

Automatizált mozgásvizsgálat robot mérőállomással és fényképekkel

Automated movement analysis with total station and photos

dr. SIKI Zoltán

Általános és Felsőgeodézia Tanszék, Építőmérnöki Kar,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Budapest 1111 Műegyetem rkp. 3.,
siki.zoltan@emk.bme.hu, <http://geod.bme.hu>

Abstract

Two automated movement measurement systems and an open-source software package, developed at our department, will be introduced. The system based on robotic total stations capable to detect slower movements at several point while the image processing based system is suitable to follow fast movement at a single point. The application experiences are also presented in this paper.

Keywords: movement analysis, robotic total station, open source, Raspberry PI, image processing

Kivonat

A geodéziai mozgásvizsgálatok területén kétféle automatizált mérőrendszer illetve azokhoz kapcsolódó, a tanszékünkön fejlesztett nyílt forráskódú szoftvercsomag bemutatására kerül sor. A robot mérőállomásokra alapozott rendszer több pontra vonatkozó lassabb mozgások kimutatására, míg a képfeldolgozáson alapuló módszer egy pontra vonatkozó gyors mozgások kimutatására alkalmas. A cikk a gyakorlati alkalmazás tapasztalatait is bemutatja

Kulcsszavak: mozgásvizsgálat, robot mérőállomás, nyílt forráskód, Raspberry PI, képfeldolgozás

1. BEVEZETÉS

Tanszékünkön a mozgásvizsgálatokkal kapcsolatos automatizálási kutatások 2007-ben indultak el egy ipari megbízás kapcsán. A Paksi Atomerőmű lokalizációs tornyának deformáció vizsgálatához kezdtük el az első szoftverváltozat készítését. Az azóta eltelt idő során nagymértékben kibővítettük a rendszert, a robot mérőállomások mellett más szenzorok kezelésére is felkészítettük az Ulyxes-t [5]. A fejlesztésben oktató kollégák és diákok is részt vesznek, több TDK dolgozat és diplomamunka témájául szolgált. 2015-ben a rendszer második generációjának a forráskódját nyilvánossá tettük, így az bárki számára szabadon elérhetővé és továbbfejleszhetővé vált. A kutatás mellett a Geodéziai automatizálás MSc tárgy keretében az oktatásban is alkalmazzuk a rendszerünket.

A következőkben a kutatások és fejlesztések két fő irányára fókuszálunk. A robot mérőállomások automatizált mozgásvizsgálati alkalmazása a kezdeti célok között szerepelt. A fejlesztések során már elértünk arra a szintre, hogy a rendszerünket egy másfél évig tartó folyamatos épület monitoring feladatnál is alkalmazzunk. A másik terület a digitális fényképek illetve videó felvételek alapján történő mozgásvizsgálat, mely egy újabb dinamikus fejlődő automatizálási terület.

2. MOZGÁSVIZSGÁLAT ROBOT MÉRŐÁLLOMÁSOKKAL

A mérőállomásokra alapozott monitoring rendszereket manapság széles körben alkalmaznak a mindennapi geodéziai gyakorlatban. A nagy műszergyártók és független cégek is kínálnak a kereskedelmi forgalomban komplex monitoring rendszereket. Tanszékünk Geo4All [7] laborjában fejlesztett Ulyxes rendszer [2] az előbb említettektől eltérően bárki számára szabadon elérhető.

Robot mérőállomásokra alapozott monitoring rendszert leggyakrabban építkezések környezetében lévő épületek elmozdulásának kimutatására alkalmazunk. Amennyiben nem csak az épületek esetleges süllyedését szeretnénk detektálni, hanem az dőlését is, akkor célszerű egy-egy függélybe 3-3- prizmat elhelyezni az épületeken. Amennyiben feltételezzük, hogy a mérőállomás nem mozdul el és az épületek

mozgása kismértékű, akkor a robot mérőállomások automatikus irányzás (ATR) funkciójával pontosan rá tud állni a prizmára, ha a távcsövet a vizsgált pont közelítő irányába forgatjuk. Budapesten a Széllkapu mélygarázs építése során az Ulyxes rendszert használtuk a résfallal elhatárolt munkagödör környezetében található épületek mozgásvizsgálatára, két műszert vezéreltünk automatizáltan 7 x 24 órában több mint egy éven keresztül. A mérőállomás vezérlésére elsősorban Raspberry PI számítógépet használunk, melyre alacsony energia fogyasztása, kis mérete és kedvező ára miatt esett a választásunk.



1. Ábra. Terepi modul és mérőállomás

Mivel a hosszú üzemidő alatt egy építési területen nehéz a műszerek mozdulatlanságát biztosítani, célszerű a mozgásveszélyes területen kívül alappontokat elhelyezni (referencia pontok), melyek segítségével a műszerálláspontok mozdulatlanságát ellenőrizhetjük, illetve a mérőállomások pozícióját rendszeresen levezethetjük. Egy másik problémás helyzet lehet, ha a mérőállomás elveszíti a tájékozását egy áramszünet vagy avatatlan személy beavatkozása miatt. Ilyen esetekben fel kell készíteni a vezérlő szoftvert, hogy emberi beavatkozás nélkül elvégezze a tájékozást. További problémát jelenthet, ha a mérőállomás látómezejében egyidejűleg egynél több prizma jelenik meg. Ilyenkor előfordulhat, hogy a műszer nem a kívánt prizmára áll rá és a téves pontazonosítás miatt hatalmas mozgást detektál a rendszer. Végül a problémák között megemlíteném, hogy az építési területen egy munkagép, deponált anyag vagy egy személy időlegesen eltakarja a prizmát. Ezen körülmények figyelembevételé miatt egy komplex vezérlő szoftvert kellett kidolgozni, hogy emberi beavatkozás nélkül kezelje ezeket a problémás helyzeteket.

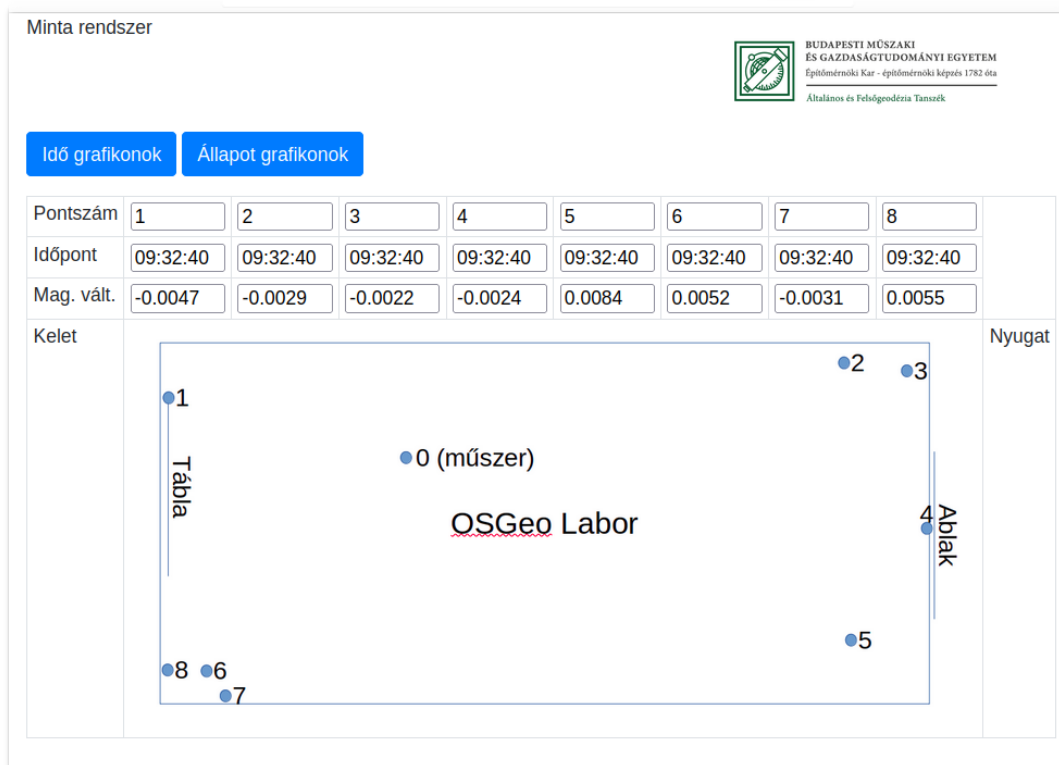
Az Ulyxes terepi modulját felkészítettük a fenti problémák kezelésére is. Egy-egy mérési sorozat megkezdése előtt a mérőállomás pozícióját a referencia pontok alapján, szabatos kiegyenlítéssel határozzuk meg, melynek során durvahiba szűrést is alkalmazunk, így egy referencia pont esetleges elmozdulását is ki tudjuk szűrni. Az álláspont koordináta középhibáinak és a tájékozási állandó középhibájának vizsgálata alapján is információt nyerhetünk a referencia pontok stabilitásáról. Amennyiben a referencia prizmákat nem találja a műszer a tájékozás elvesztése miatt, akkor vakon kezd el keresni egy prizmát, ez azoknál a műszereknél, melyek nem rendelkeznek beépített 360 fokra kiterjedő automatikus prizma keresés funkcióval hosszabb időt vehet igénybe. A rövid ideig tartó prizma takarások kivédésére a rendszerben beállítható az ismételt próbálkozások száma, ha sikertelen lenne a pont megirányzása.

A szoftver a GitHub portálon található meg [6]. A Python nyelven írt objektum orientált kód három részre (illetve könyvtárra) bontható. A *pyapi*-t a programfejlesztők használhatják újabb végfelhasználók számára készülő programjaikban. A *pyapps* könyvtárban az eddig elkészült közvetlenül használható alkalmazások találhatók meg. A *camera* mappában a képfeldolgozással kapcsolatos alkalmazások találhatók.

A szoftver a következő lépéssorozatot hajtja végre az egyes mérési sorozatok során:

- Koordináták alapján irányszög, zenitszög és távolság számítás az állásponttól a mérendőkre
- Tájékozottság ellenőrzése, szükség esetén vakon tájékozás
- Iránysorozat mérése a referencia pontokra, akár több fordulóban is
- Álláspont koordináták és tájékozási szög számítása kiegyenlítéssel és durvahiba szűréssel
- Iránysorozat mérése a vizsgálati pontokra, akár több fordulóban
- Koordinátaszámítás a vizsgálati pontokra
- Mérési adatok és koordináták küldése az adatbázis szerverre

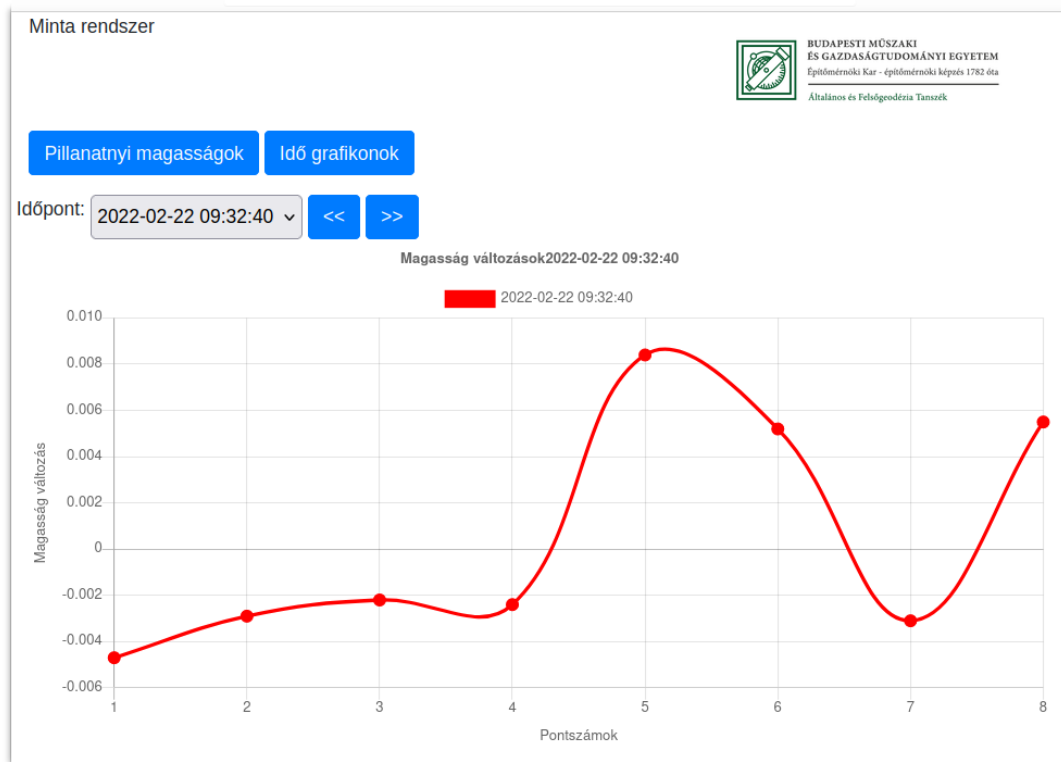
A vizsgálati pontok bemérése után az adatokat elérhetővé kell tenni a rendszer felhasználói számára. Ehhez a terepi, a műszert vezérlő számítógépnek az internetre kell csatlakoznia, jellemzően mobilneten keresztül. Az adatok tárolása egy az internetre csatlakozó szerveren egy PostgreSQL adatbázisban történik, melyet szintén nyílt forráskódú szoftver kezel. Ebből az adatbázisból történik az adatok publikálása egy web szerveren keresztül, ehhez is elkészítettük a web böngészőben futtatható szoftver komponenseket. A 2. és 3.



ábrán egy az oktatás során egy tanteremben kialakított minta rendszer adatainak publikálását látjuk.

2. Ábra. Adatok internetes publikálása, magasságváltozások

Egy másik terület, ahol a robot mérőállomásokat automatizáltan használjuk a hidak, felüljárók statikus próbaterhelése. Itt hagyományosan a szabatos szintezés módszerét alkalmazzák, de mérőállomásokkal rövid műszer prizma távolságok (< 200 m) esetén a szükséges pontosság biztosítható, jóval rövidebb idő alatt. Az elmúlt néhány évben tucatnyi híd és felüljáró statikus próbaterhelése során alkalmaztuk az Ulyxes rendszer RobotPlus alkalmazását, többek között a Lánchíd, a Hárosi Duna-híd, M44-es út ártéri hídja, M4-es gyorsforgalmi út ártéri hídja, hódmezővásárhelyi körforgalmú felüljáró. A próbaterhelések jellemzően egy napon belül lezajlanak, így ezekben az esetekben nem szükséges komolyabb infrastruktúra (áram forrás, internet, stb.) kiépítése. Ezekben az esetekben az automatizálásnak abban van szerepe, hogy gyorsabban, akár sötétben is végrehajthatók a mérések és azok kiértékelése is automatizálható és akár a terepen is megtehető.

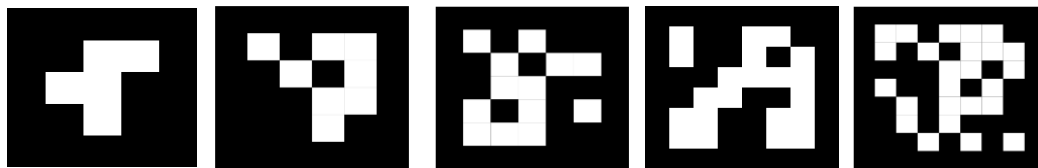


3. Ábra Internetes grafikus adatszolgáltatás

3. MOZGÁSVIZSGÁLAT DIGITÁLIS KÉPEK ALAPJÁN

A digitális képek alapján történő mozgásvizsgálatoknál egy mozdulatlan kamerával készítünk kép- vagy videófelvételeket. A mozgás vagy deformáció nagyságára a képeken bekövetkezett változások alapján következtetünk. A képek terepi felbontását egy geodéziai távcső közbeiktatásával növeljük. A Raspberry PI Camera V2 modult egy speciális elemmel rögzítjük az okulár mögé (5. Ábra). A 8 megapixeles kamerát egy harmincszoros nagyítású távcsőre szerelve, a maximális felbontásnál (3280 x 2464) kb. 80 méternél éri el a terepi pixelméret (GSD) az 1 mm-t.

A képek automatizált feldolgozásához az OpenCV nyílt forráskódú programkönyvtárat használjuk. Kétféle algoritmust is beépítettünk az Ulyxes rendszerbe, a sablonkeresést és az alakfelismerést. Ez a két algoritmus nem csak a matematikai módszerben, hanem a felhasználási lehetőségek területén is különbségeket mutat.



4- Ábra. ArUco kódok, 3x3, 4x4, 5x5, 6x6, 7x7

A sablonkeresési eljárás során egy kisebb képrészlet (sablon) előfordulását keressük a képsorozatban vagy a videó felvétel kockáin. Az eljárás során a sablont végigmozgatjuk a vizsgált kép felett és a fedésbe kerülő sablon és képpixelek értékei alapján egy statisztikai értéket számítunk, mely a minta és a képrészlet közötti egyezés szorosságát mutatja. A statisztika szélsőértékénél (az összefüggés típusától függően minimum vagy maximum is lehet) van a minta legvalószínűbb helye a képen. A sokféle lehetséges statisztikai értékből a normalizált keresztkorreláció illetve a normalizált korrelációs együttható [3] bizonyult a tapasztalataink szerint a legmegbízhatóbbnak. A normalizálás (0-1 közötti érték) azért is hasznos, mert az illeszkedés jóságára is könnyen értelmezhető adatot ad. A módszer előnye, hogy akár előre kihelyezett jel nélkül is használható és a fényviszonyokra kevésbé érzékeny. A hátránya, hogy csak a minta elfordulása és/vagy méretváltozása esetén nem használható, illetve a hamis találatok esélye nagyobb. Célszerű a normalizált statisztikára egy küszöbértéket beállítani, ami alatt nem fogadjuk el a találatot.

Az alakfelismerésre épülő eljárás esetén a vizsgált műtárgyra kihelyezett jel előfordulását keressük a képen, akár többet is. Ehhez egy komplexebb eljárást kell alkalmazni a képen, mint a sablonkeresésnél. A munkánk során az ArUco jeleket (4. Ábra) használunk, melyeket kiterjesztett valóság alkalmazásokhoz fejlesztettek a cordobai egyetemen. Az ArUco jelek 3x3 mérettől 7x7 méretig, mátrixban elrendezett fekete-fehér négyzetekből állnak, az egyes jelekhez egyedi azonosító tartozik. Sem tengelyes, sem középpontos szimmetria nincs bennük, így az irányultságuk is egyértelműen megállapítható. A felismerést nem befolyásolja, ha a jelek elfordulnak vagy a méretük megváltozik, sőt bizonyos mértékű perspektív torzulás is kezelhető.



5. Ábra. Távcsőre rögzített kamera modul

A két módszer összehasonlítását az 1. táblázatban foglaltuk össze. Amennyiben a felvételek készítése előtt kihelyezünk ArUco jeleket, akkor a feldolgozás során utólag is választhatunk a feldolgozási módszerek közül, vagy akár mindkettőt elvégezve összehasonlíthatjuk az eredményeket. Az alakfelismerés módszerének pontosságát fokozhatjuk, ha több ArUco kódot tartalmazó jeleket helyezünk ki.

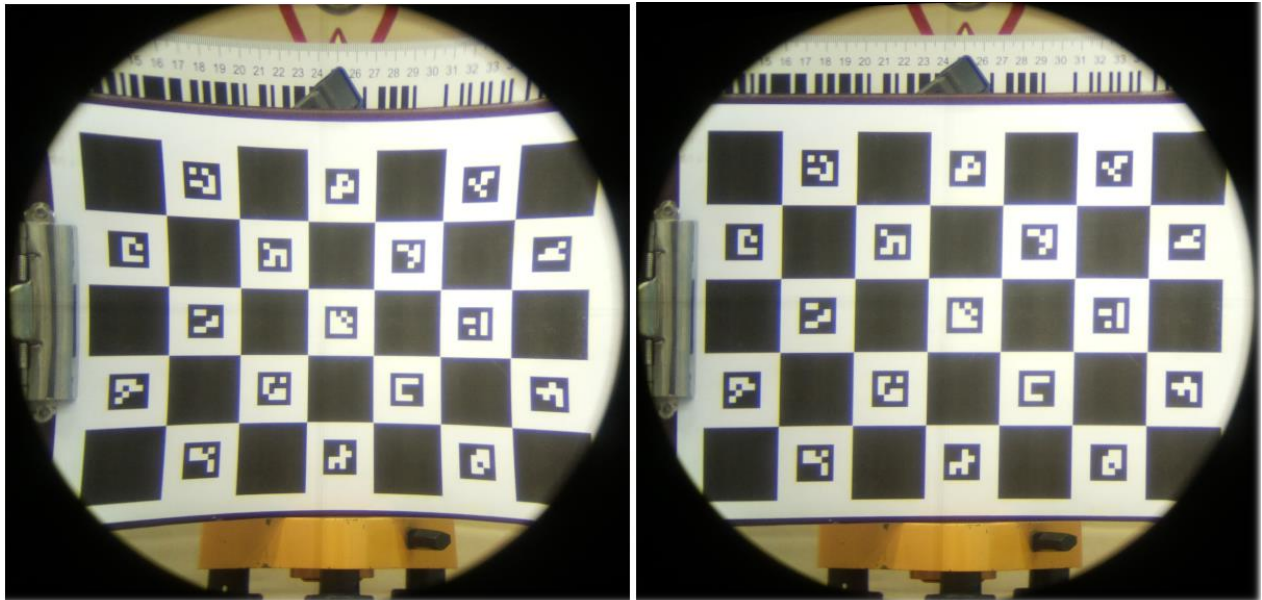
Eljárások összehasonlítása

1. táblázat

	Sablonkeresés	Alakfelismerés
Fényviszonyok	Kevésbé érzékeny	Érzékenyebb
Algoritmus	Egyszerűbb	Bonyolultabb
Hamis találat	Nagyobb valószínűséggel	Kisebb valószínűséggel
Jel elfordulás	Nem	Igen
Jel méretváltozás	Nem	Igen
3D iránymeghatározás	Nem	Igen
Több minta/jel egyidejű keresése	Nem	Igen

Az olcsó kamera és a két optikai rendszer együttes használata miatt nem elhanyagolható elrajzolás jelentkezik a képeken. Emiatt a rendszert kalibrálni kell és a képek feldolgozásánál a radiális és tangenciális elrajzolási komponensek hatását meg kell szüntetni (6. Ábra).

A képek feldolgozása során az alkalmazott módszer és a képfelbontás függvényében másodpercenként 10-30 kép készítésére van lehetőség. A 30 fps képsűrűséget maximum 1632 x 1216 felbontású képekkel a rögzített videó utófeldolgozásával tudjuk elérni. A maximális felbontás esetén (3280 x 2464) 10 fps érhető el, Raspberry Pi 4 számítógép használata esetén. Összehasonlításképpen a korszerű robot mérőállomásokkal 5 mérés/sec érhető el, igaz hogy a mérőállomással 3D-s pozíció kapunk. A feldolgozás során nem szabad elfeledkeznünk arról, hogy a képekből a képsíkból történt elmozdulást tudjuk kimutatni, így a zenitszöveget figyelembe kell venni, ha például függőleges elmozdulás meghatározása a célunk.



6. Ábra. Eredeti kép és a torzulásmentes átalakítása

4 GYAKORLATI TAPASZTALATOK

A robot mérőállomásokra alapozott monitoring megoldásunkat több tucat alkalommal alkalmaztuk már, az évek során bővítettük a funkcionalitását. A többi, hasonló feladatot megoldó rendszerektől nem csak abban különbözik, hogy nyílt forráskódú, hanem a nagyon rugalmas konfigurálhatósága is kivételes. A nyílt forráskódból következik, hogy a felhasználók, a GPL (General Public License) licencet betartva akár a program sorokat is átírhatják, bővíthetik a saját igényeik szerint.

Kamera felbontás különböző távolságokban

2. táblázat

Távolság a kamerától [m]	Terepi pixelméret (GSD) [mm / pixel]
6	0.08
11	0.15
20	0.26
31	0.4
55	0.7
83	1.1

A kamerás méréseket először 2016-ban alkalmaztuk a Rákóczi híd dinamikus próbaterhelése során [1]. Dinamikus próbaterhelés esetén egy vagy több ismert tömegű jármű halad át megadott sebességgel a hídon, a geodézia feladata a híd alakjának időbeli változásának a megmérése. Ebben az esetben a méréseinkkel a híd zsámoly néhány másodperc alatt bekövetkezett pár milliméteres vízszintes elmozdulásának a meghatározása volt. A távcsőre szerelt kamerát néhány méterre tudtuk elhelyezni a zsámolytól, így tizedmilliméter alatti megbízhatóságot tudtunk elérni. A kamera rendszer megbízhatóságát labor körülmények között is vizsgáltuk [3]. A Raspberry Pi V2 kamera maximális felbontását (3280 x 2464) kihasználva, egy harmincszoros nagyítású távcső közbeiktatásával néztük meg a kalibrált képeken egy pixel valóságban vett méretét (2. táblázat). A fotogrammetriában elfogadott 1-2 pixel közötti mérési megbízhatóságot figyelembe véve, a táblázatban szereplő adatokból a módszer megbízhatóságára is

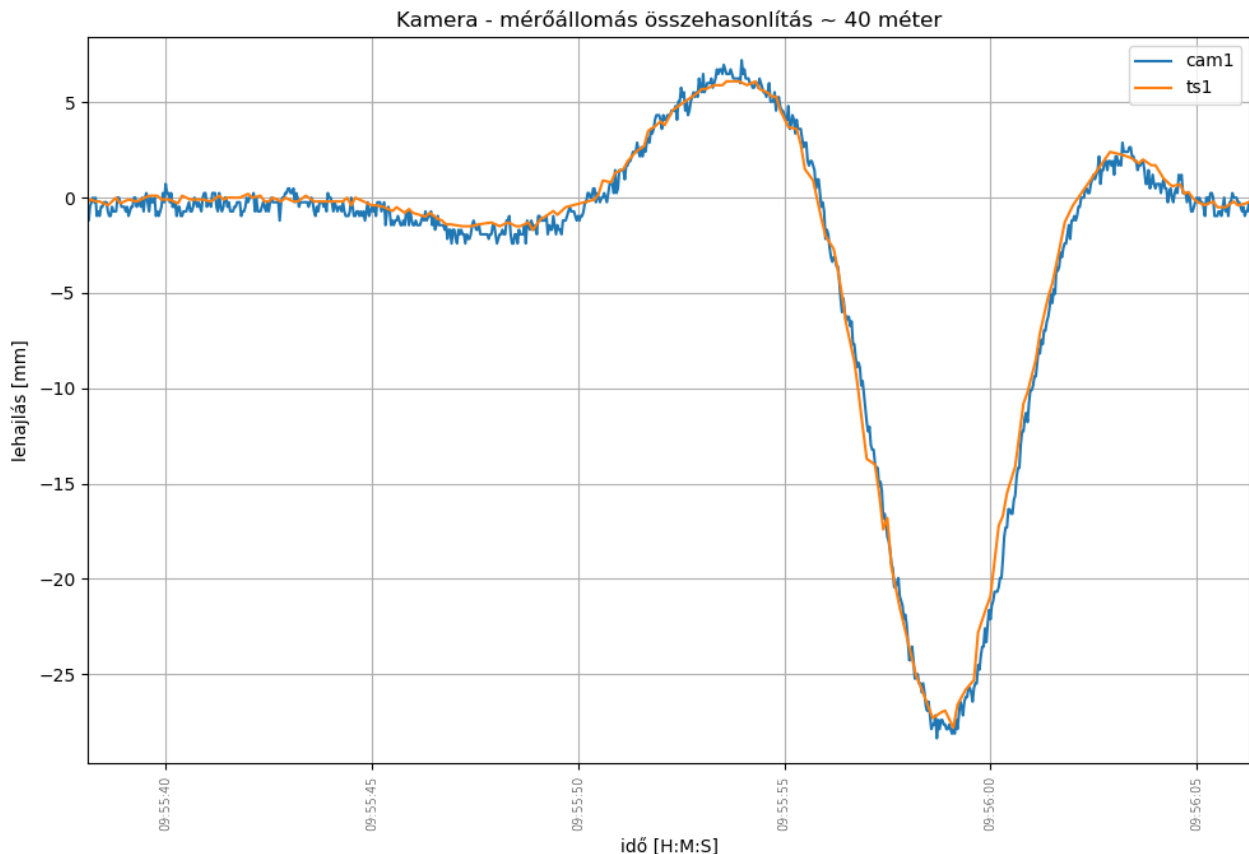
következtethetünk. Azaz 10 méter alatt a felsőrendű szintezés, 30 méter alatt a szabatos mérőállomások pontosságát is elérhetjük.

Legutóbbi munkánk során, a Déli összekötő vasúti Duna-híd harmadik ágának dinamikus próbaterhelésénél alkalmaztuk a rendszert. A kamerás mérések mellett robot mérőállomásokkal is párhuzamos méréseket végeztünk a kamera rendszer pontosságának vizsgálatára. A mérések célja néhány 10 másodperc alatt bekövetkezett függőleges elmozdulások időbeli változásának megmérése. A hídon egymás közelében elhelyezett távmérő prizmára és ArUco jelre végeztük a méréseket (7. Ábra), a két jelet azonos szerkezeti elemre rögzítettük, így jogosan feltételezhetjük az azonos mértékű elmozdulásukat. A 8. ábrán egy példa látható, ahol a robot mérőállomás és a kamera rendszer méréseiből levezetett magasságváltozások láthatók. A kamerával 30 képkocka/másodperces videót készítettünk, egy pixelnek 1 milliméter felel meg a képeken (1632 x 1216 pixeles felbontás), a mérőállomással 5 mérést végeztünk automatikusan másodpercenként. Az ábrán jól látható, hogy a nagyobb gyakorisággal vet kamera adatok zajosabbak mint a mérőállomás adatok. A kidolgozott kamera rendszer nem csak a nagyobb frekvenciájú mintavételezési lehetőség miatt lehet versenyképes a robot mérőállomásokkal szemben, hanem az alacsonyabb költségével is.



7. Ábra. Kihelyezett ArUco jel és prizma

A kameraképek készítésére kidolgozott technológia és szoftver elsősorban gyorsan lezajló, síkbeli mozgások, kis távolságokból történő kimutatására alkalmas. A hidak dinamikus próbaterhelése mellett laboratóriumi anyagtörési vizsgálatoknál is jól használható.



8. Ábra. Dinamikus terhelés hatására létrejött lehajlás, kamera (cam1) és mérőállomás (ts1)

A kamera rendszer még számos fejlesztési lehetőséget tartogat. A másodpercenként rögzített képek számának növelésével gyorsabban lezajló jelenségeket figyelhetünk meg megfelelő részletességgel. A terepi pixelméret csökkentésével a mérés megbízhatóságát növelhetjük. Ezen célokat egyrészt hardver fejlesztéssel, másrészt szoftvertechnológia váltásokkal tervezzük elérni. Jelenleg a rendelkezésre álló hardver, első sorban az adatrögzítésre használt SD kártya írási sebessége a legszűkebb keresztmetszet.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutatás a BME-NVA-02 számú projekt részeként az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatással, a TKP2021 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Ezúton szeretném megköszönni tanszéki kollégáimnak a kutatáshoz nyújtott segítségüket, kiemelten Dr. Takács Bence támogatását és közreműködését.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Kovács, N. – Kövesdi, B. – Dunai, L. – Takács, B. 2016. *Loading Test of the Rákóczi Danube Bridge in Budapest*. Procedia Engineering, Volume 15, 2016, pp. 191–198
- [2] Siki, Z. – Takács, B. – Égető, Cs. 2018. *Ulyxes and open source project for automation in engineering surveying*. Peerj Preprints. 6 Paper e27226v1 DOI: [10.7287/peerj.preprints.27226v1](https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.27226v1)
- [3] Siki, Z.; Takács, B. *Mozgásvizsgálat fényképekből*, GEODÉZIA ÉS KARTOGRÁFIA 73 : 3 pp. 19-23. , 5 p. (2021)
- [4] Siki, Z.; Takács, B. *Automatic Recognition of ArUco Codes in Land Surveying Tasks*, BALTIC JOURNAL OF MODERN COMPUTING 9 : 1 pp. 115-125. , 11 p. (2021)
- [5] ***, *Ulyxes honlap*, Ulyxes, <http://www.agt.bme.hu/ulyxes> (utolsó letöltés 2022.09.01.)
- [6] ***, *Ulyxes forráskód*, GitHub, <https://github.com/zsiki/ulyxes> (utolsó letöltés 2022.09.01.)