



TÉRBŐL DIGITÁLIS TÉRBE

esettanulmány mobiltelefonos lézerszkennelés alkalmazására

Szerző:

Pálvölgyi Ádám

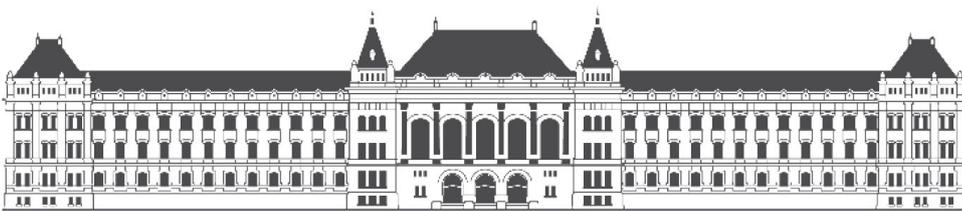
Építészmérnöki osztatlan képzés

Konzulens:

Vasáros Zsolt DLA

Egyetemi tanár, tanszékvezető

Exploratív Építészeti Tanszék



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

Építészmérnöki Kar

Tudományos Diákköri Konferencia

Budapest, 2022

Tartalomjegyzék:

Absztrakt Magyarul	4
Abstract in English	4
Bevezetés és a LiDAR technológia működése	7
Alkalmazott szoftverek	10
3d Scanner App - Laan Labs	10
Polycam - Polycam Inc.	15
Qlone 3D Scanner - EyeCue Vision Tech	17
Szikla vastagság vizsgálata	21
Felszín alatti terek egymáshoz való viszonya	24
Sírkamra és felszín kapcsolata	24
Felszín alatti terek kapcsolata	24
Nagy területű felszíni adatrögzítés	26
Tereprészletek területei	27
Scannelés folyamata	28
3D adatok feldolgozása	31
Programok	31
Pontfelhőből szintvonalak	31
3D modellből szintvonalak	31
A Khokha domb 3D modelljének feldolgozása	32
Szintvonalas térkép készítése	35
LiDAR vs Fotometria	36
Konklúzió	38
Köszönetnyilvánítás	39
Bibliográfia	40

Absztrakt Magyarul

Több évtizede használnak 3D scannelési eljárásokat az építőiparban és más területeken is. Az elmúlt években a technológia elérte a szükséges fejlettséget ahhoz, hogy hordozható, multifunkcionális eszközökben is megjelenhessenek egy adott tér 3D leképezésére alkalmas célhardverek és specifikus szoftverek. Ezek az újabb, könnyen elérhető készülékek eredetileg nem azzal a céllal lettek felszerelve fejlett érzékelőkkel, hogy kifejezetten 3D scannelésre használjuk, hanem főleg a fényképezés közbeni mélységélesség digitális reprodukálásának eléréséhez. Az új, speciális hardverekben rejlő lehetőségeket újabban az alkalmazás fejlesztők is felfedezték, így megjelentek olyan applikációk, amik lehetővé teszik az érzékelők által rögzített adatok tárolását és feldolgozását, megfűszerezve azzal, hogy az eszközben található GPS modullal, gyorsulásmérővel és fejlett kamerákkal növelik a technológia pontosságát. Mindezen előnyök mellett egy ilyen készülék egymagában persze nem válthatja ki, nem érheti el a céleszközök pontosságát, viszont a rengeteg lehetséges felhasználási körülmény között elképzelhetők olyan szituációk, amikor megfelelő, sőt, bizonyos esetekben akár jobb eredményt is elérhetünk, nem beszélve azokról a helyzetekről, mikor a körülmények (fizikai vagy más, pl. háború, krízishelyzet, stb.) nem engedik, hogy egy nehéz, értékes műszert vigyünk magunkkal, ellenben egy olyan multifunkciós készülékkel, ami a zsebünkben elfér és manapság igen pontos eredményeket érhetünk el vele.

A kutatásom egy esettanulmányon alapul, ahol komplex, egyedi szituációkban tettem próbára a technológia lehetőségeit, kitérve az extrém helyzetekre, és keresve azt a határt, ameddig érdemes és ésszerű alkalmazni a módszert. 2022 tavaszán a BME ÉPK Exploratív Építészeti Tanszék szervezésében és a Hungarian Archaeological Mission in Thebes (ELTE) South Khokha Project-jének keretében (ELTE és BME) Egyiptomban, Luxor-West Bank területén nyílt lehetőség nagyobb terepi-, építészeti- és objektum léptékű adatfelvételre majd azok feldolgozására. A régészeti ásatáson lehetőségem volt kísérletezni a technológiával olyan extrém körülmények között, mint a rendkívül magas hőmérséklet vagy a szélsőséges fényviszonyok (a felszínen vakítóan erős napsütés, a sírokban teljes sötétség). A TDK dolgozatom keretein belül egy lehetséges workflow kidolgozását is tervezem az adatfelvételre, a rögzített adatok feldolgozására, kombinálására és alkalmazására, a lehetséges alkalmazási módokra való formálásra.

Abstract in English

3D scanning has been used for decades in architecture and other fields. In recent years, the technology has reached the necessary maturity to enable the development of target hardware and specific software for 3D scanning of a given space in portable, multifunctional devices. These newer, readily available devices were not originally designed with advanced sensors to be used specifically for 3D scanning, but mainly to achieve digital reproduction of depth of field during photography. More recently, the potential of the new advanced hardware has been discovered by app developers, with the release of apps that allow the storage and processing of data captured by sensors, enhanced by the inclusion of a GPS module, accelerometer and advanced cameras in the device to increase the accuracy of the technology. With all these advantages, such a device alone cannot, of course, replace or achieve the accuracy of a professional device, but among the many possible applications, there are situations where good enough or, in some cases, even better result can be achieved, not to mention situations where conditions (physical or otherwise, e.g. war, crisis, etc.) do not allow us to carry a heavy, valuable instrument, as opposed to a multifunctional device that fits in our pocket and can nowadays give very accurate results and measurements.

My research is based on a case study, where I tested the potential of the technology in complex, specific situations, taking extreme scenarios to the limit of what is reasonable and worthwhile. In the spring of 2022, the Department of Explorative Architecture of the BUTE FA and the Hungarian Archaeological Mission in Thebes (ELTE) South Khokha Project (ELTE and BME) in Luxor-West Bank, Egypt, provided the opportunity to carry out large-scale field, architectural and object-scale data collection and processing. During the archaeological excavation, I had the opportunity to experiment with the technology under extreme conditions such as extremely high temperatures or harsh lighting conditions (blindingly strong sunlight on the surface, total darkness in the tombs). Within the framework of my TDK project, I also plan to develop a possible workflow for data acquisition, processing, combining and applying the recorded data, and formulating possible applications.



*Hőlégballonból készült távlati kép az ásatásról
(Pálvölgyi Á. 2022)*

Bevezetés és a LiDAR technológia működése

A kutatásom egy esettanulmányon alapul, ahol komplex, egyedi szituációkban tettem próbára a technológia lehetőségeit, kitérve az extrém helyzetekre, és keresve azt a határt, ameddig érdemes és ésszerű alkalmazni a módszert. 2022. tavaszán a BME ÉPK Exploratív Építészeti Tanszék Hassan Fathy Survey Mission¹ szervezésében és a Hungarian Archaeological Mission in Thebes (ELTE) South Khokha Project-jének keretében (ELTE és BME) Egyiptomban,² Luxor-West Bank területén nyílt lehetőségem nagyobb terepi-, építészeti- és objektum léptékű adatfelvételre majd azok feldolgozására.³ A régészeti ásatáson lehetőségem volt kísérletezni a technológiával olyan extrém körülmények között, mint a rendkívül magas hőmérséklet vagy a szélsőséges fényviszonyok (a felszínen vakítóan erős napsütés, a sírokban teljes sötétség). A TDK dolgozatom keretein belül egy lehetséges workflow kidolgozását is tervezem az adatfelvételre, a rögzített adatok feldolgozására, kombinálására és

alkalmazására, a lehetséges alkalmazási módokra való formálásra.

A LiDAR scannelés nem egy újkeletű dolog. Mint sok minden más újkeletű, úttörő technológiát, ezt is a hadiiparban és az űriparban használták először, repülőgépekről vagy műholdakról mérjenek fel nagy területeket. Érdekesség, hogy kerekén ötven éve az Apollo 15 küldetésen használták először⁴ a technológiát a hold felszínének részletes digitalizálására. A LiDAR szó egy rövidítés ami Light Detection and Ranging-et jelenti, ami jól leírja, hogy pontosan mi is ez a technológia. A működésének alapja az, hogy infravörös, lézer, vagy más hullámhosszú fénysugarat vetítünk egy felületre, majd az arról visszapattanó fényt érzékeljük, az oda-vissza útjának az idejét lemérjük, és ebből számítjuk ki, hogy az adott pont milyen távolságra van a kibocsátó egységtől. A jelenleg használt LiDAR scannerek többsége azonban már nem csak egy fénysugarat bocsájt ki, hanem egy pont hálót vetít a felületekre és egyszerre számítja ki akár több száz vagy több ezer pontnak a távolságát. Egy LiDAR scanner ezen feladatok elvégzése érdekében több részből áll: a fénysugarakat egy lézer vagy infravörös projektor vetíti ki, majd amikor visszapattannak, egy szenzor fogadja a sugarakat. Ahhoz, hogy a geometria kiszámítható legyen a LiDAR szenzonnal felszerelt eszköznek pontosan ismernie kell a térben elfoglalt pozícióját, amit több léptékben segítenek a pozícionálásban,

¹ A projektről átfogóan lásd: Dávid, D.—Vasáros, Zs. (eds.), *Current Research of the Hassan Fathy Survey Mission in Egypt 2016-2017*. Publications of Office of the Hungarian Cultural Counsellor in Cairo, vol. 2, Cairo-Budapest, 2020.; Dávid, D.—Vasáros, Zs. (eds.), *Current Research of the Hassan Fathy Survey Mission in Egypt 2018-2019*. Publications of Office of the Hungarian Cultural Counsellor in Cairo, vol. 3, Cairo-Budapest, 2020.

² Az 1983-óta folyó Thébai Magyar Régészeti Misszió tevékenységéhez lásd: Bács, T. A.—Fábián, Z. I. F. —Schreiber, G.—Török, L., *Hungarian Excavations in the Theban Necropolis. A Celebration of 102 Years of Fieldwork*. Budapest, 2009.

³ A 2022. tavaszi projektről lásd: Vasáros, Zs., *Final Report on the Work of the Hungarian Archaeological Mission – South Khokha Project in Theban Tombs 32, 179/180 and TT -400- Seasons April and October 2022*.

⁴ További információ az Apollo 15 LiDAR hold felméréseiéről: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20100031189>

ilyenek a GPS⁵ vagy RTK⁶ vevőegységek, valamint az IMU⁷ érzékelők, amik képesek rögzíteni az eszköz legkisebb elmozdulásait vagy elfordulásait bármelyik tengelyen. Továbbá szükség van egy fedélzeti számítógépre, ami eltárolja a begyűjtött adatokat.

Napjainkban az okostelefonokba rengeteg érzékelőt helyeznek el, hogy azokkal újabb és újabb funkciókat tegyenek lehetővé. Az elmúlt években megfigyelhettük, ahogy technológia fejlődésével az eddig nagy helyigényű rendszerek egymást követve válnak egyre apróbbá, így lehetőség nyílt ezek beépítésére a mindennapi használatra szánt eszközökbe is, mint például a tabletekbe vagy telefonokba. Először a kamerával, majd GPS-szel felszerelt telefonok arattak nagy sikert, mivel lehetővé tette a forgalmi navigációt a készülékeken, majd a gyorsulásmérő használata is teret hódított magának - mozgásformák felismerésére és elemzésére tette alkalmassá az eszközöket. 2020-ban azonban az Apple Inc. az egyik népszerű konzumer táblagépében debütálta az évek óta fejlesztett LiDAR szenzorát⁸, ami a fényképek készítése közben a fókusz beállítására, majd a fotóalany háttértől való elszeparálását volt hivatott segíteni.

Ezzel a lépéssel a kirakós utolsó darabja is bekerült a képbe, jobban mondván a “gépbe”. Ezekben az új eszközökben így lehetőség nyílik LiDAR adatok rögzítésére, mivel a fent leírt érzékelők mindegyike valamilyen formában belekerült a készülékekbe,

hiszen az IMU is megfeleltethető az okos eszközökben használt gyorsulásmérőnek. Mindezek mellé az Apple kifejlesztette az ARKit⁹ nevű keretrendszerét, amit a programfejlesztők használhatnak annak érdekében, hogy a szoftvereik jobban ki tudják használni a telefonjaikban vagy táblagépeikben használt érzékelőket.

Végül ezek a technológiai fejlesztések tették lehetővé, hogy a szoftverkészítő csapatok olyan programokat tudjanak alkotni, amik lehetővé teszik a LiDAR szenzor által érzékelt adatok rögzítését feldolgozását és exportálását, ezzel más dedikált szerepük mellett lényegében egy LiDAR szkennerré változtatva az okostelefont. A témának ha kevés is, de van szakirodalma, léteznek tudományos alaposságú kutatások, amelyek az alkalmazás lehetőségeit vizsgálják.¹⁰



*iPhone 13 Pro LiDAR pont projektorának kivetített ponthálójáról készített infravörös kép
(Pálvölgyi Á. - Hajdú B. - Tóth D. 2022)*

⁵ Global Positioning System

⁶ Real-Time Kinematic Positioning

⁷ Inertial Measurement Unit

⁸ További információ a LiDAR megjelenéséről az iPad Pro-ban:

<https://szifon.com/2020/04/22/lidar-szkenner-a-2020-as-ipad-pro-leglatvanyosabb-ujdonsaga/>

⁹ ARKit dokumentáció:

<https://developer.apple.com/documentation/arkit>

¹⁰ Lásd: VOGT, M.— RIPS, A.—EMMELMANN, C., Comparison of iPad Pro®’s LiDAR and TrueDepth Capabilities with an Industrial 3D Scanning Solution. Technologies. 9. 25. 10.3390/technologies9020025, 2021.

Kutatásomban¹¹ a fenti esettanulmányra alapozva arra keresem a választ, hogy az informatikai fejlődés egy ilyen spontán módon használatba vett “mellékterméke” milyen lehetőségeket nyithat meg előttünk az építészeti dokumentálás területén, esetünkben annak is egy határterületén, a régészet terepi adatrögzítésében. Kérdésként merül fel, hogy milyen hibahatárral dolgozik, hogyan viszonyul a hasonlóan egyszerűen elérhető 3D scannelési eljárásokhoz, például fotometriához, valamint hogyan férhet meg ez a két technológia egymás mellett? Keresem a választ arra, hogy hogyan tudom hatékonyabbá tenni az adatfelvételt, hogyan gyorsíthatom fel az eddig jóval időigényesebben végezhető munkafolyamatokat. Kutatásomban próbára teszem az eddigi legfejlettebb szoftvereket, hogy alkalmasak-e érdemi, pontos adatfelvételre, és vizsgálom, hogy ezekből az adatokból ténylegesen használható és valid dokumentáció készíthető. További kérdés, hogy milyen olyan szituációk lehetnek, amikor egy nagyobb, nehezen mozgatható, értékesebb gépet egyszerűen nem lehet alkalmazni, és hogy ilyen esetekben megfelelő alternatívát tud-e nyújtani egy iPhone 13 Pro LiDAR modulja a hozzá elkészült szoftverek jelenlegi fejlettségi szintjén.

¹¹ Hasonló kutatások: VOGT, M.— RIPS, A.—EMMELMANN, C., Comparison of iPad Pro®’s LiDAR and TrueDepth Capabilities with an Industrial 3D Scanning Solution. Technologies. 9. 25. 10.3390/technologies9020025, 2021.; A. SPREAFICO 1 — F. CHIABRANDO 1 — L. TEPPATI LOSÈ 1 — F. GIULIO TONOLO., Apple LiDAR Sensor for 3D Surveying: Tests and Results in the Cultural Heritage Domain, 2022; A. SPREAFICO 1 — F. CHIABRANDO 1 — L. TEPPATI LOSÈ 1 — F. GIULIO TONOLO., The iPad Pro Built-in LiDAR Sensor: 3D Rapid Mapping Tests And Quality Assessment

Alkalmazott szoftverek

3d Scanner App - Laan Labs

Az adatfelvétel során is több programot, illetve applikációt hasonlítottam össze. Először a legnépszerűbb alkalmazást használtam (3d Scanner App™) a feladatra. Ekkor a sziklasírok részben szabályos, de a kitörések és kopások miatt mégis amorf belső felületén teszteltem az eszköz és a szoftver adta lehetőségeket. Érdekelt, hogy a folyamatosan bővülő adathalmaz ilyen esetben csak a korábbi mérésekhez képest tudja-e pozicionálni az újabban felvett pontokat. Ezért elképzelhetőnek tartottam, hogy habár a LiDAR technológia apró hibahatárral dolgozik, egy több-tíz méteres szakaszon ezek a pontatlanságok összeadódnak. A kiválasztott konkrét objektum az 32-es számú sziklasír ún. Sloping Passage-e, azaz lejtős folyosója, amely a sír kultuszkapolna részét köti össze a sírkamrával.¹² Ez a mintegy 80 méter hosszú, spirálisan lefelé tekeredő sziklából kivájt folyosó ideális terepe a tesztelésnek. A kísérlet célja egy nagyobb modell alakhelyességének megállapítása volt. Meglepő módon a program az első támpontokhoz képest is hosszú, szabálytalan utat is néhány centiméter eltéréssel le tudott követni, aminek az a magyarázata, hogy scannelés közben a gyorsulásmérő adatait is számításba veszi, ami elég pontos adatot ad az eszköz számára telefon térben megtett útvonaláról, ami egyfajta gerincgörbét ad a pontfelhő számára és ezt a pozíciót pontosítja az infravörös pontokból kiszámított távolság. A program fő hátránya - ami miatt nem ezt alkalmaztam ilyen típusú felmérések elkészítésére -, hogy az alacsony megvilágítás és a változó fényviszonyok közepette nem tudta azonosítani a már bescannelt felületeket és ezért, amikor újra áthaladtam bizonyos szakaszokon, azoknak az adatait újra felvette és egy kis távolságra egy párhuzamos felületet alakított ki a modellben, úgy mond duplázta a felületet.

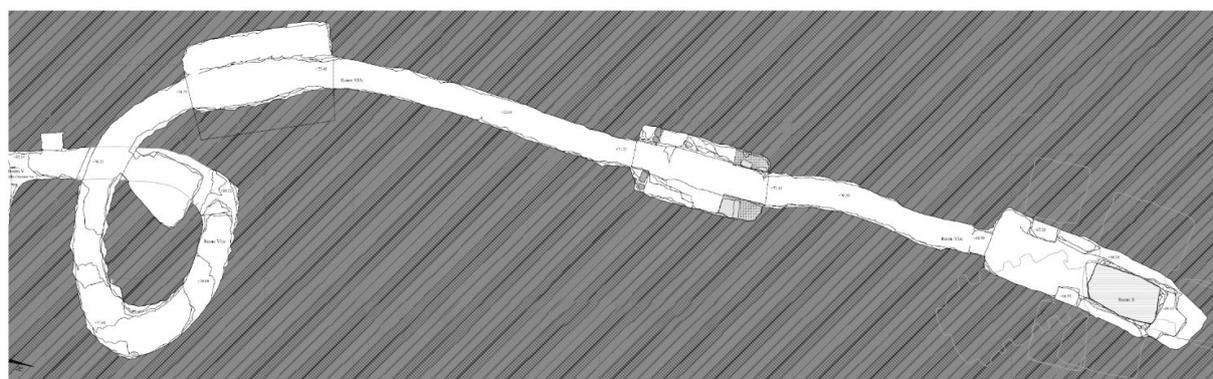


*3d Scanner App logója
forrás: <https://3dscannerapp.com/>*

¹² Részletesen lásd: Kákosy, L-Gaál, E.-Bács, T.A.-Fábián, Z.I.F.-Bartos Z., The Mortuary Monument of Djehutymes I. *Studia Aegyptiaca Series Maior I.* Vol. 1-2. Budapest, 2004.



*TT 32 sziklasír LiDAR felmérése - 3d Scanner App
(Pálvölgyi Á. 2022)*



*TT 32 sziklasír felmérése
(manuális felmérés: Vasáros Zs. 1998-2004)*



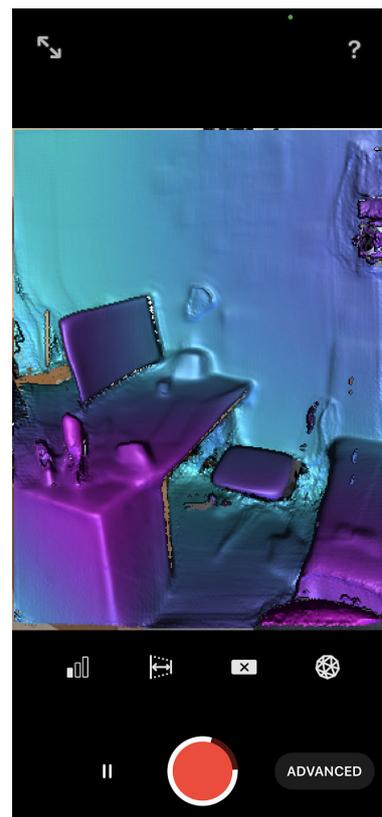
*TT 32 sziklasír LiDAR felmérése átfedésben a sír
manuális felmérésével - 3d Scanner App
(manuális felmérés: Vasáros Zs. 1998-2004)*

A programban több scannelési módot alakítottak ki a fejlesztők a könnyebb használhatóság céljából, viszont szabadon csak bizonyos beállításokat állíthatunk.

Az első módban szimplán a LiDAR nevet kapta, ebben a módban az alkalmazás maga határozza meg a modell részletességét, típusát és számunkra csak egy egyszerű háromszög-hálózással jelzi a rögzített felületeket. Ez alkalmas lehet gyors, de alacsony részletességű modellek készítésére. Ezek a 3D objektumok véleményem szerint inkább látványtervezéshez, közepes méretű tárgyak esetén alkalmazható. Hibája ennek a módnak, hogy mivel a modellt alkotó háromszögek nagyobbak, így a textúrázás is könnyen torzzá válhat.

Lehetőséget kapunk használni egy másik módot is. A LiDAR Advanced módban több beállítást adhatunk meg, mint például a részletességét vagy a maximális mérési távolságot. Ez azért nagy segítség, mivel így a mi megítélésünk szerint tudjuk megadni a modell részletességét és akár 5 mm-es ponthálóval is rögzíthetünk adatot, viszont arra figyelni kell, hogy túl nagy modellt és túl részletesen nem tud az eszköz, mivel a programban megszabták a maximálisan rögzíthető háromszögek számát.

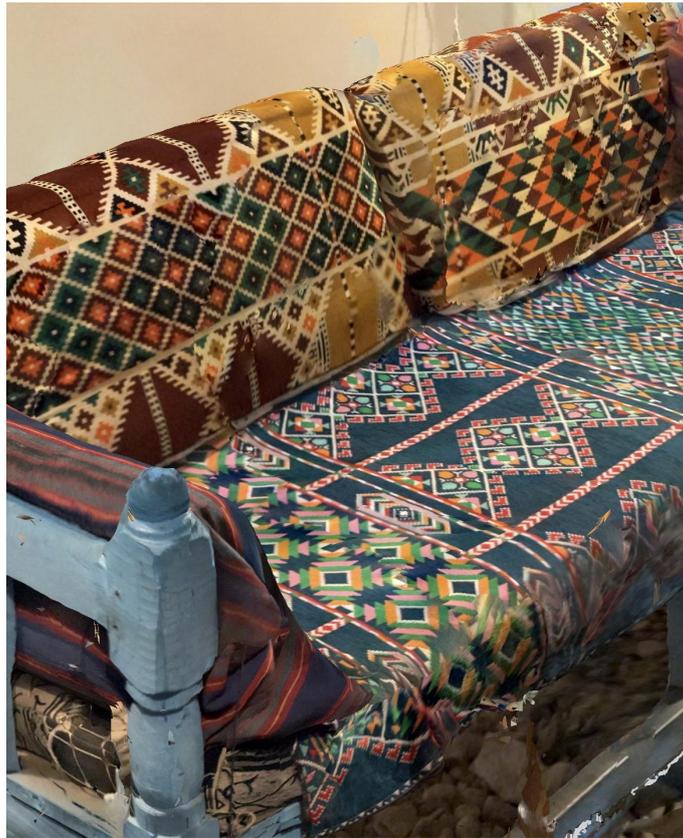
A programban a harmadik és számunkra legfontosabb mód a pontfelhő rögzítése. Ez a modell személyre szabásának következő lépése, amikor csak a LiDAR és a további szenzorok adataiból kiszámított pontfelhőt rögzíti a program. Ez a fajta adatfelvétel a legnyersebb formája a szenzor által érzékelt és kiszámított geometria eltárolására. Ez a mód további utómunkát igényel. Ebben az esetben a mesh-t már egy második programban kell tovább dolgozni. Ez megadja a lehetőséget arra, hogy profi szoftverben folytathassuk a feldolgozást és modellépítést, erre alkalmas pl. az Agisoft Metashape. A hátránya ennek a módszernek az, hogy textúrát így nem tudunk rögzíteni, ebben a módban a kamerát az eszköz csak a pontok színezésére használja, viszont az így készült mesh a lehető legrészletesebbé válhat.



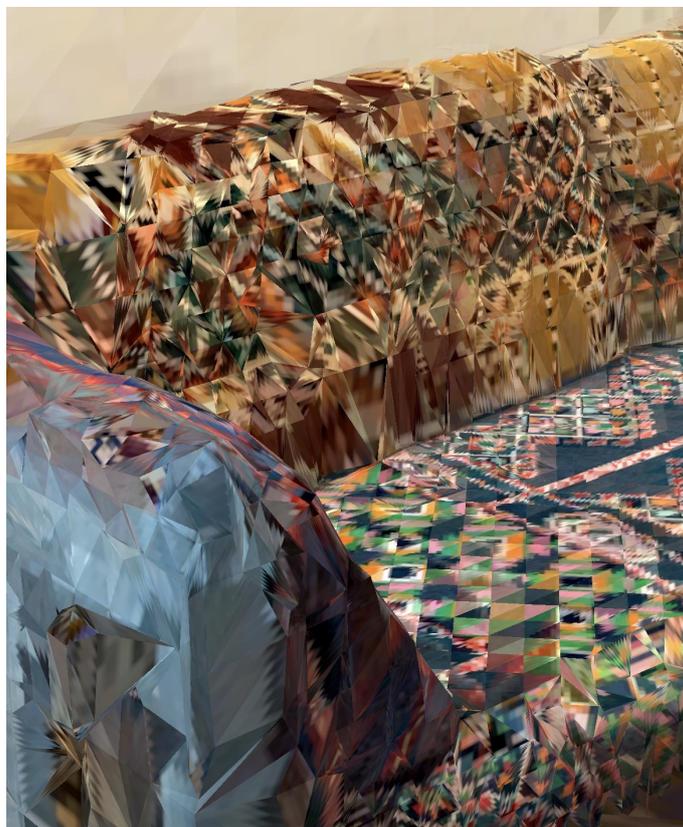
*3d Scanner App
LiDAR Advanced mód
képernyőkép*



*3d Scanner App
Point Cloud mód
képernyőkép*



*Mastaba (padszerű ülőalkalomosság
felső-egyiptomi arab neve) 3D model
3d Scanner App - LiDAR mode*



*Mastaba (padszerű ülőalkalomosság
felső-egyiptomi arab neve) 3D model
3d Scanner App - LiDAR Advanced mode*



*TT400 sírbelső részlet
3d Scanner App - Point Cloud mode*

Polycam - Polycam Inc.

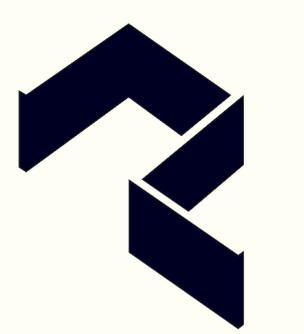
A Polycam véleményem szerint a jelenleg elérhető legfejlettebb, LiDAR szenzort alkalmazó program, ami elérhető a mindennapi felhasználónak.

A Polycam inc. egy Los Angeles-i szoftverfejlesztő csapat, amely tagjai nagy tapasztalattal rendelkeznek az általánosabb, ipari lézer scannelési eljárásokban. Ők alkották meg a Polycam szoftvert, ami mindamelllett, hogy rendkívül gyorsan magas precizitású modellt hoz létre és dolgoz fel, 'machine learning' és mesterséges intelligencia segítségével, hogy egy jó részletezettségű és geometriájú 3D modellt hozzunk létre. A tesztelt szoftverek közül ez használja a legtöbb érzékelőt a készüléken, mivel a GPS-t, a gyorsulásmérőt, a kamerát és LiDAR szenzort is használja adatrögzítésre vagy a meglévő adatok pontosítására.

A szoftver legnagyobb előnye a vetélytársaival szemben az, hogy kombinálja a mélységi és vizuális adatokat, így egyfajta hibrid technológiát alkalmaz a fotometria és a lézer scannelés között: a modell tömegét és alapvető, nagyobb részleteit adó formát a LiDAR szenzor segítségével rögzít, majd ezt a modellt tovább részletezi a scannelés közben készített fotósorozatból, új, apróbb felületi elemet is létrehozva. További előnye a szoftvernek, hogy a gyűjtött adatokból, a 3D modellt utólag újra feldolgozhatjuk, akár más minőségben, más beállításokkal is, ezzel lehetőségünk nyílik arra, hogy adatfelvétel után egy gyors alacsony részletességű modellt futtassunk, amivel ellenőrizni tudjuk, hogy jól dolgoztunk -e, megfelelő ez a modell.

A szoftverfejlesztő vállalkozás jelenleg a fotometria oldalát fejleszti a legnagyobb erőforrással, de a LiDAR módját is folyamatosan finomítják, tökéletesítik és időnként egy-egy újabb funkciót is beépítenek.

A program ingyenesen letölthető mind iPhone, mind Android rendszerű eszközökre,¹³ viszont a Polycam kínál évi vagy havi díjas előfizetést is, ami annyiban segít, hogy többféle fájlformátumban tudunk exportálni modelleket, valamint felhő alapú feldolgozást biztosít fotometriához. Az alkalmazásban három főbb mód található:



*Polycam alkalmazás logója
forrás: <https://poly.cam/>*

¹³ Az androidos verzióban értelemszerűen csak a fotometria mód működik, mivel jelenleg még nincs a piacon olyan androidot futtató készülék, ami LiDAR modullal lenne felszerelve.

LiDAR:

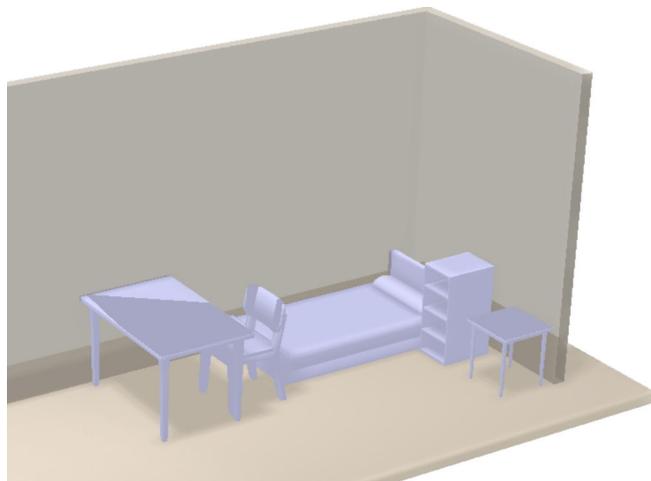
Ez a mód jelen esetben számunkra a legfontosabb, mivel ebben az esetben a használja a telefon a LiDAR modulját. Ebben a módban a telefon másodpercenként készít egy fényképet és rögzíti a lézerszkennerek mélység adatait. Ezt a módot kétféleképpen lehet használni: folyamatos automatikus felvétel készítésével - ilyenkor csak mozgatni kell a készüléket a szkennelendő objektum körül vagy használhatjuk a "manual" módot, ilyenkor nekünk kell elkészíteni a kombinált felvételeket úgy, mintha fotóznánk, de ebben az esetben is egyszerre rögzítenek a telefon érzékelői adatokat.¹⁴

Photo:

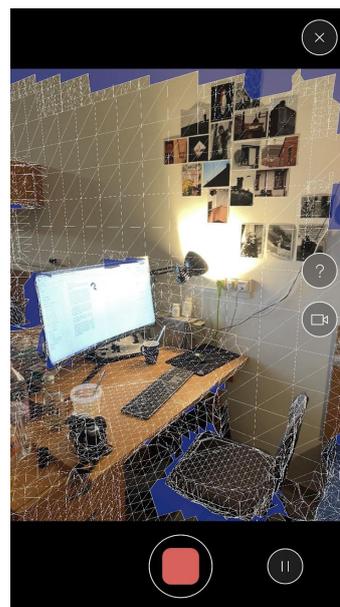
Az alkalmazás lehetőséget ad fotometria készítésére is, amit a felhőben dolgoz fel a program.

Room:

A legfrissebben bekerült mód a Room mode, ami a AI és Computer Vision segítségével ismeri fel a LiDAR pontfelhőben az adott tér berendezéseit, falait, felületeit és alkot belőle egy léptékhelyes alaprajzot a benne található bútorok, tárgyak befoglaló formáival.



*Polycam, ROOM mode
fotó a 3D modelltől*



*Polycam alkalmazás
LiDAR mód
képernyőkép*

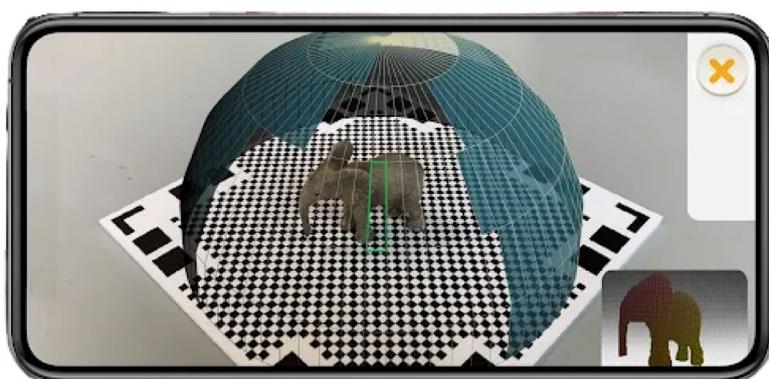


*Polycam alkalmazás
ROOM mód
képernyőkép*

Qlone 3D Scanner - EyeCue Vision Tech

Egy régészeti ásatáson rengeteg olyan tárgy vagy töredék kerül elő, amiről fontos, hogy pontos és részletes dokumentáció készüljön. Erre a 3D scannelés a legcélravezetőbb eljárás, amit előszeretettel használnak építészek és régészek is. Jelenleg a fotometria a legelterjedtebb eljárás a kisebb tárgyak, kövek, töredékek formájának rögzítésére. Ez a technológia a kézi mérésnél jelentősen gyorsabb, viszont így is képek százait kell elkészíteni, majd számítógépen modellé generáltatni, ami tárgyanként több óra, sokszor több tízóra élők munkát vesz igénybe.

Erre mutat egy nagyságrendekkel gyorsabb, egyszerűbb megoldást egy hibrid, LiDAR-t és fotometriát egyszerre alkalmazó szoftver, a Qlone 3D Scanner¹⁵. Ezt az alkalmazást arra fejlesztették ki, hogy kisebb tárgyak 3D scannelését tegye lehetővé és egyszerűbbé, mint az eddigi megoldások. A program az Apple ARKit-et használja, így a LiDAR szenzorral felszerelt telefonokon képes az érzékelő adta lehetőségeket kihasználni, mégpedig úgy, hogy a LiDAR adatokat pozícionálásra használja, ami jelentősen felgyorsítja a kameraszögek meghatározását. Ez az alkalmazás a 3D modellt fotometriával építi fel, viszont azzal, hogy a készült képek pozícióit már a készítésük pillanatában rögzítette, rengeteg időt és erőforrást spórol meg a feldolgozás során, ezzel lehetővé teszi, hogy a 3D modell építés és a textúrázás is az okostelefonon történjen meg. Ezzel gyakorlatilag teljesen megkímélve minket a számítógépen végzett hosszú munkafolyamatoktól.

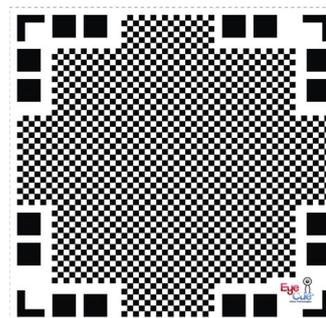


*Qlone 3D Scanner alkalmazás
képernyőkép
forrás: <https://www.qlone.pro/>*

A program egyik legnagyobb előnye, hogy nagyon felhasználóbarát, hiszen a már a fényképek elkészítését is segíti,



*Qlone 3D Scanner
alkalmazás logója
forrás: <https://www.qlone.pro/>*

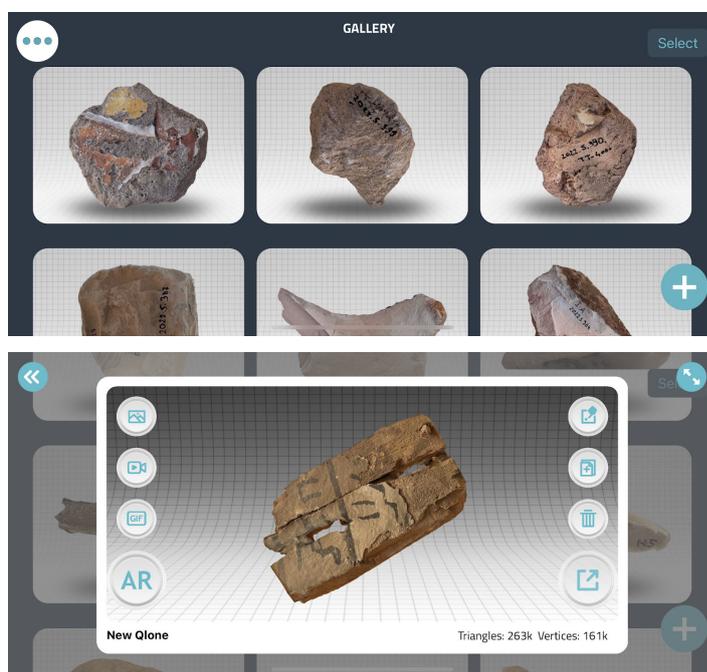


*Qlone 3D Scanner
nyomtatható alátét lap
forrás: Qlone alkalmazás
letölthető:
https://www.qlone.pro/_files/ugd/0dc13a_3427b99878b3407d94e6ca136bff2fa9.pdf*

¹⁵ Qlone 3D Scanner használatát bemutató videók: <https://youtu.be/WAvWqTzmylM>

azzal, hogy a szkennelendő objektum köré egy AR¹⁶ félgömböt tesz, ami úgy vezet minket, hogy az elkészült képek helyén eltűnik a gömb, így nem kell észben tartanunk, honnan készítettünk már fotókat. Egy másik okos dolog, amire ez a program lehetőséget ad, hogy készítettek hozzá a fejlesztők egy nyomtatható alátétet, ami segít a tárgy és a háttér szeparálásában, valamint javítja a kamera pozíciók pontosságát. Általában a scannelt tárgyaknak minden oldalát dokumentálni kell, ezért gyakran meg kell fordítani a tárgyat és egy másik oldalát is bescannelni. Ezért a programba építettek egy olyan funkciót, ami képes egymás után több modellt is feldolgozni, majd ezek felületeit azonosítva pontosan egymásba illeszteni, összeolvasztani, hogy az objektum alján és tetején is releváns geometriát kapjunk.

Az ásatáson lehetőségem nyílt élesben bevetni ezt a szoftvert és összehasonlítani a protokoll módszerrel. Újabban fotoscanneléssel rögzítünk adatokat, azaz a tárgyat körbefotózzuk majd az Agisoft Metashape nevű programban modellt generálunk a fotók alapján és méretezzük utólag számítógépen. Ezzel a technológiával állítottam szembe a Qlone szoftverben, okostelefonon készített 3D modelleket.



Qlone 3D Scanner alkalmazás képernyőkép a modell könyvtárról

Qlone 3D Scanner alkalmazás képernyőkép a modell előnézetről

A következőkben egy részletesebb összehasonlítás látható a két program alkotta modellről

¹⁶AR: Augmented Reality - Kiterjesztett valóság

Qlone 3D Scanner Model VS Agisoft Metashape Model

2022.S.399-es leltári számú homokkő szobortöredék

Qlone 3D Scanner

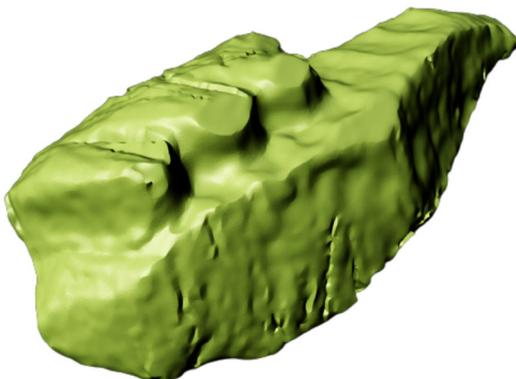
Agisoft Metashape



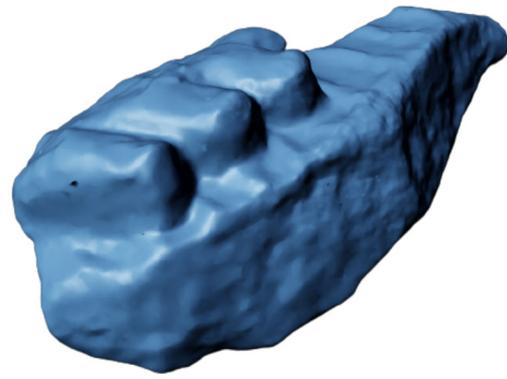
Qlone 3D Scanner - textúrázott 3D model



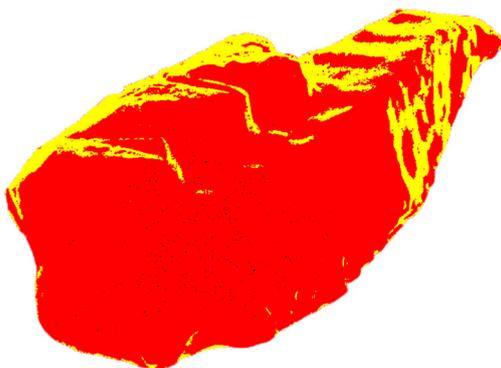
Agisoft Metashape - textúrázott 3D model



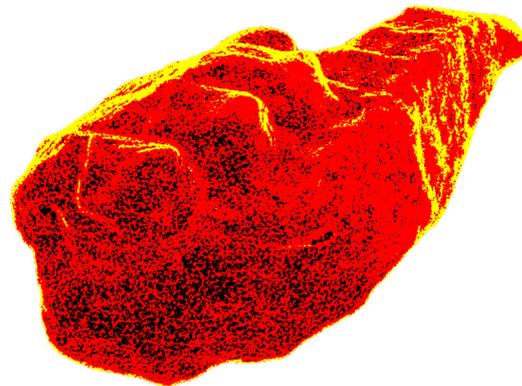
Qlone 3D Scanner - textúrázatlan 3D model



Agisoft Metashape - textúrázatlan 3D model



Qlone 3D scanner - pontsűrűség vizsgálata



Agisoft Metashape - pontsűrűség vizsgálata

Szkennelési és feldolgozási idő:

- Oldalanként 2 perc adatrögzítés
- 5 perc feldolgozás (Telefonon)

- Oldalanként 10-15 perc adatrögzítés
- 3 óra feldolgozás (PC-n 50.000 ponttal)

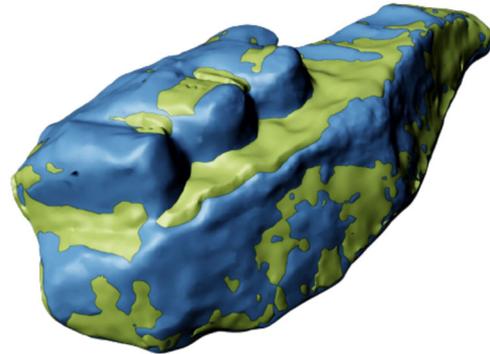
Eredmény:

- Léptékhelyes 3D model
- 212.000 polygon
- 4K textúra

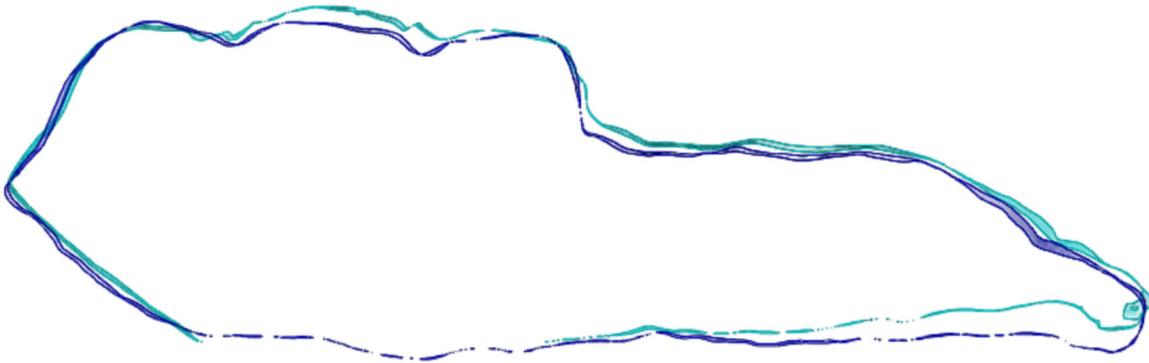
- Méretezendő 3D model
- 49.040 polygon (Agisoftban állítható)
- 16K textúra



körbevágott fotó a valós töredékről



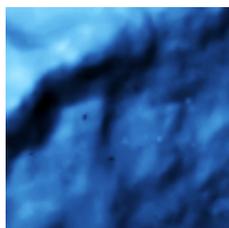
*a két vizsgált 3D model geometriájának eltérései
zöld: Qlone 3D Scanner - kék: Agisoft Metashape*



*a két 3D model keresztmetszeti eltéréseinek szemléltetése
zöld: Qlone 3D Scanner - kék: Agisoft Metashape*

Konklúzió:

Mivel mindkét esetben fotometriáról van szó, így elég hasonló eredményt kapunk. A fő különbség a két modell feldolgozásának sebességében keresendő. A Qlone 3D scanner azért képes jóval gyorsabban feldolgozni a hasonló, vagy magasabb részletességű modellt, mert a kamera pozíciók meghatározása a scannelés közben történik a LiDAR szenzor segítségével, nincs szükség, ennek az utólagos kiszámítására.



*a két 3D model részletességének összehasonlítása (részlet)
zöld: Qlone 3D Scanner - kék: Agisoft Metashape*

Mivel a valóságban a scannelt tárgy egy alaplapon helyezkedik el, ami ismert méretű, ezért az elkészült modell is léptékhelyes lesz, ami megkímél minket az utólagos méretezés komplikációjától.

A geometria tekintetében véleményem szerint a Metashape valamivel pontosabb munkát végzett, ezt abból következtetem, hogy bizonyos felületeken a Qlone kevésbé részletes morfológiájú felületeket számított, míg a Metashape modelljén több geometriai információ látható.

Szikla vastagság vizsgálata

Az absztraktban említett egyiptomi terepmunka közben talákoztunk egy olyan problémával, hogy igen rövid idő alatt meg kellett határozzuk, hogy egy sziklasírban biztonságos-e belső feltárási munkák folytatása. Mivel nem volt naprakész felmérés a sír azon részéről, így a szikla vastagságának meghatározását a dolgozatban taglalt LiDAR technológiával végeztük.

A TT 179-es sír¹⁷ tengely menti harmadik tere törmelékkel töltődött fel, ami miatt le lett falazva ez a tér, viszont az említett fal felett be lehet látni egy térbe, ami láthatóan nagyon nagyon közel ér a felszínhez. A szikla ismeretlen vastagsága miatt ide bemászni nem biztonságos, így olyan felmérési megoldást kellett választanunk, amivel nincs szükség arra, hogy bemásszunk erre a helyre, mindemellett jól kell, hogy működjön gyenge fényviszonyok mellett is. Egy erre tett kísérlet az Iphone 13 Pro LiDAR érzékelőjét használva egy olyan 3D modell készítése, amiről centiméteres pontossággal mérhető a szikla vastagsága.



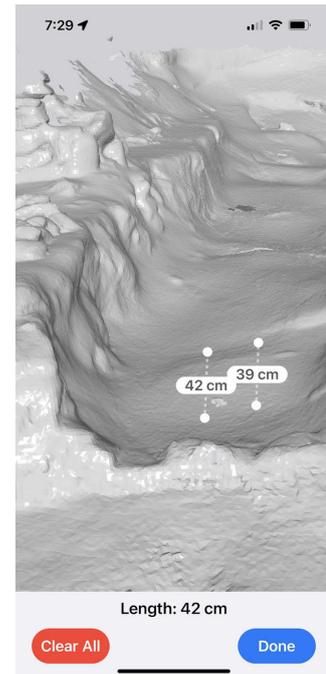
*Polycam alkalmazás
szikla vastagság vizsgálatának
helyszíni mérései
képernyőkép*



*szikla vastagság vizsgálatához készült 3D model
TT179-es sír
térbeli metszet*

¹⁷ TT 179-es sziklasír Thébában, a Nemeselek Temetőjében: Nebamun sírja, épült III. Thotmesz uralkodása idején (Kr.e. 1458-1425), lásd: G. Schreiber – R. Vadas – K. Vértés: The Abydos Pilgrimage. A Reconstructed Sequence of Scenes from Theban Tomb 179. In: Hungarian Archaeology 2018 Autumn, 10-17.

Ezt úgy értük el, hogy a sír feletti részt megtisztítottuk egészen a szikláig, így gyakorlatilag a mennyezetet alkotó szikla alsó és felső oldalát is tisztán látjuk. A scannelést a földfelszín felett kezdtem, feltérképeztem azt a mintegy 20 m² területet, ahol valószínűsíthetőleg a belső tér a legközelebb található a külsőhöz, azaz a szikla a legvékonyabb, majd annak érdekében hogy az eredmény minél pontosabb legyen, egy folyamatban igyekeztem végigcsinálni a felmérést. A sír bejárata körüli területet és az e felett elhúzódó részt, majd részletesen a sír bejáratát is beszkeneltem, hogy minél több közös és részletes felület legyen, hogy az ajtón áthaladva a sírkamra belső terével pontosan össze tudja kapcsolni a program a rögzített részeket. A scannelés során többnyire a sír mennyezetére fókuszáltam, mivel az a legrövidebb út a vizsgált felületekig. A sír végében található tér felmérése bonyolult feladat volt, mert az ide beszűrődő fény kevés volt, viszont mivel a modell célja a geometria feltérképezése és nem a textúra megléte, így csak az LiDAR által kibocsátott infravörös ponthálóra hagyatkoztunk, ami a kevés fény ellenére egy meglepően részletes geometriát hozott létre a vizsgált szikla struktúráról.



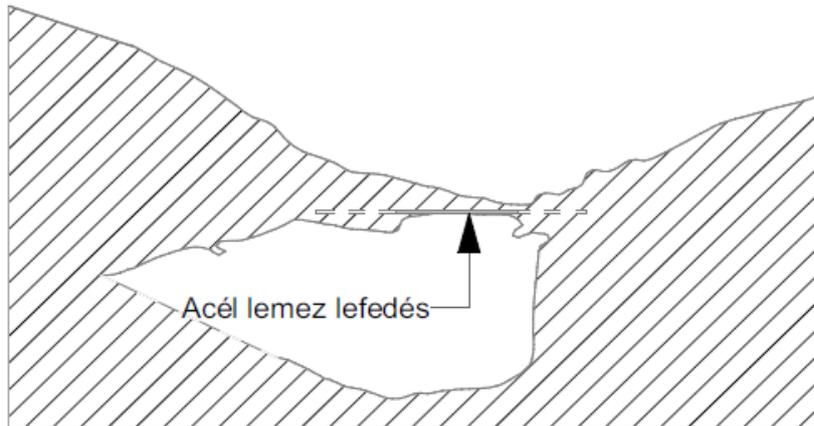
*3d Scanner App
szikla vastagság vizsgálatának
helyszíni mérései
képernyőkép*



*szikla vastagság vizsgálatához készült 3D model
TT179-es sír
perspektív nézet a sírbejáratról*

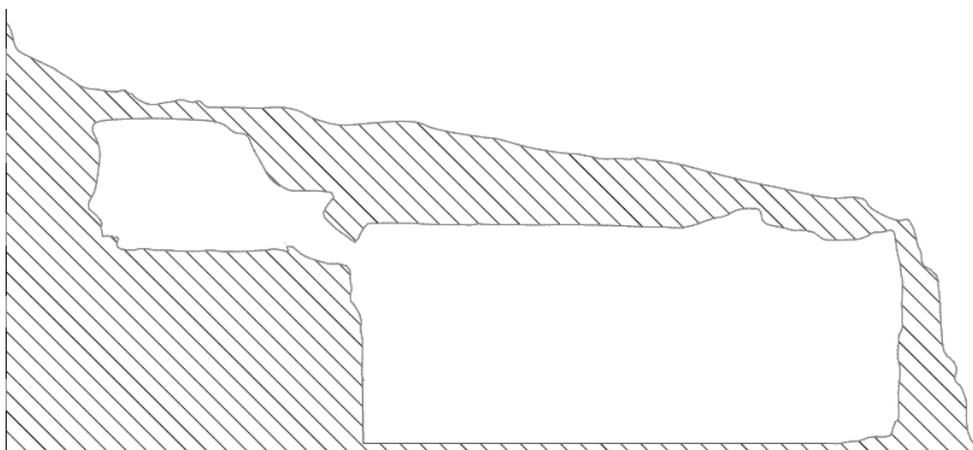
Ezt a folyamatot néhányszor megismételtem, hogy biztos legyek az értékekben, szerencsére minden felmérés centiméteres pontossággal egy eredményt mutatott. Az így elkészült modellek alkalmasak voltak a helyszínen egy megközelítő legkisebb

vastagság megállapítására, és arra, hogy meghatározzuk a felszínen hol lehet a szikla boltozat legvékonyabb pontja. Az eddig leírt folyamatból a szkennelés megközelítőleg fél-egy órát vett igénybe, tehát egy igen gyorsan kaptunk egy megközelítő eredményt.



*LiDAR méréséből készített vonalrajz
a szikla vastagságának meghatározásához
TT179-es sír, keresztmetszet*

Az ásatásról visszatérve folytatódott az adatok feldolgozása számítógépen, ahol a rögzített adatokat egy léptékhelyes 3D modell formájában exportáltam FBX formátumban, amivel tovább tudtam dolgozni a Blender 3D nevű programban. Itt elvégeztem a modell tisztítását, korrekcióját, majd ahhoz, hogy ebből az objektumból metszeteket és alaprajzot tudjak kinyerni, átvittem az adatokat ArchiCAD programba, ahol szeleteltem a modellt, és metszeteket készítettem belőle, különös tekintettel a veszélyes helyekre. Ebből végül kevés korrekcióval dokumentációt tudtam készíteni.



*LiDAR méréséből készített vonalrajz
a szikla vastagságának meghatározásához
TT179-es sír, hosszszelvény*

Felszín alatti terek egymáshoz való viszonya

Sírkamra és felszín kapcsolata

Az terepmunka során a hátralévő terepi idő szűkössége miatt egy korábban feltárt és dokumentált struktúra, az ún. B sír 3D dokumentálása kapcsán keletkezett igény a LiDAR által biztosított gyorsabb adatfelvételre.¹⁸ A fő célja ennek a 3D modellnek az volt, hogy meghatározható legyen, hogy a sír melyik föld alatti része fogja megközelíteni egy újonnan letisztított/feltárt terület felszínét. Hasonlóan, ahogy a szikla vastagság vizsgálatánál eljártam, itt is egy munkafolyamatban mértem fel a felszínt és a sírt is, viszont ez alkalommal a sír legmélyebb pontjától kifelé haladva mértem fel a tereket, majd a sírbejáratot átlépve a minél nagyobb felszíni felületet scanneltem. A helyszínen, készüléken lefuttatott modellből már meg lehetett állapítani, hogy melyik sírkamra kerül a legközelebb a felszínhez. Később ezt a modellt prezentációs célokra is tudtuk alkalmazni.¹⁹

Ebből a felmérésből eredeztethető az ötlet, hogy egy hasonló folyamattal nem csak a felszínhez való viszonyát tudjuk megállapítani egy sírkamrának, hanem

amennyiben két sírt összekötő útvonalon haladok végig, akkor az így felmért tereknek a sziklában elfoglalt, egymáshoz való viszonyát is meg tudjuk határozni, hozzávetőleg 50 cm-es pontossággal.

Felszín alatti terek kapcsolata

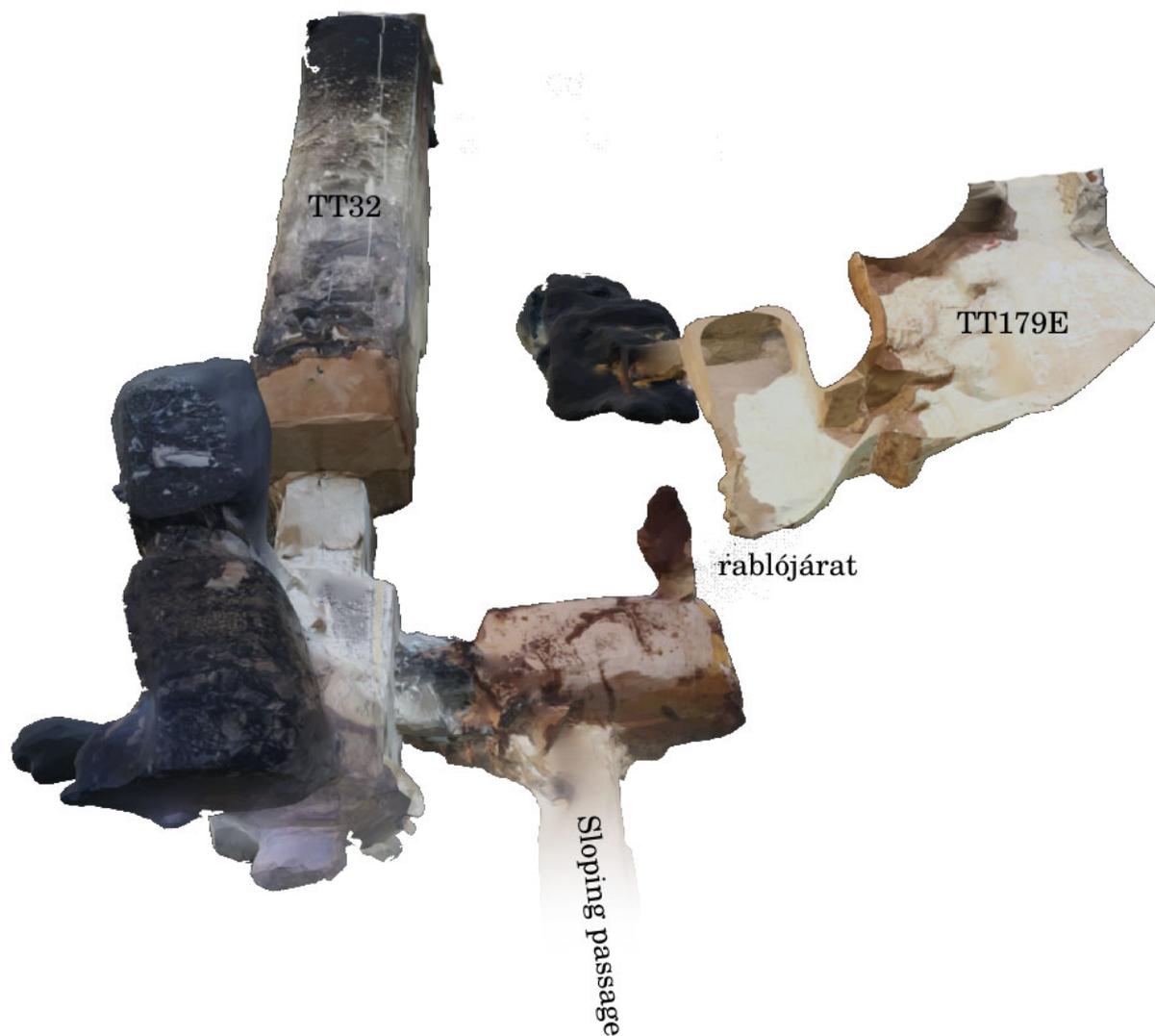
Erre a folyamatra akkor lett nagyobb szükségünk, mikor a TT179-es sír előtt feltárt újabb sírkamrák egyike összeért egy üreggel a sziklában, amit nem tudtuk, hogy hova vezet, vagy mivel lehet kapcsolatban, ráadásul ilyen szituációban be sem szabad menni a járatba, amíg nincs meghatározva, hogy biztonságos a szikla szerkezete. A kevés fény ellenére az üreg formáját jól meg lehetett határozni LiDAR-ral, majd környezetet és a terepet beolvasva összeköttem a valószínűleg közel eső sír tereivel. A helyszínen feldolgozott modell igazolta a sejtést, miszerint az újonnan felfedezett üreg a TT 32-es sír második kamrájához fekszik közel, így valószínűleg azzal állhat kapcsolatban. A 3D modell rámutatott egy rablójárat lehetséges torkolatára is, mivel az új üregben is elindult egy térnyúlvány a sírből induló rablójárat irányába. Ez a 3D modellen jól megfigyelhető.



*LiDAR-ral készült 3D model keresztmetszete
Az ún. B sír*

¹⁸ Az ún. B sírhoz lásd: Schreiber, G. - Vasáros, Zs., A Theban tomb of the late Third Intermediate Period on El-Khokha, Acta Archaeologica (2005), 1-27.

¹⁹ A textúrázott modellből "esztétikus", azaz közérthető látványtervek készíthetők.



*TT32-es és a TT179E sírok közötti kapcsolat
rablójarat, 3D model
(Pálvölgyi Á. 2022)*

Nagy területű felszíni adatrögzítés

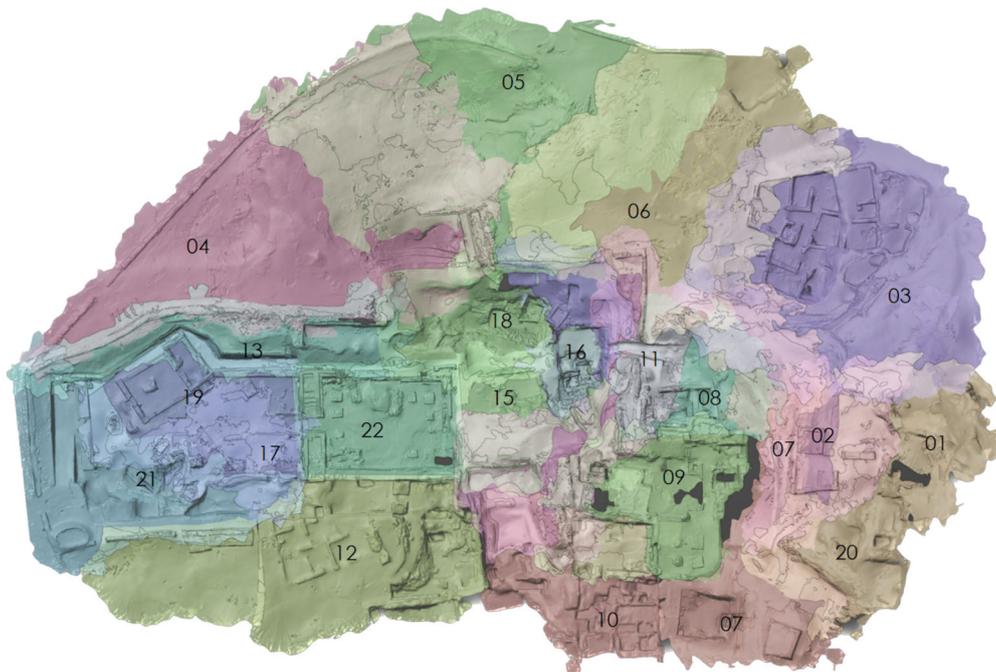
Egyiptomban a drónnal való repülés és felvételkészítés nagyon szigorú szabályozás alatt van - lényegében tilos, vagy igen nehéz az engedélyeket megszerezni. Speciális minisztériumi jogosultság kell ahhoz, hogy valaki drónt használjon, ezen kívül szigorúan tilos bármilyen földről irányított vagy automatizált repülő, felvételt készítő eszközt használni. Egyiptomban az ásatásokon nem tudunk drónnal adatfelvételt készíteni, pedig talán ez lehet a legcélszerűbb mód a az ásatási terület léptékhelyes digitalizálására, a nagyobb léptékű összefüggések tisztázására.

Az előzőekben leírt tesztjeimben már alkalmaztam a telefonos LiDAR szenzort arra, hogy a felszínt rögzítsem, viszont azt látva, hogy mind a szikla vastagság vizsgálatnál, mind az ún. B sírnál keresett felszíni kapcsolat milyen pontos és látványos eredményt adott, így az az ötletem támadt, hogy tesztelni lehetne a módszer szélsőértékeit. Mekkora

lehet méretben az a modell, amit a telefon egyszerre fel tud dolgozni? Egyértelmű, hogy a telefonos felmérésnek méretbeli korlátai lehetnek, mivel egy ilyen apró multifunkciós eszköz nem rendelkezhet végtelen mennyiségű memóriával és erőforrással, így arra az elhatározásra jutottam, hogy megkeresem ezt a határt.

Néhány próba mérést követően arra jutottam, hogy az átlagosan, egy munkafolyamatban felmérhető maximális terület 800-1200 m² között lehet, de ez nagyban függ a felületek részletességétől, lényegében a felszín morfológiájától. Sík terepen egyszerűbb modellt hoz létre az eszköz és akár 2000 m²-nél is nagyobb részek is felmérhetők.

Ezen eredmények hatására úgy ítélt meg, hogy egy jó kísérlet lehet, ha a maximumot úgy hozzuk ki a hardverből, hogy egy nagyobb területet több, kisebb felmérésből állítunk össze egy nagy modellé úgy, hogy minden adatrögzítés között mintegy 30% átfedést hagyok.



az egyesített LiDAR-ral készült 3D modell részei

Tereprészletek területei

No.:	Bruttó 3D felület:	Megjegyzés:
01	1019,43m ²	Domb teteje, sziklák
02	448,02m ²	Piramis maradványai, részletes felület
03	1529,52m ²	Lebontott házak maradványai, domboldal
04	1888,38m ²	Többnyire sík terület, sírbejárat
05	1514,60m ²	Többnyire sík terület, 04 átfedése
06	1237,47m ²	Többnyire sík terület, 05 átfedése
07	1014,12m ²	Piramis alatti és melletti terület
08	556,42m ²	TT -61- sír bejárata
09	903,64m ²	3 sír bejárata a TT 32-es sír feletti részen
10	681,81m ²	Sír udvara, lebontott házak maradványai
11	903,18m ²	A TT 179 feletti terület
12	1296,30m ²	Síraknák, térdfalak
13	673,86m ²	Támfal, szűk terek
14	843,81m ²	Vályogtégla támfal, TT 32 feletti terület
15	423,79m ²	Rézsű, vésett sziklák
16	397,67m ²	TT 179-180 sírbejárat
17	379,52m ²	Térdfalak, udvar
18	599,16m ²	TT -400- bejárat
19	742,11m ²	B sír felszín feletti része, udvara
20	187,88m ²	Sziklák
21	883,94m ²	Síraknák, térdfalak
22	808,17m ²	TT 32 udvara
Össz:	18932,80m ²	Átlagban 33,3%os átfedéssel dolgoztam

Az ásatási terület 3D modelljének elkészítéséhez összesen 18932,80m² felületet mértem fel, ez átfedések nélkül 14265,49m²-re redukálódik. Ezek a felület méretek nem vízszintes vetületi méretek, hiszen a domboldal lejt. A teljes modell vízszintes síkra vetített területe 10868,66 m².

Scannelés folyamata

A domb tetejéről indulva kezdtem meg az adatfelvételt, és lehetőség szerint lefelé haladtam, viszont az ásatási munkálatok miatt változó sorrendben scanneltem be fent bemutatott területeket. Ebben az esetben is a Polycam nevű szoftvert használtam, gyors modellfeldolgozási képességei miatt, valamint mert a már feldolgozott részek minden adatát eltárolja a program és lehetőséget ad a későbbi, részletesebb, időigényesebb feldolgozásra. Továbbá ez a szoftver képes a legjobban azonosítani a felületeket, amiken már áthaladtam, ez különösen fontos a 3D model idomhelyességének eléréséhez és a duplázott “falak”, felületek elkerüléséhez.

Az adatfelvételt követően mindig lefuttattam egy alacsony poligonszámú modellt, hogy lássam, a nem hagytam-e ki semmit. Az olyan területeken, ahol jelentős horizontális változás van, például meredek lejtő vagy fal, ott először a felső részt szkenneltem, majd miután körbehaladtam, alulról is beolvastam

ugyanazt a felületet, hogy pontosabb eredményt kapjak a több szögből történő szkennelés következtében.

A szkennelés közben nehézséget okozott az, hogy az erős napfény, a néha 50 C felé emelkedő hőmérséklet és a jelentős számításokat végző processzor hőfejlesztése miatt néha túlmelegedett a telefon. Az eszköz erre a képernyő fényerejének jelentősen csökkentésével reagált, így nehezen volt látható az adatrögzítést végző program visszajelzése. Amennyiben ez zavaróan befolyásolta az előrehaladásomat a munkában, visszavonultam egy árnyékos helyre, hogy le tudjon hűlni a készülék, valamint hogy feltöltsem az akkumulátort, mivel a 3D scannelés és a folyamatos feldolgozás rendkívül gyorsan lemerítette.

A teljes domboldal feltérképezése LiDAR scannerrel összesen mintegy 30 munkaórába telt, ennyi ideig tartott több szakaszban és munkamenetben a mintegy másfél hektáros felszín szkennelése.



az ásatási helyszín textúrázott 3D modellje
a 3D model online megtekinthető itt: <https://p3d.in/LdciG>
(Pálvölgyi Á. 2022)

Fontos, hogy egy ekkora léptékű modell esetében fel kell mérni, és előre meg kell tervezni, hogy milyen részekre, darabokra bontjuk fel a munkaterületet, hol tudunk megfelelő méretű és részletességű átfedéseket biztosítani az utólagos összeillesztés könnyebbé és pontosabbá tétele érdekében.

Hasonló vagy nagyobb léptékű munkáknál célszerű lehet 3D vizuális markerekkel kitűzni a részeket, ezek nagyban felgyorsítják a folyamatot, mivel nem kell fejben tartani az eddig megtett útvonalat, továbbá az utómunka során sokat segítenek a modellek illesztésénél is.

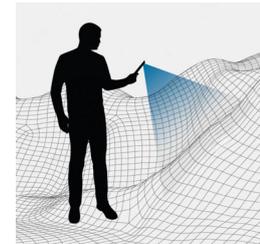
Az útvonalat legjelentősebben a terep befolyásolja és hogy hogyan lehet a legösszefüggőbben bejárni a felületet. Ha a terepviszonyok engedik, akkor célszerű egy pontból bővíteni a felületet.

A jó minőségű, pontos scan érdekében fontos, hogy a telefont kellő távolságra tartsuk a felülettől, mivel a szenzor és a cél közötti távolsággal egyenesen arányosan nő a hibafaktor is, ezért igyekezzünk a felülethez legalább egy, maximum 4 méter távolságot tartani. Fontos, hogy a felületre merőlegesen tartsuk a készüléket, mivel így az összes infravörös pont optimális távolságba kerül.

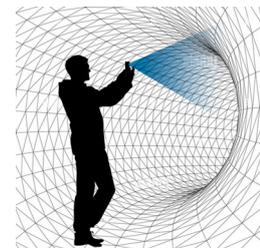
Fontos továbbá, hogy lassítsuk le a mozgásunkat. Az Iphone-ok LiDAR szenzora úgy működik, hogy több száz apró infravörös pontot vetít a ki, majd ezen pontok távolságát méri le másodpercenként több tíz alkalommal. Ebből következik, hogy minél lassabban haladunk át egy felületen, annál több különböző ponton érik az említett pontok, így annál több és biztosabb információt nyerünk a geometriáról.



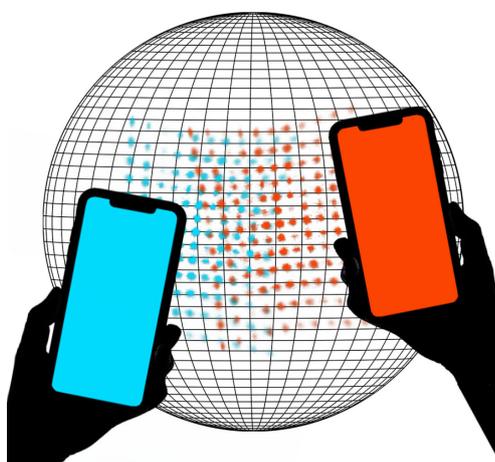
sík talaj LiDAR scannelése



ferde felület LiDAR scannelése



falfelület LiDAR scannelése



*illusztráció a LiDAR pontháló
helyes átfedéséről*

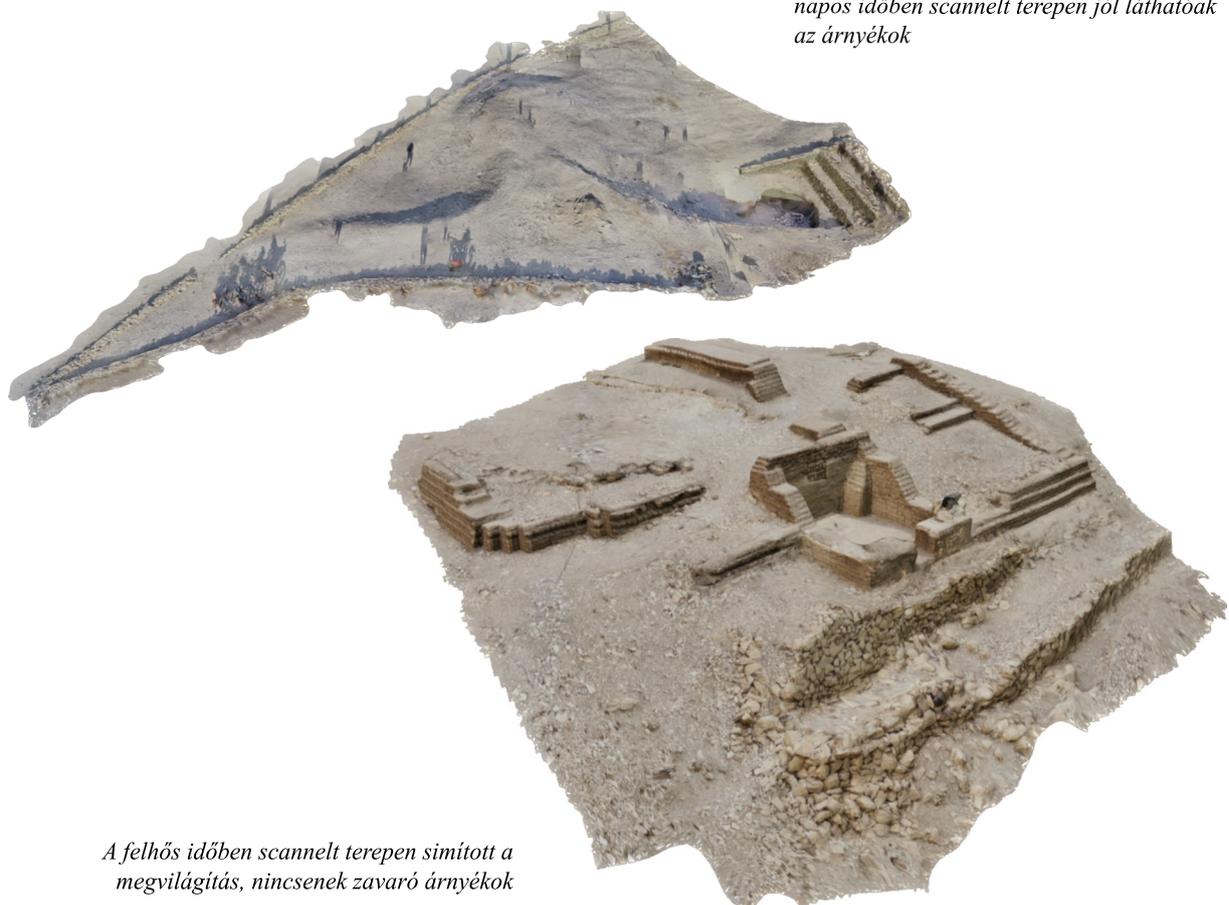
A scannelés alatt két szempontból is fontos a fény. Elsősorban a jó geometria eléréséhez konstans fény szükséges, tehát nem szabad, hogy egy munkafolyamat alatt meghatározóan változzanak a fényviszonyok. Elsősorban azért, mert a szoftverek vizuális információt is használnak a már bescannelt részek felismeréséhez és folytatásához. Ezért nem célszerű olyan részlegesen felhős időben felmérni, amikor a napot időnként eltakarhatja a felhőzet. Ha ez bekövetkezik, könnyen többszörös felületek (dupla falak) alakulhatnak ki a feldolgozott modellen, amennyiben az adatrögzítő alkalmazás a megváltozott megvilágítás miatt nem azonosítja a már beolvasott felületet. Másodsorban a 3D modell textúrái is kevésbé lesznek esztétikusak, ha fényviszonyokban változás következik be. A tűző nap színhőmérséklete, fényereje változó lesz, és ezt amikor a program összevágja és rá vetíti a felületre, láthatóvá válnak ezek az árnyalatbeli különbségek.

További előfordulhat, ha fényes napon végzünk adatrögzítést, könnyen abban a problémába futhatunk, hogy az árnyékunkat is rögzítjük. Ez szintén meg fog jelenni a textúrában.

A legideálisabb időjárás a szabadban történő scanneléshez a felhős idő, mivel ez ad simított, egységes, konstans megvilágítást, kevés árnyékkal.



scannelés közben rögzített árnyék megjelenése a textúrázott modellen (képernyőkép)



napos időben scannelt terepen jól láthatóak az árnyékok

A felhős időben scannelt terepen simított a megvilágítás, nincsenek zavaró árnyékok

3D adatok feldolgozása

Programok

Általában az adatrögzítő applikációkban nincs lehetőségünk szerkeszteni a feldolgozott 3D modelleket, csak a feldolgozás beállításait tudjuk állítani annak függvényében, hogy milyen minőségű modellel szeretnénk tovább dolgozni. Így szükség van arra, hogy az applikációból exportált modelleket vagy pontfelhőket a számítógépen “letisztítsuk”, majd ha több részletből áll az adat össze, akkor ezeket illesszük és a számunkra szükséges formátumra alakítsuk. Ezt követően tudjuk a kívánt használathoz előkészíteni a modellt, kinyerni belőle a szükséges információt, vagy tárolni azt további felhasználásra. A fenti esetekben dokumentációs és archiválási célokra, mérési és vizualizációs használatra kellett előkészítenem a 3D modelleket.

Minden esetben a **Blender 3.1**²⁰ nevű programban kezdtem meg az exportált modellek összeillesztését, letisztítását és korrekcióját, majd megfelelő fájl formátumba való átalakítását. Szükség volt még arra is, hogy ebben a lépésben a felszínen található lyukakat²¹, azaz a modellfelület hiányait “betömjem”.

A nagyléptékű terepmodell elkészítésének egyik legfontosabb célja az volt, hogy kinyerjünk belőle egy alakhelyes és pontos szintvonalas térképet, továbbá az koncessziós ásatási területről a lehető legpontosabb aktuális felszíni

adatrögzítés is megtörténjen. Erre a feladatra a **Rhino** szoftvert gondoltam legalkalmasabbnak, így abba hoztam át a léptékhelyes mesh-t majd azt felszeleteltem 50 cm-enként, így kialakult egy térbeli szintvonalas térkép, amit felülnézetből könnyen lehetett bármilyen léptékben dokumentálni.

Pontfelhőből szintvonalak

Az eszköz által rögzített nyers adat egy képek alapján színezett és LiDAR szenzor által rögzített pontfelhőből, másodpercenként rögzített képekből²² és további kamera pozíciót meghatározó adatokból áll. A professzionális szférában általában a LiDAR scanneket pontfelhőként dolgozzák tovább, mivel sokkal könnyebben kezelhető, kisebb erőforrás igényű, mint egy poligonmodell.

3D modellből szintvonalak

Alaprajzi nézetek, metszetek vagy más vonal alapú dokumentációk készítéséhez is, háromszögekből álló, poligon alapú 3D modell a célravezetőbb, mivel a térbeli háromszögeket elmetszve a programok könnyedén képesek kiszámolni a metszévonalakat. Nem elhanyagolható az sem, hogy a 3D vizualizációban is egyre nagyobb teret hódít a 3D scannelés, és erre a textúrázott 3D objektumok a legjobb eszköz. Fontos azonban megemlíteni, hogy pontfelhőkből az adat tovább dolgozható modellé

²⁰ Blender: <https://www.blender.org/>

²¹ Lyukakat azért alakultak ki, mert a terepen bizonyos területeket nehéz vagy veszélyes megközelíteni, illetve hibás adatfelvétel miatt is keletkezhetnek.

²² Képekből, amiket a szoftver később a modell textúrázásához használ.

A Khokha domb²³ 3D modelljének feldolgozása

Miután rögzítettem az összes kívánt adatot, és ellenőriztem alacsony részletességű, helyszínen gyorsan futtatható modelleken, hogy a bescannelt terep részletek megfelelőek, az utómunka már irodai környezetben folytatódott. Mind a 22 modellrészlet esetében újra futtattam a textúrázott geometria elkészítését a Polycam szoftverben, viszont most jóval magasabb részletességet adó beállításokkal. Ez minden modell esetében egy hosszabb, egyenként mintegy 5-10 perces feldolgozási időt, a 22 modell esetén összesen 3 óra²⁴ munkát jelentett. Mivel a rögzített adatokat több részletességben is fel lehet dolgozni, így ebben az esetben 5 cm-es ponthálót választottam, mivel ez rendkívül magas részletességet ad ekkora terepmodell esetén. Az így kapott objektumokat exportáltam a programból, léptékhelyes .GLB²⁵ fájlformátumba, majd számítógépre másoltam.

PC-n a fent említett fájlokat Blender 3.1 programban egyesítettem. A modellek egymáshoz illesztését a teljes terep közepétől indulva kezdtem felépíteni, hogy ezzel is csökkentsek minden

lehetséges pontatlanságot. Két vagy több felület pontos egymáshoz illesztéséhez

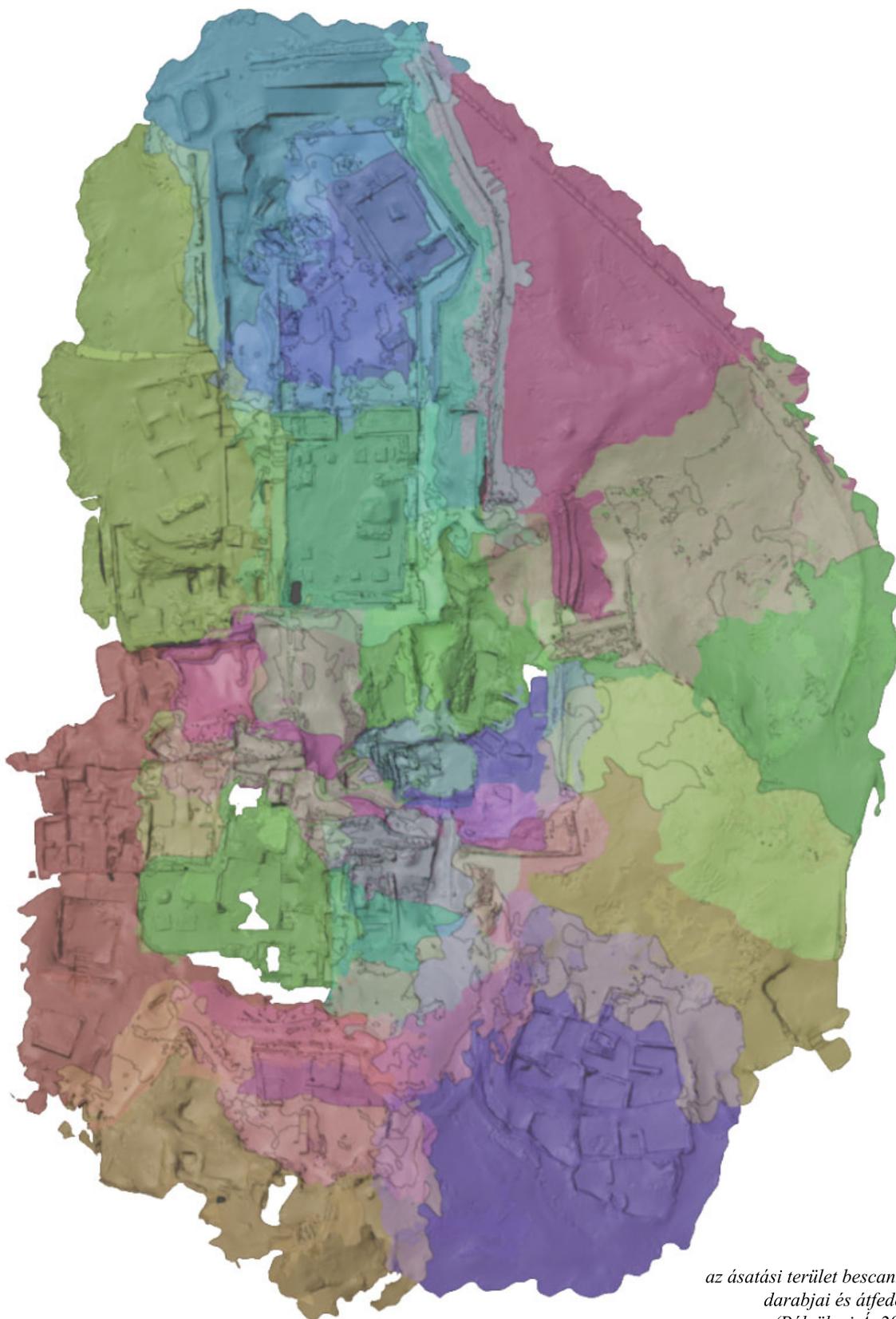
több módszert is használtam. A legegyszerűbb eset, amikor a scannek átfedésében jól láthatóak olyan markáns kontrasztos pontok, ami alapján manuálisan egymáshoz illeszthetőek a modellek, mivel akkor a programban több nézetből precízen egymáshoz illeszthetőek a felületek. Tartsuk fejben, hogy a modellek léptékhelyesek, ezért az illesztéskor átméretezni nem szabad őket. Amennyiben nehezen látható pontokkal a Blender egy kiegészítőjét, a 3 Points Align²⁶-t használtam, amivel a szoftver 3 kiválasztott pont alapján, ami mindkét modellen megtalálható, automatikusan egymáshoz illeszti a felületeket. (Ebben az esetben jól használhatóak lettek volna a korábban említett vizuális markerek, akik alapján a kitűzött terület széléit lehetett volna illeszteni nagy pontossággal.) Ezt a folyamatot ismételttem meg a fennmaradó darabok esetében is, míg végül a teljes ásatási terület és a csatlakozó, nem koncessziós területek is egy felületté álltak össze.

²³ Az ásatási területet magába foglaló domb arab neve

²⁴ Itt fontos megjegyezni, hogy a telefon ilyen hosszabban tartó nagy igénybevétel hatására túlmelegedhet és ezzel lassíthatja a feldolgozási folyamatot. Ilyenkor a legegyszerűbb megoldás az, hogyha a tokból vagy más védőeszközből kivesszük és elhelyezzük egy jól hővezető sima felületre, pl. üvegre, fémre, ahol kontakt úton képes elvezetni a hőt.

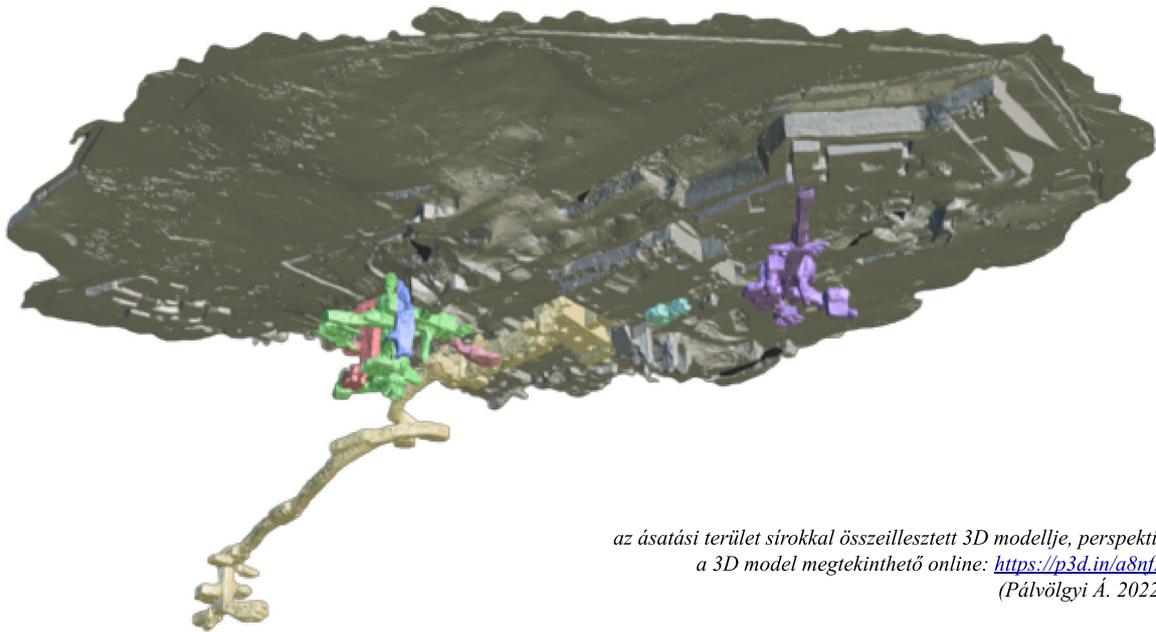
²⁵ További információ:
<https://docs.fileformat.com/3d/glb/>

²⁶ A kiegészítő weboldala:
<https://blendermarket.com/products/3-points-align>

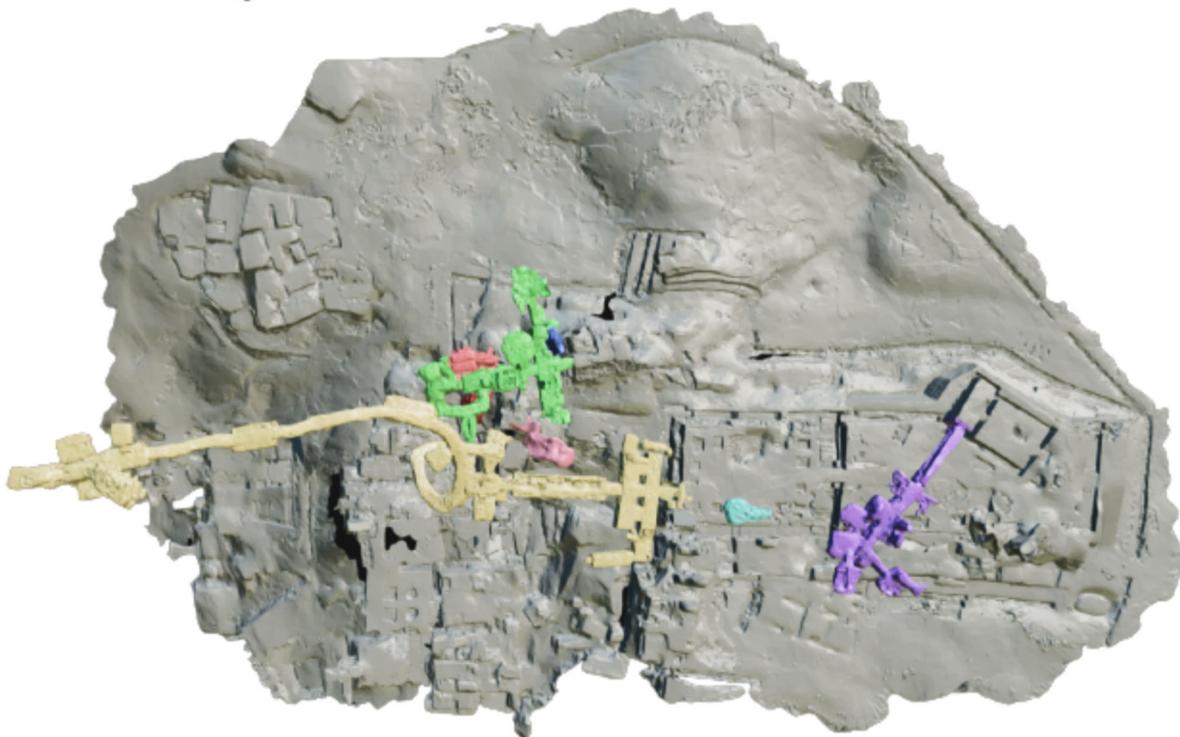


*az ásatási terület bescannelt darabjai és átfedései
(Pálvölgyi Á. 2022)*

Később prezentációs célra készítettem egy olyan 3D modellt, amibe szinte minden, az ásatási területről készült modellt összeilleszttem egy olyan fájlba, amiben a terep morfológiája, valamint alatta a különböző, sziklába vájt sírok egyszerre láthatóak és színekkel elkülönítettek egymástól. Így jól értelmezhető az elhelyezkedésük. A modelleket úgy illesztettem össze, hogy adatfelvételkor a sírbejáratokat is rögzítettem és az azokon jól definiált pontok alapján pozicionáltam egymáshoz a két 3D modellt.



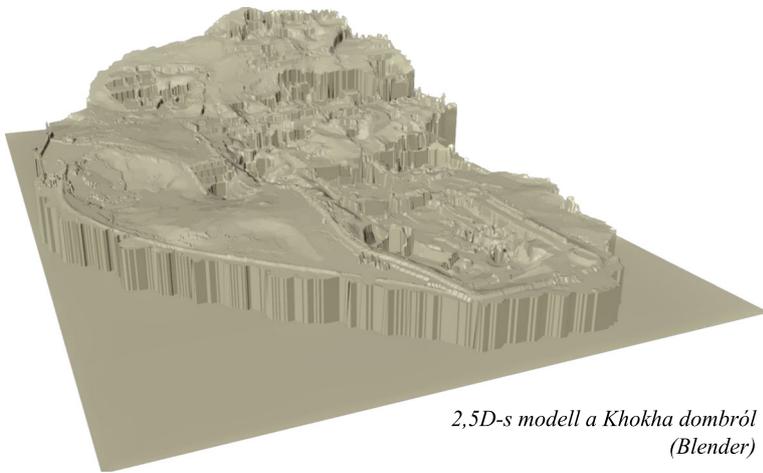
*az ásatási terület sírokkal összeillesztett 3D modellje, perspektív
a 3D model megtekinthető online: <https://p3d.in/a8nfr>
(Pálvölgyi Á. 2022)*



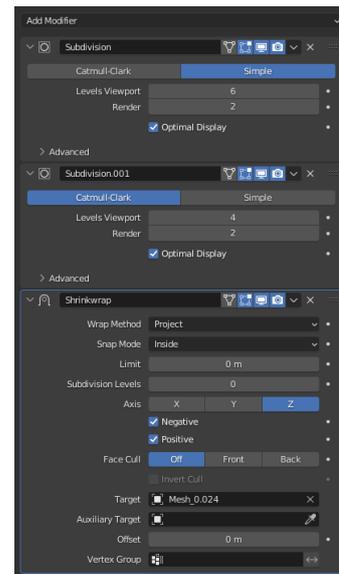
*az ásatási terület sírokkal összeillesztett 3D modellje, alunézet
a 3D model megtekinthető online: <https://p3d.in/a8nfr>
(Pálvölgyi Á. 2022)*

Szintvonalas térkép készítése

Mivel a 3D model elkészítésének egyik célja egy 50 cm-es szintvonalas térkép elkészítése volt, így ehhez még mielőtt felszeleteltem a terepet, “be kellett tömjem” a fenti ábrán is jól kivethető lyukakat. Mivel a terepen találhatóak függőleges konkáv felületek is, így 2,5D-ssé kellett változtatnom a modellt, hogy a homorú felületek következtében ne metsszék egymást a szintvonalak, és értelmezhetőek legyenek a különálló vonalak. Ezt követően egy olyan felületfolytonos modellt kaptam, amin minden poligon tökéletesen csatlakozik a szomszédaival, ez az ún. “watertight model”-t. Erre azért van szükség, hogy a szintvonalak ne szakadjanak meg sehol.



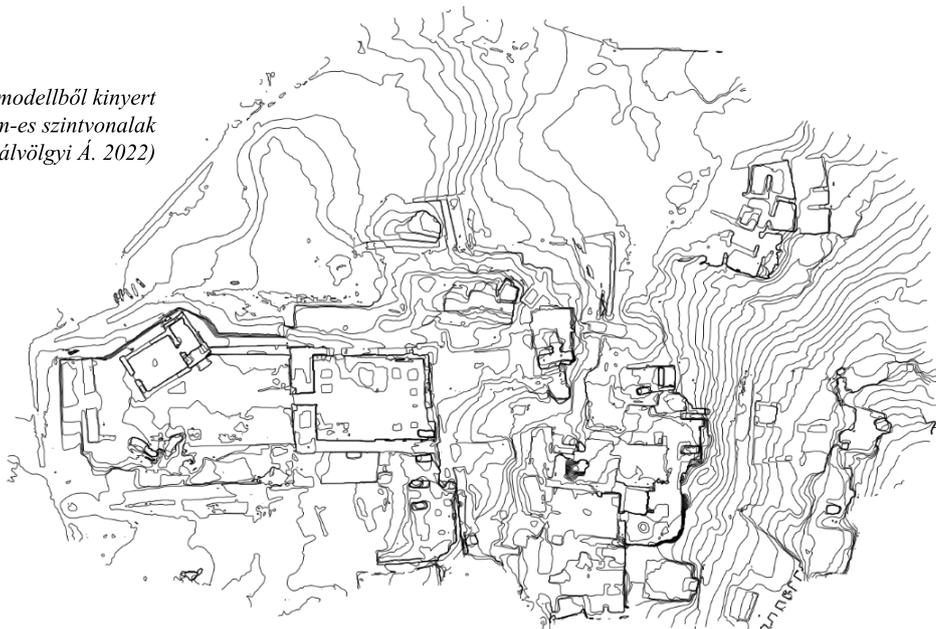
2,5D-s modell a Khokha dombról
(Blender)



modell 2,5D-ssé alakításának lépései
(Blender)

Ezen lépések után már csak fel kell szeletelni a 3D modellt, amit Rhino-ban vagy más szoftverekben könnyedén megtehetünk.

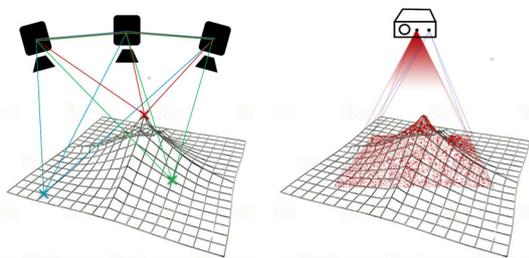
a 2,5D modellből kinyert
50cm-es szintvonalak
(Pálvölgyi Á. 2022)



LiDAR vs Fotometria

A két technológia nagyon különböző módon számítja ki pontokat, épít fel mesh-t, azaz a 3D modellezés alapját²⁷. A LiDAR esetében aktív mérésről beszélünk, mivel a rendszer a kibocsátott infravörös fénysugarak visszaérkezésének idejéből méri le minden kivetített pont távolságát, és ezekből egy pontfelhőt épít, majd ezekből a pontokból építi fel a 3D modellt.

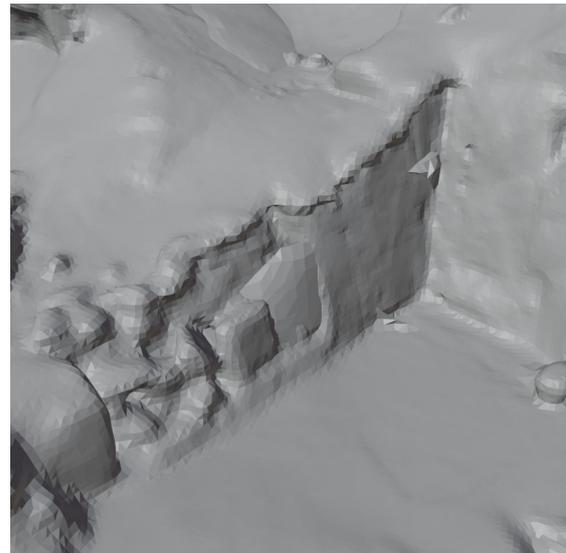
A fotometria viszont fényképeken felismert nagy kontrasztú pontok felismeréséből és további képeken való azonosításából bizonyos pontok relatív pozícióit állapítja meg, így a fotometria passzív mérést végez a LiDAR scannerrel szemben. A dimenziótlan fotometriákat viszont a feldolgozást követően dimenzionálhatjuk a modell valóságban bemért pontjaira feszítésével.



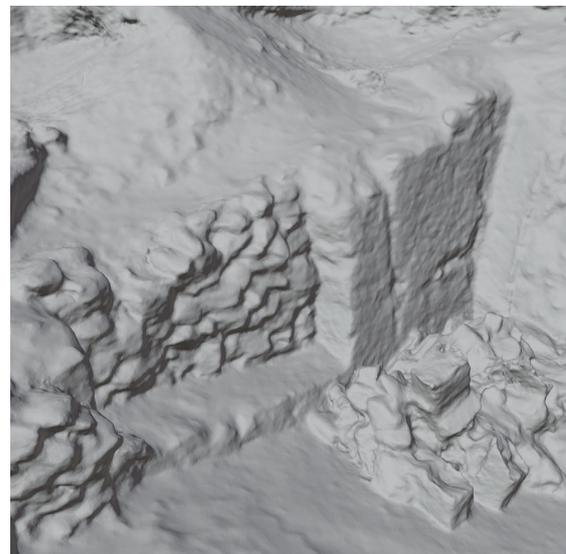
fotometria és LiDAR összehasonlítása

Ebből a technológiai különbségből ered az a tény, hogy a LiDAR scannelésnek a fotometriával szemben léptékbeli korlátai vannak, mivel az infraprojektor által kivetített pontháló legközelebbi fókusz távja (iPhone 13 Pro esetében) kb. 50 cm, ami a lehető legjobb esetben is minimum 5 mm-es ponthálót képes alkotni. Ezzel szemben a

fotometriának nincs méretbeli megkötése, mivel különböző gyújtótávolságú és fókusz távolságú objektíveket alkalmazhatunk, így gyakorlatilag bármilyen apró modellt létrehozhatunk, így egyértelmű, hogy fotometriával sokkal részletesebb modellt alkothat a szoftver.



*LiDAR scan részlet
3D model részletességének vizsgálata
(Pálvölgyi Á. 2022)*



*Fotometria scan részlet
3D model részletességének vizsgálata
(Kovács K. 2017)*

²⁷ További összehasonlítás:

<https://www.hammermissions.com/post/lidar-vs-photogrammetry-what-s-the-difference-and-when-to-use-which>

Feldolgozás szempontjából is fontos különbségek vannak. Mint már említettem a LiDAR egyből egy pontfelhőt hoz létre, amit szoftveresen dolgoz tovább a szoftver színezett pontfelhővé a fényképek alapján, vagy textúrázott 3D modellé. Ellenben a fotometriának szüksége van egy pontfelhő elkészítését megelőző lépésre: pozicionálni kell a fényképeket, majd ezek elhelyezkedése és orientációja alapján képes a felismert, azonos pontok pozícióinak kiszámítására. A LiDAR technológia esetén azért nincs szükség erre a lépésre, mert az eszköz már a scannelés közben rögzíti a fent említett adatokat és csatolja a pontfelhőhöz ezeket. Ebből adódik, hogy a scannelés sebessége sokkal gyorsabb LiDAR esetében. Ezt az időbeli előnyt mélyíti tovább az a tény, hogy a fotometria feldolgozása csak nagy teljesítményű számítógépeken végezhető, mivel a fotometria sokkal számításigényesebb. Sűrű pontfelhőből (amit a LiDAR technológia alpból rögzít) sokkal kevesebb erőforrással lehet 3D modellt építeni, így ezt akár a telefon,

vagy más eszköz is képes lehet elkészíteni. Ez a lehetőség egy hasonló részletességű modell elkészítését körülbelül 50-szer gyorsabbá teszi, ha LiDAR-t alkalmazunk.



*TT32 sloping passage részlet
pontfelhő, 3d Scanner App
(Pálvölgyi Á. 2022)*

Konklúzió

A LiDAR technológia egy újabb, előrhetőbb formában történő megjelenése olyan új távlatokat nyitott meg a valós világunk digitalizálásában, ami eddig csak professzionális, drága eszközökkel volt lehetséges. Lehetnek olyan szituációk, amikor ezeket általában nagy, nehéz eszközök, sokszor a feldolgozást végző számítógépekkel együttes alkalmazására nincs lehetőségünk, mivel a körülmények ezt nem teszik lehetővé.²⁸ Ezekben a szituációkban egy zsebünkben elférő, multifunkciós eszköz adhatja az egyetlen lehetőséget - különösen nehezen elérhető adatok felvételéhez. Ezért forradalmi fejlesztés a LiDAR szenzor telefonokba építése.

A szituációban, amiben én használtam és teszteltem a mobiltelefonos LiDAR lehetőségeit, csak nagyon nehezen vagy időigényesen lehetett volna bármilyen más aktívan mérezezt²⁹ dokumentálási eljárást használni. Például egy professzionális lézerekamerát kizsállítása, felállítása és használata rendkívül körülményes lett volna. Általában ezeket LiDAR vagy lézerekamerával alapuló felmérésre specializálódott vállalkozások, cégek végzik, akiknek megvannak a forrásai egy mobiltelefonnál akár 50-100-szor drágább céleszköz beszerzésére.

Erre a lehetőségre elkezdtek felfigyelni az építőiparban is, és olyan kiegészítőket gyártani az Apple

eszközeihez, amik tovább fejlesztik, pontosítják a scannelés folyamatát. Az egyik úttörő cég az ilyen eszközök gyártásában Pix 4D, ami kifejlesztett egy RTK pozícionáló rendszert bizonyos iPhone modellekhez, amivel lehetővé teszi a telefon számára egy sokkal pontosabb pozícionálást, mint amire GPS alapján lenne képes az eszköz. Ez a rendszer a viDoc RTK rover, mi egy rögzített pozíciójú földi vevőegység alapján akár centiméter pontos helyzet és orientáció meghatározásra képes.



*viDoc RTK rover promó képei
forrás: <https://www.pix4d.com/product/vidoc-rtk-rover>*

Mivel már most, a technológia kezdeti szakaszában az első ilyen érzékelőket tartalmazó eszközök megjelenésekor felkeltette a professzionális felhasználók figyelmét, bátran kijelenthetjük hogy hatalmas lehetőségek rejlenek benne.

Véleményem szerint a további fejlesztések új távlatokat nyitnak meg a gyors, egyszerű és elérhető 3D scannelés tekintetében, továbbá, olyan szituációkban teszi lehetővé a LiDAR használatát, amelyekben eddig egyszerűen nem volt lehetőségünk. Konzumer eszközökben történő megjelenése pedig azt idézi elő, hogy némi képzéssel gyakorlatilag sokan képesek lesznek gyors és pontos mérések elvégzésére.

²⁸ Kovács K.—Miklós B.—Molnár Á., “DDD” Data Doing Dimension / Műemléki felmérés és dokumentáció konfliktuszónában. TDK dolgozat, BME ÉPK, 2016 (konz.: Vasáros Zsolt és Major Balázs)

²⁹ Olyan technológia, ami pontos méreteket rögzít, nem pedig relatív pont pozíciókat számol.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton köszönöm meg a Hungarian Archaeological Mission in Thebes (ELTE) South Khokha Project-nek és a BME ÉPK Exploratív Építészeti Tanszékének, hogy részt vehettem a 2022. tavaszán az Egyiptomban, Luxor-West Bank területén zajló ásatáson, ahol a dolgozatban bemutatott esettanulmányokat végeztem, valamint külön köszönet illeti segítségükért és támogatásukért Vasáros Zsoltot, a konzulensemét, valamint Takáts Bendegúzt, észrevételeikért az adatfelvétel során, továbbá a Eötvös Loránd Tudományegyetemet és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemet, hogy lehetőséget adott ezen dolgozat megírására.

Köszönettel tartozom ugyanakkor a 2022-es Egyiptomi ásatáson részt vevő hallgató társaimnak és további ott dolgozó szakembereknek, különösképp: Csehi Eszternek, Bilák Lászlónak, Dávid Dórának, Edlmayer Fanninak, Ferenczi Natáliának, Hoór Csillának, Kiss Rebekának, Kőfalvi Annának, Mátyus Lászlónak, Pasker Ingridnek, Seres Nórának, Priskin Gyulának, Szabó-Temple Marcellnek, Szepesi Annának, Tihanyi Balázsnak, Tóth Dávidnak, Tóth Eszternek és Varga Dánielnek, hogy ezt a felejthetetlen három hetet velük tölthettem. Továbbá szeretném megköszönni Hamza Márkónak és Tóth Eszter Lilinek, hogy motiváltak a dolgozat megírásában.



*csoportkép az ásatáson résztvevő hallgatókról
(Vasáros Zs. 2022)*

Bibliográfia

BÁCS, T. A.—FÁBIÁN, Z. I. F. —SCHREIBER, G.—TÖRÖK, L., *Hungarian Excavations in the Theban Necropolis. A Celebration of 102 Years of Fieldwork. Budapest, 2009.*

BUZÁS G.—OROSZ K.—VASÁROS Zs. (szerk.), *Reneszánsz Látványtár: Virtuális utazás a múltba. Magyar Nemzeti Múzeum, Budapest, 2009.*

DÁVID, D.—VASÁROS, Zs. (eds.), *Current Research of the Hassan Fathy Survey Mission in Egypt 2016-2017. Publications of Office of the Hungarian Cultural Counsellor in Cairo, vol. 2, Cairo-Budapest, 2020.*

DÁVID, D.—VASÁROS, Zs. (eds.), *Current Research of the Hassan Fathy Survey Mission in Egypt 2018-2019. Publications of Office of the Hungarian Cultural Counsellor in Cairo, vol. 3, Cairo-Budapest, 2020.*

KÁKOSY, L.—GAÁL, E.—BÁCS, T.—FÁBIÁN, Z.I.—BARTOS, Z., *The Mortuary Monument of Djehutymes I. Studia Aegyptiaca Series Maior I. Vol. 1-2. Budapest, 2004.*

KLEIN GOLDEIJK, B.—FRERKS, G.—van der PLAS, E.: *Cultural Emergency in Conflict and Disaster. NAI Publishers in association with the Prince Claus Fund for Culture and Development, 2011.*

KOVÁCS K.—MIKLÓS B.—MOLNÁR Á., “DDD” Data Doing Dimension / Műemléki felmérés és dokumentáció konfliktuszónában. TDK dolgozat, BME ÉPK, 2016 (konz.: Vasáros Zsolt és Major Balázs)

VOGT, M.—RIPS, A.—EMMELMANN, C., *Comparison of iPad Pro®’s LiDAR and TrueDepth Capabilities with an Industrial 3D Scanning Solution. Technologies. 9. 25. 10.3390/technologies9020025, 2021.*

A. SPREAFICO 1 — F. CHIABRANDO 1 — L. TEPPATI LOSE` 1 — F. GIULIO TONOLO., *Apple LiDAR Sensor for 3D Surveying: Tests and Results in the Cultural Heritage Domain, 2022*

A. SPREAFICO 1 — F. CHIABRANDO 1 — L. TEPPATI LOSE` 1 — F. GIULIO TONOLO., *The iPad Pro Built-in LiDAR Sensor: 3D Rapid Mapping Tests And Quality Assessment*

<https://blog.lidarnews.com/how-lidar-used-iphone-13-pro-pro-max/> (utolsó elérés: 2022.11.01.)

<https://www.cnet.com/tech/mobile/lidar-is-one-of-the-iphone-ipad-coolest-tricks-its-only-getting-better/> (utolsó elérés: 2022.11.01.)

Szoftverek:

Polycam: <https://poly.cam/>

3d Scanner App: <https://3dscannerapp.com/>

Qlone 3D Scanner: <https://www.qlone.pro/>

Blender: <https://www.blender.org/>

Rhino 3D: <https://www.rhino3d.com/>

Agisoft Metashape: <https://www.agisoft.com/>

TÉRBŐL DIGITÁLIS TÉRBE

esettanulmány mobiltelefonos lézerszkennelés alkalmazására

MELLÉKLET

Szerző:

Pálvölgyi Ádám

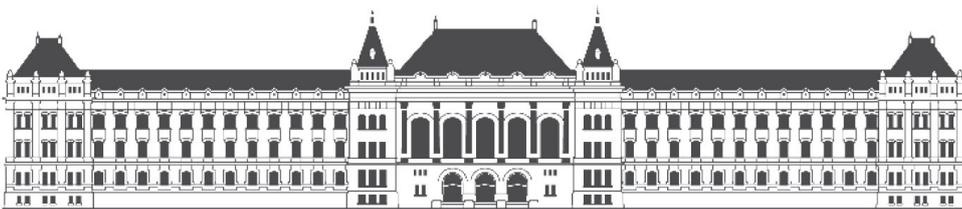
Építészmérnöki osztatlan képzés

Konzulens:

Vasáros Zsolt DLA

Egyetemi tanár, tanszékvezető

Exploratív Építészeti Tanszék

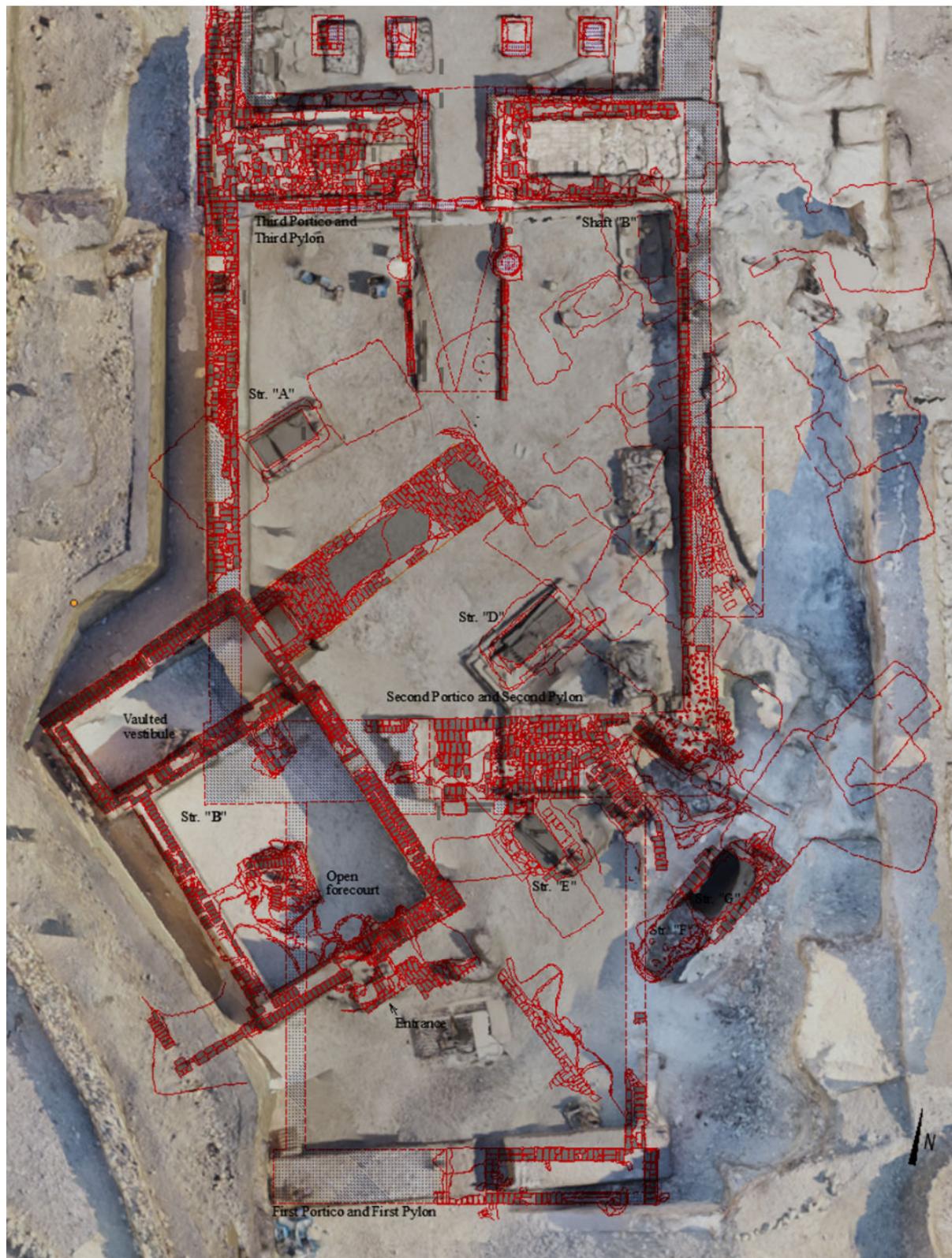


BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

Építészmérnöki Kar

Tudományos Diákköri Konferencia

Budapest, 2022

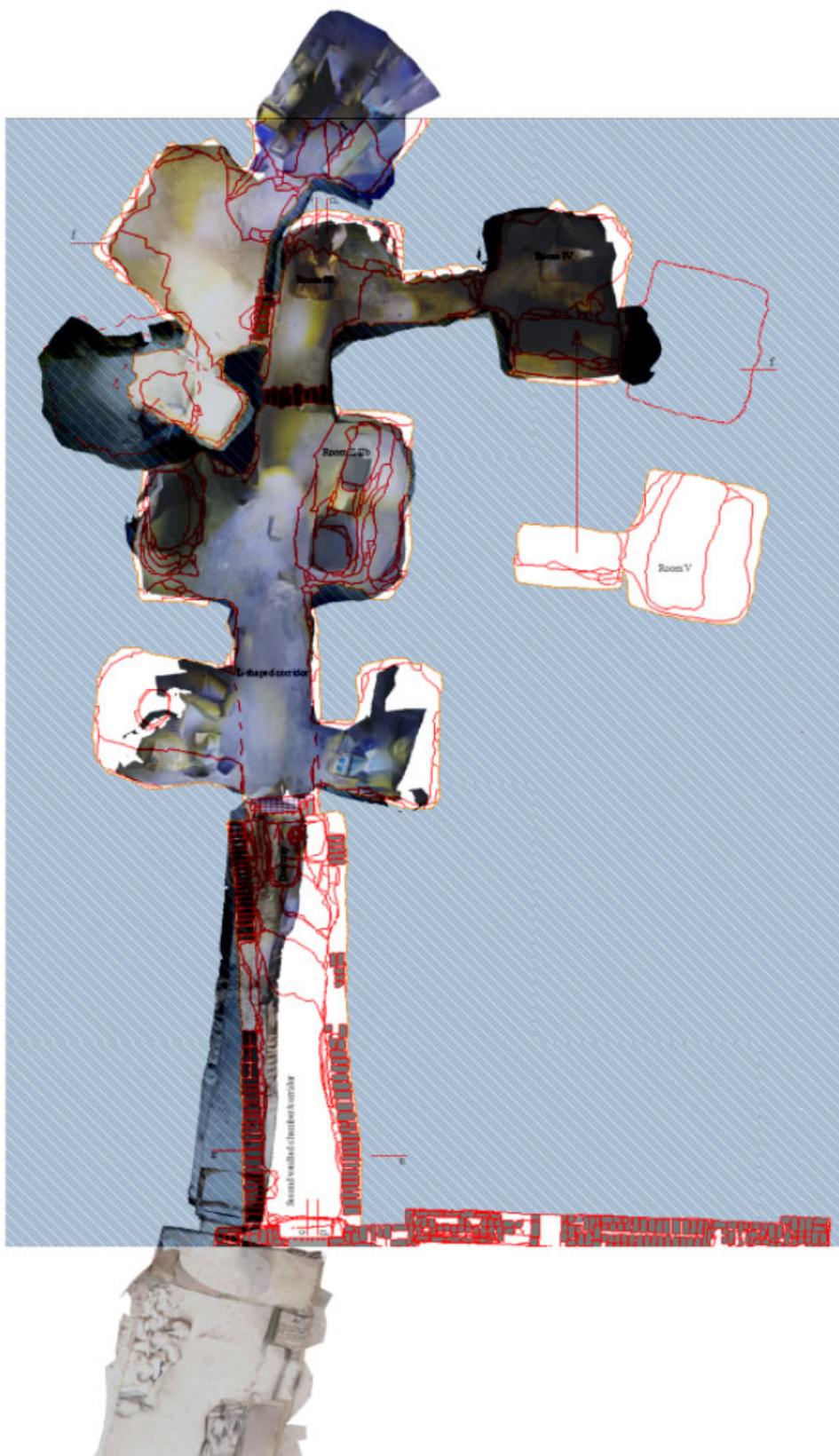
iPhone LiDAR scannerrel készült terepmodell pontosságának ellenőrzése 1.

TT32 udvara, részlet
3D model és manuális felmérés átfedésben, Polycam+Blender
(manuális felmérés: Vasáros Zs. 1998-2006, 3D model: Pálvölgyi Á. 2022)

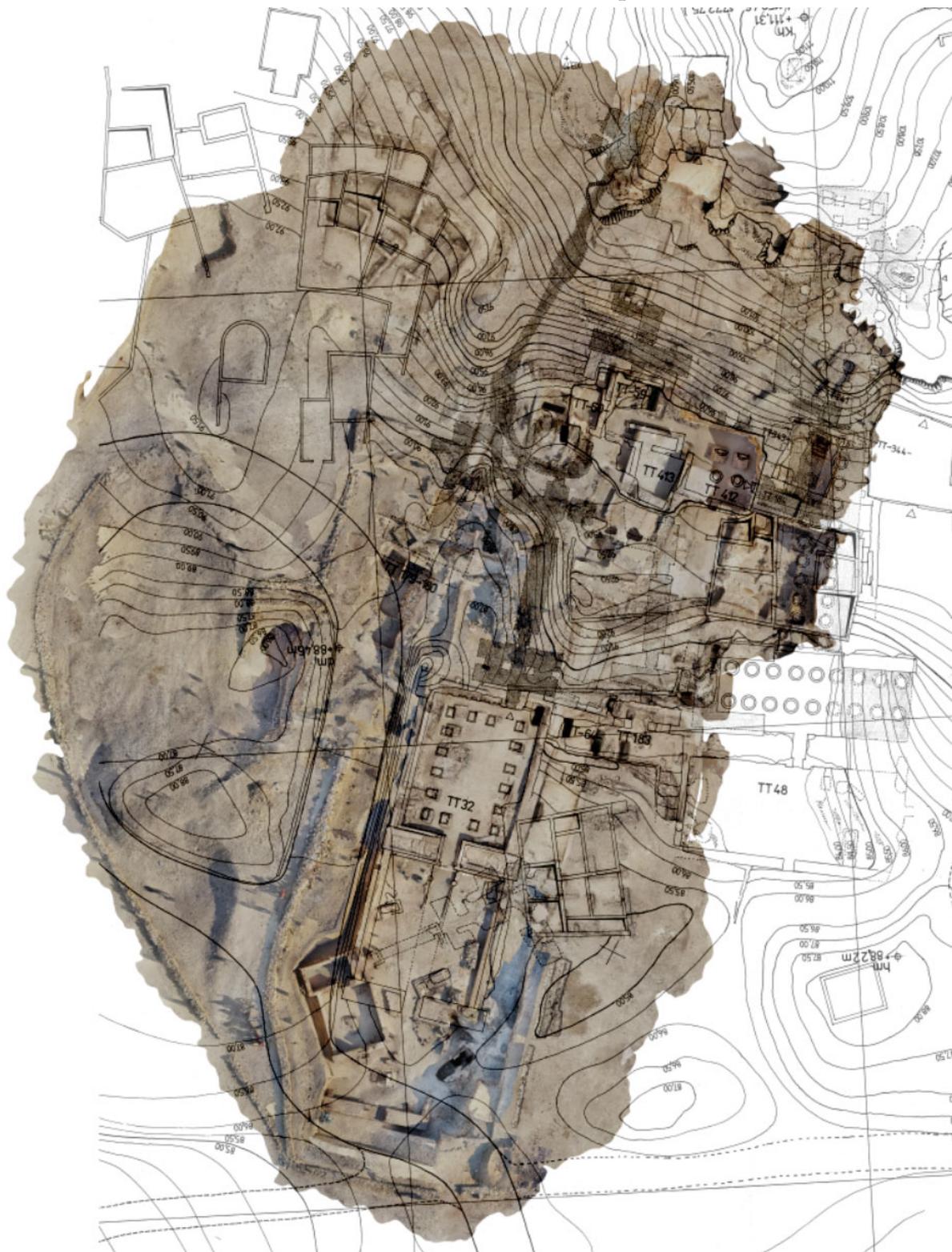
iPhone LiDAR scannerrel készült terepmodell pontosságának ellenőrzése 2.

TT32 udvara, részlet
3D model és manuális felmérés átfedésben, Polycam+Blender
(manuális felmérés: Vasáros Zs. 1998-2006, 3D model: Pátvölgyi Á. 2022)

Sziklasír felmérése iPhone LiDAR scannerrel



TT32B sír
3D model és manuális felmérés átfedésben, Polycam+Blender
(manuális felmérés: Vasáros Zs. 1998-2006, 3D model: Pálvölgyi Á. 2022)

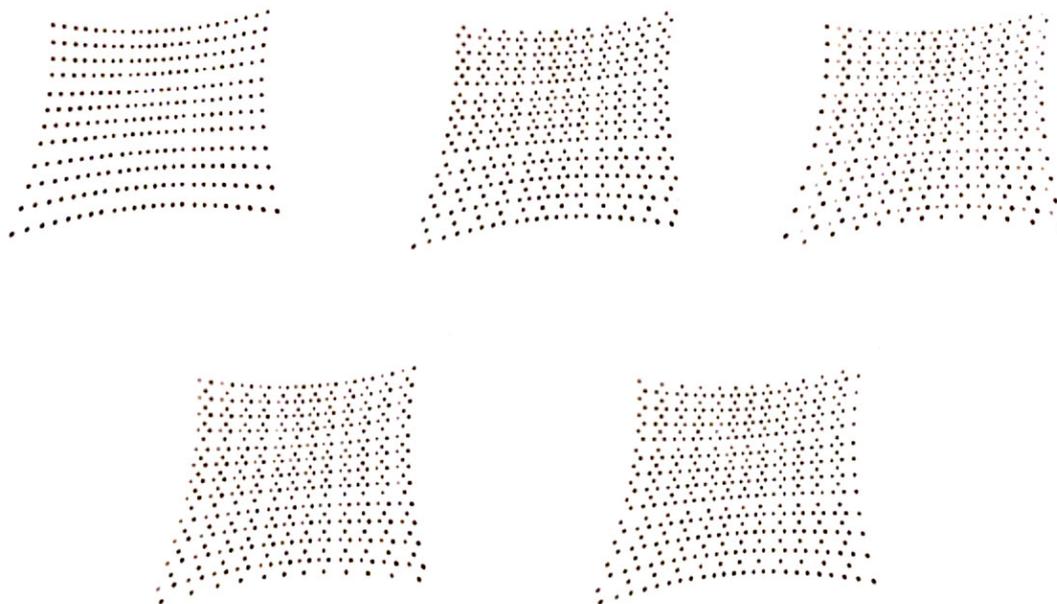
iPhone LiDAR-ral készített 3D terepmodell

*Teljes ásatási terület
3D model és manuális felmérés átfedésben, Polycam+Blender
(manuális felmérés: Vasáros Zs. 1997-2018, 3D model: Pálvölgyi Á. 2022)*

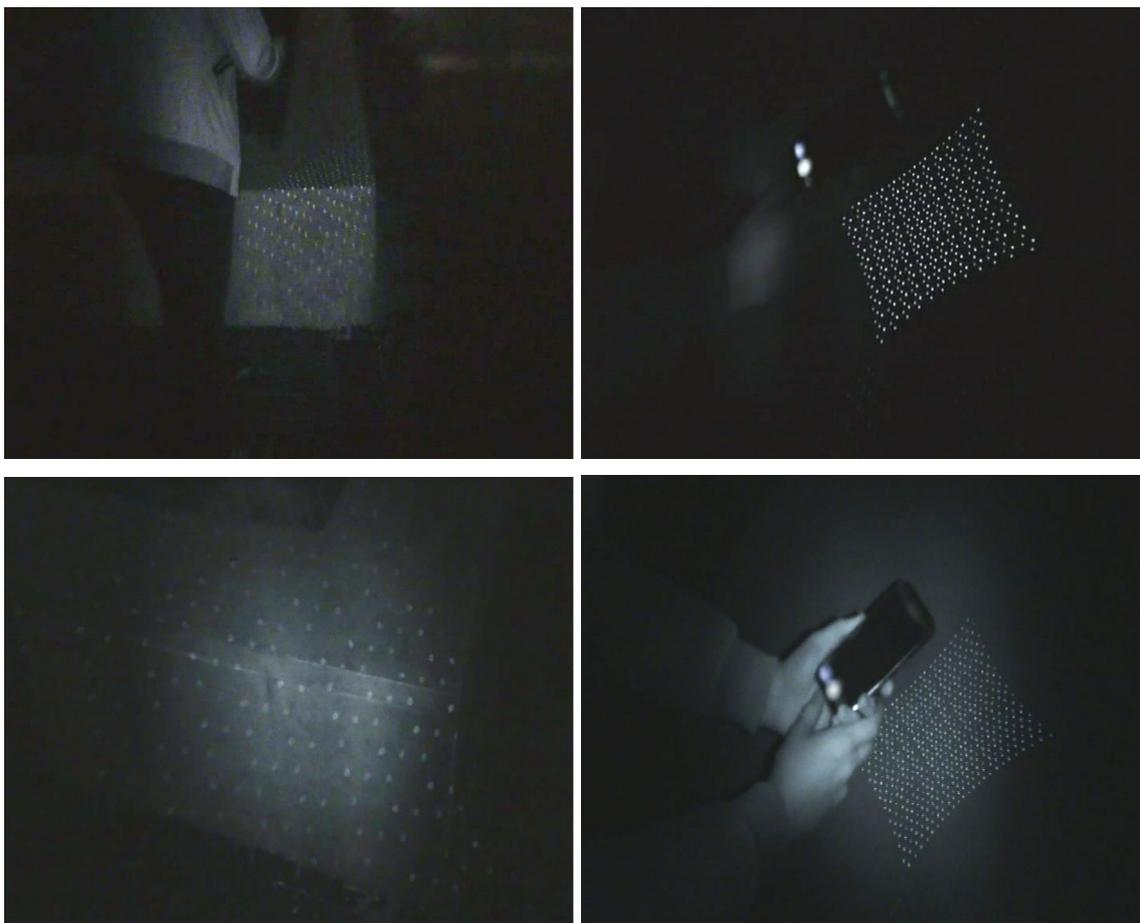
Az iPhone LiDAR-ral készített szintvonalas térkép



Az iPhone 13 Pro LiDAR pont projektor vetített mintázatai



kísérletezés, iPhone 13 Pro LiDAR ponthálójának rögzítése infravörös kamerával a LiDAR projektor különböző vetített mintázatai, amik másodpercenként 30szor váltakoznak ezen 5 verzió között, infravörös fényképek invertálva, emelt kontraszttal (Pálvölgyi Á. - Hajdú B. - Tóth D. 2022)



kísérletezés, iPhone 13 Pro LiDAR ponthálójának rögzítése infravörös kamerával a LiDAR projektor különböző vetített mintázatai, infravörös fényképek 3D scannelésről (Pálvölgyi Á. - Hajdú B. - Tóth D. 2022)