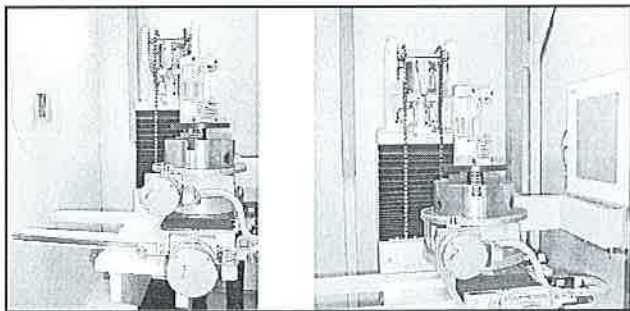


A 3D-s számítógépes röntgentomográfia

Maisl, M.* – Reiter, H.* – Purschke, M.**

A gyártási folyamatok optimalizálása céljából végzett roncsolásmentes vizsgálatok hozzásegítenek ahhoz, hogy igen szigorú követelményeket állíthassunk az alapanyagok és a munkadarabok minőségével szemben. Ahhoz, hogy e termékekben ki lehessen mutatni, jellemezni és mérni lehessen a térfogati anyaghiányokat (hibákat), nagy térfelbontású roncsolásmentes vizsgálatra van szükség. Erre a célra különösen alkalmas a 3D-röntgen-komputertomográfia (3D-CT), amely egyre nagyobb jelentőségre tesz szert köszönhetően a számítástechnika utóbbi évtizedekben végbement fejlődésének.



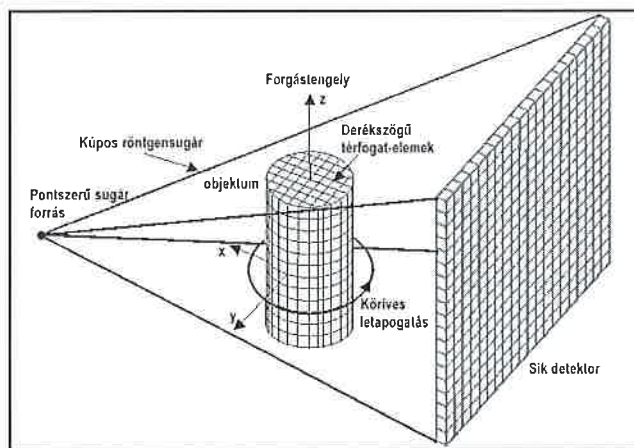
1. ábra. A 3D-CT berendezés; röntgenablak és manipulátor; felületi detektor és manipulátor (jobbra)

A 3D-CT-s mérés során a vizsgált tárgyat $z =$ állandó magasságon 360° -ban megforgatják a kúp alakú röntgensugárban. Eközben a röntgenső és a detektor rögzítve marad. A vizsgált tárgyról minden szögállításban a felületi detektor vetületi röntgenképet készít (1. ábra). Megfelelő matematikai algoritmus segítségével aztán a mért vetületi képekből rekonstruálják a röntgensugár-gyengítési tényező eloszlását a vizsgált tárgy teljes térfogatán belül.

A Feldkamp-algoritmus optimalizálása

Feldkamp 1984-ben a kúpos sugárgeometriára (2. ábra) vonatkozó 3D-s rekonstrukciós algoritmust [1] hozott nyilvánosságra. Ez az algoritmus a fordított 3D-radontranszformáció közelítő végrehajtásának felel meg, és a szűrt visszavetítés elvére épül [2].

Az elmúlt években a kúpos sugárgeometriára kifejlesztettek néhány



2. ábra. A 3D-CT kúpos sugárgeometriája

olyan 3D-rekonstrukciós algoritmust [3], amelyek a fordított 3D-radontranszformáció matematikailag egzakt végrehajtására épültek [2]. Ezeknek az algoritmusoknak azonban az a legnagyobb hátrányuk, hogy matematikailag igen összetettek, problémát jelent a megfelelő számszerűsítésük, és a Feldkamp-algoritmussal összehasonlítva hosszú a rekonstrukciós időtartamuk és nagy tárolókapacitást igényelnek.

Ezzel szemben a Feldkamp-algoritmust két lényeges előnye miatt gyakran alkalmazzák a 3D-CT vizsgálatokhoz, mivel

- a rekonstrukció a méréssel párhuzamosan is elvégezhető;
- a többi rekonstrukció algoritmussal összehasonlítva csekély a tárolókapacitás-igénye.

A Feldkamp-algoritmusnak azonban két lényeges hátránya is van, mégpedig:

- a gyakorlati alkalmazáshoz túlságosan hosszú a rekonstrukció időtartama;
 - a széttartó sugárgeometria miatt a rekonstruált térfogatban (testben) a z tengely irányú geometriai felbontás a központi síktól ($z = 0$) távolodva romlik a röntgensugár-kúp nyílásszögének nagyságától függően.
- A Feldkamp-féle rekonstrukciós algoritmust tehát optimalizálni kell, hogy a mindennapi vizsgálati gyakorlatban megfelelően alkalmazható legyen, azaz
- le kell rövidíteni a rekonstrukció időtartamát;
 - javítani kell a geometriai felbontást a rekonstruált térfogaton belül úgy, hogy független legyen a központi síktól ($z = 0$) mért z távolságtól.

Csökkent időtartamú rekonstrukció

Az N térfogati elemből álló N^3 tárgytérfogat Feldkamp-algoritmussal történő rekonstruálása során vetületképenként el kell végezni a vetületi (projekciós) adatok előzetes feldolgozását és visszavetítését a tárgytérfogatba.

A vetületi adatok előzetes feldolgozása abból áll, hogy ki kell keresni az adatok logaritmusát (a Beer-féle sugárgyengítési törvénynek megfelelően), geometriailag súlyozni kell ezeket az adatokat (mivel az eredeti Feldkamp-algoritmus a detektort sík felületként értelmezi) és meg kell szűrni ezeket az adatokat.

A rekonstrukció időtartamának csak kis részét teszi ki a logaritmuskeresés és az adatok súlyozása, ezért ezzel a továbbiakban nem foglalkozunk. A szűrés és a visszavetítés számítási időszükséglete viszont egyaránt egyenesen arányos az N^3 nagyságával. Az eredeti Feldkamp-algoritmussal a rekonstrukció teljes időszükségletében a visszavetítésnek van meghatározó szerepe. Például az $N = 256$ elemű N^3 térfogat rekonstrukciója időtartamának 85%-át teszi ki a visszavetítésre fordított idő.

Vagyis, a Feldkamp-algoritmus rekonstrukciós időigényének csökkentéséhez a visszavetítést kell optimalizálni. A szimmetria viszonyok kihasználásával a visszavetítés számítási időigényét megközelítően az adatszűrés időigényére lehetett csökkenteni, és ezzel a rekonstrukció számítási időigénye mintegy a harmadára csökkent. Ennek megfelelően a 3D-komputertomográfia esetében a táblázatban közölt rekonstrukciós időikkel számolhatunk.

A rekonstrukció számítási időigénye az alkalmazott hardvereszköztől függően

A mátrix nagysága	A rétegek száma	A vetületi képek száma	Időigény, min 2 DualPIII PC	Időigény, min 4 DualPIII PC	Időigény, min DualPIII PC
255x255	255	200	2,5	1,5	1,5
511x511	511	400	3 1	16	9
1023x1023	511	800	470	235	11

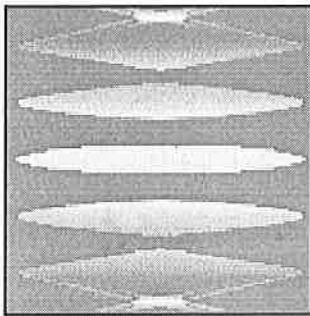
* Röntgentechnikai fejlesztőközpont, FhG, Saarbrücken;

** Rich. Seifert & Co., Ahrensburg

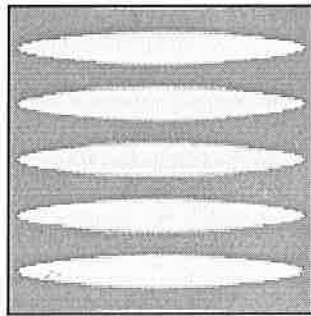
A helyi geometriai felbontás javítása

A széttartó sugárgeometria miatt a z tengely irányában a geometriai felbontás a rekonstruált térfogatban a röntgensugár-kúp nyílásszögének a függvénye. Ezért a központ síktól ($z = 0$) mért növekvő z távolságban romlik a geometriai felbontás. Ebben a széttartó sugárgeometria mellett a letapogatási görbe alakja is szerepet játszik. Az eredeti Feldkamp-algoritmus alkalmazási feltételei mellett (a vizsgált test körbe forgatása közben $z = \text{állandó}$) a letapogatási görbe: kör.

Az elméleti vizsgálatok [4] azonban azt az eredményt adták, hogy a kör mentén történő letapogatással a sugárkúp-geometriás 3D-CT-nél nem lehet izotróp helyi felbontást elérni a rekonstruált térfogati egységben. Ezért a sugárkúp-geometriás 3D-CT geometriai felbontásának javítására térbeli letapogatási görbékkel dolgozó rekonstrukciós algoritmusokat (például: Helix-letapogatási görbe) fejlesztettek ki az elmúlt években [3]. A legtöbb elméletben javasolt letapogatási görbe azonban mérés-technikai okokból csak nehezen alkalmazható a vizsgálati gyakorlatban.



3. ábra. A rekonstruált modell kb. 25°-os nyílásszög esetén



4. ábra. A rekonstruált modell 10°-os nyílásszög esetén

A rekonstruált tárgyterfogat helyi geometriai felbontásának torzításait azonban matematikai kompenzációval javítani lehet. Ennek előfeltétele a modellel még vizsgálható sugárkúp nyílásszögű leképezési geometria alkalmazása. A modell öt egyforma sűrűségű, az xy síkban egymástól egyenlő távolságra egymás fölött elhelyezett ellipszoidból áll. A kísérletek során minden esetben egy 150 rétegből és rétegenként 200^2 képelemből álló térfogatot rekonstruáltak.

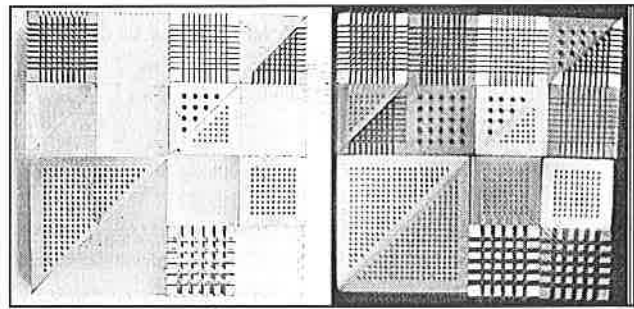
A 3. és a 4. ábra a rekonstruált térfogaton belüli yz síkot mutatja az $x = 0$ értéknél. A 3. ábra a mintegy 25, míg a 4. ábra a 10 fokos nyílásszögű sugárkúppal felvett térfogat rekonstrukcióját szemlélteti. Jól látható, hogy míg a modell feltételénél nagyobb nyílásszögű felvétel rekonstrukciója (3. ábra) – a középső ellipszoid ($z = 0$) kivételével – geometriailag torz és az ellipszoidok sűrűségét sem sikerült pontosan visszaadni, addig a csupán 10 fokos nyílásszöggel készült felvétel rekonstrukciója (4. ábra) mind az ellipszoidok geometriáját, mind a sűrűségét illetően pontos.

Rekonstrukciós eredmények

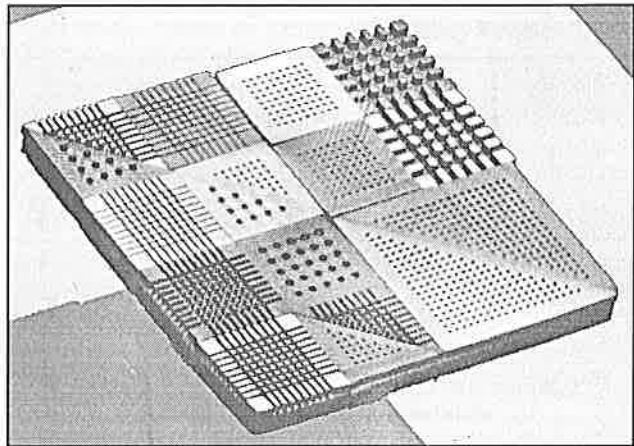
Az optimalizált Feldkamp-algoritmussal végzett 3D-CT vizsgálatok gyakorlati alkalmazhatóságát néhány tárgyról készült felvétel rekonstrukciójának bemutatásával szemléltetjük.

Az 5. ábra bal oldalán egy alumíniumból és műanyagból készített próbatest látható, amelynek egyes mezőibe 5 mm-es zsákfuratokat, illetve hornyokat munkáltak az egyik, illetve a másik oldalán. A próbatest mérete: 15x15x1 cm. A felvétel jellemzői: a röntgensőv feszültsége 225 kV, anódárama 1,4 mA; a geometriai nagyítás: 1,4-szeres (a háromdimenziós képelemek alaptere, azaz a pixelméret ekkor kb. 300 μm). A próbatest 2D-s (5. ábrán jobbra) és a 3D-s (6. ábra) rekonstrukciós képén a műanyag blokkok, a kisebb abszorpció miatt, sötétebbek, mint az alumínium blokkok.

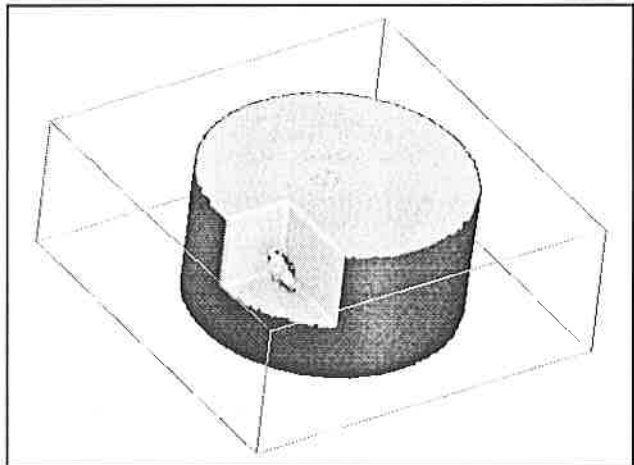
A 7. ábra a Si_3N_4 kerámiából készült szelepszár egy darabjának



5. ábra. Az alumíniumból és műanyagból készített próbatest (balra) és a 2D-CT eljárással készített rekonstrukciója (jobbra)



6. ábra. A próbatest 3D-CT eljárással készített rekonstrukciója

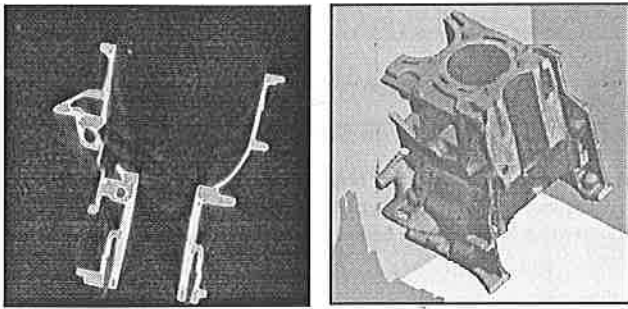


7. ábra. A szelepszár egy darabjának rekonstrukciós képe a porózus anyagrészebe ágyazott zárvánnyal

rekonstruált képét mutatja (A felvétel homorú katódú mikrosővvel és annak megfelelő nagyítással készült, a kiértékelés pedig 75 réteggel, rétegenként 200^2 , 50 μm alapteretű, térfogatelemmel). A 3D-s szemléltető szoftverrel készült rekonstruált térfogati képen jól megfigyelhető egy nagyobb sűrűségű zárvány és az azt körülvevő porózus térfogat, amelynek befoglaló mérete: 2x1x1 mm. Azaz a rekonstruált térfogaton belüli anyaghibát 3 dimenzióban megjeleníthetjük és méreteit a nézeti irány és metszeti sík változtatásával meghatározhatjuk.

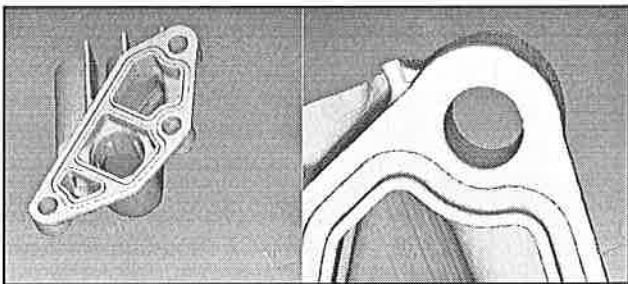
A vastagabb falú tárgyak, például forgattyúházak, hengerfejek, biztonságos átvilágításához nagy energiájú röntgensugárzásra van szükség ahhoz, hogy a térfogati rekonstrukció hibátlan legyen. A 8. ábra egy forgattyúház metszeti és térfogati képét mutatja. A 3D-CT-s felvétel kibővített mérési tartományú és 450 kV csőfeszültségű berendezéssel készült.

A könnyűfémöntvények célszerű kialakításához jelentős segítség,



8. ábra. Forgattyúház 2D-s metszeti képe (balra) és 3D-s térfigati képe (jobbra)

hogy lehetőség van az egyes öntvényrészek térfigatelem-adatait STL-formátumban pontfelhővé alakítva CAD rendszer segítségével megjeleníteni. Ezt láthatjuk egy alumíniumöntvény példáján a 9. ábrán, amelyről a 3D-CT-s felvétel 180 kV csőfeszültséggel és 2-szeres geometriai nagyítással készült; alapfelbontás: 200 μm .

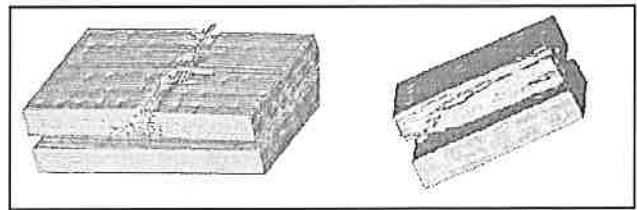


9. ábra. Alumíniumöntvény megjelenítése a CAD rendszerrel (átekintés és részlet)

A tárgy egyes részleteinek 3D-mérése az alapfelbontásnak megfelelően végezhető el. Így a 3D-CT vizsgálattal rekonstruált térfigatban lehetőség van megmérni a vizsgált tárgy tényleges méreteit, és ezeket összevetni a tervrajzon előírt értékekkel (az ún. reverse engineering program).

Végül a 10. ábra szénszál-erősítésű kompozitból (CFK) készült mintadarab 3D-CT vizsgálati eredményét mutatja. A felvételt 180 kV csőfeszültséggel készítették, a kiértékelést pedig 3-szoros geometriai nagyítással (alapegység: 130 μm) végezték el. A vizsgálat szemléletesen mutatja, hogy a töréskár – a kívülről láthatónál – lényegesen nagyobb kiterjedésű. Éppen a kompozit anyagok körében lesz egyre nagyobb jelen-

tősége a 3D-CT vizsgálatoknak, mivel gyakran csak ez az eljárás lesz alkalmas használható mérési eredmények szolgáltatására.



10. ábra. Törött CFK-mintadarab térfigati képe

Összefoglalás

A szimmetriatulajdonságok kihasználásával sikerült az eredeti Feldkamp-algoritmus visszavetítési műveletét optimalizálni és ezzel a 3D-CT felvétel rekonstrukciójának időigényét a harmadára-ötödére csökkenteni. A rekonstruált térfigatképen, a helyfüggő geometriai felbontás okozta torzításokat matematikai kompenzációval ki lehet javítani, ha 10 fokos nyílásszögű röntgensugár-kúp leképezési geometriát alkalmazunk.

A legkülönbözőbb felhasználási esetek vizsgálati eredményei igazolták a 3D-CT módszerben rejlő lehetőségeket és a módosított Feldkamp-algoritmus teljesítőképességét.

A 3D-CT módszer előnye a 2D-s mérésorozat eredményeit közvetve hasznosító módszerekkel szemben az, hogy mérési ciklusonként több száz síkban végzik el a méréseket és a rekonstrukciót, továbbá mivel a mérési adatok felvétele és a térfigat rekonstrukciója egy időben történik, a vizsgálat időtartama lényegesen lerövidül.

Irodalom

1. L. A. Feldkamp, L. C. Davis, J. W. Kress: Practical cone-beam algorithm, J. Opt. Soc. Amer., (1984) Vol 1, No A6, pp. 612-619.
2. H. H. Barrett, W. Swindell: Radiological imaging, the theory of image formation, Detection and Processing, Vol 1+2, Academic Press, 1981
3. R. Clack, M. Defrise: Overview of reconstruction algorithms for exact cone beam tomography, Mathematical Methods in Medical Imaging III, San Diego, California, 25–26 July 1994, SPIE Vol 2299
4. B. D. Smith: Image reconstruction from cone-beam projections: Necessary and Sufficient Conditions and Reconstruction Methods, IEEE Trans. on Med. Imag., Vol MI-4, No 1, Mázr 1985

SZEMLE

A szilícium chipek sokkal nagyobb kapacitást kínálnak

A George Institute of Technology kutatóinak számításai szerint a szilícium chipek a jelenleginél ezerszer több, 10^{12} tranzisztort tartalmazhatnak, amelyek kihasználásával a számítógépek műveleti sebessége jelentősen megnövelhető lenne (a jelátvitel elvi korlátja a fénysebesség). Ennek jelenleg „csak technológiai akadályai vannak”: 1 nm-nél vékonyabb és 10 nm-nél keskenyebb szilícium-dioxid rétegek előállítására és nagy pontosságú mikroötvözésre. A megvalósítás időpontját 2011-re jósolják a kutatók. (CERN Courier, November 2001)

A jelenlegi helyzetről a Magyar Nemzet Telecomputer melléklete 2002. január 28-án ezt adta hírül: „itt van a 0,13 mikronos technológiával gyártott, 2,2 GHz-es, 512 kilobájtos, beépített gyorstárral is ellátott Pentium 4 processzor, amelyben ötvenmillió ($5 \cdot 10^7$), egyenként 60 nm

méretű tranzistor van, és ezeket több mint három km összhosszúságú, rendkívül finom rézvezeték kapcsolja egymáshoz. Az új processzorral relatív árcsökkenést is bejelentett az Intel.”

Robbanásvédett ultrahangkészülék

A Krautkrämer cég robbanásvédett ultrahangkészüléket fejlesztett ki. Az USM 23Ex típusjelű készülék mindazokat a funkciókat tudja, amit egy korszerű digitális készüléktől elvárható – írja a ZfP-Zeitung 2001. júniusi száma. A műanyag házba zárt, robbanásvédett készülék önmagában is védett telepről működik, és mindenben megfelel a vonatkozó EN 50014 és 50020 szabványok előírásainak. Ugyanakkor a robbanásveszélyes zónán kívül hálózatról is működtethető. A merőleges vizsgálófejek önfrekvenciája: 1–4 MHz, a szögfejeké pedig 2 és 4 MHz.