

ROBOTREPÜLŐKKEL KÉSZÍTETT LÉGIFELVÉTELEK FELDOLGOZÁSA

BALOGH ANDRÁS¹ – KISS KINGA²

BEVEZETÉS

Az utóbbi évtizedben a 3D megjelenítés a régészeti kutatás, a kulturális örökség bemutatásának fontos elemévé vált. Tanulmányunkban egy új fotogrammetriai eljárás régészeti alkalmazhatóságát ismertetjük; annak lépéseit a légifotók készítésétől egészen a 3D modell (digitális terepmodell és ortofotó) elkészültéig. A bemutatott módszerrel pontos terepmodell vagy ortofotó készíthető a régészeti dokumentáció számára, az utófeldolgozás során pedig vizuális megjelenítés, a régészeti örökség bemutatása céljából.³ A légifotók készítésére RPAS eszközöket (Remotely Piloted Aircraft System – Távirányított Repülő Rendszer) használunk, melyekkel nagy terület felvételezése lehetséges alacsony költségráfordítással. Ismertetjük az eljárás munkamenetét a légifotók készítésétől az SfM és MVS algoritmusok bemutatásán át a terepmodellek, ortofotók elkészítéséig.

A régészet egyik alapvető célja a lelőhelyek minél pontosabb és részletesebb dokumentálása. Ennek során fontos szerepet tölthet be egy, a lelőhelyről és annak környezetéről készült ortofotó vagy akár egy terepmodell, mely nagy pontossággal jeleníti meg a felszínt.⁴ Ezen kívül jelentősen növelheti az adott állapot rögzítésének pontosságát. Az itt bemutatott eljárás véleményünk szerint megváltoztathatja a régészeti feltárások gyakorlatát. A régészeti terepmunka során az elsődleges cél rendszerint a régészeti jelenségek,



1. kép: Merevszárnyú RPAS eszköz waypoint repülés közben

¹ Pazirik Informatikai Kft., pazirik@pazirik.hu

² Pazirik Informatikai Kft., geoinformatikus, k1ng4.k1ss@gmail.com

³ De Reu, J. – Plets, G. – Verhoeven, G. – De Smedt, Ph. – Bats, M. – Cherretté, B. – De Maeyer, W. – Deconynck, J. – Herremans, D. – Laloo, P. – Van Meirvenne, M. – De Clercq, W.: Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science* 40 (2013), 1108–1121; De Reu, J. – De Smedt, Ph. – Herremans, D. – Van Meirvenne, M. – Laloo, P. – De Clercq, W.: On introducing an image-based 3D reconstruction method in archaeological excavation practice. *Journal of Archaeological Science* 41 (2014), 251–262. A SziMe3D AR kutatásfejlesztési projektünkben a technológia szerepét és használhatóságát vizsgáltuk, összehasonlítva más technológiákkal. További információ: <http://szime3dar.com/hu/>

⁴ Verhoeven, G. – Doneus, M. – Briese, Ch. – Vermeulen, F.: Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs. *Journal of Archaeological Science* 39 (2012), 2060–2070.

leletek felfedezése, azok összefüggéseinek feltárása. Az ásatás azonban destruktív kutatási módszer, így fontos a helyszín egyes fázisokhoz kötődő állapotainak pontos megörökítése, dokumentálása. A technológiai újításoknak köszönhetően lehetőség nyílt arra, hogy kétdimenziós képekből, légifotókból nagyfelbontású háromdimenziós modelleket hozzunk létre, így a lelőhely később is könnyebben tanulmányozható egy pontos helyszíni felmérésekkel kiegészített dokumentáció alapján.⁵

A modellek elkészítéséhez megfelelő minőségű képekre és egy SfM algoritmuson alapuló szoftverre van szükség. Esetünkben ez az orosz Agisoft LLC által készített PhotoScan.⁶ Az algoritmus segítségével a program kiszámolja a kamerapozíciókat, és ebből felépíti az objektum 3D pontfelhőjét, amely a valós tárgyat jeleníti meg. A program képsorozatokkal dolgozik, amelyek egy területről több nézőpontból készültek. A következőkben bemutatjuk, hogy ezzel a módszerrel hogyan térképezhető fel hatékonyan egy ásatási terület,⁷ de az eljárás nemcsak a légifotózásban, hanem a leletek dokumentálása során is alkalmazható.

TEREPI MUNKA

A teljes munkamenet két alapvető eleme a terepi adatgyűjtés és a képfeldolgozás. (2. kép) A terepi munka a *ground control point*-ok (GCP-k)⁸ kitűzéséből és felméréséből (ha van erre lehetőség), valamint légifotók készítéséből áll.

A régészeti lelőhelyek dokumentálása szempontjából a helyszínről ortofotókat készítünk, amely sok információt nyújthat a lelőhely környezetéről is.⁹ Ennek során közel merőleges tengelyű képeket veszünk fel. Azonban ahhoz, hogy terepmodell is számítható legyen, általában nem csupán ilyen, egyetlen szögből felvett fotókra van szükségünk, hanem kisebb szögből is érdemes képeket készíteni a területről.

Fontos, hogy a területről minden szögből készüljön kép, hogy a 3D rekonstrukció kiszámolása után minden részlet megtalálható legyen a modellen is. Ahhoz, hogy jó minőségű modellt kapjunk a munkamenet végén, meghatározó jelentőséggel bír a képek felbontása és a repülési magasság is. Általánosságban elmondható, hogy több és magasabb felbontású kép esetében a modell pontosabb lesz, azonban ez jelentősen megnöveli a számítógépes feldolgozás időtartamát és annak hardverigényét. Optimális minőség eléréséhez legalább 5 Mpx felbontás szükséges, azonban ha jobb minőségű ortofotót szeretnénk készíteni, ajánlott a minimum 12 Mpx felbontás.

A kamerapozíciók és a 3D szerkezet számítása az egyes képek átfedéséből származik, így a legjobb eredmények minél nagyobb átfedéssel érhetőek el. Rendezett és rendezetlen képsorozatokból¹⁰ is előállítható ortofotó, illetve terepmodell, azonban fontos, hogy minden kép más helyről, nézőpontból készüljön, és megfelelő átfedés legyen a képek között (60% merőleges, 80% hosszanti irányba; 4. kép). Ez elsősorban a

⁵ De Reu, J. – De Smedt, Ph. – Herremans, D. – Van Meirvenne, M. – Laloo, P. – De Clercq, W.: On introducing an image-based 3D reconstruction method in archaeological excavation practice. *Journal of Archaeological Science* 41 (2014), 251–262.

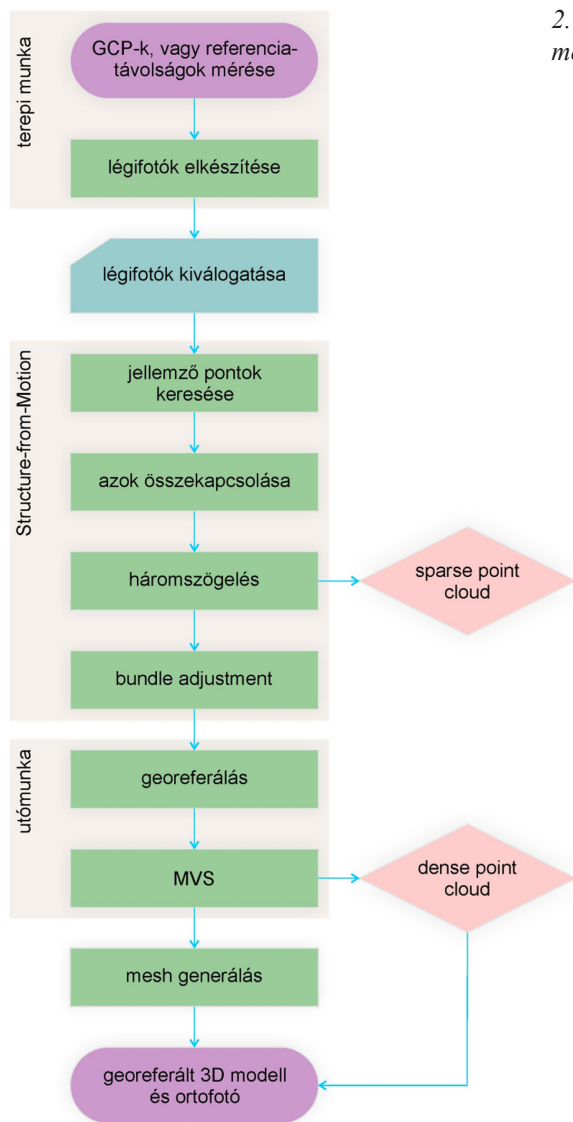
⁶ Agisoft LLC (2013) Agisoft PhotoScan user manual. Professional edition, version 1.0.0. http://downloads.agisoft.ru/pdf/photoscan-pro_1_0_0_en.pdf (2014. január)

⁷ De Reu, J. – Plets, G. – Verhoeven, G. – De Smedt, Ph. – Bats, M. – Cherretté, B. – De Maeyer, W. – Deconynck, J. – Herremans, D. – Laloo, P. – Van Meirvenne, M. – De Clercq, W.: Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science* 40 (2013), 1108–1121; Doneus, M. – Verhoeven, G. – Fera, M. – Briese, Ch. – Kucera, M. – Nezbauer, W.: From deposit to point cloud: a study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations. *Geoinformatics* 6 (2011), 81–88; Verhoeven, G. – Doneus, M. – Briese, Ch. – Vermeulen, F.: Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs. *Journal of Archaeological Science* 39 (2012), 2060–2070.

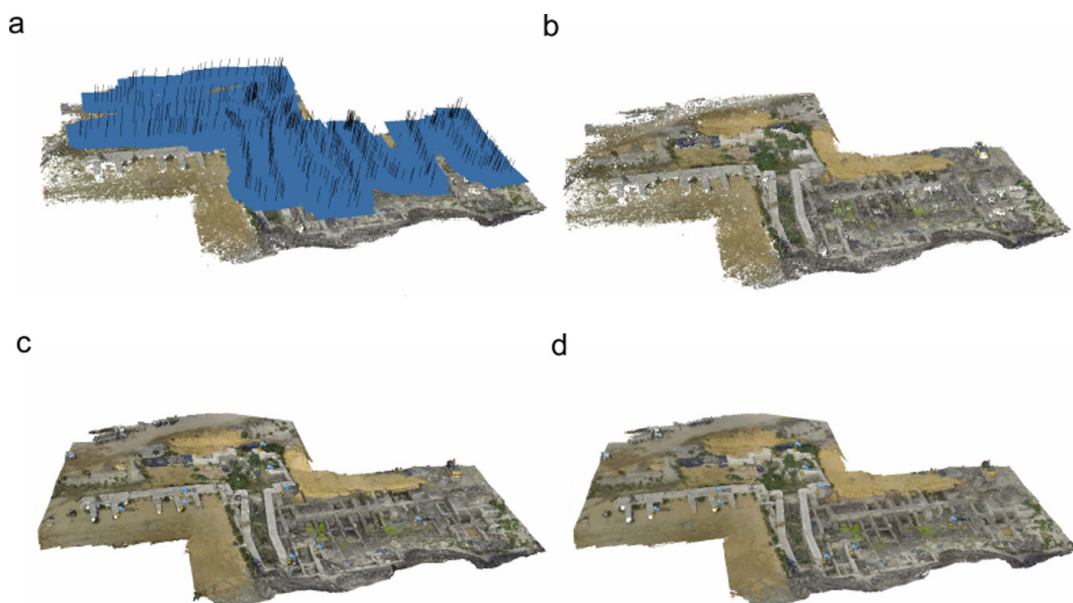
⁸ Pontos koordinátákkal rendelkező pontok, amelyek jól láthatóak a légifotókon.

⁹ A technológia alkalmazását nagyon fontosnak tartjuk az előzetes felderítés során, hiszen az RPAS eszközök segítségével gyorsan és hatékonyan felmérhetők a nagyobb beruházások mentén elhelyezkedő régészeti lelőhelyek is.

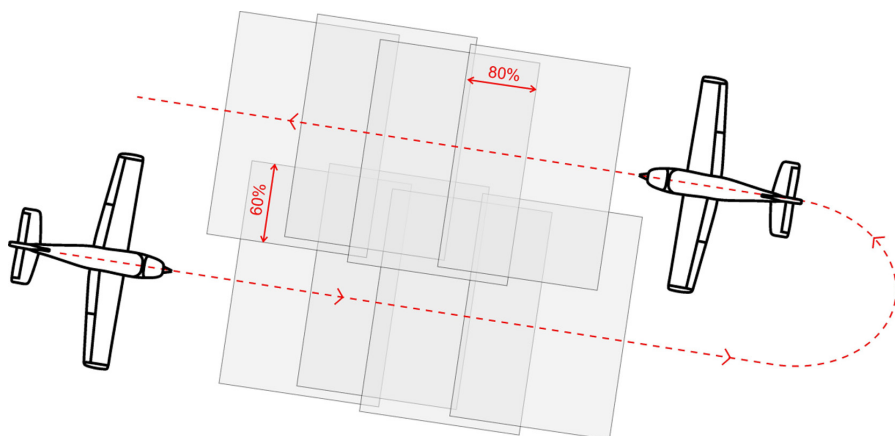
¹⁰ Rendezett képsorok például a waypoint-repülések során készített képsorozatok, amelyek „sorban” vannak. A rendezetlen képsorozatokban nincs rendszer, véletlenszerű helyekről készült képek.



2. kép: Az ortofotók és terepmodellek készítésének menete (pontosabb leírás a szövegben)



3. kép: A sparse point cloud a kamerapozíciókkal (a); a sparse point cloud (b); a dense point cloud (c); a textúrázott poligonháló (d); Győr-Dunakapu téri ásatás, légifotózás: 2013. augusztus 30.



4. kép: Légifotók közötti átfedések

waypoint repüléseknél állítható be pontosan.¹¹ Ennek során a robotpilóta irányítja a gépet előre megadott útvonalon és magasságban.

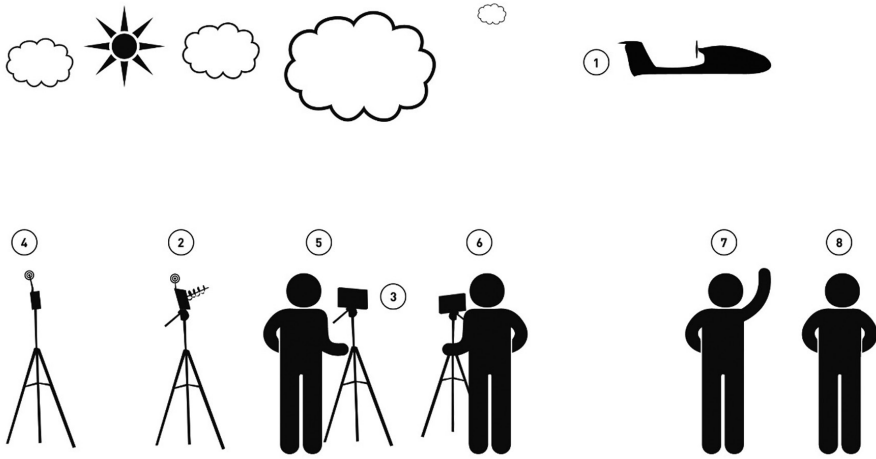
A terepi munka első fázisa a *ground control point*-ok (GCP) bemérése és elhelyezése. Pontos, georeferált modell csak GCP-k segítségével állítható elő. Ha ezek nem állnak rendelkezésre, a modell abban az esetben lehet mégis pontos, ha rendelkezünk referenciatávolságokkal, azaz ha bizonyos, jól látható pontok közötti távolságokat pontosan ismerünk. Ilyenkor a modellünk ugyan nem helyezhető el vetületi rendszerben, de pontos lesz, és méréseket végezhetünk rajta.¹²

Esetünkben a 3D rekonstrukció egy automatikus, 2D képek alapján készült 3D modell, ami a valós objektum pontos leképezése. Minden 3D rekonstrukciós módszerhez szükséges valamilyen eszköz, amellyel felvételezzük az adott objektumot, majd a felvett adatokat egy fotogrammetriai programmal dolgozzuk fel, hogy 3D modellt készítsünk belőle.

A légifelvételek készítésére merevszárnyú RPAS eszközt használtunk, mellyel nagy terület feltérképezése lehetséges. Az eszköz egy kifejezetten FPV (kamera segítségével irányított eszköz) repülésre tervezett Skywalker típusú modellrepülőből és az ezt kiegészítő rendszerekből áll. (5. kép) A repülőgép működését a magyar fejlesztésű C4S típusú robotpilóta-rendszer segíti, amely több repülési módra képes (szabad kézi repülés, stabilizált repülés, waypoint-repülés, adott pont körüli körözés, return to home, vagyis hazatérés stb.). Waypoint-repülés során a vizsgálni kívánt terület kijelölése után a robotrepülőhöz biztosított program automatikusan megtervezi a repülési útvonalat. A repülési terv a különböző beállítási lehetőségek segítségével még pontosabban személyre és az adott feladatra szabható (repülési magasság, repülési sebesség, a fényképezőgép beállítási lehetőségei és technikai paramétereinek megadása). A repülést a gépen elhelyezett kamera és videóadó, valamint a földön elhelyezett videóvevő segítségével folyamatosan nyomon követhetjük, kontrollálhatjuk. A feladat végrehajtása automatikus, a robot végzi, de bármikor megszakítható vagy korrigálható az útvonal. A nagyobb távolságok berepülésében egy LRS (Long Range System/nagy hatótávolságú távirányító rendszer) is segíti a pilótát. Segítségével ezeknek az eszközöknek az irányíthatósága akár 5–10 km távolságra is biztonságosan kiterjeszhető. Az RPAS eszköz repülési ideje 40–60 perc közötti időtartam, de akkumulátorcsere után folytatható a repülés. A repülőgép testében a felszínhez képest közel merőlegesen elhelyezett fényképezőgép helyezkedik el, és adott időközönként készít felvételt.

¹¹ De Reu, J. – Plets, G. – Verhoeven, G. – De Smedt, Ph. – Bats, M. – Cherretté, B. – De Maeyer, W. – Deconynck, J. – Herremans, D. – Laloo, P. – Van Meirvenne, M. – De Clercq, W.: Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science* 40 (2013), 1108–1121.

¹² De Reu, J. – Plets, G. – Verhoeven, G. – De Smedt, Ph. – Bats, M. – Cherretté, B. – De Maeyer, W. – Deconynck, J. – Herremans, D. – Laloo, P. – Van Meirvenne, M. – De Clercq, W.: Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science* 40 (2013), 1108–1121; Plets, G. – Gheyle, W. – Verhoeven, G. – De Reu, J. – Bourgeois, J. – Verhegge, J. – Stichelbaut, B.: Three-dimensional recording of the archaeological remains in the Altai Mountains. *Antiquity* 86 (2012), 884–897.



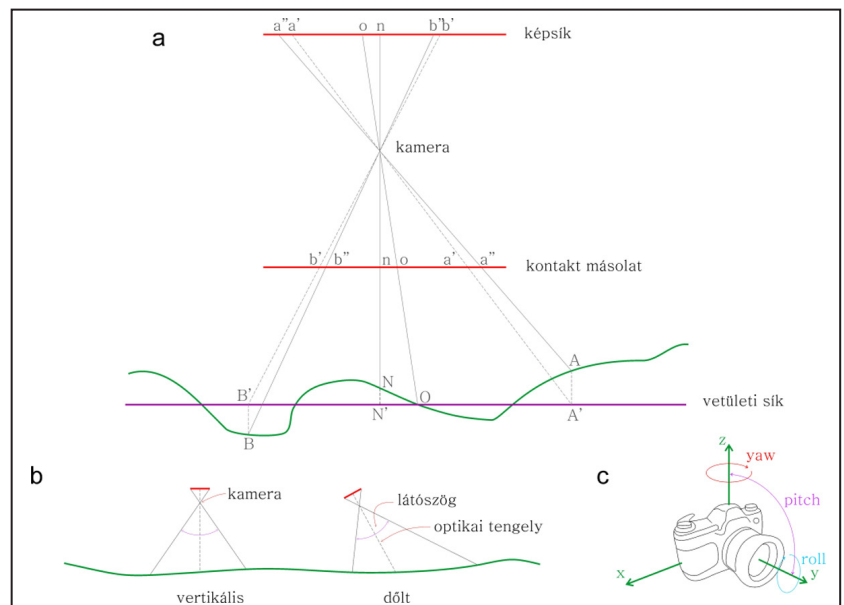
5. kép: Robotrepülő légifotózáshoz szükséges alapvető személyi és eszközállományok: 1. robotrepülő, 2. videó vevő rendszer, 3. monitorok, 4. nagy hatótávolságú irányító rendszer, 5. robotpilóta, 6. másodpilóta, 7. segédszemélyzet, 8. régész szakember

KÉPEK FELDOLGOZÁSA

Légifotózás – vagy bármilyen fotózás – során optikailag torzult képek keletkeznek. Ez a digitális fotók jellemzője, így a légifotózás is minden esetben torzult képeket eredményez. Minden egyes kép más repülési magasságból készült, esetlegesen más dőlésszöggel is. Ahhoz, hogy ezt korrigáljuk és pontos térképeket kapjunk, geometriai korrekciót kell végeznünk és georeferálni kell a fotókat. A geometriai hibák több okból adódnak, amely lehet a kamera optikájával, a topográfiai relieffel vagy a kameradőléssel kapcsolatos.¹³ (6. kép) A kamera egy ponton helyezkedik el a térben, egy bizonyos dőléssel. Ez a helyzet jelöli ki a vetítési középpontot három koordinátával (x , y és z), az irányt pedig három szöggel adhatjuk meg (ω (*pitch*), φ (*roll*) és κ (*yaw*); 6. kép/c). Ez a hat érték határozza meg a külső kameraparamétereket. Merőleges tengelyű fotózás esetén a φ és a ω közel 0. Minél nagyobb a kameradőlés a felszínhez képest, annál torzultabb képet kapunk. (6. kép/b)

A topográfiai relief, vagyis a domborzat okozta hibák abból adódnak, hogy az egyes pontokhoz tartozó magasságokat a vetületi síkhoz kell igazítanunk. (6. kép/a)

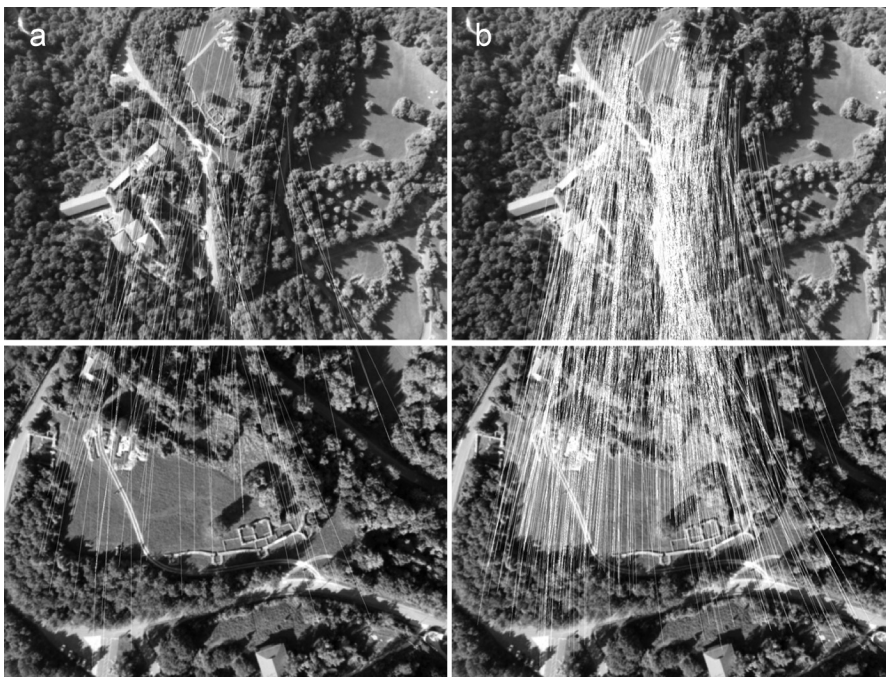
6. kép: A képek geometriai hibáinak szemléltetése: (a) relief és (b) kameradőlés okozta torzulás; (c) a kamera irányának szögei



¹³ Verhoeven, G. – Sevara, Ch. – Karel, W. – Ressler, C. – Doneus, M. – Briese, Ch.: Undistorting the past: New techniques for orthorectification of archaeological aerial frame imagery. In: *Good practice in archaeological diagnostics. Non-invasive survey of complex archaeological sites*, eds Corsi, Cristina – Slapšak, Božidar – Vermeulen, Frank (Cham: Springer, 2013), 36–67.

Az elkészített képeket válogatás után importáljuk PhotoScan-be, majd ha szükséges, a zavaró, felesleges részleteket (mozgó részek, textúrázatlan területek, vízfelület, csillogó felületek, égbolt) maszkoljuk, hogy ezeket a számolás során ne vegye figyelembe a program. A következő lépés a pontfelhő-generálás. Ennek során (1) egy sparse point cloud készül (*sparse point cloud*; 3. kép/a és b), mely az eredeti tárgy geometriai formájának felel meg, (2) valamint a program kiszámítja a kamerapozíciókat a képek készítésének időpontjában és (3) a belső kameraparamétereket: fókusz távolság, képfőpont stb. (2. kép)

Az utófeldolgozás, tehát a modellépítés első lépése a képek jellegzetes pontjainak keresése, ezt követi a kapcsolópontok meghatározása. (7. kép) A kapcsolópontok száma függ az eredeti kép textúrájától és felbontásától, tehát a nagy felbontású képek adják a legjobb eredményt. Ezek hátránya, hogy jelentősen megnövelik a számítási időt, amely nagyban függ a képek minőségétől, mennyiségétől, és az elkészítendő modell kívánt minőségétől. A képek sűrűsége, élessége és felbontása határozza meg az elkészített pontfelhő minőségét. Azok felvételénél tekintettel kell lenni arra, hogy egy pont legalább három képen látható legyen; érdemes tehát minél több képet készíteni az adott terepről.¹⁴



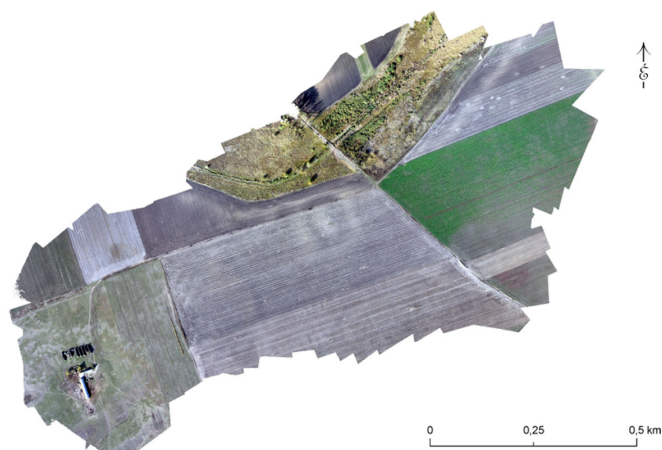
7. kép: A SIFT (a) és ASIFT (b) algoritmusok ugyanazon a képpáron eltérő számú kapcsolópontot találnak, ami az algoritmusok jellegéből fakad (a tesztet a http://demo.ipol.im/demo/my_affine_sift/ oldal segítségével készítettük el).

A kapcsolópontok keresését, azok összekapcsolását, és a pontfelhő elkészítését a *Structure from Motion* (SfM) algoritmus segítségével végzi el a program. Az SfM algoritmusnak összefüggő képsorozatra van szüksége a pontfelhő elkészítéséhez, amelyek között van átfedés, tehát megtalálhatóak rajta ugyanazok a pontok más szemszögből. Ennek során nem csupán a kapcsolópontokat számolja ki, hanem a kamerapozíciókat is, ahonnan a képek készültek, valamint a belső kameraparamétereket (fókusz távolság, lencse geometriai torzításának jellemzői stb.). Ezt úgy éri el, hogy a képeken található jellemző kétdimenziós pontokat összekapcsolja a különböző képpárokon.

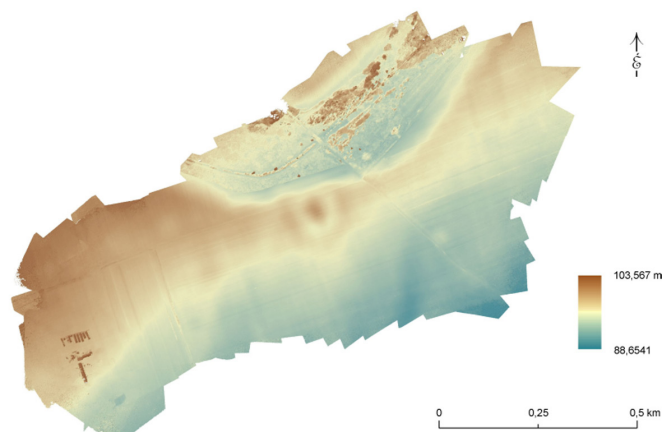
A *sparse point cloud* elkészítése után a következő lépés a georeferálás, tehát a GCP-k megadása a képeken jól látható pontokhoz, és a vetületi rendszer meghatározása. Az adatgyűjtés során ügyelni kell arra, hogy ezek a pontok a felmért területen egyenletesen elszórtan helyezkedjenek el, és rendelkezzenek x, y és z koordinátákkal.

Ha megadtuk a georeferáláshoz szükséges adatokat, elkészíthetjük a *dense point cloud*-ot, mely a *sparse point cloud* kimenetét használja fel a sűrűbb pontfelhő számításához. Ez a lépés a *Multi-view Stereo* (MVS)

¹⁴ Westoby, M. J. – Brasington, J. – Glasser, N. F. – Hambrey, M. J. – Reynolds, J. M.: ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179 (2012), 300–314.



8. kép: Mezőcsát-Laposhalom területére elkészített ortofotó, BORBAS project, Pustainé Dr. Fischl Klára kutatási területe



9. kép: Mezőcsát-Laposhalom területére elkészített terepmodell, BORBAS project, Pustainé Dr. Fischl Klára kutatási területe

algoritmus végrehajtása, amely az SfM algoritmus kimenetét használja a *dense point cloud* (sűrű pontfelhő; 3. kép/c) elkészítésére. Ez a sűrű pontfelhő a pontos ortofotók készítéséhez szükséges. A program ebből elkészíti a poligonhálót, majd ezt textúrázhatjuk is. (3. kép/d) A textúrákat a program az eredeti képek alapján készíti el. Ha ezeket a számításokat elvégeztük, exportálhatjuk a textúrázott ortofotót (8. kép) és a digitális terepmodellt (DTM-et) (9. kép),¹⁵ amely importálható más programba, így felhasználhatjuk pl. térinformatikai elemzések végrehajtására is. Utóbbihoz georeferált modell szükséges, azonban más módon is készíthetünk mérhető – de nem georeferált – modellt, amennyiben rendelkezünk referenciatávolságokkal a pontok között.¹⁶

A számítások hardverigénye meglehetősen nagy. A bemutatott példák számításához egy Intel Core i7 4770 3.4 GHz, 32 GB RAM, Nvidia GeForce GTX 650 Ti konfigurációt használtunk. Nagy mennyiségű kép esetében a számítások több napig is eltarthatnak a képek és az eredmény kívánt minőségétől függően. Erős videokártya használata csökkentheti a számítások időtartamát az OpenCL használatának köszönhetően.¹⁷

ÖSSZEGZÉS

A fent bemutatott módszer viszonylag költséghatékony felmérést tesz lehetővé. A feltárások területének térképezésére, ortofotók, terepmodellek készítésére teljes mértékben alkalmas. A felmérés során fontos a nagy mennyiségű kép készítése, a pontos GCP-k felmérése jól látható pontokhoz, vagy a korábban említett referencia-távolságok mérése.

Az ilyen típusú dokumentáció segíti a veszélyeztetett örökség felmérését, jelentős szerepet tölthet be a kulturális örökségmegőrzésben. Előnye, hogy pontos, gyors és roncsolásmentes. Hátránynak mondható, hogy rendkívül nagy a hardverigénye, és a pontos eredmények eléréséhez drága eszközök szükségesek, valamint a komolyabb RPAS eszközök fejlesztése és szakszerű üzemeltetése nagy tapasztalatot igényel. Ezen kívül hátránya, hogy alkalmazkodni kell az időjárási viszonyokhoz a felmérés során. Előfordul, hogy pl. erős szél vagy esős időjárás miatt egyáltalán nem lehetséges a légifotók elkészítése. Tekintettel kell lennünk a napkitörésekre is, ugyanis ez gyakori GPS-jelvesztéshez, rosszabb esetben balesethez vezethet. A technika rendkívül sok előnye mellett csekély számú hátránnyal rendelkezik, mindemellett folyamatosan fejlődik, így véleményünk szerint a módszer nagy jövő előtt áll, és egyre fontosabb szerepet tölthet be a régészetben és a kulturális örökségvédelemben.

¹⁵ Ibid.

¹⁶ Plets, G. – Gheyle, W. – Verhoeven, G. – De Reu, J. – Bourgeois, J. – Verhegge, J. – Stichelbaut, B.: Three-dimensional recording of the archaeological remains in the Altai Mountains. *Antiquity* 86 (2012), 884–897; Verhoeven, G.: Taking Computer Vision Aloft – Archaeological Three-dimensional Reconstructions from Aerial Photographs with Photoscan. *Archaeological Prospection* 18 (2011), 67–73.

¹⁷ Az OpenCL programozási nyelv, melynek segítségével a videokártya feldolgozóegységeit hatékonyan használhatjuk.

AJÁNLOTT IRODALOM

- Agisoft PhotoScan user manual. Professional edition, version 1.0.0. 2013. http://downloads.agisoft.ru/pdf/photoscan-pro_1_0_0_en.pdf (2014. január)
- DE REU, J. – DE SMEDT, PH. – HERREMANS, D. – VAN MEIRVENNE, M. – LALOO, P. – DE CLERCQ, W.
On introducing an image-based 3D reconstruction method in archaeological excavation practice. *Journal of Archaeological Science* 41 (2014), 251–262.
- DE REU, J. – PLETS, G. – VERHOEVEN, G. – DE SMEDT, PH. – BATS, M. – CHERRETTÉ, B. – DE MAEYER, W. – DECONYNCK, J. – HERREMANS, D. – LALOO, P. – VAN MEIRVENNE, M. – DE CLERCQ, W.
Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science* 40 (2013), 1108–1121.
- DONEUS, M. – VERHOEVEN, G. – FERA, M. – BRIESE, CH. – KUCERA, M. – NEZBAUER, W.
From deposit to point cloud: a study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations. *Geoinformatics* 6 (2011), 81–88.
- PLETS, G. – GHEYLE, W. – VERHOEVEN, G. – DE REU, J. – BOURGEOIS, J. – VERHEGGE, J. – STICHELBAUT, B.
Three-dimensional recording of the archaeological remains in the Altai Mountains. *Antiquity* 86 (2012), 884–897.
- TORRES, J. C. – ARROYO, G. – ROMO, C. – DE HARO, J.
3D digitization using Structure from Motion. *CEIG – Spanish Computer Graphics Conference* (2012). http://www.academia.edu/2021718/3D_Digitization_using_Structure_from_Motion
- VERHOEVEN, G. – DONEUS, M. – BRIESE, CH. – VERMEULEN, F.
Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs. *Journal of Archaeological Science* 39 (2012), 2060–2070.
- VERHOEVEN, G.
Taking Computer Vision Aloft – Archaeological Three-dimensional Reconstructions from Aerial Photographs with Photoscan. *Archaeological Prospection* 18 (2011), 67–73.
- VERHOEVEN, G.
Getting computer vision airborne – using Structure from Motion for accurate orthophoto production. *RSPSoc Archaeology Special Interest Group Newsletter* Spring 2012, 4–6.
- VERHOEVEN, G. – SEVARA, CH. – KAREL, W. – RESSL, C. – DONEUS, M. – BRIESE, CH.
Undistorting the past: New techniques for orthorectification of archaeological aerial frame imagery. In: *Good practice in archaeological diagnostics. Non-invasive survey of complex archaeological sites*, eds Corsi, Cristina – Slapšak, Božidar – Vermeulen, Frank, 36–67. Cham: Springer, 2013.
- VERHOEVEN, G. – Taelman, D. – Vermeulen, F.
Computer vision-based orthophoto mapping of complex archaeological sites: The ancient quarry of Pitaranha (Portugal–Spain). *Archaeometry* 54/ 6 (2012), 1114–1129.
- WESTOBY, M. J. – BRASINGTON, J. – GLASSER, N. F. – HAMBREY, M. J. – REYNOLDS, J. M.
,Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179 (2012), 300–314.