Pontfelhő az útéépítésben

Égető Csaba – Gherman Sámuel – Hrutka Bence Péter – Nagy Nándor Antal – Takács Bence

DOI: [10.30921/GK.72.2020.5.2](https://doi.org/10.30921/GK.72.2020.5.2)

Absztrakt: 2019. januártól hatályos a „Közutak geodéziai előírásai és geometriai követelményei” című Útügyi Műszaki Előírás (ÚME), amely több évtizedes hiányosságot pótol az utak tervezésével, építésével és üzemeltetésével kapcsolatos geodéziai munkák szabályozása, valamint az utak építésével kapcsolatos geometriai tűrések megfogalmazása terén. Az ÚME részletesen szabályozza a hagyományosnak mondható műszerekkel (szintezőműszerrel, mérőállomással, GNSS-vevővel) végezhető méréseket, emellett korlátozottan engedi a pontfelhőt eredményező technikák (lézerszkennelés, mobil térképezés és légifotogrammetria) alkalmazását. Korlátozza, mivel szakmai körökben is vitatott, hogy a korszerű, pontfelhőt alkotó mérési módszerekkel elérhető pontosság elegendő-e az utakkal kapcsolatos geodéziai munkák számára. A korlátozás másik oka pedig, hogy az ÚME készítői számára, akkor még, nem állt rendelkezésre elegendő szakmai tapasztalat, illetve megnyugtató módon dokumentált pontfelhő-technikákkal végzett referencia munka. Ebben a cikkben három esettanulmányt mutatunk be, pontfelhő-technikákkal végzett tervezést előkészítő felmérési, illetve kivitelezés közben végzett geodéziai ellenőrzési munkáinkra alapozva. A cikkben vizsgáljuk a gyakorlatban elérhető pontosságot, valamint bemutatjuk, hogyan tudják a korszerű mérési technikák a tervezők és kivitelezők munkáját a hagyományos technikákkal előállított termékekhez képest lényegesen részletesebb információkkal hatékonyan támogatni.

Abstract: The Standard Highway Specifications entitled „Geodesic specifications and Geometrical Requirements of Roads” has been operative since January 2019, which supplies the deficiency of several decades in terms of engineering surveying jobs related to design, build and operation of roads in addition to defining geometric requirements of road construction works. This standard brings under regulation the use of traditional land surveying instruments, just like surveyor’s level, total station and Global Positioning System receivers, while partially allows the application of point cloud techniques, such as terrestrial laser scanning, mobile mapping systems and aerial photogrammetry. Just partially, since even experts debate whether the accuracy of point cloud techniques meets the requirements of surveying jobs regarding roads. Another important reason for the partial restriction is that only a limited number of well-documented reference projects were available for the committee which was responsible for developing this standard. This paper introduces three case studies based upon our jobs as regards surveying roads before design as well as quality checking of roads under construction. In addition to investigating the achievable accuracy in practice, we present how point cloud techniques can support the jobs of designers and builders with a lot more detailed information as compared to traditional surveying techniques.

Kulcsszavak: pontfelhő, lézerszkennelés, mobil térképező rendszer, fotogrammetria, drón, útéépítés, oldalesés, egyenes illesztés, RANSAC

Keywords: point cloud, laser scanning, mobil mapping system, photogrammetry, drone, road construction, cross fall, line fitting, RANSAC

Bevezetés

Pontfelhők készíthetők földi vagy légi lézerszkenneléssel, légi fotogrammetriával, illetve mobil térképező rendszerekkel is. Többek között a feladat jellege, a pontossági követelmények, gazdaságossági szempontok alapján választjuk meg az alkalmazott módszert, illetve a felmérés végrehajtásának szempontjait. A hazai mérnöki gyakorlatban a pontfelhők számos mérnökgeodéziai alkalmazása ismert. Ezek közül az egyik, talán leggyakoribb műemlék épületek felmérése (Lovas et al. 2018), hiszen ezekben a feladatokban igen gyakran kell szabálytalan, összetett geometriával rendelkező alakzatokat pontosan felmérni (Busics et al. 2016). A tapasztalatok alapján a pontfelhő készítésére alkalmas

technológiák napjainkban olyan feladatokhoz is kedvezően alkalmazhatók, amelyekre korábban gondolni sem mertünk (Király 2016) (Kulcsár – Kunfalvi 2015). A pontfelhő-technikákkal végzett felmérés manapság számos közmű, út és egyéb létesítmények üzemeltetése során alkalmazott térinformatikai rendszerek alapja (Lázár 2017). A pontfelhők mozgásvizsgálata vagy alakváltozási feladatok terén is jól alkalmazhatók, különösen olyan feladatok esetében, amikor a mozgások, illetve alakváltozások iránya előzetesen nem ismert vagy a mérendő mérnöki létesítmény megközelítése, azon vizsgálati jelek elhelyezése valamilyen okból nem lehetséges vagy nem biztonságos (Lovas et al. 2009). A pontfelhőket igen gyakran alkalmazzák külszíni bányák állapotterképeinek elkészítése,

illetve egy adott időszakban elvégzett munka mennyiségének (térfogatának) meghatározása céljából (Csörgits 2018). Műszaki ellenőrzési feladatra történt alkalmazásra példa a Kossuth téri mélygarázs építése során a résfal geometriai ellenőrzésére végzett vizsgálat (Takács et al. 2014). Napjainkban rohamosan terjed a drónokról végzett légifotogrammetria a geodéziában (Lehoczy – Siki, 2019), illetve egyre gyakrabban alkalmazzák útéépítéseken, elsősorban az elkészült földmunka állapotának térképezése és mennyiségének meghatározása céljából, de többen keresik a technológia alkalmazásának lehetőségét további útszerkezeti rétegek, pl. aszfalt burkolatok ellenőrzése terén (Lennert 2019, Sáfár 2019). Évek óta egyértelmű igény mutatkozik tehát az úttervezések és útéépítések terén a

pontfelhő technikák alkalmazására, ugyanakkor a technológiák pontosságával és megfelelő alkalmazásával kapcsolatban vannak még nyitott kérdések. Közeljövőben várható a geodéziát érintő ügügyi műszaki előírás frissítése, ezért időszerűnek láttuk a pontosság vizsgálatával és a pontfelhők kiértékelésével kapcsolatos tapasztalataink összefoglalását három vizsgálat és egyben esettanulmány bemutatásán keresztül.

Esettanulmányok

Az első vizsgálatot mobil térképező rendszerrel előállított pontfelhőn végeztük. A pontfelhőt a Budapest Közút ZRt. munkatársai a Közúti Adatgyűjtő Rendszer (KARESZ) (Lázár 2017) feladat specifikus alkalmazásával készítették, Budapest egyik legforgalmasabb főútján, mintegy 1 km hosszon. A mérés célja az út felújítása előtti tervezési munkákhoz szükséges adatszolgáltatás. A vizsgált útszakasz hagyományos geodéziái módszerekkel történő felmérése a rendkívül erős forgalom alatt igen veszélyes és lényegében kivitelezhetetlen. A felmérés idejére az út lezárása elképzelhetetlen.

A mobil térképező rendszer egyik óriási előnye, hogy a felmérés forgalom mellett és annak minimális zavarásával balesetmentesen elvégezhető. Másik előnyként említhető, hogy lényegesen sűrűbb geometriai felbontással szolgáltat adatot összetett csomópontokban például, vagy töredezett, nyomvályús burkolatokon, így a tervezők lényegesen pontosabb képet alkothatnak a meglévő állapotról. Nagyon lényeges, hogy a pontfelhő kiértékelése során

mérőállomással mért illesztőpontokat használtak és nem (csak) a mozgó járműre szerelt GNSS-vevők és inerciális rendszerek mérései alapján illesztették és kapcsolták a pontfelhőket. A pontosságvizsgálat során, összhangban az ÚME előírásaival 10 keresztaszelvényben mérőállomással mértük összesen 135 darab, úgynevezett geodéziái minősítési pontban a burkolat magasságát és hasonlítottuk össze a pontfelhő alapján levezethető értékekkel. Az ellenőrző mérésekhez és az illesztőpontok meghatározásához is, környező magassági alappontokra támaszkodva, szintezéssel mm-pontossággal meghatározott alappontokat használtunk fel. (Az alappontok vízszintes koordinátáit részben GNSS-technikával, részben sokszögeléssel határoztuk meg néhány mm-es pontossággal.)

A második vizsgálatot földi lézerszkennerral készített pontfelhőn végeztük. A szkennelést egy épülő aluljáróban végeztük Leica C10 műszerrel. A mérés célja az aszfaltburkolat kopórétegének ellenőrzése, egyben az aluljáró vasbeton falainak, illetve fődémjének ellenőrzése is. A vizsgált terület mintegy 125 méter hosszú, vízszintes vonalvezetése tartalmaz egy 80 m sugarú ívet, keresztaszelvénye pedig a kezdeti 5,0 méterről 6,5 méterre szélesedik. Hossz-aszelvénye egyeneseket és több lekerekítő ívet tartalmaz. A hasonló ellenőrző mérések kiértékelése során az egyik legnagyobb kihívás a tervezett geometria modellezése szokott lenni, különösen abban az esetben, amikor a tervezői adatszolgáltatás során csak papír alapú, esetleg pdf-formátumú tervek kapunk. Esetünkben nagy segítséget jelentett,

hogy a tervező térbeli modellek alapján dolgozott és a tervek között elérhetővé tette a tervezett létesítmények BIM (Building Information Modeling) modelljeit is. Az ellenőrző méréseket elvégeztük hagyományos geodéziái módszerrel (robot mérőállomással is), 5 méterenként szelvényezve az utat, szelvényenként 5-6 pontot, összesen 135 pontot mérve az aszfalt burkolaton. (A vasbeton szerkezet vizsgálatával most nem foglalkozunk.)

A harmadik vizsgálatot drónról, légifotogrammetriai úton előállított pontfelhőn végeztük. Egy nemrég átadott, új építésű út felmérését végeztük el, mintegy 240 méter hosszon. A fotogrammetriai felméréssel párhuzamosan 20 méterenként, összesen 12 keresztaszelvényben mértük a geodéziái minősítési pontokat, szelvényenként 6, összesen tehát 72 pontot. A repülést 25 méteres magasságban kétszer hajtottuk végre, először vonalas módban, függőleges kamerával, másodszor 30 fokos döntött kamerával, raszteres módban. Az útpálya jobb és bal oldalán, mind a 12 vizsgált szelvényben helyeztünk el illesztőpontokat, amelyeket mérőállomással mértünk be. Az illesztőpontokra eső térbeli maradék ellentmondások legnagyobb értéke 10 mm. A pontfelhő sűrűsége mintegy 6000 pont/négyszélméter.

Pontosságvizsgálatok

Mindhárom munkaterületen meghatároztuk a mérőállomással mért pontokhoz képest a pontfelhő legközelebbi pontjainak eltérését. Számunkra az eltérések magassági összetevője a lényeges, a vízszintes összetevő lényegében a pontfelhő sűrűségétől függ. Mindhárom vizsgálati helyszínen az eltérések vízszintes összetevői legfeljebb néhány cm értéket érnek el, azaz a vizsgálatunk szempontjából elhanyagolhatók. A mérőállomással mért pontok magassága tapasztalataink szerint néhány mm, vizsgálatunk során hibátlanak tekinthető. Az eltérések statisztikai jellemzői megerősítik azt a feltevést, hogy a pontfelhő egyes pontjaiban a pontosság magassági értelemben elmarad a hagyományos technikákkal elérhető pontosságtól, de igen figyelemre méltó, hogy mindhárom

1. ábra. Mobil térképező rendszerrel felmért rendkívül forgalmas út (forrás: Google)

2. ábra. Földi lézerszkennerral felmért aluljáró

3. ábra. Légi fotogrammetriával felmért útszakasz

vizsgálat során a legnagyobb magassági eltérés is mindössze 18 mm, illetve az egyes vizsgálatok eredményei között nincs érdemi különbség.

A tervezett felület és a pontfelhő eltérése

A pontfelhők kiértékelése során az egyik legkézenfekvőbb feladat a pontfelhő pontjainak a tervezett felületről

tartalmazhat egyeneseket, íveket, átmeneti íveket. A tengely magassági vonalvezetése tartalmazhat egyeneseket és lekerekítő íveket. A tervezett keresztmetszvény általában több, változó meredekségű egyenesből áll, illetve a keresztmetszvények változhatnak, pl. túlemelés-kifuttatás során. Az úttervező szoftverek (pl. AutoCAD, Civil 3D) alkalmasak a tervezett geometria, illetve felület modellezésére

1. táblázat Mérőállomással mért pontok és a pontfelhő magassági eltérése

	1. vizsgálat mobil térképező rendszer	2. vizsgálat földi lézer- szkenner	3. vizsgálat légifotogram- metria, drón
Pontok száma	135	135	72
Legkisebb eltérés [mm]	-14	-2	-11
Legnagyobb eltérés [mm]	+18	+15	+6
Átlagos eltérés [mm]	+1	+5	-1
Eltérések középhibája [mm]	±7	±2	±4

4. ábra. Tervezett és megvalósult állapot magassági eltérése

való távolságának számítása és a távolságok, valójában magasságkülönbségek megjelenítése (4. ábra) A tervezett felület meglehetősen összetett is lehet, hiszen a vízszintes vonalveze-

(Nagy-Hrutka 2018). A pontfelhő és a tervezett felület összehasonlítása a legtöbb pontfelhőkezelő és -kiértékelő szoftverrel elvégezhető, vizsgálataink során ehhez a nyílt forráskódú CloudCompare szoftvert használtuk.

Az eltérések (magasságkülönbségek) színezett megjelenítése nagy segítség lehet a kivitelezők számára, különösen az aszfaltburkolat alsóbb rétegein, hiszen a megépített burkolat esetleges magassági hibái lényegében tetszőleges felbontásban láthatók, szükség esetén jól lehatárolhatók a javítandó felületrészek. Az ÚME előírásai alapján a hagyományos geodéziai módszerekkel a kiviteli tervek keresztmetszvényeiben, az úgynevezett geometriai minősítési pontokban mérünk, azaz a keresztmetszvények között a burkolat magasságára, illetve az esetleges hibákra vonatkozóan nem kapunk információt. Tapasztalataink alapján a pontfelhőt terhelő mérési zaj ellenére jól láthatók a burkolat szabályos jellegű, esetenként nagyobb területre kiterjedésű magassági hibái.

Oldalesés pontfelhő alapján

Az út geometriai minősége szempontjából a megfelelő oldalesés az egyik legfontosabb, ha nem a legfontosabb jellemző. Az oldalesés alapvetően befolyásolja az útpálya vízvezetését,

nem megfelelő vízelvezetés könnyen balesetet okozhat, illetve jelentős mértékben hozzájárulhat az útpálya idő előtti tönkremeneteléhez. Az oldal-esés értékét hagyományos geodéziai módszer esetén a két szélső minősítési pont magasságkülönbségéből és távolságából számítjuk, értelemszerűen a mért keresztaszvénnyekben, pl. 20 méterenként kapunk adatot. Pontfelhő-technikák esetén lehetőség van az oldal-esés értékét meghatározni lényegében tetszőleges sűrűségben, pl. 1 méterenként, az adott szelvénybe eső pontokra a legkisebb négyzetek módszere alapján illesztett egyenes meredeksége alapján. Így tehát az oldal-esés esetleges hibái két keresztaszvénnyel között is kimutathatók. Tekintettel arra, hogy egy-egy szelvénybe több száz vagy akár több ezer mért pont is eshet, az oldal-esés értéke elég pontosan meghatározható a pontfelhőt terhelő mérési zaj ellenére is.

A pontfelhők kiértékelése során szükséges lehet a pontfelhő szűrése, tisztítása, azon pontok törlése, amelyek nem a vizsgált felületről verődtek vissza. Az útépítés során végzett mérések esetén is így van ez, szinte lehetetlen úgy mérni, hogy a mérés idején ne legyenek emberek, eszközök, járművek, szemét stb. a mérendő útpályán. Amennyiben a pontfelhő pontjai között csak csekély mennyiségű durva hibás pont található, az oldal-esés értéke robusztus becslési eljárásokkal, pl. RANSAC módszerrel (Tóth 2019, Paláncz et al. 2017) a nyers pontfelhőn is kinyerhető. Igen lényeges szempont ugyanis, hogy a pontfelhő előállítás és kiértékelése milyen gyorsan végezhető el. Ebből a szempontból is kedvező a nyers pontfelhő kiértékelése, amely lényegében teljes mértékben automatizálható.

Az oldal-esés levezetésének lépései:

1. A keresztaszvénnyek töréspontjait összekötő vonallancok kiszervezése. Ez sok esetben a burkolatszéléket és a tengelyt tartalmazó vonallancok kiszervezését jelenti. A gyakorlatban legtöbbször jó megoldás a megfelelő vonallancok átvétele a tervekről.

5. ábra. Tervezett és mért oldal-esés

6. ábra. A pontfelhő metszetébe eső pontokra legkisebb négyzetek módszerével és robusztus becsléssel illesztett egyenes

2. A vonalláncokkal párhuzamos vonal szerkesztése, pl. 40 cm távolságra és az így kapott poligonok mentén a pontfelhő vágása. A párhuzamosokra azért van szükség, hogy a bizonytalan burkolatszélék ne befolyásolják az oldal-esés értékét.
3. A vizsgálandó metszeteket kijelölő (pl. 1 méterenként felvett) tengelyre merőleges síkok meghatározása. Az így felvett síkok mentén a pontfelhők metszése.

Valójában a pontfelhőt valamilyen (pl. 5 cm-es) vastagságban metszszük el, tehát a metsző síkok valójában metsző téglalapok.

4. Az egyes metszetekbe eső pontokra egyenes illesztése, az egyenes meredeksége alapján az tényleges oldal-esések értékének és becslött pontosságának meghatározása.
5. A kapott oldal-esés értékeket célszerű hagyományos geodéziai módszerrel meghatározott pontok alapján ellenőrizni.

6. A tervezett és tényleges oldalesértékek ábrázolása, dokumentálása.
7. A folyamat lényegében teljes mértékben automatizálható, mi ehhez úttervező szoftvert (AutoCAD Civil 3D-t), pontfelhő kiértékelő szoftvert (CloudCompare-t), annak is parancssori változatát és numerikus számítások elvégzésére alkalmas matematikai szoftvert (Octave-ot) használtunk. A kiértékeléshez némi programozási ismeretek és rutin szükséges.

Összefoglalás

Utak felmérése során készített pontfelhők pontossági vizsgálatát végeztük három különböző helyszínen, három különböző mérési módszerrel (mobil térképező rendszerrel, földi lézerszkenneléssel és légi fotogrammetriával). Mind a három felmérést elvégeztük mérőállomással is és megállapítottuk, hogy a mérőállomással mért pontok a pontfelhő legközelebbi pontjaitól magassági értelemben legfeljebb 18 mm-re térnek el. Ezzel az értékkel jellemzett pontosság egyelőre elmarad az utakkal kapcsolatos geodéziai munkák során sokszor elvárt mm-es pontossági igénytől, ugyanakkor bemutattuk, hogy a pontfelhők segítségével is hatékonyan és igen részletes felbontásban kimutathatók a burkolat több centiméteres magassági hibái. A pontfelhők alapján továbbá szinte tetszőleges sűrűségben és megfelelő pontossággal vizsgálható a burkolat tényleges oldalesése, valamint eltérése a tervezett értéktől.

A pontfelhőt alkotó technikák már ma is jelen vannak az útépitésben. Nagyobb útépitő cégek már most is rendelkeznek mobil térképező rendszerekkel, illetve végeztenek felméréseket ilyen eszközökkel. A kisebb vállalkozások számára is elérhető és rendszeresen alkalmazott mérési módszer a drónokról végzett légi fotogrammetria. Pontfelhő-technikákkal végzett mérés gyors, nagyrészt automatizálható, lényegében tetszőleges geometriai felbontásban szolgáltat adatot és akár forgalom mellett is végezhető. A mérések feldolgozása és kiértékelése is szinte teljesen automatizált, a mai eszközökkel az ellenőrző mérések

dokumentációja akár másnapra is elkészíthető.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönettel tartoznak a Budapest Közút Zrt. munkatársainak, elsősorban Folly-Ritvai Zoltánnak az 1. vizsgálathoz felhasznált pontfelhő elkészítéséért. A szerzők köszönettel tartoznak az EMMI-nek is a BME FIKP-VÍZ pályázat keretében nyújtott támogatásért. Köszönettel tartoznak továbbá a Hungeod Kft-nek, elsősorban Bényi Lászlónak és Farkas Péternek a 2. vizsgálathoz felhasznált pontfelhő előállításáért. Végül, de nem utolsó sorban köszönettel tartoznak Kolozsvari Nándornak, a geodéziai ÚME-t készítő bizottság vezetőjének az értékes tanácsokért és észrevételekért.

Irodalom

- Busics György – Páli Meliton – Tóth, Sándor 2016. Az egykori királyi hosszegység meghatározása két megmaradt középkori templom méretei alapján. *Geodézia és Kartográfia*, 68. évf. 3–4. sz., pp. 7–12.
- Csörgits Péter 2013. Mobil Térképező Rendszer a földmérés és térinformatika gyakorlatában. *Geodézia és Kartográfia* 65. évf. 7–8. sz. pp. 15–20.
- Király Tamás 2016. Földi felmérés vagy pontfelhő? *Mérnökgeodézia* 2016. konferencián elhangzott előadás.
- Kulcsár László – Kunfalvi Péter 2015. Mobil térképező rendszer alkalmazása a hagyományos geodéziai feladatokban. *Geodézia és Kartográfia* 67. évf. 5–6. pp. 9–13.
- Lázár Lajos 2017. A Közúti Adatgyűjtő Rendszer és ami mögötte van: az FME, *Geodézia és Kartográfia* 69. évf. 6. sz. pp. 27–30.
- Lehoczy Máté – Siki Zoltán 2019. Fotogrammetriai feldolgozó szoftverek, *Geodézia és Kartográfia* 72. évf. 2. sz. pp. 23–27. DOI: [10.30921/GK.72.2020.2.4](https://doi.org/10.30921/GK.72.2020.2.4)
- Lennert József 2019. Nyomvonalas kivitelezés légi ellenőrzése. *Mérnökgeodézia* 2019. konferencián elhangzott előadás.
- Lovas Tamás – Berényi Attila – Barsi Árpád – Dunai László 2009. Földi lézerszkennerek alkalmazhatósága mérnöki szerkezetek deformáció mérésében, *Geomatikai Közlemények* 12. sz. pp. 281–290.
- Lovas Tamás – Rehány Nikolett – Somogyi József Árpád (2018): Történelmi épületek rekonstrukciós munkálatainak támogatása pontfelhők segítségével, *Geodézia és Kartográfia* 70. évf. 1. sz. pp. 19–24. DOI: [10.30921/GK.70.2018.1.3](https://doi.org/10.30921/GK.70.2018.1.3)
- Nagy Nándor Antal – Hrutka Bence Péter 2018. Útpálya geometriai ellenőrzése pontfelhő alapján. TDK dolgozat. BME, Építőmérnöki Kar.
- Nagy Nándor Antal 2019. Mobil térképező rendszer vizsgálata úttervezési alaptérkép készítésének szempontjából, Diplomamunka BME, Építőmérnöki Kar.

- Paláncz Béla – Awange Joseph – Völgyesi Lajos 2017. A novel RANSAC approach to robustly solve the 3D similarity transformation problem. *Australian Journal of Earth Sciences* LXIV, 4, pp. 565–576. DOI: [10.1080/08120099.2017.1316313](https://doi.org/10.1080/08120099.2017.1316313)
- Sáfár Tamás 2019. Útburkolat geometriai minőségének vizsgálata mobiltérképező technológiával. *Mérnökgeodézia* 2019. konferencián elhangzott előadás.
- Takács Bence – Somogyi József Árpád – Lovas Tamás 2014. A Kossuth téri mélygarázs részfalának ellenőrző mérése lézerszkenneléssel, *Magyar Építőipar* 64.évf. 2. sz. pp. 81–84.
- Tóth Gyula 2019. Kiegyenlítő számítások MSc. órávázlatok. BME, Építőmérnöki Kar.

Dr. Égető Csaba
adjunktus

BME Általános és Felsőgeodézia
Tanszék
egeto.csaba@epito.bme.hu

Gherman Sámuel
egyetemi hallgató

BME Építőmérnöki Kar
gherman.samuel@gmail.com

Hrutka Bence Péter
egyetemi hallgató

BME Építőmérnöki Kar
hrutka.bence@gmail.com

Nagy Nándor Antal
egyetemi hallgató

BME Építőmérnöki Kar
nagy.nandor.a@gmail.com

Dr. Takács Bence
egyetemi docens

BME Általános és Felsőgeodézia
Tanszék
takacs.bence@epito.bme.hu