghatározó. Fontos megjegyezni, hogy a környezetünkben és bennünk lévő természetes radioaktív anyagokból származó ionizáló sugárzások következtében évente 1–3 mSv sugárdózist szenvedünk el, amelyet természetes háttérsugárzásnak hívunk. Ehhez képest a korábban Magyarországon is rendszeres és kötelező évenkénti tüdőrontgen-felvétel 0,05 mSv, míg egy nagyon részletes anatómiai viszonyokat feltáró CT-vizsgálat, az alkalmazott orvosi protokolltól függően, 2–30 mSv terhelést is jelenthet. Láthatjuk, hogy ez utóbbi az éves dózis sokszorosa. Ismerve, hogy csak az Egyesült Államokban 25 év alatt az elvégzett CT-vizsgálatok száma húszszorosára nőtt, el kell ismernünk, hogy ez jelentős egészségi kockázatot jelentő probléma, amely azonnali lépéseket követel. A pontos statisztikai vizsgálatok és kockázatbecslések kimutatták, hogy a teljes po-

állóképek, ami felveti azt a kérdést, hogy mi történik abban az esetben, ha az élő szervezet – teljesen várható módon – „bemozdul” a felvétel készítésének ideje alatt. A fényképezésben gyakorlottaknak ismerős lehet ez a probléma, ami a kép bizonyos részleteinek elmosódásához vezet. Az orvosi gyakorlat a mozgó szervek elmosódását mozgási műterméknek nevezi. A mozgási műtermék megjelenése az orvosi röntgenfelvételeken komoly gond a radiológusoknak, hiszen sok esetben ez limitálja a képek használhatóságát. A probléma elméleti megoldása az lehetne, hogy végtelenül rövid vagy legalábbis nagyon rövid felvételi idővel készítik a képeket, így a mozgás nem lesz jelentős. A gyakran alkalmazott triviális megoldás azonban az, hogy a páciens például a tüdőrontgen készítése alatt nem lélegzik. Egy hasonló elvárás a szívvizsgálat esetében azonban irreális, vagyis más megoldást kell találni. Fontos azt is szem előtt tartani, hogy minden élettani jelenség jellegzetesen más időskálával jellemezhető, vagyis a megfelelő expozíciós idő megválasztásával egyes folyamatok a képen „befagyaszthatódnak”, míg a gyorsabbak elmosódnak.

Röntgenképkalkotást használva lehetséges az is, hogy bizonyos folyamatokat több egymás utáni kép sorozatából álló mozgóképrögzítsünk. Ilyen mozgóképek készítését jelenti a röntgen-fluoroszkópia, ami nagyon hasznos különböző nyelési problémák, béltraktus-mozgások vagy vérkeringési zavarok diagnosztikájában, vagy akár egy sebészeti műtét követésében. Az eljárás hátránya azonban, hogy nagyon nagy (20–50 mSv) sugárterhelést jelent a betegre nézve.

Egy másik megoldási lehetőség, hogy a képkalkotástól függetlenül, de a mozgás fázisait pontosan leíró mérés segítségével szinkronizáljuk a képkalkotást a mozgással. Ezt a módszert periodikus mozgások esetében lehet eredményesen alkalmazni, például a röntgen CT-felvétellel párhuzamosan a szív mozgására jellemző EKG fázisait is rögzítjük. A jó felbontású és a mozgást is tökéletesen visszaadó méréshez azonban legalább néhány százszor tíz, de tipikusan százak nagyságrendű szív ciklus során kell az adatokat begyűjteni. A végeredmény itt egy térbeli viszonyok időbeli változását bemutató film lesz, de meg kell jegyezni, hogy ez a módszer azt feltételezi, hogy a különböző szívverési ciklusokban készült, de a szív azonos állapotát jellemző fázisok során a szív térbeli elhelyezkedése azonos. Ez a feltevés nem minden esetben állja meg a helyét, nem beszélve olyan esetekről, amikor a mozgás eleve nem periodikus (pl. aritmia esetében). A módszer további hátránya, hogy jelentős sugárterhelést ró a szervezetre.



2. ábra. A kép (A) részén egy klasszikus röntgenfelvétel látható, amely egy faliórászerkezet átlagos denzitásviszonyait ábrázolja. Látszanak a fém alkatrészek – ezek denzitása jóval nagyobb – és látszanak a műanyag, kissé alacsonyabb denzitású fogaskerekek is. A (B) képen kinetikus felvétel látható. A különböző denzitású alkatrészek itt nem emelkednek ki a háttérből, viszont az eltérő sebességgel mozgó másodperc-, perc- és óramutatókat meghajtó fogaskerekek jól elkülönülnek egymástól, vagyis a képen a kontrasztot a mozgás adja

ionizáló sugárzás kétféle úton is okozhat károsodást. Egyfelől közvetlenül is roncsolhat biológiai struktúrákat, másrészt közvetve, az élő szervezet nagy részét kitevő vízben elnyelődve szabadgyököket termel, és ezeken keresztül károsítja a sejtek génekészletét, ami a későbbiekben daganat megjelenéséhez vezethet. Természetesen a röntgensugárzást használó orvosi diagnosztikai eszközök és az orvosi protokollok azóta nagyon sokat fejlődtek. Ma már

pulációban a daganatos esetek körülbelül 2%-áért tehető felelőssé az orvosi diagnosztika során alkalmazott röntgensugárzás. Ezen eredmények alapján mind a betegek, mind az orvosok számára fontossá vált az alkalmazott sugárdózisok jelentős csökkentése.

A röntgensugárzás mindennapos használata már a feltalálása óta az orvosi területen a legelterjedtebb. A hagyományos úton készített röntgenfelvételek tipikusan

A Semmelweis Egyetem Biofizikai és Sugárbiológiai Intézetében olyan mérési módszert és algoritmust dolgoztunk ki és szabadalmaztattunk, amely az említett klinikai gyakorlatot jelentősen megváltoztathatja. Az algoritmus megértéséhez meg kell jegyezni, hogy az átmenő és a behatoló sugárzás arányának logaritmusát denzitásnak hívjuk, amely tulajdonképpen a tárgy anyagának sugárzáselnyelő képességét jellemzi. Az egyszerűség kedvéért vegyünk az átvilágított objektum levilágítási képén egy képpontot, és abban vizsgáljuk meg, mi történik időben. Fontos szem előtt tartani, hogy mi nem a denzitást mérjük közvetlenül a röntgenképpalkotás során, hanem csak az áthatolt sugárzás intenzitását. Az intenzitás jellemzésére meghatározzuk a röntgendetektorra eső fotonok számát. A mérést többször elvégezve azt tapasztaljuk, hogy a detektorba beérkező fotonok száma mérésről mérésre változik. Ennek a változásnak két oka van. Az egyik az, hogy a detektálás során a detektort érő röntgensugárzás intenzitása változik a páciensben végbemenő mozgások miatt. Ilyenkor az élő szervezeten belüli mozgás hatására egy adott szövet elnyelőképességének hatása hol egyik, hol másik képpontban jelenik meg. A másik ok az, hogy a röntgenfotonok megszámlálásának is van egy hibája, ami a röntgensugárzás részecsketermészetéből adódik, és még egy tökéletes detektor segítségével se küszöbölhető ki. A detektorra eső változatlan röntgenintenzitás mellett is azt tapasztaljuk, hogy adott idő alatt mért fotonok száma Poisson-eloszlás szerint véletlenszerűen fluktuál. A röntgenkép elkészítésekor a két változást csak együttesen tudjuk megmérni. A Semmelweis Egyetemem kidolgozott eljárás eredményeképpen a két változás megfelelő matematikai módszerek

segítségével szétválasztható, a korábban mozgási műtermékek nevezett jelenségből fontos élettani információ nyerhető.

Az új eljárás lényege a háttérben meghúzódó matematikai eljárás végigszámolása nélkül is érthető. Hagyományos módon egy röntgenkép elkészítésekor a filmet vagy detektort adott hosszúságú ideig (például 100 ms) exponálják a páciensnek keresztüljutó röntgensugárzással, hogy egy helyesen exponált képet nyerjenek. Az új mérési eljárás folyamán egyetlen megfelelően hosszú expozíciós idejű felvétel készítése helyett több rövid ideig tartó fel-

vétel készül (1. ábra). Például 10 darab kép, mindegyik 10 ms expozíciós idővel. Az így kapott képek természetesen alul-exponáltak, önállóan nem értelmezhetőek. Az egész képsorozat segítségével azonban minden képpontban kiszámolható a mért fotonszámok átlaga és szórása. Felhasználva ezt a két statisztikai változót, kiküszöbölhető a Poisson-zaj és kiszámítható a képpontban lévő röntgendenzitás átlaga és szórása. Az átlagkép adja a klasszikus, már régóta ismert röntgenképet, a szórás kép (ezt nevezik kinetikus képnek) a röntgendenzitás változásain keresztül a szervezetben végbemenő mozgásokat ábrázolja. A módszer pontos matematikai leírása szakmai folyóiratban már megjelent [1].

Az új eljárás használhatóságát néhány példán keresztül mutatjuk be. Az 2. ábra (A) képe a számolás után kapott klasszikus képet mutatja, amely egy falióra szerkezetének átlagos denzitásviszonyait ábrázolja. Nagyon szépen látszanak a fém alkatrészek, ezek denzitása jóval nagyobb,

tesen eltérő színekkel, elmondható, hogy a kinetikus képnek a dinamikus tartománya jelentős, itt nagyjából 3–4 nagyságrendet fog át.

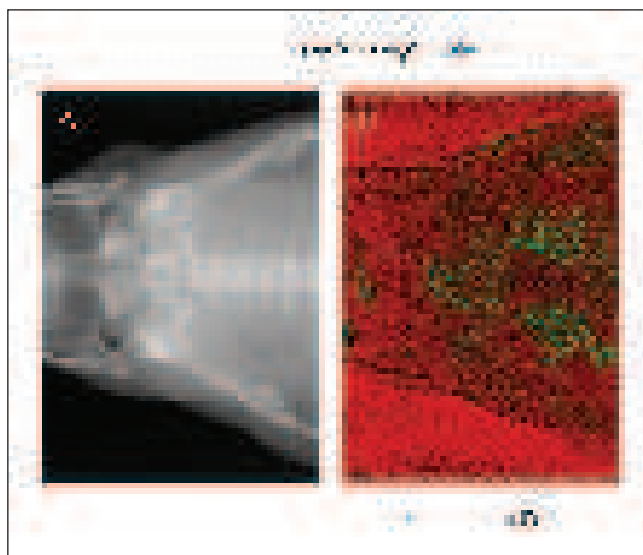
A 3. ábra egy béka klasszikus (A) és a kinetikus (B) képét, a 4. ábra egy humán nyelésvizsgálat eredményét mutatja. Ezen vizsgálatokat az orvosi gyakorlatban a bemutatott fluoroszkópiás módon szokták elvégezni. A nyelés során a pácienssel nehézfém tartalmú (bárium) kontrasztanyagot itatnak, amelynek az útja kirajzolja a nyelöcsövet, és annak problémás területeit. A képekből kiderül, hogy a nyelöcső középső tartományában egy szűkület van, és a felszín alaposabb vizsgálatából, a denzitásból, valamint a páciens előéletéből világosan kiderül, hogy ez feltehetőleg egy nyelöcsőtumor. A módszer segítségével a fluoreszcenciás mozi elkészítése helyett nagyjából tized-huszd dózissal lehet azzal egyenértékű diagnosztikai felvételt készíteni.

Napjainkban a röntgenképpalkotást a CT-vizsgálatok fejlődése határozza meg. A kinetikus képet előállító módszer könnyen átültethető a térbeli rekonstrukció során használt képpalkotásba is. Ennek az a matematikai háttere, hogy a variancia – amely a szórás négyzete – azonos módon összeadható mint az átlagok, így az átlagdenzitások térbeli rekonstrukciójára kifejlesztett, és a CT-ben mindennapos – szűrt visszavetítéses – algoritmusok könnyen alkalmazhatóak a térbeli kinetikus kép elkészítésére is.

A bemutatott új módszer egy 100 éves gondolkodásmódot igyekszik megváltoztatni azáltal, hogy azt az információ nyer ki és hasznosítja, amit mindeddig kiküszöbölendőnek vélték és mozgási műterméként elvetettek. Napjainkban nagyon sok fejlesztés célozza a diagnózishoz használható információ minél hatékonyabb felhasználását, ezért remélhető, hogy a kinetikus képpalkotási módszer hamarosan megtalálható lesz a mindennapi klinikai gyakorlatban is.

Szót kell még ejtenünk néhány ígéretes területről, ahol a módszer várhatóan hasznos információkat szolgáltat. Ezen módszerek segítségével olyan időbeli eseményeket és mozgó objektumokat lehet megjeleníteni, amelyek korábban nem voltak láthatóak.

Természetesen adódik a kérdés, hogy hogyan használható, és mire az orvosi diagnosztikában a bemutatott módszer. Az orvostudományban három olyan jól elkülöníthető röntgenvizsgálati módszer léte-



3. ábra. Egy béka klasszikus (A) és kinetikus (B) képe. Utóbbin a béka „mozgó” szervei láthatóak. Ezek közül jól azonosíthatóak a tüdőben mozgó léghólyagocskák, a szívből lévő billentyűk és a nyelvé vége is

és látszanak a műanyag, kissé alacsonyabb denzitású fogaskerekek is. A (B) képen a kinetikus felvétel látható. Itt a fentiekől eltérően, a különböző denzitású alkatrészek nem emelődnek ki a háttérből. Azonban jól látható, hogy az eltérő sebességgel mozgó másodperc-, perc- és óramutatókat meghajtó fogaskerekek jól elkülönülnek egymástól, a képen a kontrasztot a mozgás adja. A radiológiában klasszikusan használt szürkeárnyalatos képtől eltérően, itt a színskála jelöli a mozgásviszonyokat. Mivel mind az óra-, mind a másodpercmutatót mozgató fogaskerek látszik, természe-

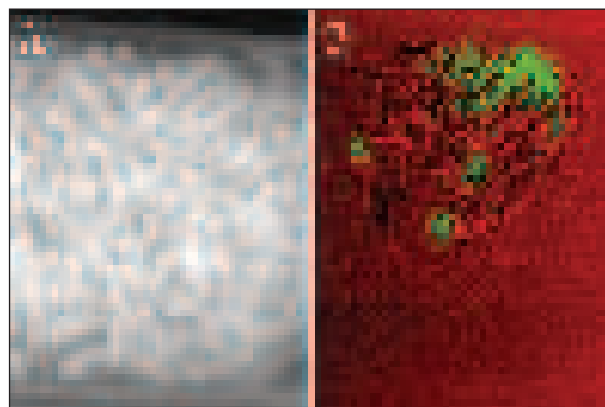
zik, amelyek mindegyikében nagyon hasznos a találmány. Ezek egymástól a felvételek készítése idejében és térbeli viszonyában különböznek. A legegyszerűbb, és ami mindenki számára ismert, a köztudatban röntgenvizsgálat néven szerepel. Itt egy nagyon rövid ideig tartó besugárzásnak tesszük ki a beteget, így téve láthatóvá például a tüdőben a kóros elváltozásokat, vagy a láb- és kéztöréseket is. Ezen módszer újragondolása során a teljes dózist nem változtatva, csak több alulexponált képben időben elosztva lehetne fontos információt nyerni a belső mozgásokról. A kinetikus kép – az eddig használt állókép mellett – megmutatja a hörgők és légútiágak mozgását vagy ezek hiányát, esetleg kóros voltát. A kinetikus kép változásából, vagyis a normálistól való eltérő képi információ birtokában megtalálhatók a tüdőben a gyulladt területek, a nem funkcionáló légútiágak helye és a nyákdugók kiterjedése is. Ily módon lehetővé válhat néhány olyan tüdőbetegség felderítése, amit jelenleg nagyon nehezen, vagy csak késői stádiumban tudnak diagnosztizálni.

További alkalmazási terület lehet a fluoroszkópia, illetve annak a vérkeringés

felelően mozgásokat, és mozgási anomáliákat keresnek az orvosok, legtöbbször nagy rendszámú elem, például báriumtartalmú kontrasztanyag beadása mellett. A kinetikus képalkotást itt arra lehetne használni, hogy jelentősen (10–20-ad részére) csökkentjük a páciens és az orvos erő röntgendózist a diagnózis szempontjából fontos információ elvesztése nélkül.

A harmadik fontos alkalmazási terület a már korábban említett CT, amelyben a mozgások csak műtermékek és rontják a térbeli rekonstrukciót. Itt lehet olyan anatómiai eloszlást ábrázoló képet készíteni, amely a kinetikus kép segítségével a 3D mozgási információt is mutatja, ezzel segítve a korábban soha nem látott funkciók feltárását. Fontos megjegyezni, hogy a korábbi moziktól eltérően itt nem egy mozi, csak egy térbeli rekonstrukció készül, amelyeken a mozgás intenzitása adja a kontrasztot. A 4. ábra (B) képen a szív egyes gyorsan mozgó elemei, például a billentyűk jobban kirajzolódnak.

A mozgások detektálása és ábrázolása sok más területen is fontos, nem csak a gyógyászatban. Az egyik ilyen alkalmazási terület, ahol a kinetikus képalkotási módszer fontos szerephez juthat, a szállítmányok vizsgálata. Napjainkban nagyon aktuális probléma, hogy élősködők és kártevők utaznak a konténerekben az élelmiszer-, fa- és gabonaszállítmányokban. Ezek a portyautasok a szállítás ideje alatt tönkre tudják tenni az árut, vagy a célországban a rájuk nem felkészült környezetet, erdőket és ökoszisztémákat rombolják vagy pusztítják el. Ez a probléma a világ számos helyén felvetődött mind Európában, mind az Egyesült Államokban, ahol a behurcolt kártevő-



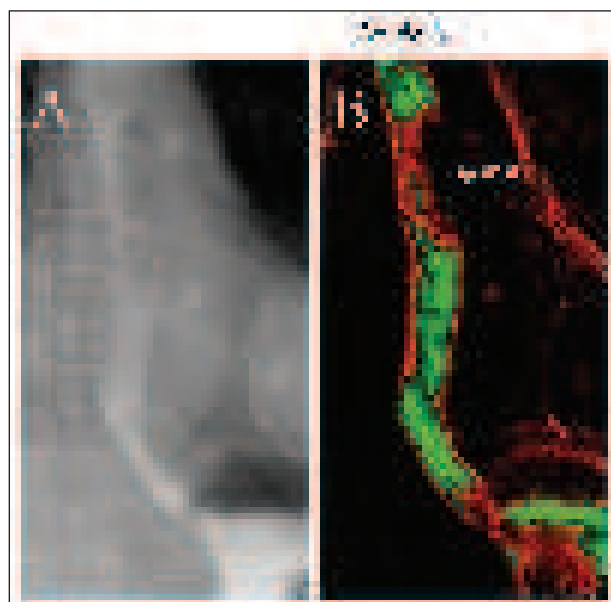
5. ábra. Egy cső, amelyben rizs és a rizsben egy kukac található. A klasszikus képen nem látszik eltérés, míg a kinetikus képen jól látható a kártevő és a környezetében megmozdított gabonaszemek mozgása

fajok jelentős anyagi kárt okoztak az erdőgazdaságoknak, és a mezőgazdaságból élő gazdáknak. Alkalmos megoldás lehet az, hogy a határokon jelenleg is a sok országban kötelezően alkalmazott kámon- vagy konténeröntgent ruházzuk fel sokkal érzékenyebb módszerekkel. A kinetikus képalkotás beüzemelése ezeken a röntgenkészülékeken olyan kisméretű kártevők mozgását is láthatóvá tudja tenni, amelyeket más módszerrel nem lehetséges kiszűrni, vagy csak nagyon lassan lehet megtenni, kézi átvizsgálás segítségével. Egy ilyen alkalmazás prototípusát ábrázolja az 5. ábra, ahol egy cső látszik, amelyben rizs és a rizsben egy kukac található. A klasszikus képen nem látszik semmilyen eltérés, míg a kinetikus képen jól látható a kártevő és a környezetében megmozdított gabonaszemek mozgása.

Az emberi egészség védelmét szem előtt tartó EU direktívák nagyon szigorú feltételeket teremtettek az ionizáló sugárzást használó eszközökkel szemben, ami jelenleg a röntgenkészülékek fejlesztésének egyik fontos motorja. A mai klinikai gyakorlatban számos olyan nehézség merül fel, amelynek technikai megoldása jelentősen javíthatná a röntgenképalkotás hatékonyságát és használhatóságát. Ebben a helyzetben az innováció és a sokszereplős piaci nyomás hatására jelenleg is folyik a versenyfutás a műszerfejlesztők között. A kérdés csak az, hogy ki tud gyorsabb, szebb képet és rekonstrukciókat adó, illetve kisebb dózisterheléssel járó röntgeneszközöket készíteni, amelyek sokkal több információt szolgáltatnak a működésről, és a vizsgálni kívánt változásokról.

Irodalom

IEEE Transactions on Medical Imaging 33, 10, 01/10/2014, 2031–2038.



4. ábra. Humán nyelésvizsgálat eredménye egy klasszikus anatómiai viszonyokat bemutató (A) és egy kinetikus képen (B). A pácienssel itatott nehézfém tartalmú kontrasztanyag útja kirajzolja a nyelvcsövet, és annak problémás területeit. A nyelvcső középső tartományában szűkület van, amit feltehetőleg nyelvcsőtumor okoz

gés vizsgálatára kifejlesztett változata, az angiográfia. Mindkét eljárás során a páciensről több képkockából álló részletes képet készítenek. Ezen alkalmazásokban nagyon sokáig – ami esetenként 30 perc is lehet – kapja a sugárzást a beteg, és tipikusan a vizsgálat céljának meg-