Mozgásvizsgálat fényképekből

SIKI Zoltán – TAKÁCS Bence

DOI: [10.30921/GK.73.2021.3.4](https://doi.org/10.30921/GK.73.2021.3.4)

Absztrakt: A geodéziai mozgás- és deformációvizsgálatok területén a fotogrammetria egy újszerű alkalmazását mutatjuk be ebben a cikkben. A fénykép, illetve videó elvételek készítése során Raspberry Pi számítógépet és kamerát alkalmazunk úgy, hogy a kamerát egy geodéziai távcsőre szereljük a felbontás növelése érdekében. A képek feldolgozását teljesen automatizáltuk a nyílt forráskódú Ulyxes-rendszer továbbfejlesztésével. Az automatizálást az úgynevezett ArUco-jelek és az OpenCV-könyvtár segítségével valósítottuk meg. Kétféle algoritmust, egyrészt a sablonillesztést (template matching), másrészt az alakfelismerést is implementáltunk. A sablonillesztés esetén a jel nem fordulhat el és a mérete sem változhat meg, így a képsíkban a jel önmagával párhuzamos elmozdulását tudjuk detektálni. Az alakfelismerés esetén nincsenek ilyen korlátozások. A rendszert dinamikus próbaterhelések során alkalmaztuk, ahol a robot-mérőállomások nem elég gyorsak, a GNSS-technika pedig nem elég pontos.

Abstract: In geodetic movement and deformation analysis, a novel application of photogrammetry is presented in this article. The resolution of the images is increased by inserting a geodetic telescope in front of the camera. Raspberry Pi computer and camera are used to take photos and videos. Extending the open-source Ulyxes system, image processing was fully automated using the so-called ArUco codes and the OpenCV library. Two different algorithms, namely template matching as well as pattern recognition were implemented. In the case of template matching, the markers cannot be rotated or scaled; therefore, we can detect their parallel displacement in the image plane. On the other hand, though, in the case of pattern recognition, there are no such restrictions. The system was applied during dynamic test loads where the robotic total stations are not fast enough and the GNSS technique is not accurate enough.

Kulcsszavak: mozgásvizsgálat, deformációvizsgálat, képfeldolgozás, nyílt forráskód, Raspberry Pi

Keywords: movement analysis, deformation analysis, image processing, open source, Raspberry Pi

Bevezetés

A cikk a 2020. évi Mérnökgeodézia Konferencián elhangzott előadás írásos változata.

A BME Általános és Felsőgeodézia Tanszékén működő, a nemzetközi Geo4All (<https://www.osgeo.org/initiatives/geo-for-all/>) hálózat tagjai között szereplő OSGeoLabBp laboratóriumban (lásd: <http://osgeolabbp.hu>) nem csak oktató tevékenységet folytatunk, hanem kutatási és fejlesztési feladatokat is megoldunk nyílt forráskódú szoftverek segítségével. A saját fejlesztések közül kiemelkedik az Ulyxes-rendszer (Siki et al. 2018), amely automatizált adatgyűjtést valósít meg különböző geodéziai szenzorok esetén (pl. robot-mérőállomás, GNSS-vevő). Jelen cikkünkben a rendszer képfeldolgozás irányában történő bővítését és annak mozgásvizsgálati alkalmazását mutatjuk be. Az Ulyxes-rendszert a kutatás-fejlesztés mellett az oktatásban és ipari alkalmazások során is használjuk. A fényképekből történő mozgásvizsgálatnak hosszú története van, már az Erzsébet híd 1964. évi próbaterhelésénél is alkalmazták a fotogrammetriát a BME munkatársai (Kis

Papp 1965). Az Ulyxes-rendszer első ilyen alkalmazása 2015-ben történt a Rákóczi híd dinamikus próbaterhelése során (Kovács et al. 2016). Azóta a hardver és a szoftver területén is fejlesztéseket hajtottunk végre, melyekről ebben a cikkben számolunk be. Emellett egy gyakorlati alkalmazást is bemutatunk.

Technikai háttér

A nyílt forráskódú szoftverfejlesztések egyik előremutató jó tulajdonsága, hogy más, szintén nyílt forráskódú fejlesztések eredményei közvetlenül felhasználhatóak, ami az egymással versengő kereskedelmi szoftverek esetén elképzelhetetlen. A képfeldolgozás területén egyik elterjedt nyílt forráskódú programkönyvtár az OpenCV (Villán 2019). Ezt elsősorban a robotláta támogatására fejlesztették ki, de számos geodéziai és fotogrammetriai alkalmazása is van (pl.: Paulik et al. 2018 vagy Engel-Schweimler 2016).

A mozgás-, illetve deformációvizsgálatoknál abból indulunk ki, hogy egy mozdulatlan kamerával készítünk kép- vagy videófelvételeket. A mozgás vagy deformáció nagyságára a képen bekövetkezett változások alapján következtetünk. A képek terepi felbontását egy geodéziai távcső beiktatásával növeljük, mivel a mozgó létesítmény közvetlen közelében nehezen biztosítható a kamera mozdulatlansága, illetve így a terepi pixelméretet is növelni tudjuk. A kamera vezérlésére és a képek, videófelvételek tárolására Raspberry Pi számítógépet használunk. A 8 megapixeles

1. ábra. Mérőállomásra rögzített Pi V2 kamera

Raspberry Pi Camera V2 modult egy speciális elemmel rögzítjük a műszer okulárjára (1. ábra). A Raspberri Pi számítógép energiafogyasztása alacsony, így egy nagyobb teljesítményű power bankkal akár 24 óránál többet is működhet. WIFI-n keresztül mobiltelefonnal, tablettel vagy laptoptal csatlakozhatunk a Raspbian (Linux) operációs rendszer felügyelete alatt működő Raspberry Pi számítógéphez. A programok más típusú kamerával és nagyobb teljesítményű számítógéppel is használhatók.

A képfeldolgozás területén széles körben használt algoritmusok közül kettőt is alkalmaztunk a képrészletek elmozdulásának kimutatására. A sablonkeresés (*template matching*) esetén egy képrészlet előfordulását keressük egy másik képben. A másik módszer az alakfelismerésre támaszkodva speciális jel (ArUco-kód) előfordulását keresi a képben. A mozgás vagy deformáció nagyságát az egymás után következő képeken a minta vagy jel pozíciójának megváltozásából vezetjük le. A videófelvételek feldolgozása során képkockánként végezzük el a minta vagy jel keresését. Mindkét módszer esetén célszerű a színes képeket szürke árnyalatossá képpé átalakítani a feldolgozás előtt, így gyorsítani tudjuk az algoritmusok futását.

Sablonkeresés

A módszer alap gondolata az, hogy egy képrészlet előfordulását megkeressük a képfelvételeinken. A képrészlet legvalószínűbb helyének megkereséséhez minden kombinációban ráillesztjük a részletet, és képpontonként vizsgáljuk az egymás fölé kerülő pixelek eltérését. Az eltérésekből egy összeget állítunk elő minden pozícióra, ami az illeszkedést jellemzi. Több különböző függvényt alkalmaznak a gyakorlatban, ezek szélsőértéke jelenti a legjobb egyezést. Az OpenCV-könyvtár ehhez hat különböző függvényt biztosít (OpenCV Tutorials, é. n.). Ezek közül a normalizált keresztkorreláció (*cross correlation*) (Briechle-Hanebeck 2001) (1), illetve a normalizált korrelációs együttható (*correlation coefficient*) (2) bizonyult a legmegbízhatóbbnak a gyakorlati alkalmazásaink során.

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} (T(x', y') \cdot I(x + x', y + y'))}{\sqrt{\sum_{x', y'} T(x', y')^2 \cdot \sum_{x', y'} I(x + x', y + y')^2}} \quad (1)$$

Ahol:

x', y' – oszlop- és sorpozíció a keresett mintában

x, y – oszlop- és sorpozíció a vizsgált képben

$T(x', y')$ – pixelérték a keresett minta-pozícióban

$I(x + x', y + y')$ – pixelérték a vizsgált képben

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} (T(x', y') \cdot I'(x + x', y + y'))}{\sqrt{\sum_{x', y'} T(x', y')^2 \cdot \sum_{x', y'} I'(x + x', y + y')^2}} \quad (2)$$

Ahol:

$$T'(x', y') = T(x', y') - \frac{1}{w \cdot h} \cdot \sum_{x, y} T(x, y)$$

$$I'(x + x', y + y') = I(x + x', y + y') - \frac{1}{w \cdot h} \cdot \sum_{x, y} I(x + x', y + y')$$

w – a keresett minta szélessége pixeleken

h – a keresett minta magassága pixeleken

A normalizált összefüggés eredménye nulla és egy közé esik, az egy érték jelenti a tökéletes egyezést. Így az eredményből közvetlenül következtethetünk az egyezés minőségére. A mozgásvizsgálatok során hosszabb ideig is eltarthat a felvételek készítése, melyek során nem lehet biztosítani az azonos körülményeket (fényviszonyok, pára stb.) ezért az egyezés minősége széles tartományban változhat. A 2. ábrán a jobb oldalon alul a normalizált korrelációs együttható eredményeit szürke árnyalatossá alakítottuk át, a fehér szín a legjobb, a fekete szín a legrosszabb illeszkedést jelenti. A sablonkeresés feltételezi, hogy a minta csak önmagával párhuzamosan mozdul el a képen, és a mérete sem változik.

2. ábra. A sablonkeresés eredménye

ArUco-kódok keresése

Az ArUco-kódok speciális négyzet alakú sakktáblaszerű jelek, melyeket fekete keret vesz körül, különböző felosztású változatai léteznek a 4×4-től a 7×7-ig (3. ábra). Az egyes jelek egy egész számot jelképeznek. Elsősorban a kiterjesztett valóság alkalmazásokhoz fejlesztették ki, a szoftver a képen megtalált ArUco-kód helyén más tartalmat jelenít meg. Emellett alkalmazzák beltéri navigációban, amikor a kódérték alapján egy jel koordinátája kereshető vissza, illetve a fotogrammetriában, ahol az ArUco-kóddal jelölt illesztőpontok automatizáltan visszakereshetők a képen. A fotogrammetriai alkalmazáshoz laborunkban is készítettünk nyílt forráskódú megoldást (lásd: <https://github.com/zsiki/Find-GCP>) az ODM- (Open Drone Map <https://www.opendronemap.org>) és VisualSfM- (<http://ccwu.me/vsfm>) szoftverekhez.

3. ábra. 4×4, 5×5, 6×6 és 7×7 ArUco-kódok

Az ArUco-kódok alkalmazása esetén a kód tetszőleges méretű, elfordult és perspektíven torzult képét próbáljuk megkeresni. Ehhez jóval összetettebb algoritmus szükséges (4. ábra), a sablonkereséshez képest, amely számos paraméter megadásával hangolható és finomítható. Az első lépésben a képet szürke árnyalatossá konvertáljuk, majd adaptív küszöbértékek alkalmazásával kétszínűre egyszerűsítjük. Az adaptív küszöbérték azt jelenti, hogy nem az egész képre egységesen megadott küszöb alapján döntjük el, hogy az egyes képpontok fehér vagy fekete színűek legyenek, hanem a képet kisebb egységekre bontva végzük el ezt. Ez lehetővé teszi, hogy a

4. ábra. ArUco-jel-felismerés folyamata

nagymértékben függ a kép és a keresett minta területének arányától. Az ArUco-kód felismerése esetén nem jár különösebb hatékonyságnövekedéssel a kisebb részletre korlátozott feldolgozás.

A gyakorlati alkalmazás során a szabadtéren, ahol a fényviszonyok sokat változhatnak a felvételek elkészítése során, nehézségekbe ütközhetünk elsősorban az ArUco-kódok felismerése során. Az 5. ábrán a nap sugarak tükröződése miatt a program nem képes az ArUco-jel felismerni. Ezen a kép szintartományának a szétvágásával segíthetünk. A leghatékonyabb megoldást a CIELAB-szintérbe (Simonot et al. 2011) konvertálással kaptuk. Ez az $L^*a^*b^*$ hivatkozással is bíró szintér az RGB- vagy HSV- színekhez hasonlóan bármely szín leírására alkalmas. A L^* komponens az érzékelt fényességet, az a^* és b^* a vörös, zöld, kék és sárga színösszetevőket írja le. Az RGB-képet az $L^*a^*b^*$ szintérbe konvertálva az L^* csatornát használjuk csak, amelyre egy adaptívhisztogram-kiegyenlítést alkalmazunk és ennek eredményeképpen kialakult szürke árnyalatot használjuk a továbbiakban. A 2. táblázat adatai alapján 5-40 százalékkal sikerült megnövelni az ArUco-kódok megtalálásának arányát.

A két optikai rendszer, a geodéziai távcső és a Raspberry Pi V2 kamera, együttesen nem elhanyagolható párnás elrajzolást eredményez (6. ábra). Ezért a kamera és a geodéziai távcső együttes kalibrálására van szükség (Völgyesi-Tóth 2020). Az OpenCV alapsakktáblás kalibrálása mellett az ArUco-könyvtár két további kalibrálási eljárást biztosít, a ChArUco-táblást és az ArUco-táblást. Ez utóbbi két módszer esetén a tábla kisebb takarása vagy egy részének kilógása nem hiúsítja meg a kép használatát a kalibrációban, emellett a táblán megjelenő ArUco-kódok pontosabbá teszik a kalibrációt.

A kalibráció során a tábláról több különböző szögből készült felvétel alapján a kamera mátrix (f_x, f_y, c_x, c_y), valamint a radiális (k_1, k_2, k_3) és tangenciális (p_1, p_2) torzítási paramétereinek meghatározása történik meg.

fényviszonyoktól, az esetleges árnyékoktól függetlenül a fekete-fehér képen jól felismerhető legyen a jel. A második lépésben a képen az egyenesekkel határolt zárt négyszögeket keressük meg. A harmadik lépésben a perspektív torzulás hatását küszöböljük ki, a négyszöget négyzetté transzformáljuk. Végül a negyedik lépésben egy rácsot illesztünk a jelre, hogy 0 vagy 1 értékeket rendeljünk az egyes cellákhoz. A feldolgozáshoz megadható paraméterek segítségével az egyes lépések során szűréseket végzünk, például a négyszög méretére (OpenCV Tutorials, é. n.).

Az ArUco-kódok kezelését az OpenCV-könyvtár egy önálló bővítménye tartalmazza, mely a felismerés mellett lehetőséget biztosít a jelek előállítására a kinyomtatáshoz és a kamerakalibrációra.

A két bemutatott módszer összehasonlítását az 1. táblázat tartalmazza. Általánosságban elmondható az is, hogy az OpenCV-könyvtár által biztosított megoldások esetén a sablonkeresés több időt vesz igénybe.

Algoritmusok fejlesztése

Mind a sablonkeresés, mind az ArUco-kód felismerése esetén az OpenCV-könyvtár által biztosított megoldásokat finomítottuk, egyrészt a futási idő csökkentése, másrészt a felismerés eredményességének javítása érdekében.

Az OpenCV által kínált alapelgoritmusok esetén az ArUco-kód keresése kétszer, háromszor gyorsabb mint a sablon illesztés. Mindkét algoritmus alkalmazása során, ha feltételezhetjük azt, hogy a két egymást követő kép között az elmozdulás mértéke kicsi, akkor nem szükséges a következő képet teljeskörűen megvizsgálni a jel megtalálásához. Az előző képen megtalált minta, jel megnövelt környezetére elvégezve a keresést felgyorsíthatjuk az egyes képek feldolgozását. Ez a sablonkeresés esetén, az előző képen megtalált jel négyszeresére korlátozott kereséssel akár egy nagyságrenddel gyorsíthatjuk a feldolgozást, természetesen a sebességnövekedés

1. táblázat.

A sablonkeresés és ArUco-kód-keresés összehasonlítása

Sablonkeresés	ArUco-kód-felismerés
Előnyök:	
Mindig van találat	A jel elfordulhat
Egyszerű algoritmus	A jel mérete változhat
Nem szükséges jeleket előre elhelyezni	A normális irány is becsülhető
Hátrányok:	
Hamis találat esélye nagyobb	Fényviszonyokra érzékenyebb
Csak minimális elfordulás lehet	Speciális jellet kell előre elhelyezni
Csak minimális méretváltozás lehet	Nincs mindig találat, hamis találat is lehet

5. ábra. Az eredeti kép (bal oldal) és az adaptívhisztogram-kiegyenlítés eredménye az L csatornán (jobb oldal)

2. táblázat.

ArUco-kód-keresés hatékonyságának növelése

fájl	képkocka	Alapalgoritmus		L csatorna hisztog.	
	szám	találat	%	találat	%
3_20191207_105813.h264	3452	1965	56,9	3146	91,1
4_20191207_103907.h264	4167	1801	43,2	3541	85,0
5_20191207_114801.h264	15790	13556	85,9	13882	87,9
5_20191209_143236.h264	13500	7856	58,2	10925	80,9
5_20191211_103149.h264	4068	1945	47,8	3910	96,1
5_20191211_153508.h264	5448	3663	67,2	4074	74,8
4_20191213_120446.h264	13532	10141	74,9	12917	95,5
4_20191213_135821.h264	16117	15552	96,5	15906	98,7
5_20191213_140133.h264	15722	12698	80,8	14040	89,3
4_20191214_115855.h264	15877	14878	93,7	15752	99,2

6. ábra. A kamera + a geodéziai távcső nyers képe (bal oldal) és a kalibráció paramétereivel javított változat (jobb oldal)

7. ábra. A Rákóczi híd dinamikus próbaterhelése során, a saru vízszintes elmozdulása mérőállomással, képfeldolgozással és interferométerrel meghatározva

Alkalmazási tapasztalatok

Az első, 2015-ös kísérleti alkalmazás során három technológiát alkalmaztunk a hídsámolyon a dinamikus terhelés hatására történő elmozdulás meghatározására, a képfeldolgozás mellett interferométert és robotmérőállomást is, mivel a technológia alkalmazhatóságának az igazolása volt a célunk. A nagy tömegű teherautó hirtelen fékezése hatására lezajló mozgást a képfeldolgozásból is nagy pontossággal meg tudtuk határozni (7. ábra). Ebben az esetben mikroszkópkamerát (Dino-Lite Pro AM4000) és laptopot használtunk a terepen.

2019. decemberében egy úszómű statikus próbaterhelése során alkalmaztuk a továbbfejlesztett hardver- és szoftvermegoldásunkat, számos más szenzorral együtt. Az úszóműn a folyó hullámszásának kimutatására három ArUco-jelet (72×72 mm) helyeztünk el, így feldolgozás során mindkét módszert (sablonkeresés és ArUco-kód-felismerés) alkalmazni tudtuk. A három ArUco-jelet egy-egy Leica mérőállomásra szerelt Raspberry Pi V2 kamerával vettük fel, másodpercenként két kép frekvenciával. Emellett három GNSS-vevővel és két robot-mérőállomással is végeztünk észleléseket. A próbaterhelés során 30 cm körüli magasságváltozások voltak várhatók. A kamerás (2 Hz) és a GNSS- (1 Hz) észlelések egy-egy teherállás során folyamatosan történtek. A robot-mérőállomással csak a kezdő és végállapotban végeztünk méréseket (8. ábra)

A képfeldolgozáson alapuló megoldáshoz használt eszközök jóval kisebb költséget jelentenek a hagyományos geodéziai eszközökhöz képest. A mérési eredmények megbízhatósága a GNSS-technikáénál nagyobb. Kis távolságon (pár méter) a mérőállomásnál pontosabb, néhány tíz méteres távolságon ahhoz közelítő eredményt kaphatunk. Az alkalmazott hardver függvényében a gyakoribb mintavételezésre alkalmas, így gyorsan lezajló mozgások, deformációk megfigyelésére is lehetőséget biztosít. A módszernek persze vannak hátrányai is a GNSS- vagy robot-mérőállomás

8. ábra. Az úszómű statikus próbaterhelése során meghatározott magassági elmozdulások fotogrammetriával, GNSS-technikával és mérőállomással

alkalmazásával szemben: csak 2D-ben, azaz a képsíkkal párhuzamos síkban ad eredményt, csak relatív adatok meghatározására alkalmas, a kép méretének függvényében csak meghatározott mértékű elmozdulás kimutatása lehetséges, és sötétben nem használható.

Fejlesztési perspektívák

Bár már most is gyakorlati feladatok során alkalmazható rendszert sikerült összeállítanunk, mind a hardver, mind a szoftver területén több fejlesztési lehetőséget igyekszünk a jövőben megvalósítani. A hardverkialakítás még nem teljesen időjárásálló, a távcsőre rögzítést lehetővé tevő adapter mellett eső elleni védelmet kell kialakítani a Raspberry Pi kamerához. A parallaxis eltüntetése nem egyszerű feladat a távcsőre felszerelt kamerával. A terepen általában nem kapcsolunk közvetlenül egy képernyőt a Raspberry Pi számítógéphez, mert például nincs megfelelő energiaforrás ehhez. Ebben az esetben egy mobil eszközről (telefon, tablet, laptop) csatlakozunk a Raspberry Pi-hez és a WIFI-hálózaton keresztül visszük át a videóképet a két eszköz között. A lassú WIFI-adatátvitel miatt akár 10-20 másodperc késleltetéssel jelenik meg a külső eszköz képernyőjén a kamerakép. Ez körülménnyé teszi a beállítást.

Jelenleg a Raspberry Pi számítógép által rögzíthető képek másodpercenkénti számát (fps) elsősorban a SD-kártya sebessége határozza meg. A jelenlegi kiépítésben ez nagyjából 2 fps, ami gyorsan lezajló jelenések megfigyelésére nem alkalmas. Itt a gyorsításhoz számos kész megoldás szóba jöhet, mint például a kis fogyasztású SSD-háttértároló, nagyobb

teljesítményű mini PC, esetleg terepálló laptop alkalmazása.

A gyorsabb hardver esetén az online feldolgozás is lehetővé válhat, amikor a videórögzítés nem feltétlenül szükséges. A programokat már alkalmassá tettük az online feldolgozásra. Egy nem nagy teljesítményű lappal (Intel(R) Core(TM) i7-8565U CPU @ 1.80GHz, 8 GB RAM) másodpercenként 10 felvétel online feldolgozását tudtuk elvégezni a sablonkeresés módszerével. További gyorsítás érhető el a többszörös programozással és a GPU számítási célokra történő felhasználásával.

Eddig nem használtuk ki, hogy az ArUco-kódok keresése során lehetőség van a jelhez kapcsolt térbeli koordináta-rendszer-tengelyelfordulásának meghatározására is. Ez főként deformációvizsgálat esetén jelentene többletinformációt. Jelenleg képenként egy ArUco-jel megkeresését valósítja meg a program. Egy másik fejlesztési irány lehet, hogy egy képkockán több jel felismerését és megkeresését is támogassa az alkalmazás.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak az EMMI-nek a BME FIKP-VIZ pályázat keretében nyújtott támogatásért.

Irodalom

- Engel, P. – Schweimler, B. 2016. *Development of an Open-Source Automatic Deformation Monitoring System for Geodetical and Geotechnical Measurements*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing XL-5/W8.25-30, DOI: [10.5194/isprs-archives-XL-5-W8-25-2016](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XL-5-W8-25-2016)
- Kis Papp, L. 1965. *Az Erzsébet híd mozgásának vizsgálata fotogrammetriai módszerrel*. Geodézia és Kartográfia 17. évf. 3. sz. pp. 187–195.
- 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.

DOI: [10.1016/j.proeng.2016.08.286](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.286)

OpenCV Tutorials (é. n.). https://docs.opencv.org/master/d9/df8/tutorial_root.html utolsó elérés: 2020. 12. 27.

Paulik, D. – Tóth, M. T. – Molnár, B. – Neuberger, H. – Horváth, L. 2018. *Mérnökfotogrammetriai támogatás a tartószerkezetek vizsgálatához*. Geodézia és Kartográfia, 70. évf. 2. sz. pp. 15–20. DOI: [10.30921/GK.70.2018.2.2](https://doi.org/10.30921/GK.70.2018.2.2)

Simonot, L. – Hébert, M. – Dupraz, D. 2011. *Goniocolorimetry: From Measurement to Representation in the CIELAB Color Space*. Color Research & Application 36. évf. 3. sz. DOI: [10.1002/col.20605](https://doi.org/10.1002/col.20605)

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)

Villán, A. F. 2019. *Mastering OpenCV 4 with Python*. PackPub. ISBN 978-1-78934-491-2

Briechele, K. – Hanebeck, U. D. 2001. *Template matching using fast normalized cross correlation*. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering 4387, 2001 March DOI: [10.1117/12.421129](https://doi.org/10.1117/12.421129)

Völgyszi, L. – Tóth, Gy. 2020. *Calibration of CCD sensors mounted on geodetic measuring system*, Surveying Review 52. évf. pp. 1–10. DOI: [10.1080/00396265.2019.1703506](https://doi.org/10.1080/00396265.2019.1703506)

Dr. Siki Zoltán
egyetemi
adjunktus

BME Általános és Felsőgeodézia
Tanszék
siki.zoltan@epito.bme.hu

Dr. Takács Bence
egyetemi docens

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