



Európai Unió
Európai Szociális
Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

SZÉCHENYI  2020

SOPRONI EGYETEM
ERDŐMÉRNÖKI KAR

TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

2020. NOVEMBER 30.

SOPRONI EGYETEM
ERDŐMÉRNÖKI KAR





Soproni Egyetem
Erdőmérnöki Kar

TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

Szerkesztette: **Facskó Ferenc, Király Gergely**



Soproni Egyetem
Kiadó

Sopron – 2020

A kötet megjelenését az „EFOP-3.6.1-16-2016-00018 – A felsőoktatási rendszer K+F+I szerep-vállalásának növelése intelligens szakosodás által Sopronban és Szombathelyen” című projekt támogatta.

A kötet publikációit lektorálták: Bartha Dénes, Bidló András, Brolly Gábor, Czimber Kornél, Czupy Imre, Faragó Sándor, Frank Norbert, Pájer-Gálos Borbála, Gribovszki Zoltán, Heil Bálint, Hofmann Tamás, Horváth Adrienn, Horváth Tamás, Jánoska Ferenc, Kalicz Péter, Király Angéla, Király Gergely, Kovács Gábor, Lakatos Ferenc, László Richárd, Szakálosné Mátyás Katalin, Rétfalvi Tamás, Tuba Katalin, Vityi Andrea, Winkler Dániel

Soproni Egyetem Kiadó, 2020
Felelős kiadó: Prof. Dr. Fábíán Attila általános rektorhelyettes
Kézirat lezárva: 2020. november 30.

ISBN 978-963-334-376-0 (on-line verzió)

On-line verzió elérhetősége: http://emk.uni-sopron.hu/images/dekani_hivatal/Kiadvanyok/TudomanyosKozlemenyek2020.pdf

Szerkesztette: Facskó Ferenc
Király Gergely

Ajánlott hivatkozás:

FACSKÓ F.– KIRÁLY G. (szerk.) (2020): Soproni Egyetem Erdőmérnöki Kar. Tudományos közlemények. Soproni Egyetem Kiadó, Sopron.

Tartalomjegyzék

Előszó.....	5
Ács Norbert, Czímber Kornél: Webes földmérési alappontsűrítést végző alkalmazás	6
Báder Mátyás, Németh Róbert: Rostirányban tömörített faanyag zsugorodásának és dagadásának csökkentése	13
Balázs Pál, Király Géza, Nagy Dezső, Konkoly-Gyuró Éva: Az első katonai felmérés tartalmi ellenőrzése egy felső-rába-völgyi példán keresztül	19
Balázs Pál, Berki Imre, Konkoly-Gyuró Éva: Tájváltozással kapcsolatos kutatások a hazai és nemzetközi szakirodalomban	26
Barta Edit, Bakki-Nagy Imre Sándor: Vasúti felsővezeték elektromos terének mérése és számítása ...	33
Brolly Gábor, Bazsó Tamás: Oktatási fejlesztések az okleveles erdőmérnök szak Földmérés tantárgy gyakorlatain	40
Brolly Gábor, Király Géza: Földi lézerszkennelt pontthalmazok tájékozására alkalmas szoftverek összehasonlítása erdei fák térképezése szempontjából.....	45
Czímber Kornél, Burai Péter, Román András: Légi lézeres és hiperspektrális faállomány-felmérés első eredményei.....	51
Czupy Imre, Mészáros Imre, Vágvölgyi Andrea: A soproni szennyvíztisztító telep biogázüzemre vetített energiamérlege.....	61
Csáki Péter, Czímber Kornél, Király Géza, Kalicz Péter, Zagyvainé Kiss Katalin Anita, Gribovszki Zoltán: Erdőállományok vízháztartásának vizsgálata az Alföldön, leskálázott párolgástérképek segítségével	69
Csanády Viktória: Vízszennyezési adatok modell vizsgálata	74
Deák István György, Horváth Sándor: Pamo Mangala farm (Észak-Zambia) vadállományának állapota	81
Elekne Fodor Veronika, Biró Barbara, Horváth Adrienn, Polgár András : A közlekedés környezeti hatásainak lehetséges monitorozása az M85 gyorsforgalmi út tükrében.....	85
Fülöp Viktor Géza, Horváth Sándor: A tűzifa, az energetikai célú erdei apríték, valamint az ipari fakitermelési és piaci változásai 2007 és 2018 között	91
Gálos Borbála, Kiss Márton: Meteorológiai mérések a Soproni-hegységben.....	97
Gribovszki Zoltán, Kalicz Péter: Párolgás okozta napi ingadozás és annak információtartalma (módszerek az evapotranszpiráció számítására).....	105
Gribovszki Zoltán: Vízpótlások erdőterületen, elmélet és esettanulmányok	112
Herceg András, Kalicz Péter, Primusz Péter, Gribovszki Zoltán: Az éghajlatváltozás hatása az útpályaszerkezetre	119
Hofmann Tamás, Visiné Rajczi Eszter, Albert Levente: Bükk (<i>Fagus sylvatica</i> L.) faanyag polifenol készletének folyadékkromatográfiás/tömegspektrometriás vizsgálata	127
Hofmann Tamás, Visiné Rajczi Eszter, Albert Levente : Bükk (<i>Fagus sylvatica</i> L.) levél antioxidáns kapacitásának és polifenol készletének vizsgálata.....	132
Hofmann Tamás, Visiné Rajczi Eszter, Albert Levente: Tölgyfajok levél-antioxidáns tartalmának összehasonlító vizsgálata	137
Horváth Attila László, Szakálosné Mátyás Katalin: A harveszteres fakitermelés teljesítményének javítási lehetőségei szimulátor segítségével	142
Horváth Attila László, Szakálosné Mátyás Katalin: A harveszteres gépkezelők szimulátoros képzésének hatása a munka gazdaságosságára	149
Horváth Attila László, Major Tamás, Szakálosné Mátyás Katalin: Harveszteres fakitermelési módszerek termelékenységeinek összehasonlítása	156
Horváth Bíbor Júlia, Németh Róbert, Báder Mátyás: A rostirányban tömörített faanyag zsugorodás-dagadásának vizsgálata.....	163
Kapocsi Gergely, Horváth Sándor, László Richárd: N agyvadállomány vagyon-kezelésének elemzése az Országos Vadgazdálkodási Adatbázis állománybecslési és elejtési adatainak tükrében	170
Katona Csaba, Bazsó Tamás, Péterfalvi József, Primusz Péter: BLK360 lézerszkennő alkalmazása vonalas létesítmények felmérésére: jelek és távolságok.....	177
Kovács Gábor, Heilig Dávid, Heil Bálint: Fás szárú energetikai ületvények technológiáját és ökonómiáját befolyásoló tényezők a gyakorlatban.....	187

Kovács Klaudia, Vityi Andrea, Horváth Attila László: Agroerdészeti erdei köztes termesztésű rendszerek technológiája.....	195
Major Tamás, Pintér Tamás, Szakálosné Mátyás Katalin: Gyökérsarj eredetű akác állományok összehasonlító vizsgálata a SEFAG Erdészeti és Faipari Zrt. területén.....	200
Major Tamás, Horváth Attila, Virág Vivien: Harveszteres gépi faanyagfelvételezés összehasonlító vizsgálata.....	205
Marcisin Tamás, Király Gergely: Az állomány záródása és az újulatszám összefüggéseinek vizsgálata nyírségi vörös tölgyesekben	210
Németh Zsolt István, Kiss Péter Áron, Rákosa Rita: Faanyagok FT-IR spektrum alapú osztályozása kemometriás módszerekkel	217
Nevezi Csenge, Bazsó Tamás, Csáki Péter, Gribovszki Zoltán, Kalicz Péter, Zagyvainé Kiss Katalin Anita: Hidrológiai és botanikai folyamatok összefüggéseinek vizsgálata egy patakmenti erdőállomány és nedves rét területén.....	221
Novák Dominik, Németh Róbert, Báder Mátyás: A jövő faimpregnáló polimerje. A tejsav tömörfában történő felhasználásának áttekintése	227
Papp Viktória, Szalay Dóra: Pirolízis korom és faanyag keverék pelletek energetikai és mechanikai vizsgálata.....	232
Péterfalvi József, Primusz Péter: Talajstabilizációk szerepe az erdészeti útépítésben	237
Polgár András, Jagodics Nóra, Horváth Adrienn, Elekné Fodor Veronika: Szántóföldi növénytermesztés környezeti hatásai	247
Polgár András, Antal Mária Réka: Faipari élzárési típusok környezeti hatásainak vizsgálata.....	254
Rákosa Rita, Pásztory Zoltán, Börcsök Zoltán, Németh Zsolt István: IR spektrometria a faanyag hőkezelésének monitorozására	263
Rákosa Rita, Szegleti Csongor, Németh Zsolt István: Műanyag hulladékok osztályozása FT-IR spektrumok alapján.....	268
Szakálosné Mátyás Katalin, Fekete György, Horváth Attila László: Lovak alkalmazása és jövője a hazai fahasználatokban	273
Szakálosné Mátyás Katalin, Gimesi Kristóf Szilárd, Major Tamás, Horváth Attila László: Kötélpályás közelítés vizsgálata a soproni hegyvidéken	278
Szakálosné Mátyás Katalin, Sudár Ferenc János, Horváth Attila László: A többműveletes fakitermelő gépek kíméletességének fokozása harveszter szimulátor segítségével.....	284
Szöke Előd, Csáki Péter, Kalicz Péter, Zagyvainé Kiss Katalin Anita, Gribovszki Zoltán: Hidrológiai vizsgálatok egy fás legelőn.....	291
Tari Tamás, Sándor Gyula, Náhlik András: A vaddisznó lakott-területi megjelenésének jellemzői kérdőíves felmérés eredményeinek tükrében.....	298
Tóth Mihály Zoltán, Németh Róbert, Báder Mátyás: Fahegesztés vízgőz és nyomás segítségével.....	305
Vadkerti Tóth Balázs, Németh Róbert, Báder Mátyás: Fahajlítás anatómiája – Áttekintés.....	311
Vágvölgyi Andrea, Szalay Dóra: Stratégiai elemzőmódszer alkalmazása az energetikai célú fás szárú ültetvények vizsgálatára.....	318
Vágvölgyi Andrea, Mészáros Imre, Czupy Imre: Szennyvíziszap komposztálás anyagmérlegére irányuló vizsgálatok	325
Vágvölgyi Andrea, Szigeti Nóra, Czupy Imre, Beszédes Sándor, Szalay Dóra: Fás szárú ültetvények technológiai és ökológiai szempontú siker-kudarcc tényezőinek vizsgálata.....	329
Vajda József, Horváth Sándor: A COVID-19 hatása az amerikai agrártámogatási rendszerre.....	336
Visiné Rajczi Eszter, Albert Levente, Hofmann Tamás: A fakéreg antioxidáns tulajdonságainak kiértékelése	342
Visiné Rajczi Eszter, Albert Levente, Bocz Balázs, Bocz Dániel, Hofmann Tamás: Tobozok antioxidáns tulajdonságainak vizsgálata	348
Zagyvainé Kiss Katalin Anita, Gribovszki Zoltán, Kalicz Péter, Szöke Előd, Varga Jenő, Csáki Péter: Agrárerdészeti rendszer talajnedvességének vizsgálata fertődi mintaterületen.....	354

BLK360 LÉZERSZKENNER ALKALMAZÁSA VONALAS LÉTESÍTMÉNYEK FELMÉRÉSÉRE: JELEK ÉS TÁVOLSÁGOK

KATONA CSABA, BAZSÓ TAMÁS, PÉTERFALVI JÓZSEF, PRIMUSZ PÉTER
Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet
csabakatonaa@gmail.com

A tanulmányban a Leica BLK360 földi lézerszkenner alkalmasságát vizsgáltuk vonalas létesítmények felmérésére. Kitérünk az ehhez szükséges jel-műszer távolságokra, a céljelek megválasztására, és a gömbalakú illesztőjelek utófeldolgozására leginkább javasolt regressziós módszerekre. Áttekintettük a nemlineáris legkisebb négyzet módszerén alapuló korlátozással és korlátozás nélküli gömbillesztést, a lineáris legkisebb négyzetek módszerét és a RANSAC eljárást. A műszer terepi vizsgálata egy 530 méter hosszú, önmagába záródó teszt pályán történt, ahol a mérőállomással bemért álláspontok 20-40 méterre helyezkedtek el. A lézerszkennerrel rögzített gömbalakú illesztőjelek középpontjait és sugárértékeit négy módszerrel számoltuk vissza, és az eljárásokat jellemző hiba (RMSE) vagy sugár értékeket a mérési távolság függvényében elemeztük. A lézerszkennerrel meghatározott álláspontok koordinátáit végül a mérőállomással bemért pontokkal hasonlítottuk össze. Tanulmányunk végén javaslatot teszünk a gömbalakú illesztőjelek maximális távolságára, és a pontos gömbillesztéshez szükséges minimális pontszámra és RMSE értékre.

Bevezetés

A Leica BLK360 földi lézerszkenner egy kompakt, könnyen kezelhető mérőműszer, amelyet leginkább az építőiparban használnak belső terek felmérésére. Az ilyen típusú méréseknél a több álláspontból felmért ponthalmazok tájékoztatásához nem szükséges kapcsolójeleket alkalmazni, mivel a közös pontokat a pontfelhők részleteinek egyeztetésével (sík felületek illesztésével) automatikusan detektálják a feldolgozó szoftverek. A lézerszkenner részletes specifikációját az 1. táblázat foglalja össze.

A BLK360 lézerszkennerrel kísérleti jelleggel erdőállományok felmérésére BROLLY ÉS MTSAI. (2019) sikeresen alkalmazták a Pilisi Parkerdő Zrt. területén. A négy műszerállásból készült pontfelhők tájékoztatásához egymástól 10-15 méterre elhelyezett saját készítésű sík jeltárcsákat használtak fel, ami magas pontsűrűségű mérőmód mellett, legfeljebb 5 mm körüli névleges ponttávolságot eredményezett. Ez az illesztőjel távolság és pontosság a legtöbb terület vagy erdőbecslési célú felméréshez elegendőnek tekinthető.

Vonalas létesítmények felmérésénél (pl. erdészeti feltáróutak) a 10-15 méter kapcsolójel távolság már nem elégséges, mivel nem teszi lehetővé a hatékony munkát. Az ilyen célú felhasználáshoz legalább 20-30 méteres jeltávolságok alkalmazása szükséges a mérési pontosság megtartása mellett, mivel egy nap 800-1000 métert is fel kell tudni mérni. Cikkünkben ezért az optimális illesztőjel távolság és hiba nagyság meghatározásával és az ehhez szükséges eszközökkel és feldolgozási módszerekkel foglalkozunk.











Illesztőjelek a pontfelhők tájékoztatásához

Az illesztőjeleket általában statikus földfelszíni lézerszkennelési feladatokban használják kapcsolópontokként a pontfelhők együttes tájékoztatására vagy földi vonatkozási rendszerbe illesztésére (CHOW ÉS MTSAI., 2010). A jelenleg leggyakrabban használt illesztőjel típusok a gömb, a henger és a síkbeli tárcsa (DOLD ÉS BRENNER 2006). A gyakorlatban leginkább az illesztőgömbök és az álló- és fekvőtengelyük körül elforgatható sík jeltárcsák terjedtek el. Az illesztőgömbök nagy előnye, hogy nem kell forgatni őket, minden oldalról ugyanolyan homogén felületet mutatnak a műszernek.

1. táblázat: A Leica BLK360 legfontosabb műszaki jellemzői

Szkenelés	
Táv mérés metodika	Időmérés (ToF) + WFD technológia
Távolság	min. 0,6 m és max. 60 m
Pont mérés sebessége	Legfeljebb 360 000 pont/mp
Mérési pontosság	4 mm @ 10 m és 7 mm @ 20 m
Mérési modellek	3 felbontás: alacsony, közepes és magas

2. táblázat: Ajánlott jeltárcsa méret és távolság a pontsűrűség figyelembevételével (Leica BLK, 360).

Jelek:										
[1] 15,2 cm [2] 11,4 cm										
BLK360 pontosűrűség	Távolság 3,0 m (10')	Távolság 7,5 m (25')	Távolság 10,5 m (35')	Távolság 13,5 m (45')	Távolság 16,5 m (55')					
[1] Alacsony	✓	✓	✗							
[2] Közepes	✓	✓	✓	✓	✓	✗				
[3] Magas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

A gömbfelület precíz felismeréséhez vízszint – ami a középpont pontos meghatározásának feltétele – viszonylag nagyszámú pontmérésre van szükség. Ezzel szemben a jeltárcsákat mindig a műszer felé kell fordítani, cserébe a felismeréshez kevesebb pont is elegendő, főként az intenzitás a lényeges információ (RADÓCZY 2013).

A hivatalos gyártók által kínált illesztőjelek nagyon magas minőséget képviselnek, de ennek megfelelően igen magas áron juthatunk csak hozzájuk. Sokszor azonban a feladat nem igényli ezeket a hitelesített nagy pontosságú illesztőjeleket, ezért mi magunk is készíthetünk olcsó illesztőgömböket és tárcsákat a pontfelhők tájékozásához. (BRAZEAL 2013) munkájában kimutatta, hogy az olcsó polisztirol vagy a 3D nyomtatással készült gömbök a legtöbb feladat számára jól megfelelnek, és az így készült jelek pontossága csak elhanyagolhatóan marad el a hivatalos illesztőjelekéhez képest.

A Leica cég vizsgálta a BLK360 műszer céltartományait sík jeltárcsák esetén (Leica BLK é. n., 360). A vizsgálatban két eltérő méretű síktárcsát, egy 15,2 cm (6 hüvelyk) és egy 11,4 cm (4,5 hüvelyk) átmérőjűt használtak fel eltérő távolságokban, és mindegyiket három mérési felbontás (pontosűrűség) mellett rögzítették. A kísérlet eredményét a 2. táblázat foglalja össze, amiből jól látszik, hogy a legmagasabb felbontásnál a 16,5 m távolságra lévő ~15 cm átmérőjű tárcsa képe még éppen felhasználható volt a pontfelhők regisztrálásához.

Ez az eredmény előre vetíti, hogy a 15 méternél nagyobb távolságokra elhelyezett illesztőjel méretét mindenképpen 15 cm-nél nagyobbra kell választani, és csak magas pontsűrűségű mérési mód mellett érdemes a felmérést kivitelezni.

Gömbillesztő eljárások

Az illesztőgömbök használatához fontos megválasztanunk a regressziós módszert, amellyel a gömbök középpontját vagy adott esetben sugarát a mérésekből vissza tudjuk számolni. A térbeli pontokra támaszkodó gömbillesztés széles körben tanulmányozott probléma és számos algorit-

mus létezik a megoldására. Ezek a módszerek feltételezik, hogy a térbeli ponthalmaz megfelelően van szegmentálva, tehát az adattáblomány nem tartalmaz a gömbhöz nem tartozó pontokat. A legtöbb eljárás a legkisebb négyzetek módszerével oldja meg a feladatot.

Definíció szerint gömbnek nevezzük a térben azon pontok halmazát, melyek egy adott P ponttól legfeljebb egy rögzített r távolságra vannak. Ekkor P -t a gömb középpontjának, r értékét pedig a gömb sugarának nevezzük. Az analitikus geometriában, az (x_0, y_0, z_0) középpontú és r sugarú gömb felületét azok az (x, y, z) pontok alkotják, melyekre fennáll az alábbi egyenlőség:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2 \quad (1)$$

A továbbiakban három módszert tekintünk át, amelyek a gömb középpontjának és sugarának meghatározására szolgálnak.

Nemlineáris legkisebb négyzetek módszere (NLS)

A nemlineáris legkisebb négyzetek módszere (NLS) minimalizálja az adott ponthalmaz és az arra legjobban illeszkedő gömbfelület közötti távolságok négyzetének összegét. A módszer használatához szükséges célfüggvényt a (2) egyenlet adja, és ortogonális hibafüggvénynek nevezzük (RACHAKONDA ÉS MTSAL. 2017):

$$F = \sum_{i=1}^n f_i^2 = \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} - r \right)^2 \quad (2)$$

A fenti egyenletben négy ismeretlen van (x_0, y_0, z_0, r) ezért a módszert „ortogonális korlátozás nélküli illeszkedésnek (OUF³)” nevezzük. Ha a gömb sugara ismert és rögzített, akkor már csak három ismeretlent kell meghatározni (x_0, y_0, z_0) ; erre a minimalizálási módszerre röviden „ortogonális korlátozott illesztésként (OCF⁴)” hivatkozunk. A regressziós feladat megoldására több optimalizációs technika közül választhatunk, pl. Gauss–Newton vagy Levenberg–Marquardt-módszerek.

Lineáris legkisebb négyzetek módszere (LLS)

$$F = \sum_{i=1}^n f_i^2 = \sum_{i=1}^n ((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2 - r^2)^2 \quad (3)$$

A (3) egyenletben szereplő f_i függvény kifejtve:

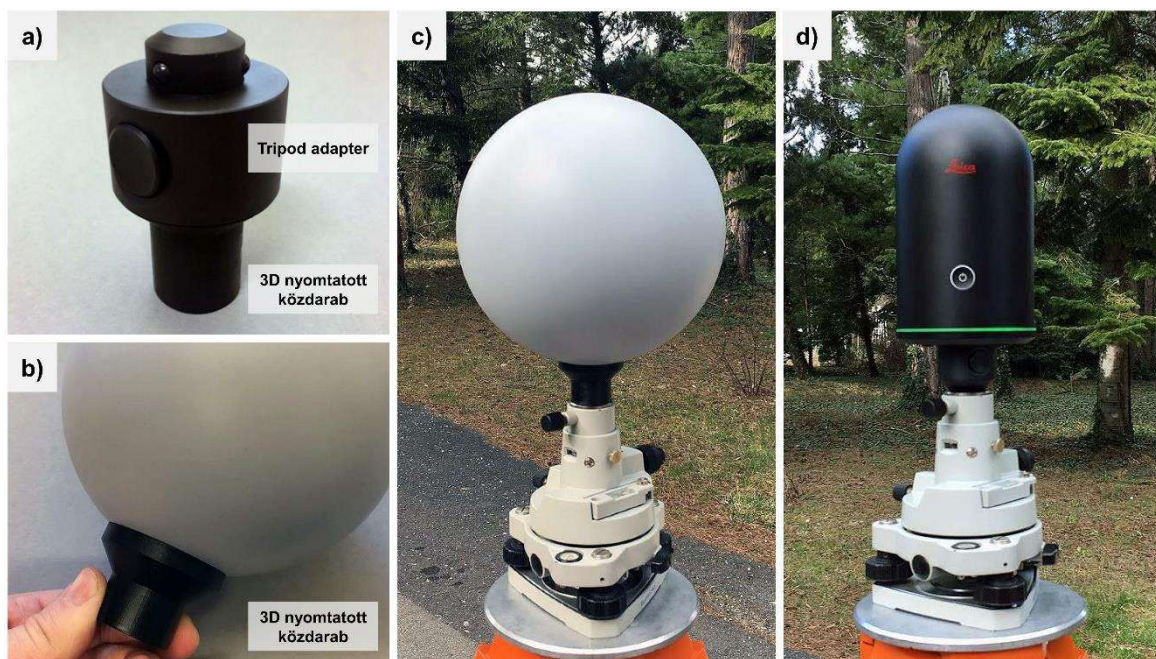
$$f_i = -2x_i x_0 - 2y_i y_0 - 2z_i z_0 + (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) + (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - r^2) \quad (4)$$

Az előbbieken bemutatott NLS eljárás tipikusan iteratív módszerekkel oldja meg a gömbillesztést, ahol megkövetelt a keresett paraméterek kezdőértékének becslése, amelyet ezután a megoldó algoritmusok folyamatosan finomítanak a megfelelő illesztés érdekében. Egy ilyen kezdeti becslés úgy adható meg, hogy minimalizáljuk az egyenlettel leírt célfüggvényt (RACHAKONDA ÉS MTSAL., 2017):

A (4) egyenletnek négy ismeretlen paramétere van (x_0, y_0, z_0, r) , amiket az F hibafüggvény minimalizálásával határozhatunk meg az $\mathbf{AX} = \mathbf{B}$ lineáris egyenletrendszer megoldásakor (RACHAKONDA ÉS MTSAL. 2017; JEKEL 2016):

3 Orthogonal Unconstrained Fit

4 Orthogonal Constrained Fit



1. ábra: Saját készítésű jelek és adapterek: a) BLK360 tripod adapter és 3D nyomtatott közdarab, b) műanyag kültéri karácsonyfadísz a 3D nyomtatott rögzítő adapterrel, c) 20 cm átmérőjű illesztőgömb prizmatalpon, d) BLK360 lézerszkennő prizmatalpon

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -2x_1 & -2y_1 & -2z_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -2x_n & -2y_n & -2z_n & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \rho \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -(x_1^2 + y_1^2 + z_1^2) \\ \vdots \\ -(x_n^2 + y_n^2 + z_n^2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

és

$$\rho = (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - r^2) \quad (6)$$

Az (x_0, y_0, z_0, ρ) paramétereket a (7) egyenletben leírt mátrix műveletek végrehajtásával kapjuk meg, feltéve, hogy a bemért gömbfelszínen négy vagy több térbeli pont áll rendelkezésünkre ($n \geq 4$):

$$\mathbf{X} = [\mathbf{A}^T \mathbf{A}]^{-1} [\mathbf{A}^T \mathbf{B}] \quad (7)$$

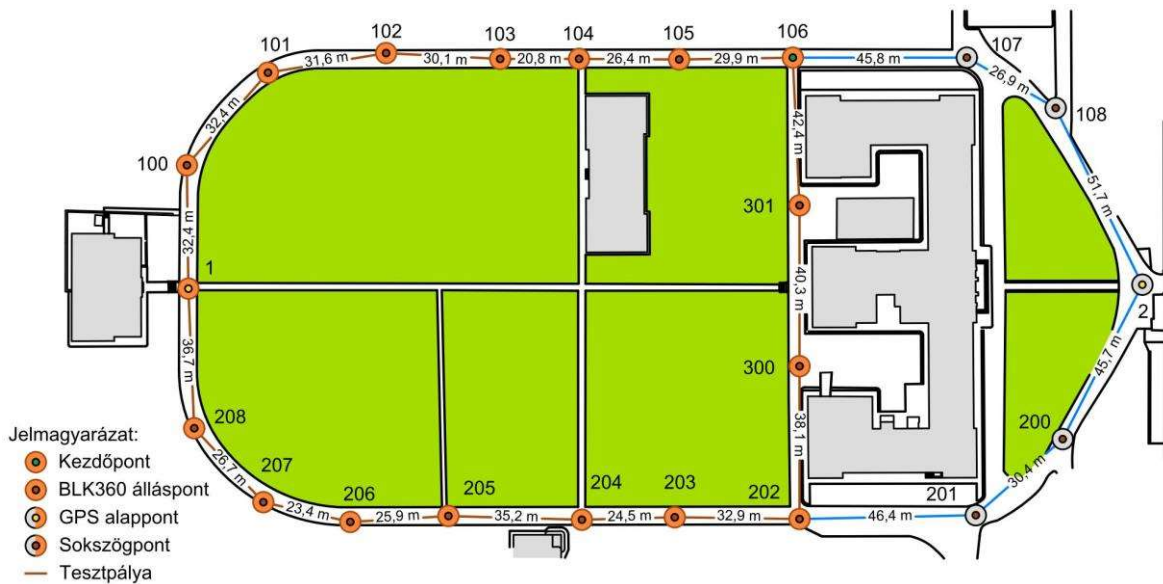
Az \mathbf{X} vektor felhasználásával kiszámíthatjuk a gömb keresett sugarát:

$$r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - \rho} \quad (8)$$

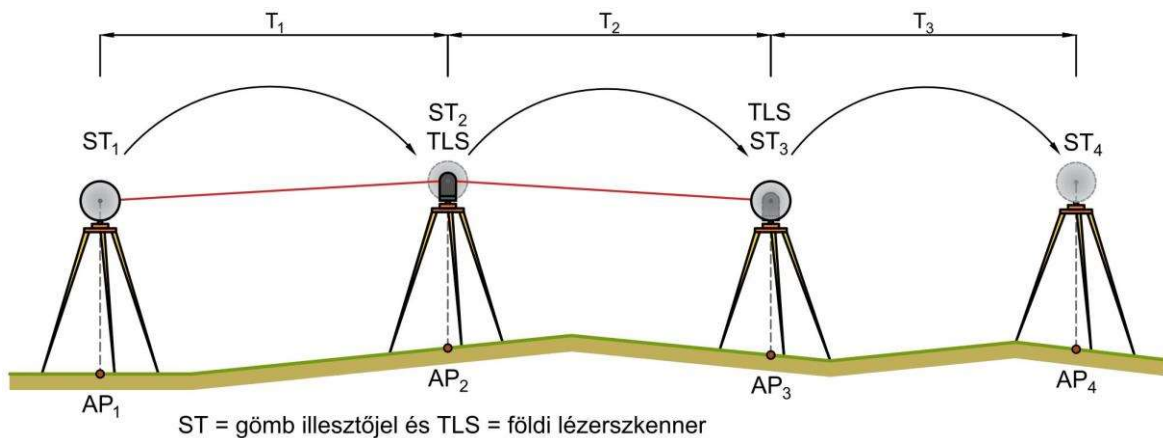
A fentiekben ismertetett gömbillesztés Python nyelvű implementációjának egy lehetséges felépítését mutatja be (JEKEL 2015) weboldala, ahol a NumPy magas szintű matematikai függvénykönyvtár biztosította a többdimenziós tömbök és mátrixok használatához szükséges algoritmusokat.

A Random Sample Consensus (RANSAC) algoritmus

Ez az eljárás is a legkisebb négyzetek elvén alapul, de az eddigiektől eltérően nem minden pontot használ fel a gömbfelület illesztéséhez (FISCHLER ÉS BOLLES 1981). A ponthalmazból az algoritmus véletlenszerűen kiválaszt egy mintát, amiből kihagyja az eredményt nagyban befolyásoló értékeket. Az eljárás véletlenszerűsége miatt nem ad megbízható eredményt a távolságokon alapuló hibavizsgálathoz, valamint a megfelelő minta meghatározása is időigényes folyamat.



2. ábra: A botanikus kertben kialakított tesztpálya vázrajza



3. ábra: A lézershírnél történő mérési folyamatábrája

Ez a módszer leginkább a nem szegmentált pontfelhőkön végzett gömbillesztés problémáját oldja meg, ahol az illesztőjelek pontjaihoz valamilyen objektum közelsége, illetve a jelet tartó állvány érintkezése okoz zavart.

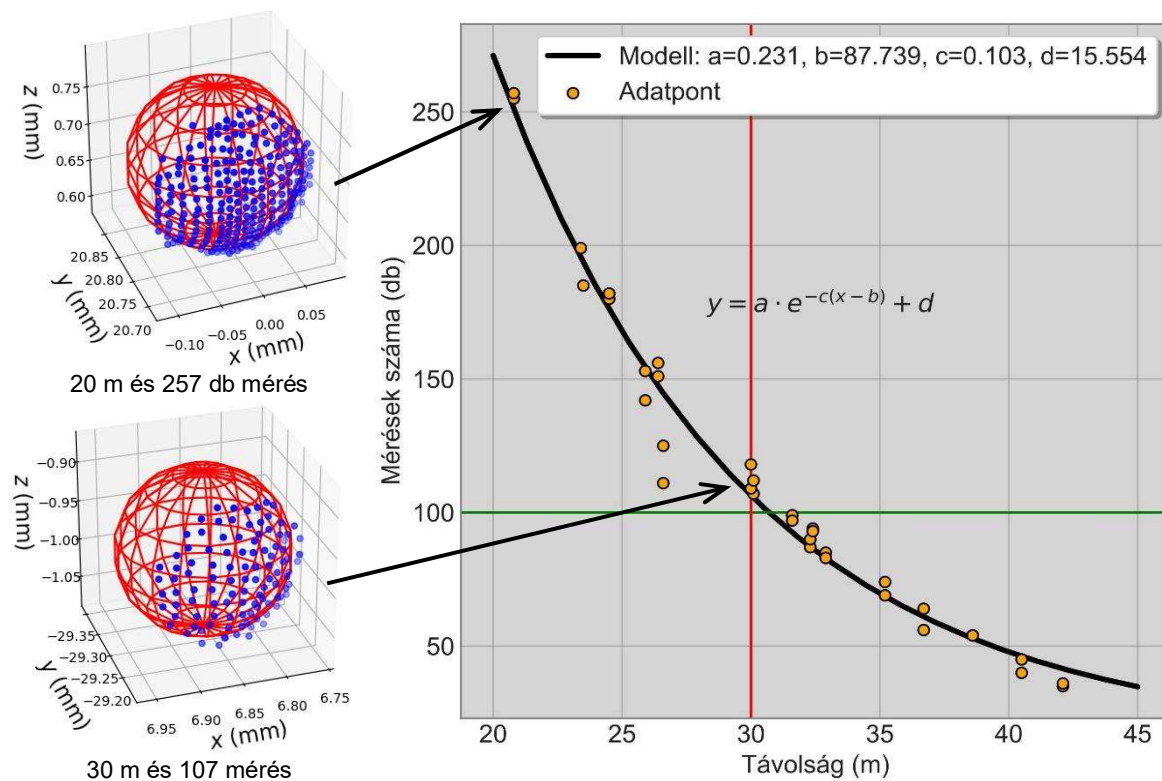
Anyag és módszer

Kutatásunkban a 15 méternél nagyobb műszer-illesztőjel távolságok hibanaságát vizsgáltuk egy vonalas létesítmény felmérésénél. Arra kerestük a választ, hogy a mekkora az a legnagyobb távolság, aminél még a BLK360 műszer a legmagasabb pontsűrűségű mérés mód mellett, még megbízhatóan meg tudja határozni az illesztőjelek paramétereit a pontfelhők pontos tájékozásához.

Az előzetes irodalmi adatok alapján min. 20 cm átmérőjű gömbalakú kapcsolójelet kellett használnunk a méréseinkhez, ami nem állt rendelkezésünkre. A Leica BLK360 lézershírnél a hozzá vásárolható gyári tripod adapter 1/4"-os állványmenetével csak fotóállványhoz vagy teleszkópos bothoz rögzíthető.

A tapasztalatok szerint viszont a fotóállványok többsége terepi munkára alkalmatlan, ezért szükség volt egy olyan közdarab elkészítésére, amivel már geodéziai műszerállványhoz is csatlakoztatható a lézershírnél (1.a. ábra).

A pontfelhők tájékozásához a gömbalakú kapcsolójeleket saját magunk készítettük el. Az anyagválasztásnál elsődleges szempont volt az ár és a pontosság.



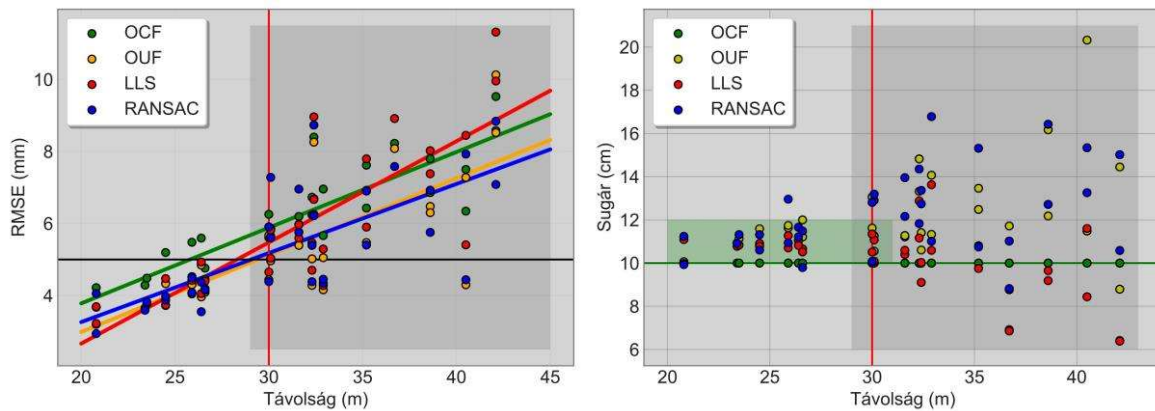
4. ábra: A gömbalakú illesztőjeleken rögzített pontok száma a távolság függvényében

A 10-15 cm-es átmérő tartományban olcsó és pontos jeleket lehet készíteni a kreatív hobbi-boltokban kapható polisztirol gömbökből, ennél nagyobb átmérő esetén viszont már csak a drágább műanyag kültéri gömbdíszek jöhetnek szóba a 3D nyomtatás mellett. Mivel a 3D nyomtatás költségét nagyban befolyásolja a nyomtatott darab mérete (vagyis a nyomtatás ideje), ezért a méréshez a 20 cm átmérőjű gömböket a karácsonyi időszakban beszerezhető nagyméretű karácsonyfadíszekből alakítottuk ki. Itt megoldandó feladat volt az eredetileg csillogó gömbfelületeket átfesteni matt fehérre vagy szürkére a lehető legtöbb visszaverődés érdekében. Kísérleti jelleggel a szürke színt választottuk, és a festés követően a gömböket saját tervezésű adapterekhez ragasztottuk (1. b. ábra). Az adaptereket AutoCAD-ben terveztük meg és 3D nyomtatással kivitelezttük, a nyomatoknak ABS anyagot választottunk. A tervezésnél figyelembe vettük, hogy a gömbalakú kapcsolójeleket könnyen lehessen csatlakoztatni a menetes (UNC-5/8) prizmaothoz vagy a 20 mm belső átmérőjű prizmatálphoz. Az általunk elkészített adaptereknek köszönhetően a mérés alatt a kapcsolójelek és a műszer állótengelye azonosnak tekinthető (1. c. és d. ábra).

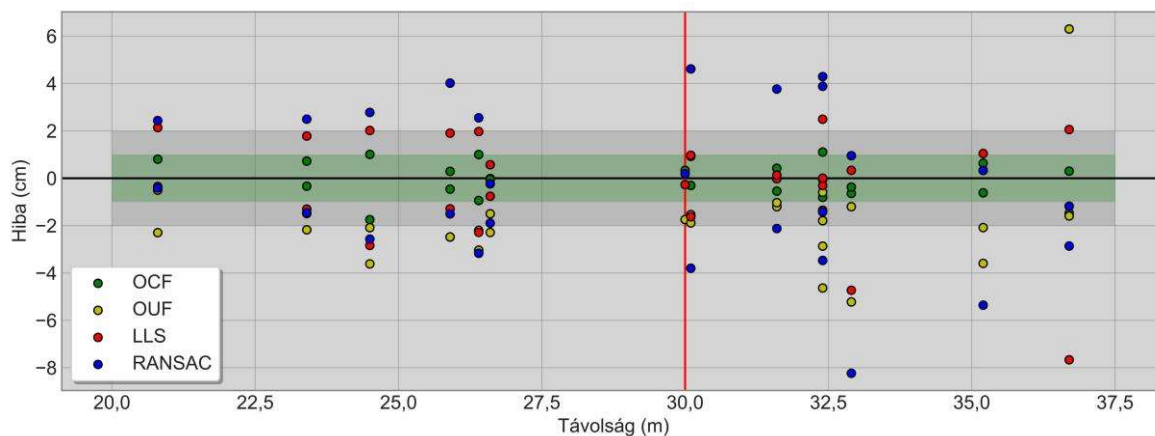
A vizsgálathoz szükséges eszközök beszerzése vagy elkészítése után kijelöltük a mérőpályát a Soproni Egyetem botanikus kertjében, ami egy önmagában végződő útszakasz volt. A kiválasztott aszfaltburkolatú út kezdőpontját a B épület Krasznai Ferenc Sportcsarnok felé eső oldalának egyik sarokpontja adta meg (2. ábra).

A botanikus kertben kialakított tesztpálya felméréséhez első lépésben a Leica 1200 GPS-el alappontokat mértünk be és állandósítottunk az egyetem főbejárata és az E épület előtt. A GPS pontok közötti alappont sűrítéshez egy Sokkia mérőállomást, a bemért sokszögvonalfeldolgozásához pedig a GeoProfi szoftvert használtuk. Az így létrejött 20 darab alappont távolságát a B és az E épületek között úgy választottuk meg, hogy lézershakkelés távolság-jelhíba aránya

meghatározható legyen, tehát 20-40 méter távolságban kerültek állandósításra. A pontok állandósításához betonszeget és fehér olajfestéket alkalmaztunk. A szkennelés 17 állásból történt, mérésenként 2 illesztőponttal.



5. ábra: Az RMSE és a visszazámolt sugár a távolság függvényében



6. ábra: A ferde távolság jellemző hibája a gömbillesztő eljárás és a mérési távolság függvényében magas pontsűrűségű mód mellett

A méréseket a legnagyobb felbontás (pontosűrűség) mellett végeztük el, ami álláspontonként körülbelül 20 percet vett igénybe. A mérési folyamat hasonlóan történt egy sokszögeléshez. A lézerszkennер egy mérési ciklus befejeztével az előtte elhelyezett illesztőgömb helyét cserélt a műszerállványok elmozdítása nélkül, majd az eredetileg mögötte lévő jelet egy új alappontra vittük át a 3. ábra szerint. Egy álláspontból tehát két illesztőgömb lett egyszerre megmérve, egy a lézerszkennер előtt és egy mögötte. Minden új műszerállás esetén a műszer és a jelmagasságot feljegyeztük.

A mérések feldolgozásához az ingyenesen elérhető CloudCompare szoftvert használtuk, ami a földi lézerszkenneléskor előforduló valamennyi utómunka végrehajtását támogatja. Az egyes álláspontokban rögzített pontfelhőkből kivágtuk a gömbfelületekhez tartozó térbeli pontokat, majd TXT fájlba exportáltuk a koordináta és intenzitás értékeket. A szegmentált pontokra a már bemutatott négyféle módszerrel gömböt illesztettünk.

Az első módszer a CloudCompare programban található gömbillesztés funkció volt. A módszer előnye, hogy a programmal a szegmentáláson túl, a kiválasztott pontokra néhány kattintással elvégezhetjük magát a gömbillesztést is.

A program gömbillesztő funkciója a RANSAC algoritmust használja, ezért minden egyes futtatásra más eredményt adott, ezek közül azt választottuk ki, ami legközelebb volt a valóságos 10 cm-es értékhez. A maradék három módszer a legkisebb négyzetek módszerén alapult és

Python programnyelvben a NumPy magas szintű matematikai függvénykönyvtár felhasználásával mi magunk implementáltuk az NLS és LLS eljárásokat. A TXT állományokból beolvastuk a térbeli pontokat, majd az algoritmusok segítségével meghatároztuk az illesztőgömbök középpontját (x_0, y_0, z_0) és sugarát (r).

Az illesztőgömbök belső hibája

A négyféle illesztéssel meghatározott gömbparaméterek jóságát eltérő szempontok szerint értékeltük. Az első lépésben a gömbillesztés ún. belső pontosságát vizsgáltuk, azaz a regisztrált pontok és az elméleti gömbfelület viszonyát elemeztük.

A gömbalakú illesztőjeleken rögzített pontok száma nagyban meghatározza a regresszió jóságát, ezért a távolság függvényében ábrázolva megállapítható, hogy kb. 30 méter felett már nagyon alacsony a pontsűrűség, így az illesztés bizonytalansága megnő. A mért adatok és az illesztett gömbfelület közötti eltérés mérésére az átlagos négyzetes hiba gyökét használtuk (Root Mean Square Error, RMSE), ami a reziduumok négyzetének átlagából von gyököt:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2} \quad (9)$$

A (9) képlettel egy jellemző eltérést kapunk a mért és becsült adatok között, mértékegysége azonos a mért adatokéval. Az RMSE mellett az elméleti gömbök sugárértéke is egy jó mutató, hiszen minél jobban megközelíti a valóságos 10 cm-es értéket, annál pontosabbnak tekinthető a gömb középpontja is. Az RMSE és a visszszámolt sugár értékeket a távolság függvényében az 5. ábra mutatja be. Az eltérést mérő mutatók együttes elemzése alapján megállapítható, hogy 30 m mérési távolságig a mérések maximális belső hibája ~10-15 mm körüli. Itt nem szabad elfelejtenünk, hogy a BLK360 szkennerek pontossága 7 mm 20 m-en. A 30 méter távolság felett a becsült sugárértékek a valósághoz képest jelentősen eltérnek, az adatok szóródását a növekvő RMSE is mutatja.

Az illesztőgömbök külső hibája

A gömbillesztő algoritmusok belső hibájának elemzése után következett a visszszámolt gömbközpontok és a mérőállomással bemért alappontok között értelmezett ferde távolságok elemzése. Azért, hogy a mért adatok összevethetők legyenek, első lépésben a visszszámolt gömb- és lézerszkennerek (0,0,0) középpontot a felírt jel- és műszermagasságok felhasználásával a bemért betonszegek szintjére vetítettük. Ezután a ferde távolság a szkennerek és a jel között már számolható a következő képlet alapján:

$$\text{SD} = \sqrt{(0 - x_0)^2 + (0 - y_0)^2 + ((0 - \text{TLS}_h) - (z_0 - \text{ST}_h))^2} \quad (10)$$

x_0, y_0, z_0 = a visszszámolt elméleti gömbközpont koordináta
 TLS_h = műszermagasság (mért érték + 15 cm)
 ST_h = jelmagasság (mért érték + 13 cm)

A mérőállomással bemért álláspontok ferde távolságainak és a különböző gömbillesztésekből meghatározott ferde távolságok különbségét a 6. ábra mutatja be. Ebben az elemzésben is jól megfigyelhető, hogy a CloudCompare segítségével illesztett gömbök nagy szórást mutatnak, ezért nem alkalmas további utómunkák végzésére. A belső hibához hasonló tendenciát mutatnak a saját Python kóddal számolt gömbparaméterek, vagyis a sugár korlátozásával végzett illesztés viszonylag távolság független eredményt hoz, ezzel szemben a korlátozás nélküli módszereknél a hiba növekszik a mérési távolság növekedésével (a pontok szóródása miatt). Az rögzített sugaras OCF eljárás ± 1 cm hibát okoz a ferde távolságban, ezért az az eljárás javasolható leginkább az illesztőjelek középpontjának visszszámolására.

Eredmények megvitatása

Földi lézerszkennerek készítésével számos cég foglalkozik, ezért összehasonlításként (RADÓCZY 2013) munkája alapján egy Faro Focus 3D műszert választottunk. A dolgozatban a Faro starter kit hivatalos 139 mm átmérőjű illesztőjeleit 20, 30, 40 és 50 méter távolságban helyezték el és különböző pontsűrűségek mellett vizsgálták, hogy a Faro Scene szoftver a gömbillesztést hogyan tudja elvégezni. A legmagasabb felbontásnál a 20 és 30 méter távolságban lévő gömbök még elfogadható eredményt adtak, amelyet a program utóbbinál 99 gömbfelületre eső mérésből számolt ki. Az ennél távolabb eső gömböket a program megjelölte, hogy az illesztést nem, vagy csak alacsony pontosság mellett tudja végrehajtani. (RADÓCZY 2013) eredményeihez hasonló eredményt kaptunk, miszerint a 30 méter távolságba helyezett jelek alkalmasak a gömbillesztés elvégzésére. Ezen a határon belül a BLK360 szkennerek 100 db-nál több gömbfelületre eső pontot regisztrál, ami már alacsony 5 mm RMSE érték és ± 1 cm hiba nagyság mellett teszi lehetővé a gömbillesztést. Ennél kevesebb mért pontnál a regressziós algoritmusok nagy RMSE mellett és igen változó sugárral és pontossággal végzik el a gömbillesztést. A vizsgált módszerek közül az OCF megoldás, amely a referencia méréshez képest a legkisebb eltérést mutatja, így a szegmentált gömbi koordinátákon végzett gömbillesztésre ezt a módszert javasoljuk.

Összefoglalás

A kutatás célja a BLK 360 földi lézerszkennerek hosszú vonalas létesítmények felmérésére való alkalmasságának vizsgálata volt. Ezt az optimális illesztőjel távolság és hiba nagyság meghatározásán és az ehhez szükséges eszközökön és feldolgozási módszereken keresztül vizsgáltuk. A mérésekhez az általunk készített 10 centiméter sugarú gömb illesztőjelet használtuk. A gömbközpontok és sugarak meghatározására négy módszert tekintettünk át. Az első CloudCompare-ben végzett RANSAC algoritmussal működő illesztésről azt állapítottuk meg, hogy a nem szegmentált felhőkön végzett illesztésre alkalmas, de az általunk áttekintett módszerek közül ez rendelkezik a legalacsonyabb pontossággal. A Python nyelven keresztül implementált OUF, OCF és LLS módszerek a szegmentált felhőkön végzett illesztésre alkalmasak, és a három algoritmus közül a pontossági vizsgálatok eredményeképpen a rögzített sugárértékkel dolgozó OCF algoritmus bizonyult a legpontosabbnak. A kutatás további eredménye, hogy a BLK360 alkalmas lehet hosszú vonalas létesítmények felmérésére, mivel a regressziót az OCF algoritmus-sal ± 1 centiméteres hibával képesek vagyunk elvégezni akár 30 m távolságban elhelyezett jelekkel is. A BLK 360 szkennerek segítségével végzett nagy távolságokat felölelő mérések további fontos vizsgálata a georeferálással keletkezett koordináták térbeli hibáinak meghatározása, ez a munka még folyamatban van.

Köszönetnyilvánítás: A kutatás az „EFOP-3.6.1-16-2016-00018 – A felsőoktatási rendszer K+F+I szerepvállalásának növelése intelligens szakosodás által Sopronban és Szombathelyen” című projekt támogatásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- BRAZEAL, R. (2013): „Low Cost Spherical Registration Targets for Terrestrial Laser Scanning”. <https://doi.org/10/gffn8v>.
- BROLLY, G, PRIMUSZ P, BAZSÓ T., KIRÁLY G. (2019): „Több műszerállásból készített lézerszkennelések tájékozása erdőállományok felmérése során”. In Soproni Egyetem Erdőmérnöki Kar VII. Kari Tudományos Konferencia, 48–53. Sopron: Soproni Egyetem Kiadó.
- CHOW, J, EBELING, A., TESKEY, B. (2010): „Low Cost Artificial Planar Target Measurement Techniques for Terrestrial Laser Scanning”, Proceedings of the FIG Congress 13.

- DOLD, CH., BRENNER, C. (2006): „Registration of Terrestrial Laser Scanning Data Using Planar Patches and Image Data”. <https://doi.org/10.15488/3750>.
- FISCHLER, M. A., BOLLES, R. C. (1981): „Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography”. *Communications of the ACM* 24 (6): 381–395.
- JEKEL, C. F. (2015): „Least Squares Sphere Fit”. Blog. Engineer. Regression. Optimization. 2015. szeptember 13. <https://jekel.me/2015/Least-Squares-Sphere-Fit/>.
- JEKEL, C. F. (2016): „Digital Image Correlation on Steel Ball”. In *Obtaining non-linear orthotropic material models for pvc-coated polyester via inverse bubble inflation* Section: Appendix A, 83–87. Stellenbosch University. <https://hdl.handle.net/10019.1/98627>.
- Leica BLK. é. n. 11. Setting Target Ranges with BLK360. Elérés 2020. április 16. <https://www.youtube.com/watch?v=eLI syk6TRR4>.
- RACHAKONDA, P., MURALIKRISHNAN, B., COURNOYER, L., CHEOK, G., LEE, V., SHILLING, M., SAWYER, D. (2017): „Methods and Considerations to Determine Sphere Center from Terrestrial Laser Scanner Point Cloud Data”. *Measurement Science and Technology* 28 (10): 105001. <https://doi.org/10/ggrqwh>.
- RADÓCZY, K. (2013): „Szádvár felmérése lézerszkennelrel”. Diplomamunka, Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.