

# Domborzat- és felületmodellek teljes jelalakos légi lézerszkenneléssel

Dr. Székely Balázs,<sup>1,2</sup> dr. Molnár Gábor<sup>1,2</sup> és Roncat, Andreas<sup>1</sup>



<sup>1</sup> Christian Doppler Laboratory Spatial Data from Laserscanning and Remote Sensing, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology

<sup>2</sup> Eötvös Loránd Tudományegyetem, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék

## Bevezetés

A georeferált téradatak tömeges generálása egyre inkább társadalmi igénnyé válik, amint az adatokat kezelni képes rendszerek (navigáció, telekommunikáció stb.) piaci szinten is elérhetővé és technikailag kiforrottá válnak. Jól mutatja ezt a különböző légi- és űrfelvételek, térképrendszerek köznapivá válása.

Az adatnyerési igényt természetesen a technológia igyekszik mielőbb kielégíteni. A távérzékelési eszközök széles skálája gyűjti a multispektrális, pozíció- és egyéb adatokat a földfelszín legkülönfélébb jelenségeiről, rétegeiről, felületeiről. Természetesen az egyes érzékelőrendszerek a rendszer által meghatározott fizikai mennyiséget mérik, és ennek megfelelően értelmezhető maga az objektum, amiről a felvétel készül. Így például megfelelő hullámsávú radarképen alapvetően nem kell felhőkkel számoljunk, vagy más hullámhossztartományban éppen a lehulló csapadékot tudjuk kimutatni.

A felvételezés viszonylag magas költségei miatt térségünkben még alig alkalmazott, de elterjedőben lévő légi lézerszkennelés (ALS, *Airborne Laser Scanning*, más elnevezéssel *airborne LiDAR*, *Light Detection and Ranging*, illetve *Airborne Laser Swath Mapping*, ALSM; ld. pl. Kraus 2007) teljesen új távlatokat nyitott az adatnyerés sebessége, a domborzatról és a felszíni objektumokról gyűjthető információ mennyisége és pontossága szempontjából. (A rendszer működési elvét részletesen bemutatja például Barsi et al. 2003). Éppen a nagy mennyiségű adat és a korábban alig elérhető pontosság miatt az alkalmazási területek száma is rohamosan nő. Az érdeklődő

olvasó követendő példaként megtekintheti a nyugat-ausztriai Vorarlberg szövetségi tartomány térinfomatikai adatbázisát az interneten (<http://www.vorarlberg.at/atlas>), amelybe a légi felvételek, kataszteri és egyéb településüzemeltetési adatok mellett a lézerszkennelésből eredő, horizontálisan 1 m-es felbontású felszínmodellt is integrálták a teljes szövetségi tartomány területére.

A légi lézerszkennelés fejlődésére jellemző, hogy az idézett összefoglaló tanulmányban említett területeken túlmenően immár rutinszerűen alkalmazzák a régészetben (Doneus et al. 2007), a gleccserkutatásban (Höfle et al., 2007) és a geomorfológia legkülönfélébb ágaiban is. Ugyanakkor természetesen az eszköz- és módszerfejlesztés is óriási léptékben halad előre. Az adathordozók és a rögzítési technológia fejlődése lassan-lassan megoldja azt a problémát, amivel korábban az ALS küzdött: kibocsátott lézerimpulzus visszavert jele teljes alakjának rögzítésére is van ma már fedélzeten is bevethető műszaki megoldás. Jelen tanulmányban a teljes jelalakos technológia néhány kiválasztott vonatkozásával foglalkozunk.

## A felszín és a domborzat megjelenése a lézerszkennelés eredményeként

A Föld felszínéről alkotott elképzelésünk magától értetődően attól függ, hogy azt milyen szempontból kívánjuk vizsgálni. Az adott szakterület képviselője a felszín elemeiből a saját maga számára fontos dolgokat kiemeli, a zavaró dolgokat pedig kiszűri vagy igyekszik kiszűrni. A telekommunikációs szakember, aki antennákat kíván telepíteni, a jelterjedési viszonyok és az össze-

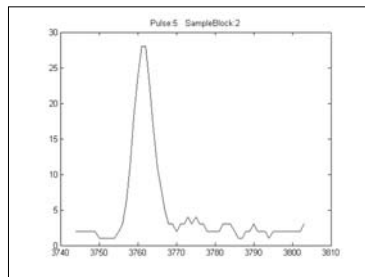
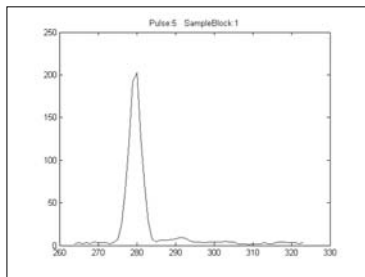
láthatóság iránt érdeklődik. Ugyanígy a repülésirányító, a légi mentő ugyancsak a számára akadályként jelentkező természetes vagy mesterséges akadályokat akarja bizonyos pontossággal ismerni. Számukra a talaj konkrét pozíciója önmagában nem fontos (hacsak nem a talaj adja a legmagasabb pontokat), de például az erdő vagy a park egyes fáinak magassága, sőt néha kiterjedése is érdekes.

Az erdész, a botanikus vagy a kerttervező szintén a növényzet, a lombkorona magassága iránt érdeklődik (esetleg más-más módon), de a háztetők magassága, hajlásszöge számukra nemcsak, hogy nem érdekes, inkább felesleges, zavaró. A város főépítész, az engedélyező hatóság számára pedig éppen a háztetők, épületek tényleges (esetleg az engedélyezett tervektől eltérő) kiterjedése, magassága jelent információt, itt a növényzet adatokban való jelenléte az épületmodellezés szempontjából kifejezetten probléma (pl. Kugler et al 2005). Végül, de nem utolsósorban a geomorfológus és a régész pedig a legtöbbször minden természetes és mesterséges tereptárgytól függetlenül a talajfelszínt szeretné adatként látni: a növénytakaró és a (modern) épületek hatása nélkül.

Ebből a néhány magától értetődő példából is látszik, hogy a fizikai felszínről alkotott fogalmunk valójában modell, amit több-kevesebb sikerrel igyekszünk adatokkal, lehetőség szerint minél valóságosabb adatokkal kitölteni. Magától értetődik, hogy a lézerszkenneléstől is azt várjuk, hogy ezeket az igényeinket kielégítse, mégpedig úgy, hogy – ha már elvégeztettük a költséges mérést – a felsorolt szakterületek által megfogalmazható minőségi követelményeket (térbeli pontosság, megbízhatóság) lehetőség szerint minden területen kielégítse. A feladat bár nem könnyű, a legtöbb esetben kielégítően megoldható a teljes jelalakot rögzítő lézerszkenneléssel.

### A teljes jelalakot rögzítő lézerszkennelés

A korábbi LiDAR technológiák szintén figyelembe vették a különböző objektumokról való visszaverődést, és ki is használták azt: az adott irányból várható jelből kinyerték az első és az utolsó beérkezéseket (ld. pl. Barsi et al. 2003). A probléma abból adódik, hogy bizonyos esetek-



1.a–b ábra Példa a teljes jelalakos lézerszkenneléssel rögzített jelle: (a) kimenő (referencia) jel, (b) visszavert jel. A vízszintes tengely nanoszekundum, a függőleges tetszőleges egységekben van.

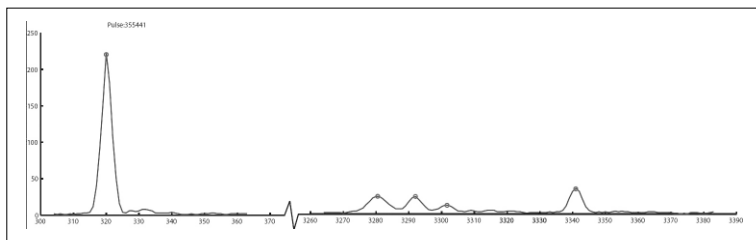
ben, például tenyészedőszakban a lombhullató növényzet különböző rétegeiről, de télen magukról az ágakról is kapunk több visszaverődést. Ezek a jelek összegződve, időben kissé eltérve érkeznek meg az érzékelőhöz, ami ezáltal a várt impulzuszerű jel helyett elnyúlt, változó amplitúdójú intenzitáseloszlást észlel (1. ábra). A jelek deformálódása miatt a felhasznált keresőalgoritmusok vagy nem tudnak megfelelő csúcspontokat (első és utolsó beérkezéseket, *first echo* [FE], illetve *last echo* [LE]) találni, vagy helyről helyre érdemben kissé máshol, eltolódva találják meg őket. Az ebből az adatrendszerből interpolálható felület a kevert jellege miatt zajos lesz: bizonyos helyeken számottevő ugrások állhatnak elő, és helyenként értelemszerűen nem azt a felületet fogjuk végül látni, amit szeretnénk.

A teljes jelalakot rögzítő légi lézerszkennelés (*Full-Waveform Airborne Laser Scanning*, FWF ALS; pl. Wagner et al. 2006) éppen a jelalakban meglévő többletinformációt igyekszik kihasználni annak érdekében, hogy ezt a nehézséget leküzdjük. A teljes jelalak rögzítése azonban nyilvánvalóan további problémákat vet fel. Magától értetődően nem tudhatjuk például előre, hogy mikor érkezik be majd a jel, ugyanakkor a jel kibocsátásától nem várhatunk akármeddig, ráadásul az összes jelet általában nem érdemes elraknunk, mert ez alatt az idő alatt leginkább zaj érkezik, és maga a jel ehhez az időhöz képest viszonylag rövid. Ezt a problémát úgy hidaljuk át, hogy a mintavételezést adatblokkokba szervezzük. Egy adatblokkban 60 mintát veszünk. Az adatblokkok felvételezését akkor kezdjük, amikor a jel egy bizonyos beállított küszöbszintet (threshold) átlép. Így biztosíthatjuk, hogy csak akkor regisztrálunk, amikor ténylegesen van jelünk. Tipikusan néhány adatblokkot veszünk fel kiküldött lézerimpulzusonként.

A 2. ábrán egy visszavert lézermimpulzus regisztrátumát láthatjuk (középen az alacsony jelszint miatt több adatblokkot átugrottunk). Kis körökkel jelöltük meg a detektált jelek pozícióját. Amint látható, a hagyományos FE/LE megközelítésből adódó két jelen kívül még másik három visszaverődést is azonosíthatunk ezzel az eljárással.

Rögtön látható, hogy a rögzítendő adatmennyiség a hagyományos FE/LE módszerhez képest ezzel megsokszorozódott. Az 1 nanoszekundumos mintavételezési sebesség mellett adatblokkonként 60 mintát véve, nagyságrendileg 30–40 millió adatblokkal kell megküzdenie a feldolgozórendszernek egy repülési nyomvonal (néhány km hosszú és repülési magasságtól függően néhány száz méter széles csík) mentén. Ilyen csíkokkal fedjük le a lemérendő területet 60% átfedéssel. Végül a területet keresztirányban is berepüljük néhányszor a különböző repülési nyomvonalakból származó adatsoportok még pontosabb illesztésének elősegítésére.

Ez a felvételezési technika korábban alig elképzelhető adatmennyiséget jelent: projektenként nagyságrendileg 1 terabyte-nyi adatot kell kezelni, feldolgozni és végül három dimenzióban megjeleníteni. A feldolgozás első lépésében időtartományban korrelációs eljárások segítségével meghatározzuk, hogy hány visszavert felület lehet jelen a regisztrátumban (Roncat et al. 2007), majd ennek megfelelő számú Gauss-görbét illesztünk a mért jelekre. Egy fakoronáról akár tucatnyi reflexió is jöhet, illetve előfordulhat, hogy több, akár nem közvetlenül egymás után következő adatblokkban is találunk reflexiót. (Például egy nagyfeszültségű távvezeték oszlopa alatt van egy fa, és alatta pedig egy bokor, majd a talajszint következik.) Ennek ellenére nem lehet tetszőlegesen sok az illesztendő csúcsok száma, hiszen a mintamennyiség statisztikai értelemben korlátot szab az illesztésből származtatható csúcsok számára. Ennek megfelelően egyszerűbb jelek esetén néhány, bonyolultabb esetén általában 4–6 görbét illesztünk. Az illesztési eljárás eredménye minőségellenőrzésen esik át: megvizsgáljuk, hogy az illesztett jelek a mérthez képest vett négyzetes hibája mekkora. Ha az eltérés túl nagy, az illesztés eredményét (így a reflektáló felületnek tűnő jelet) elvetjük.



2. ábra Egy lézermimpulzus visszavert jele. Az ábra közepén az alacsony jelszint miatt több adatblokkot kihagytunk. A hagyományos first echo – last echo megközelítésből adó két pont mellett a kiértékelés további 3 pontot szolgáltat (kis körökkel megjelölve).

Az illesztett görbék csúcsainak időbeli pozíciói a fény terjedési sebességét figyelembe véve távolságoknak felelnek meg, amelyek a szenzor és a reflektáló felület közötti pillanatnyi távolságokat jelentik. A légi jármű pozícióját GPS és inerciális navigációs rendszer, INS segítségével meghatározza (ld. részletesebben Barsi et al. 2003, 2006) a kiküldött impulzus egyedi azonosítójából a lézersugár irányát megállapítjuk, és ebből kiszámolhatjuk azokat a térbeli pontokat, amelyeket így reflektáló felületként azonosítunk. Az eljárást az összes kibocsátott impulzusra végrehajtjuk.

Eredményül egy pontfelhőt kapunk, mely XYZ koordinátákból áll. A pontosság optimális esetben néhány centiméter mindhárom irányban. Ha az egyes felületek geometriája kevésbé szerencsés, a hiba a többszörösére nőhet, de így is deciméter alatti tartományban marad. A repülési magasságtól és feladattípustól függően négyzetméterenként átlagosan 4 lézersugárnyalábot véve, nagyságrendileg 15 térbeli pontot nyerünk, ha több felület (pl. növényzet) is jelen van.

Az így kapott pontfelhőket (repülési nyomvonalanként egyet-egyet) egymáshoz kell illeszteni, kihasználva az átfedéseket. Ehhez a mérési anyagtól részben függő eljárásokat alkalmaznak, melyek az esetleg zajos pontok egy részét kiszűrik. Az előálló, immár egységes adatrendszerből azután különféle speciális eljárásokkal pontfelhőket válogathatunk le az elvégzendő feladatnak megfelelően (hasonlóan az első beérkezés, utolsó beérkezés koncepciójához).

## Példák

Bemutatunk néhány közérthetőbb példát a teljes jelalakos lézerszkennelés eredményeiből. Az adatok egy osztrák régészeti célú projekt (ld. lejjebb) számára készültek 2007. áprilisi felvételezéssel, de az itt bemutatott adatok mintegy „mellékter-

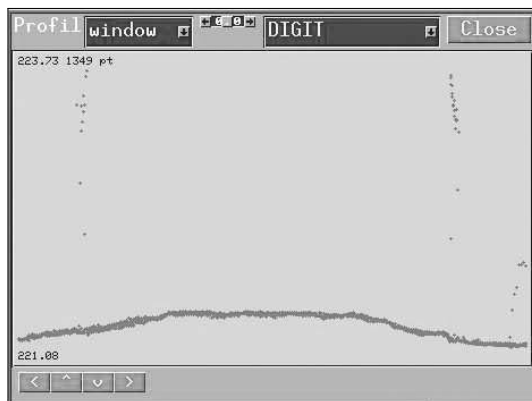
mékei” a jelenleg is folyó feldolgozásnak, hiszen Eisenstadt (Kismarton) városi területeit ábrázolják. Elsőként az Eszterházy-kastély részletét mutatjuk be, a jobb láthatóság végett „alulnézetből” (3. ábra – lásd hátsó borítóoldalon színesben). A képen nemcsak az architekturális elemek (tetőkiszögellések, tetőszerkezet) láthatók, hanem egy toronydaru is: az acélváz szerkezeti elemei is jól kivehetők, sőt a darugém alatt valószínűsíthető az emelőhorog, továbbá az ellensúly feletti oldalon a drótkötél is. A teljes jelalakos feldolgozás nélkül ezek a részletek aligha lennének észlelhetők, főleg a daru függőleges tartóoszlopán nem. Érdeemes megfigyelni a környező fák szintén kirajzolódó ágszerkezetét. Ez a részletes kép szintén túlnyomórészt a teljes jelalakos eljárás eredményeként látható.

A következő képen a kismartoni stadion felvétele látható (4.a-b-c ábra – lásd hátsó borítóoldalon színesben). A tribünz védő előtétő mellett a pályát megvilágító reflektorlámpák tartóoszlopai az előző példában látott daruéhoz hasonló részletességgel figyelhetők meg. Érdekességképpen bemutatjuk magát futballpályát is. S bár az előbbi képen is rajta vannak, de kevésbé kivehetők, ezért egy keresztiszelvényben kiemeltük a focikapukat (5. ábra). A magasságtorzítás igen jelentős, mintegy ötvenszeres. Az ábrán néhány tucat pont erejéig látható focikapuk mellett az is észlelhető, hogy a pálya nem tökéletesen sík, hanem a kapuk előtti területen (nagyjából a büntetőterületen) alacsonyabb mindkét oldalon. (Más szelvényben vizsgálódva hasonló eredményt kaphatunk.) Ez főleg a pálya használatának, „antropogén erózióknak” tudható be. Ez a bemutatott példa jól szemlélteti, hogy speciális feldolgozási és célzottan választott megjelenítési eljárások bevetésével az adatrendszerből milyen finom domborzati részletek is kiolvashatók.

### Alkalmazási példák

A módszer a feldolgozás bonyolultságából és időigényéből adódóan jelenleg viszonylagosan drága. A feldolgozórendszerek messze nem szabványosak, és félüzeminek tekinthető vizsgálatok folynak a módszerfejlesztő műhelyekben. Ennek megfelelően olyan területen és olyan célra érdemes használni az eljárást, ahol a hagyományosabb lézerszkennelési módszer nem vagy kevésbé alkalmazható.

Itt elsősorban a növényzetmonitorozás területéről említhetünk példákat: a módszer tovább-



5. ábra Hossz-szelvény a kismartoni stadion küzdőterén keresztül (erősen, kb. 50-szeresen magasságtorzított). A számok az adriai tengerszint feletti magasságot jelentik. A képen ábrázolt 1349 pontból néhány tucat esik a két kapura. Figyeljük meg a talaj szintjének változását (magyarázat a szövegben).

fejleszthető a nehezen megközelíthető helyeken való lombkoronaszint-meghatározásra (Hollaus et al. 2006), illetve az erdészeti fatömegbecslésre (Hollaus et al. 2007).

Ahogy már említettük, az itt bemutatott adatok egy, a Lajta-hegység régészeti lelőhelyeinek távérzékelési módszerekkel történő felderítését és vizsgálatát célzó projekt keretében keletkeztek (Doneus et al. 2007). A probléma kifejezetten a teljes jelalakos módszer alkalmazását igényli, hiszen a területet jó részét erdő borítja, ahol várhatóan kettőnél több felület azonosítására van szükség a megcélzott eredmény eléréséhez. A régészetben igen nagy jelentősége lehet egy akár néhány deciméteres dombocskának is, amit erdős területen más módszerrel nemcsak lemérni nehéz, de adott esetben felismerni is alig lehet.

Egy, hazánkban különös jelentőséggel bíró alkalmazási területet feltétlenül meg kell említenünk. Az alföldi területek igen alacsony reliefje miatt a magasságviszonyok nagy területre vonatkozó, elegendően pontos meghatározása az eddigi technológiákkal igen munkaigényes (ld. pl. Kolcsár 2001) vagy egyáltalán nem kivitelezhető. Az ártéri erdők, az ökoszisztémájuk szempontjából igen jelentős vizenyős területek (wetlands), például Gemenc domborzati viszonyainak részletes ismerete pedig elengedhetetlenül fontos nemcsak a környezetrekonstrukciós

kutatások (pl. *Timár et al.*, 2005) miatt, hanem árvízvédelmi szempontból is. Az árvízi havária helyzetek modellezése, lefolyásmodellek számítása csak akkor lehetséges, ha a tényleges domborzati viszonyokat is kellő részletességgel és pontossággal ismerjük azokon a területeken is, amelyeket sűrű erdők vagy az alföldi területeken gyakran előforduló, nehezen járható akácok borítanak. A lézerszkennelés nyújtotta pontosság – megfelelő célirányos feldolgozás és az eredmények minőségellenőrzése esetén – lehetővé teszi a kapott domborzati és terepmodellek közvetlen felhasználását az árvízvédelemben.

Végezetül a ALS-technológián alapuló domborzati és terepmodellek felhasználásának egy még újabb területéről ejtünk szót. A *tektonikus geomorfológia*, mely egyike a geomorfológia jelenleg talán leggyorsabban fejlődő ágainak, magától értetődően rendkívüli módon igényli a nagyfelbontású és nagy pontosságú digitális domborzati adatokat.

Ahogy azt a fentiekben a futballpálya példáján láttuk, a lézerszkennelés igen kis lejtőszögek kimutatására alkalmas, teljes jelalak vizsgálata esetén pedig egészen sűrű növényzet mellett, de az ún. levélfelületi index (leaf area index, LAI) még nem éri el az 1-et, azaz a teljes levélfedést, egészen bonyolult felszíntípusok magasságának meghatározására is van lehetőség. Hazánkban az Alföldön és a Kisalföldön feltétlenül nagy jelentősége van a módszernek a tektonikus geomorfológiai használatban, hiszen a horizontális és vertikális mozgásoknak (*Joó*, 1992; *Joó et al.*, 2006) legtöbbször felszíni kifejeződése is van, még akkor is, ha ez csak néhány deciméteres, esetleg 1 méteres nagyságrendet ér el az alföldi területeken. Az ALS-mérésekből levezetett domborzati modelleknél általában elkerülhetők azok a problémák, amelyek például a Kisalföld fotogrammetriai módszerrel készült, kisebb felbontású domborzatmodelljeinél fellépnek, ha tektonikus geomorfológiai célokra kívánjuk őket felhasználni (*Zámolyi*, 2006).

Ebben a felbontási tartományban már az ún. sinkhole-probléma sem igazán jelentkezik: a tisztított adatrendszerben valóban csak azok a területek lesznek mélyedések, amelyek a valóságban ténylegesen léteznek. A megbízható adatokból levont neotektonikai következtetések fontos hozzájárulást jelenthetnek egy-egy vető aktivitásának bizonyításához.

## Összefoglalás

Az utóbbi években a nagyfelbontású és nagy pontosságú teradatok iránt egyre növekvő igény alakult ki a legkülönbözőbb szakterületeken. A légi lézerszkennelés (Airborne Laser Scanning, ALS) alkalmas ilyen nagy pontosságú és nagy mennyiségű adat előállítására. A szolgáltatásszerűen elérhető ALS-rendszerek tipikusan a visszaverődő lézernyaláb első és utolsó beérkező jelét (first echo/last echo) tudják rögzíteni, ami azonban sok alkalmazás szempontjából nem elegendő, különösen növényzettel borított vagy erősen beépített területek esetén. A lézerszkennerek legújabb generációja már képes a visszavert lézerimpulzus teljes jelalakjának rögzítésére, így lehetővé teszi az említett területeken is a nagysűrűségű adatfelvételezést. A visszavert jelek detektálásához és kvantitatív értékeléséhez összetett feldolgozó szoftverre van szükség, mely jelenleg is fejlesztés alatt áll, és messze nem tekinthető szabványosítottnak. Jelen tanulmányban bemutatjuk a teljes jelalakos lézerszkennelés módszerét, az adatfeldolgozás menetét, és néhány alkalmazási példát is megemlítünk. Az alkalmazások közül az árvízvédelemben, a környezetmonitorozásban, továbbá a régészetben és a tektonikus geomorfológiai felhasználásban betöltött szerepét emeljük ki.

### Digital terrain and surface models by full-waveform laser scanning – new possibilities in terrain modelling with increased precision

*Székely, B.–Molnár, G.–Roncat, A.*

#### Summary

The last decade has seen an increasing demand for high-resolution and high-accuracy digital terrain and surface model data in various disciplines. Airborne Laser Scanning (ALS) is a suitable technique for acquiring spatial data with a high point density. Commercial ALS systems could deliver only the first and last echo of a laser beam. However, this is not sufficient for many applications, especially in areas with dense canopy cover or high housing density. The newest generation of scanners, recording the full waveform of the reflected laser pulse, make a high density data acquisition possible

in this type of regions. For echo detection and quantification, a sophisticated signal analysis is required which is being developed and not yet standardized. In this paper, the principle of full-waveform (FWF) ALS, methods of data processing and some application examples are presented. The range of applications includes flood control measures and environmental monitoring as well as archaeology and tectonic geomorphology.

#### Köszönetnyilvánítás

Az ALS adatok a „Celts in the Hinterland of Carnuntum” és „LiDAR supported prospection of woodland” című FWF (Ausztria) projektek keretében keletkeztek (P16449-G02; P18674-G02) Bécsi Műszaki Egyetem Fotogrammetriai és Távérzékelési Intézetének lézerszkenneléssel és távérzékeléssel foglalkozó Christian Doppler Laboratóriumában. A két első szerző a geomorfológiai vizsgálatait a T47104 sz. OTKA pályázat keretében végzi.

#### IRODALOM

- Barsi Á.–Detrekői Á.–Lovas T.–Tóvári D.* (2003): Adatgyűjtés légi lézerlevegővel. *Geodézia és Kartográfia* 55(7): 10–17.
- Barsi Á.–Lovas T.–Tóth C. K.* (2006): Helymeghatározás mobil térképező rendszerben. *Geodézia és Kartográfia*, 58(4): 3–8.
- Doneus, M.–Briese, Ch.–Fera, M.–Fornwagner, U.–Griebl, M.–Janner, M.–Zingerle, M.-C.* (2007): Documentation of analysis of archaeological sites using aerial reconnaissance and Airborne Laser Scanning. XXI International CIPA Symposium, 01–06 October, Athens, Greece.
- Höfle, B.–Geist, T.–Rutzinger, M.–Pfeifer, N.* (2007): Glacier surface segmentation using airborne laser scanning point cloud and intensity data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Espoo, Finland (CD-ROM).
- Hollaus, M.–Wagner W.–Eberhöfer, C.–Karel, W.* (2006): Accuracy of large-scale canopy heights derived from LiDAR data under operational constraints in a complex alpine environment. *ISPRS J. Photogr. Rem. Sens.* 60(5): 323–338.
- Hollaus, M.–Wagner W.–Maier, B.–Schadauer, K.* (2007): Airborne laser scanning of forest stem volume in a mountainous environment. *Sensors*, 7(8): 1559–1577.
- Joó, I.* (1992): Recent vertical surface movements in the Carpathian Basin. *Tectonophysics*. 202: 129–134.
- Joó I.–Balázsik V.–Guszlev A.–Végső F.* (2006): A függőleges felszínmozgások „okozói” hatásának szétválasztása és bemutatása a Középső-Tisza és a Körösök vidékén. *Geodézia és Kartográfia*, 58(4): 17–23.
- Kolcsár I.* (2001): Árvízvédelmi célú domborzatmodell a Tisza folyó egy szakaszára. *Geodézia és Kartográfia* 53(5): 17–23.
- Kraus, K.* (2007): *Photogrammetry: Geometry from images and laser scans* (2. kiadás). Walter de Gruyter, Berlin–New York.
- Kugler Zs.–Barsi Á.–Mélykúti G.–Ládai A. D.* (2005): Automatikus fotogrammetriai eljárással előállított digitális terepmodell városi környezetben. *Geodézia és Kartográfia* 57(12): 12–17.
- Roncat, A.–Wagner, W.–Melzer, Th.–Ullrich, A.* (2007): Echo detection and localization in full-waveform airborne laser scanner data using the average difference function estimator. *Photogr. J. Finland* (submitted)
- Timár, G.–Sümegei, P.–Horváth, F.* (2005): Late Quaternary dynamics of the Tisza River: Evidence of climatic and tectonic controls. *Tectonophysics*, 410: 97–110.
- Wagner, W.–Ullrich, A.–Duèia, V.–Melzer, Th.–Studnicka, N.* (2006): Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. *ISPRS J. Photogr. Rem. Sens.* 60: 100–112.
- Zámolyi, A.* (2006): Nagy és kis reliefenergiájú digitális domborzati modellek esettanulmánya. *Geodézia és Kartográfia*, 58(11): 24–30.