

kerültek elő. A brit kutatók úgy vélték, az csupán dogma, hogy ilyen alkotások csak Dél-Franciaországban és Észak-Spanyolországban kerülhetnek elő. Ezért Paul Pettitt elővette a térképet és megjelölt rajta három olyan helyet, ahol nagy valószínűséggel sziklarajzoknak kell rejtőzniük. A három közül az egyik Creswell Crags volt. Pettitt elmondása szerint a kutatás első napján, az első félórán megtalálták az első rajzot, amelyen két madár látszott. Aztán jött a kecske, a szarvas, a bölény stb. A munka azonban nehezen haladt, mert – az évezredek természetes rongálódáson kívül – a barlang falát mindenütt XX. századi graffiti borítja. Az egyik vandál például, aki – tudtán kívül – elsőként fedezte fel Nagy-Britannia legrégebb sziklarajzait, mindjárt meg is rongálta azokat, majd kétes művét még kézzelével is ellátta. A sziklafalba karcolt P. M. most is látható.

A brit kutatók keresgélese eredményes volt. Ez reményt adhat a magyar kutatóknak is, hogy a kutatást minden bizonnyal nálunk is érdemes folytatni.

JUHARI ZSUZSANNA

E SZÁMUNK SZERZŐI

DR. ALEXAY ZOLTÁN biológus, ny. főiskolai docens, Győr; DR. BENCZE GYULA, a fizikai tudományok doktora, KFKI RMKI, Budapest; DR. BRAUN TIBOR egyetemi tanár, főtitkári tanácsadó MTA KSZI, Budapest; DR. CZELNAI RUDOLF meteorológus, akadémikus, Dörgicse; DR. DARVAS GYÖRGY fizikus, filozófus, MTA Kutatásszervezési Intézet, Budapest; DR. GIDÓ ZSOLT biológus, Szentlőrinc; DR. GYENIS GYULA egyetemi tanár, ELTE Embertani Tanszék, Budapest; DR. HARANGI SZABOLCS tsz. egyetemi docens, ELTE Földtani Tanszék, Budapest; DR. HORVÁTH GÁBOR egyetemi docens, ELTE Biológiai Fizika Tanszék, Budapest; JUHARI ZSUZSANNA szerkesztő, Élet és Tudomány, Budapest; DR. KÉTYI IVÁN egyetemi tanár, Pécsi Tudományegyetem Általános Orvostudományi Kar, Orvosi Mikrobiológiai és Immunológiai Intézet, Pécs; NÉMETH GÉZA szerkesztő, Természet Világa, Budapest; DR. PRÉKOPA ANDRÁS akadémikus, ELTE Operációkutatási Tanszék, Budapest; SZILI ISTVÁN főiskolai tanár, ELTE, Budapest; DR. ZSOLDOS ENDRE tud. munkatárs, MTA Csillagászati Kutatóintézete, Budapest.

Háromdimenziós lézergravírozás

A térletapogatótól a térnyomtatóig

HORVÁTH GÁBOR

Nemrég egy bevásárlóközpontban sétálgatva – a *háromdimenziós lézergravírozás* formájában – vadonatúj szolgáltatásra bukkantam. Ez nemcsak személyre szóló, érdekes, maradandó ajándéktárgyak előállítására alkalmas, hanem olyan modern technológiákat is alkalmaz, amelyeket eredetesen mérnöki és tudományos kutatási célokra fejlesztettek ki. Az előadás-pultnál a vevő egy néhány centiméteres vagy akár több deciméteres méretű, szabályos üvegtestet választ ki, amibe jó pénzért majdnem tetszőleges térbeli alakzatokat vésnék (gravíroznak) bele egy berendezéssel (**1/a ábra**). Vevőcsalagotól számos mintapéldányt is kiállítottak (**1/b ábra**). Igen meglepő, amikor az ember a teljesen átlátszó üvegtestet ide-oda forgatva fölismeri a begravírozott tárgyak fehér, átlátszatlan pontokból álló, háromdimenziós kontúrfelületét. Az üvegtestbe vésendő térbeli alakzatot egy számítógépes katalógusból választhatjuk ki, vagy a világhálóról tölthetjük le, de a magunkkal vitt tárgynak, sőt még a saját arcunknak

a helyszínen pillanatok alatt elkészített háromdimenziós felületét is üvegebe gravírozhatjuk.

De vajon hogyan határozzák meg néhány másodperc alatt az arcfelület vagy bármely tárgy alakját? Miként véshetnek egy kemény, tömör üveghasábba térbeli alakzatokat? A válasz két, lézerező épülő korszerű technológiában rejlik:

1. Részben az arckutatás és a számítógépes filmgyártás számára fejlesztették ki a *lézeres arcpaszttát*, más néven *arctetapogatót*. Ennek egyik változatánál az arcot előlről egy függőleges síkban szétterülő, keskeny lézernyalábbal világítják meg, melynek olyan a hullámhossza és az intenzitása, hogy akkor sem okoz bajt, ha esetleg a szembe jut. Az eredetileg kör keresztmetszetű lézernyaláb egy speciális alakú tükrőről visszaverődve terül szét függőleges síkban. Oldalról nézve ez a síklézer kirajzolja az arcnak a lézertény síkjába eső függőleges metszetét (**2. ábra**), amit egy digitális videokamerával fölvesznek. Eközben a lézernyaláb síkja vízszintes irányban

Térletapogatók

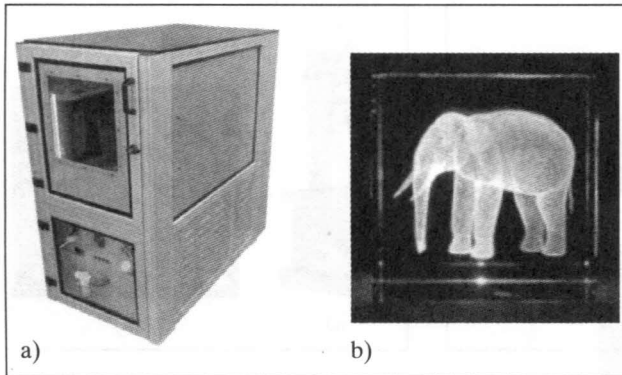
A háromdimenziós lézeres tárgyletapogató *trigonometriai háromszögelésen* alapuló elvét a **6. ábra** mutatja. Egy lézertény síkja ismert β szögben világítja meg a letapogató tárgy p pontját. Az onnan visszavert fényt a lézertől ismert b bázistávolságra lévő digitális videokamerával veszik föl. A kameralencse f fókusz-távolságának ismeretében a fölvetett képből meghatározható a p pontból a kamerába jutó fénynek a lencse optikai tengelyével bezárt α szöge. Végül, trigonometriai háromszögelési számításokkal a p pont (x, y, z) koordinátái meghatározhatók b, α, β, f , továbbá a letapogató és a visszavert sugár, valamint a bázistávolság alkotta háromszög síkja irányának ismeretében.

A *sztereokamerás térletapogató* két vagy több digitális képet készít a tárgyról a különböző, ismert koordinátájú helyek alapján. E képeket számítógép elemzi a pontjaik közötti korrelációkat keresve. Miután a képelemző program fölismeri az össze-

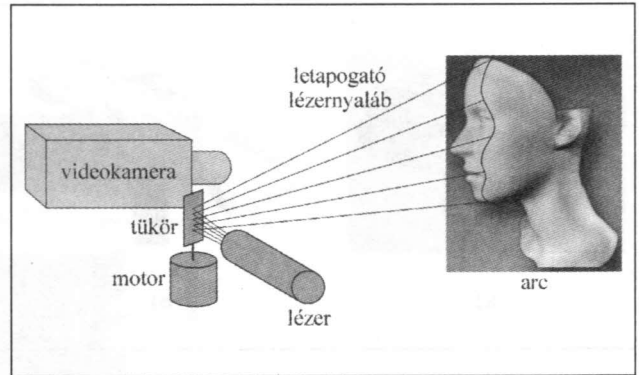
tartozó képpontokat, háromszögeléssel meghatározza koordinátáikat, ezekből pedig a tárgy felületének alakját.

A *moiré térletapogató* ismert távolságú, vastagságú és irányú fekete és fehér csíkokból álló moirémintázatot¹ vetít a vizsgált tárgyra. A csíkok a felület görbülleteinek megfelelően torzulnak, amiből sztereokamerákkal készített képpárok számítógépes kiértékelésével, háromszögeléssel meghatározhatók a tárgy felületi pontjainak koordinátái.

A *repülési idő térletapogató* nagyobb és távolabbi tárgyak, például épületek és más tereptárgyak alakját képes meghatározni. A berendezés egy ismert irányú, időben szaggatott lézertény-sorozatból bocsát ki a tárgy vizsgált pontjába, és az onnan visszavert fényt fogja föl. A fény kibocsátása és visszaérése között eltelt igen rövid időből meghatározza a pont távolságát, a kibocsátott fény irányának ismeretében pedig a pont koordinátáit. A tárgy lézertényvel való letapogatóásával végül meghatározza a tárgy



1. ábra. Egy háromdimenziós lézergravírozó berendezés (a) és egy indiai elefánt háromdimenziós testfelületének átlátszó üveghasábra lézerral bevésített, kicsinyített mása (b)



2. ábra. Az arc háromdimenziós felületének lézeres letapogatása

elfordul a számítógéppel vezérelt tükör tengelyének elfordulása miatt, s így oldalirányban tapogatja le az arcot másodpercenként többször is. A videofelvétel egymás után következő képkockái a háromdimenziós arcfelület lézerral letapogatott felének függőleges metszeteit rögzítik. Mivel az emberi arc nem tökéletesen tükörszimmetrikus, a másik arcfelét is hasonlóan letapogatják. A páciens megkéri, hogy a lézeres arcpasztázás néhány másodperce közben lehetőleg ne pislogjon, és arcát, valamint fejének helyzetét se változtassa, hogy a pásztázás közben az arcfelület ne mozduljon el a lézernyalábhoz és az arckontúrt felvevő kamerához képest. A digitális képeket ezután egy számítógépes programmal értékelik ki, amely

fölismeri a lézer által kirajzolt arcmetszeteket és ezekből rekonstruálja az arc háromdimenziós felületét. Fejlettebb számítógépes algoritmusok alkalmazása esetén még arra sincs szükség, hogy a pásztázás közben teljesen mozdulatlan legyen a fej, mert a program fölismeri az arcmetszetek apró elmozdulásait, és kompenzálja azokat. Az arcon kívül természetesen más tárgyak háromdimenziós felülete is meghatározható megfelelő számú és irányú lézeres letapogatóval és a részfelületek számítógépes összeillesztésével.

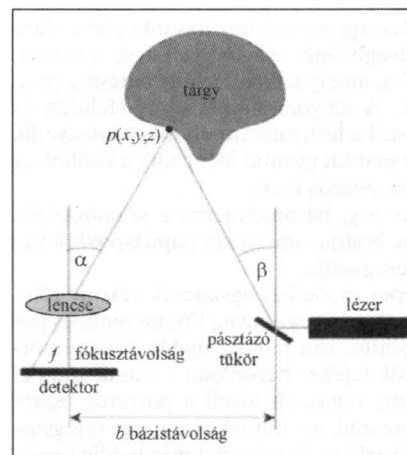
2. Az arc vagy más tárgy ily módon meghatározott háromdimenziós felületét pontról pontra vésik az üvegebe egy háromdimenziós lézergravírozóval (1/a ábra),

amit eredetileg azért fejlesztettek ki, hogy a tárgyak számítógépes tomográffal meghatározott alakjának másolatát hozzák létre. A lézergravírozás lényege, hogy egy számítógéppel vezérelt lézernyalábot az üvegebe vésendő pontra fókuszálnak. A célponton kívül kis erősségű lézertény a fókuszpontban olyan nagy intenzitású, hogy az üveget összetöri, szétzúzza vagy megolvasztja, s ennek hatására az üveg átlátszatlanná válik. Az eljáráshoz csak optikailag homogén, az alkalmazott lézertényre átlátszó üveg vagy műanyag szükséges, különben a lézertény nem lehetne pontosan a kiválasztott pontra fókuszálni, mert szóródna, elhajlana és megtörne az

alakját. (Ezen az elven működnek a radarok is.)

A rögzített lézernyalábos térletapogató lézeres háromszögelést végez, de a letapogatást nem pásztázó lézernyaláb végzi, hanem a kamerához képest rögzített lézernyaláb előtt forog vagy mozog ide-oda a tárgy, vagy a kamerát és a lézerforrást ötvöző pásztázófej mozog ide-oda a tárgy előtt. A pásztázás lehet kézzel vagy számítógéppel vezérelt.

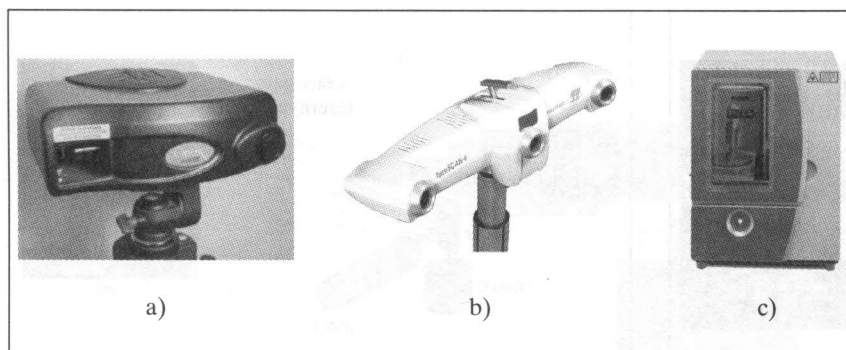
A számítógépes tomográf nemcsak a tárgy felületét képes meghatározni, hanem belsejének részleteit is. Egy detektor teljesen körbejárja a tárgy tetszőleges vékony keresztmetszeti rétegét. A kar egyik végéből sugárirányban egy ismert intenzitású röntgenyaláb indul ki, áthatol a tárgy vizsgált rétegének vékony sávján és detektálódik a kar áttelenségen lévő érzékelőben. A detektált röntgenintenzitás a sávbéli anyag röntgenelnyelése miatt kisebb, mint a kibocsátott intenzitás. Röntgensugarakra pedig azért van szükség, hogy áthatolhassanak



6. ábra. A lézeres háromszögelés elve, mellyel a tárgy tetszőleges p pontjának (x, y, z) koordinátái meghatározhatók a b bázistávolság, az α és β szögek, a kamera lencsájének f fókusz távolsága, valamint a letapogató lézernyaláb síkjának ismeretében

az anyagban. E mérést számos más irányból is megismétli a tomográf. A kibocsátott intenzitás és a különböző irányokból detektált intenzitások ismeretében egy számítógépes program kiszámítja az átvilágított anyagréteg kis tartományainak (pontjainak) röntgenelnyelő képességét, amit egy kétdimenziós eloszlástérkép formájában tárol. Folyamatos pásztázással a tárgy több, egymással párhuzamos rétegről hasonló eloszlástérképeket készít, s így a tárgy teljes térfogatának háromdimenziós röntgenelnyelési eloszlásához jut. A tárgy felületét és belső szerkezeti elemeinek határfelületét a röntgenelnyelés ugrásszerű változásai definiálják, amelyek alapján a tárgy felületének és belső komponenseinek alakja meghatározható.

¹ Mikor egy áttetsző vonalas mintázatot egy hasonló másikkra helyezünk, a két vonalhalózat interferenciájaként keletkezik az úgynevezett moirémintázat (ejtsd: moaré). A moiré szót először a takácsok használták, és a mohair francia szóból ered, ami egy kecskefej finom szőréből szőtt szövettípus neve.



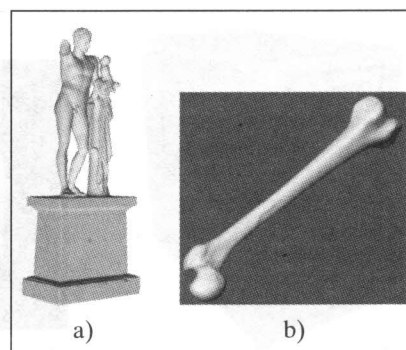
3. ábra. Lézeres monokuláris (a) és sztereo (b) háromdimenziós arclaptopogató, valamint egy háromdimenziós, forgótálcás, lézeres tárgyletopogató (c)

inhomogén közegben. A háromdimenziós felület pontjainak bevésését rétegről rétegre, alulról fölfelé haladva kezdik, hogy az éppen bevésendő pontig a lézertény felhalmozódó közegen át érhesse el. Ha fölülről lefelé haladna a bevésés, akkor az alsóbb üvegrétegekig a fény csak a már átlátszatlan, fényt szóró, bevésett pontokon át juthatna el, ami lehetetlenné tenné a fókuszálást.

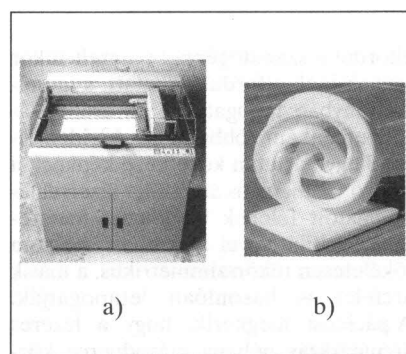
E két technológiának, a *térletapogató*-nak (3. és 4. ábra) és a *térnyomatónak* (5. ábra) számos más változatát is kifejlesztették már, amelyeket a régészetben (pl. pótolhatatlan archeológiai leletek másolására), az anatómiában és az őslénytanban (pl. csontok, csontvázak rekonstrukciójára), az építészetben

(pl. épületek makettjének készítésére), a gyógyászatban (pl. protézisek előállítására), a gépészmérnöki gyártástechnológiában (pl. számítógéppel tervezett alkatrészek modelljének legyártására) vagy a filmgyártásban (pl. arcmaszkok és fantasztikus alakok makettjének előállítására) használják.

A híres hollywoodi filmrendező, Steven Spielberg Jurassic Park III. című tudományos fantasztikus filmjének egyik jelenetében a *Velociraptor* ragadozó dinoszaurusz számítógépes tomográfiával rekonstruált hangképző szervének háromdimenziós élethű műanyag mását nyomtatták ki egy térnyomatóval („rapid rekonstruktorral”). E jelenet valójában már nem a



4. ábra. Egy szobor (a) és egy emberi csont (b) térletapogatóval rekonstruált háromdimenziós felülete



5. ábra. Térnyomató (a) és a vele kinyomtatott bonyolult geometriai alakzat (b)

Térnyomatók

A *lézeres sztereolitográfia* a háromdimenziós lézergravírozáshoz hasonló elven alapszik azzal a különbséggel, hogy nem szilárd üvegből/műanyagból vésik bele a mintát, hanem egy kádban lévő folyékony műgyantába, amely erős lézertény hatására polimerizálódás következtében megkeményedik. A kinyomtatandó tárgy (felületi és belső) pontjainak helyére lézernyalábot fókuszál a térnyomató: itt megkeményedik a gyanta. A nyomtatás végén a cseppfolyósan maradt gyantát leengedik a kádból, és visszamarad a tárgy kemény műgyantából álló, pontos mása.

A *papírlapos térnyomató* a reprodukálható tárgy háromdimenziós, számítógépes modelljét párhuzamos, papírvékony rétegekre bontja, amelyeket papírlapokból vagy ki lézertény, s ezeket egymásra rétegezve összeragasztja.

A *poralapú térnyomató* a tárgy számítógépes modelljét ugyancsak vékony rétegekre bontja, amelyeket egy építőplatformon (lapon) egy anyag finomszemcsés porának összeragasztásával épít föl. Az építőplatformra mindig újabb, vékony porréteg kerül. Efőltt – a tintasugaras nyomtatók fejéhez hasonlóan – számítógéppel vezérelt fecskendezőfej mozog, ami folyékony ragasztót lövell a porréteg összeragasztandó részeire. Miután a ragasztó megszárad, az építőplatform egy rétegvastagságnival lejjebb süllyed, s egy új porréteg kerül rá. E folyamat mindaddig ismétlődik, amíg a tárgy másolata helyén alulról fölfelé haladva a porszemcsék rétegről rétegre össze nem ragadnak. A por szinte bármilyen anyag finomszemcsés örlémenye lehet, akár hintőpor vagy liszt is. A nyomtatás végeztével az össze nem ragadt por egyszerűen eltávolítható (például lefújható vagy lemosható) a tárgyról. A kinyomtatott tárgy akár több, egymásba ágyazott, elkülönült részből is fölépülhet és eltérő tulajdonságú (például keménységű, hőtüró képességű, vízállóságú vagy színű) részekből is állhat, ami a ragasztó és/vagy a por anyagának változtatásával érhető el.

fantasztikum világába tartozik, mivel kaphatók olyan berendezések, amelyekkel bármilyen térbeli tárgy pontos háromdimenziós mása makett formájában néhány óra alatt kinyomtatható, miután egy térletapogatóval meghatároztuk a tárgy háromdimenziós szerkezetét.

Ha a bibliai Mózes ma élne, akkor számára az Úr talán nem kőtáblákba vésné a tízparancsolatot, hanem például egy átlátszó hegyi- (kvarc-) kristályba gravírozná bele lézertény. Novobáztzy Károly professzor urat, a híres magyar elméleti fizikust pedig, ha még élne, akkor diákjai azzal is meglephetnék, hogy a Maxwell-egyenleteket nem márványlapok felületére, hanem átlátszó kristályhasábok belsejébe vésetnék bele, hogy szeretett tanáruk azokat függeszthesse ki dolgozószobája falára. A ma paleontológusai meg egy újonnan fölfedezett állatfaj számítógépes tomográfiával rekonstruált csontjaiból a „cybertérben” fölépített csontváz térbeli mását nyomtathatják ki és tanulmányozhatják háromdimenziós makett formájában, Spielberg Jurassic Park-beli filmhőseihez hasonlóan.