



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Alba Regia Műszaki Kar
Geoinformatikai Intézet

SZAKDOLGOZAT

UAV ALKALMAZÁSA MŰEMLÉKFELMÉRÉSBEN

OE-AMK
2021

Hallgató neve: Varga Tibor
Hallgató törzskönyvi száma: T000375/FI12904/A-G



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Alba Regia Műszaki Kar
Geoinformatikai Intézet

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Varga Tibor

Szaktervezési száma: SZD20120110308045

Törzskönyvi száma: T000375/FI12904/A-G

Neptun kódja: XXXXXXXXXX

Szak: földmérő és földrendező mérnök

Specializáció: Geoinformatika specializáció

A dolgozat címe: UAV alkalmazása műemlékfelmérésben

A dolgozat címe angolul: Application of UAV in monument survey

A feladat részletezése:

1. Végezzen adatgyűjtést (történeti ismeretek, korábbi felmérések, fotók, vázlatok, térképek) a kijelölt műemlékről.
2. Szakirodalom és Internetes források alapján ismertesse az UAV-vel végzett 3D felmérés lehetséges módszereit.
3. Készítse el a kiértékeléshez szükséges felvételeket UAV eszközzel.
4. Készítse el a 3D modellezés technológiai folyamatát.
5. Készítse el a kijelölt műemlék 3D modelljét és végezzen pontossági vizsgálatot.
6. Az elvégzett munkát műszaki leírásban összegezze.

Intézményi konzulens neve: Habil. Dr. Jancsó Tamás

Intézményi konzulens neve: Dr. Udvardy Péter

A kiadott téma elévülési határideje: 2023. december 15.

Beadási határidő: 2021. 12. 15.

A szakdolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Székesfehérvár, 2021. 10. 28.

P.H.

Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom:

belső konzulens

külső konzulens



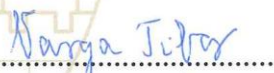
HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott szigorló hallgató kijelentem, hogy a szakdolgozat saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem.

Egyéb jelentős segítséget nem vettem igénybe.

Az elkészült szakdolgozatban található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Kelt: Székesfehérvár, 2021. december 13.


.....
hallgató aláírása

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés	5
2. Történeti áttekintés.....	7
3. Fotogrammetria	9
3.1. Fotogrammetriai alapok.....	9
3.2. Kiértékelési technológiák	11
3.3. Építészeti fotogrammetria.....	12
3.4. A 3D modellezés	15
3.5. Pilóta nélküli légitjárművek alkalmazása	18
4. Adatgyűjtés.....	21
4.1. Az UAV bemutatása	22
4.2. Reptetés	25
4.3. Felvételek készítése	27
4.4. A digitális képet terhelő hibák.....	28
4.5. A lézerszkennelés	29
4.6. A Leica P40 bemutatása	32
4.7. Szkennelés folyamata	34
5. 3D modell készítése az Agisoft Metashape-ben	35
5.1. A felvételek tájékozása	35
5.2. A kamera kalibrációja.....	39
5.3. A sűrített pontfelhő generálása	42
5.4. A felületgenerálás	43
5.5. A textúrázás	44
6. Pontosságvizsgálat – CloudCompare	45
7. Műszaki leírás	49
8. Összegzés.....	52
9. Summary.....	53
10. Irodalomjegyzék.....	54
11. Ábrajegyzék.....	56
12. Táblázatjegyzék	57
13. Mellékletek	57

1. BEVEZETÉS

Szakdolgozatom témája az UAV, azaz a pilóta nélküli légitármű alkalmazása műemlékfelmérésben. Az építészeti- és műemléki felmérések körében a fotogrammetria a kezdetek óta népszerű eljárásnak számít. Olyan módon képes az egészen apró részletek megjelenítésére, amelyre geodéziai eljárással nincs lehetőség. Témaválasztásomban szerepet játszott a történelmi örökségek – különösképpen a templomok – iránti szeretetem, valamint a számomra új technológiai megoldások iránti kíváncsiságom. E kettő ötvöztetésével lehetőségem adódott az ösküi evangélikus templom 3D modelljének elkészítésére.

Egyetemi tanulmányaim alatt alkalmam nyílt megismerkedni a fotogrammetria tudományával. Több módszer szerint lehetséges a fotogrammetriai eljárásokat csoportosítani. Legjellemzőbb a kiértékelési technológiák szerinti. Ezen belül a digitális fotogrammetria az egyik legdinamikusabban fejlődő szakterület, köszönhetően a számítástechnika innovációinak. Az UAV eszközök csekély anyagi ráfordítással beszerezhetők, a rajtuk elhelyezett kamerák kisméretűek, kompaktok, jó felbontású képek rögzítésére alkalmasak. Irányításuk néhány órás gyakorlással az átlagemberek számára is könnyedén elsajátítható. A jelenleg (2021. januárjától) érvényben lévő jogszabályok, ugyanakkor szigorú feltételekhez kötik ezen eszközök használatát. A hagyományos módon, repülőgépekről, mérőkamerával készített felvételek elkészítése összetettebb feladat. Hosszas tervezést igényel, az eszközök és maga a repülés is nagyobb anyagi ráfordítással jár. Főként a kisebb területre koncentráló geodéziai célú munkákban az UAV-k térnyerése egyre jelentősebb lesz a közeljövőben.

Dolgozatommal választ szeretnék kapni arra, hogy ezzel az új technológiával készülő modell mennyire pontos, milyen előnyei, illetve hátrányai vannak, mennyire biztonságos egy belső tér felvételezése UAV-vel.

A feladat végrehajtását az alábbi fázisokra bontottam:

1. A kiértékeléshez szükséges felvételek készítése.
2. A 3D modell megalkotása.
3. Pontfelhő készítése az ellenőrző mérésekhez
4. Pontossági vizsgálat.

A végeredményként kapott háromdimenziós modell felhasználhatósága sokrétű. Szolgálhat egyszerű szemléltetőeszközként turisztikai anyagokban, önkormányzati portfóliókban. Alkalmazható a mérnöki munkákban is: állapotfelmérések, épületkárok felmérése, település arculatának tervezése, műemlékvédelem, régészet.

2. TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

Öskü Veszprém megyei település a Keleti-Bakony lábainál, a megyeszékhelytől 15 km-re, a 8-as főút mentén fekszik. A falu már a római korban is lakott volt, ennek bizonyosságáról két obsit-plakett tanúskodik, melyet a szolgálatukért cserébe kaptak a katonák. Az első írásos emlék 1082-ből származik, egy oklevélben Villa Ees néven említik. Ez a dokumentum szerencsés módon a mai napig fennmaradt, a Veszprémi Érseki Levéltár őrzi. Öskü kapcsán legtöbbeknek a település címerében is visszaköszönő, a vasútvonal melletti dombon magasodó kerektemplom juthat eszébe. Ez az ország egyik legrégebbi Árpád-kori temploma, építését a 11. századra teszik. Különlegességét kerek alaprajza adja, az ilyen típusú templomokból viszonylag kevés maradt fent hazánk területén, építéskor még nem számított ritkának ez a forma. Egyedülállóságát növeli a faszindelyekkel fedett gombakalapja, ez a tetőforma tudomásom szerint egyetlen körtemplom kapcsán sem köszön vissza. A török hódoltság idején a falu teljesen elnéptelenedett, a rotunda is jelentős károkat szenvedett. A 18. századig nincs is semmilyen említés róla, az oszmánok kiűzése után építették újjá romjaiból, ma ismert kupolasapkáját is ekkor kapta. [1] Szakdolgozatom témáját mégsem ez az épület, hanem az ettől néhány száz méterre álló evangélikus templom adja.

Az elnéptelenedett területre a 17. század közepén a Zichy család német ajkú lakosokat hívott, akiket a kuruc időkben elűztek innen. Egy rövid időszakra ismét lakatlanná vált a település, majd egy újabb benépesítési kísérlet során, evangélikus és katolikus tótokat telepítettek ide. A gyülekezet megalakulásának pontos időpontja nem ismert, a 18. század első felére tehető, az anyakönyvi bejegyzések 1721-től datálódnak. A jelenlegi templom helyén egy faszerkezetű, viszonylag szerény imaház működött, mert a türelmi rendeletet megelőzően a protestáns felekezeteknek nem volt lehetőségük templom építésére. A kőből álló templom építése 1785-ben kezdődött meg, amely a jelenlegi épület 2/3-ad részét képezi. A későbarokk stílusú épületrészt egy fából készült kis torony díszítette közvetlenül a homlokzat felett. A 19. század második felében bővült a templom, ekkor épült meg a jelenleg ismert homlokzat a toronnyal. Az épület 24,4 m hosszú, 8,2 m széles, hajó alakú, mely nem tagolt. A templom földeméig mért magassága 6,2 m. A bővítés során új oltárt, szószéket és két oldalt húzódó karzatot emeltek. A toronytérből a templomtérbe nyíló kétszárnyú ajtó korábban a templom eredeti bejárata volt. Ezzel szemközti oldalon

áll a klasszicista stílusú, márványszínű, toszkán oszlopokkal díszített oltár. Orgonája 1870-ből származik. [2] [3]

Az idők során az épületet többször renoválták, első ízben 1903-ban, amikor a torony és a tetőszerkezet korhadt faanyagát cserélték, továbbá kőműves munkálatokat végeztek el, belső és külső részeken egyaránt. A második világháború pusztításai Ösküt sem kímélték, a templom mellett a parókia, a tanítói lakás és az iskola is jelentős károkat szenvedett. A háború utáni évek a nehéz körülmények ellenére is az újjáépítésről szóltak. A torony talapzatában a gerendák cserére szorultak, az orgonát renoválni kellett. 1980-ban a tető lécezése után új palaborítást kapott. Az 1985-ös berhidai földrengés súlyos károkat okozott a templomban, a vakolat nagy területen hullott le a mennyezetről, a falak több helyen megrepedeztek. 1994-ben a toronysisak új festést kapott, a nyílászárókat cserélték. A legutóbbi munkálatok 2004-ben a homlokzatot, a padozatot és az ereszcatornát érintették. Műemléki védettségükből fakadóan a padokat cserélni nem lehetett, csak renoválni. [2] [3]

A gyülekezet lelkesze Bódis-Hamza Kinga Dalma, akinek tudomása és elmondása szerint itteni szolgálata óta a templomról nem készült semmilyen felmérés.

3. FOTOGRAMMETRIA

3.1. Fotogrammetriai alapok

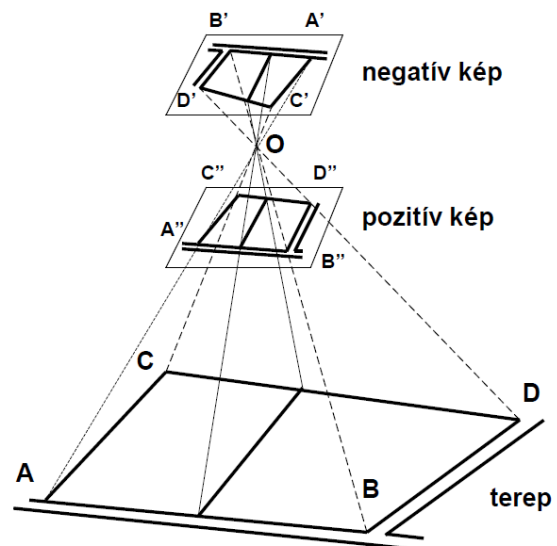
A görög eredetű fotogrammetria szó jelentése fényképmérés. A távérzékelésen belül önállósult tudományág egyidős a fényképezés feltalálásával. Lényege, hogy az adatgyűjtés során a szűkebb vagy tágabb környezetünkben található tárgyakról, felületekről, illetve jelenségekről különböző módszerekkel és felszerelésekkel, más-más távolságokból közvetve, azok érintése nélkül gyűjtünk adatokat. Az adatgyűjtésből ezt követően értelmezéssel, számítások és mérések alkalmazásával információt nyerünk. A fotogrammetria elsődleges célja a geometriai adatnyerés, amellyel a képen megjelenő objektumok helyét és méretét határozhatjuk meg. [4]

A fotogrammetriai feldolgozásra szánt, analóg vagy digitális módon létrehozott képeket centrálisan leképezett módon rögzítjük. Centrális vetítés során a tér egy kitüntetett pontjára, valamint a leképezés tárgyának minden egyes pontjára egy-egy egyenes illeszkedik. Ezek a vetítősugarak alkotják a képalkotó sugárnyalábot, melyet egy síkkal elmentszve kapjuk tárgyunk centrális vetületét. Pozitív a vetítés iránya, ha a képsík és a tárgy a centrumtól azonos irányban

helyezkedik el, negatív, ha a vetítési centrum a tárgy és a kép között található.

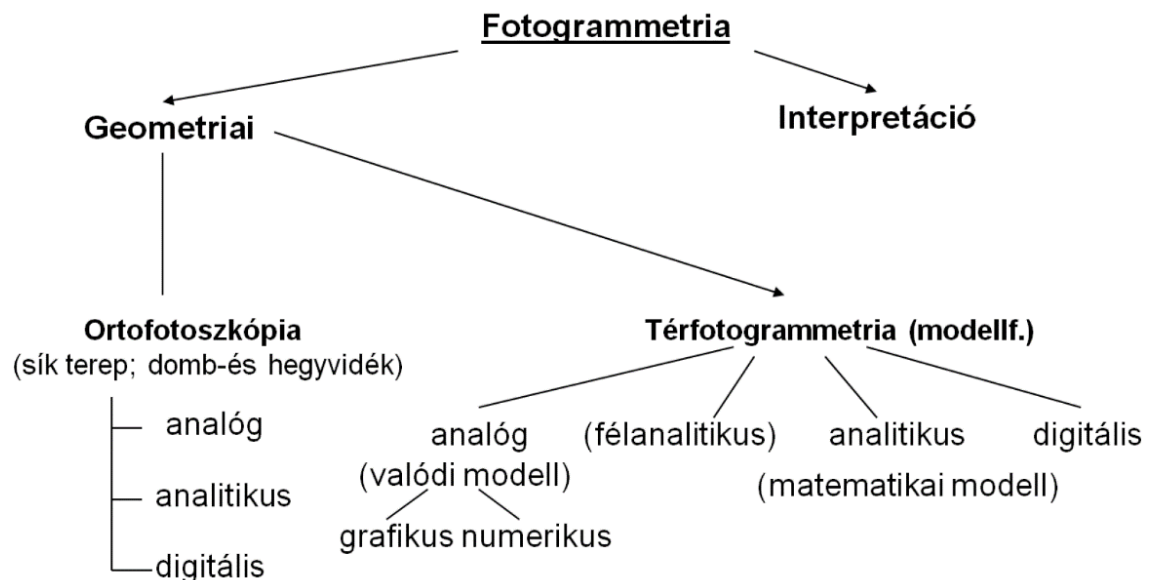
A centrális vetítéssel létrehozott kép kiértékelésével határozható meg a képi vetület szerint a tárgy alakja, mérete, terepi helyzete valamilyen koordináta-rendszerben. A vetítés során a vetített alakzat méretes tulajdonságai változnak, torzulnak. Ahhoz, hogy méreteket tudjunk meghatározni, ismernünk szükséges a vetítés tulajdonságait, azaz a geometriai egyértelműség feltételeit. A térbeli

adatnyerés elengedhetetlen követelménye, hogy legalább két felvétel álljon rendelkezésünkre. Erre azért van szükség, mert akár több térbeli pontnak lehet ugyanaz a



1. ábra: A centrális vetítés [4]

síkvetületi leképződése. Különböző vetítési középpontok megválasztásával ez a hiba javítható. [5]



2. ábra: A fotogrammetria felosztása [4]

A fotogrammetriai eljárások csoportosítása több szempont szerint lehetséges. A felvétel helye alapján – az űr fotogrammetriát figyelmen kívül hagyva – két fő csoportot különböztetünk meg: földi és légi fotogrammetria. Földi fotogrammetria esetén a felvételt készítő eszköz a terepen, illetve annak közvetlen közelében (max. 200 méter) található. Légi fotogrammetria során az adatgyűjtő berendezés valamilyen röpképes eszközön helyezkedik el, távolsága pedig a földfelszíntől számított 100 métertől 30 kilométerig terjed. [4]

A képek száma és a kiértékelés során nyert adatok kiterjedése szerint megkülönböztetünk sík- és térfotogrammetriát. Síkfotogrammetria esetében sík felületről vagy terepfelszínről készült egyetlen képpel dolgozunk, képátalakítást végzünk. Térfotogrammetria során kettő, egymást részben átfedő képet értékelünk ki, mely a sztereoszkópikus szemlélet miatt térmodell hatását kelti. [4]

Az előzőktől különböző eljárást képvisel az ortofotoszkópia. A nem sík felszínről készített kép a perspektív- és magasságkülönbségből származóan a vetítés során torzul. A kiértékelés alkalmával a terep magassági adatainak ismeretében a centrális vetítésből adódó torzulásokat szüntetjük meg. Mivel az egyes képpontokhoz különböző

terepmagasságok tartoznak, a feladat egyetlen lépésben nem oldható meg, szükséges a képet képelemekre, a digitális fotogrammetriában pixelekre bontani. Ezt követően képelemenként szüntethető meg a torzulás. [4]

A fotogrammetriai eljárások leggyakoribb csoportosítási lehetősége a kiértékelési technológiák szerinti, amely megkülönböztet analóg, analitikus és digitális fotogrammetriát. Ez a felsorolás egyúttal kialakulásuk szerinti időrendi sorrendet is jelöl. [4]

3.2. Kiértékelési technológiák

Az analóg fotogrammetriai módszer a legrégebb óta használt kiértékelési eljárás. A hagyományos módon, filmre rögzített, majd előhívott, fizikailag is létező fénykép alapján egy vetítőkamera segítségével állítjuk vissza a felvételkedészítés közben létrejövő sugárnyalábot. A képek felvételtkor helyzetének visszaállításával az optikai sugarak és sugárnyalábok segítségével tudjuk meghatározni mérendő pontjaink adatait. A kiértékelés végeredménye is analóg, síkfotogrammetriai eljárással adott méretarányú, torzulásmentes, tónusos képet kaphatunk, térfotogrammetriai eljárással alaprajzok, függőleges síkmetszetek, valamint koordináták is meghatározhatók. Az analóg fotogrammetriai kiértékelő műszerek átalakíthatók, kódadókkal elláthatók, így alkalmassá tehetők számítógéppel való összekapcsolásra és így számítógéppel támogatott kiértékelés valósítható meg velük. [4]

Az analitikus fotogrammetriai eljárás továbbra is analóg képet használ a kiértékeléshez, viszont ezt már analóg – optikai műszerekkel végzi. A számítógépes eljárás nagyban megkönnyíti a kiértékelő munkáját, a programok segítségével a felvételek tájékozása, valamint a kiértékelés bizonyos részei automatikusan elvégezhetők. A kiértékelés végeredménye digitális állományokba rendezhető, melyek lehetnek koordináta listák vagy vektorgrafikus rajzok. [4]

A digitális fotogrammetriai technológia során digitálisan előállított képet értékelünk ki számítástechnikai eszköz segítségével. A hagyományos módszereknél használt optikai-mechanikai műszerekkel ebben az esetben nem találkozunk, ugyanakkor a feldolgozásra váró és filmre rögzített analóg felvételek digitálissá való átalakítására, szkennelésére van szükség. Mára már a digitális kamerákkal készült képek kiértékelése terjedt el. Analóg

felvételek digitális feldolgozására csak akkor lehet szükség, ha egy korábbi állapotot vizsgálunk vagy hasonlítunk össze egy mostani állapottal. A pontossági igényeket számításba véve a digitalizálás történhet a jobb minőséget biztosító fotogrammetriai szkennerekkel vagy a kevésbé pontos asztali társaikkal. A kiértékeléshez elengedhetetlen egy nagyteljesítményű számítógép, amely képes a hatalmas mennyiségű digitális képállomány kezelésére, illetve tárolására. Továbbá rendelkezik a kiértékelési folyamat végrehajtásához szükséges szoftverrel. A hardver és szoftver elemek együttes elnevezése a fotogrammetriai munkaállomás, angol elnevezésének rövidítésével DPW (Digital Photogrammetric Workstation). A kiértékelés végeredményeül digitális állományt kapunk, amely lehet raszteres vagy vektoros formátumú, valamint a terepi pontok koordinátái is tárolásra kerülhetnek digitálisan. A kiértékelés pontossága a képek pixelméretének terepi megfelelőjétől, a felbontástól függ. [4]

3.3. Építészeti fotogrammetria

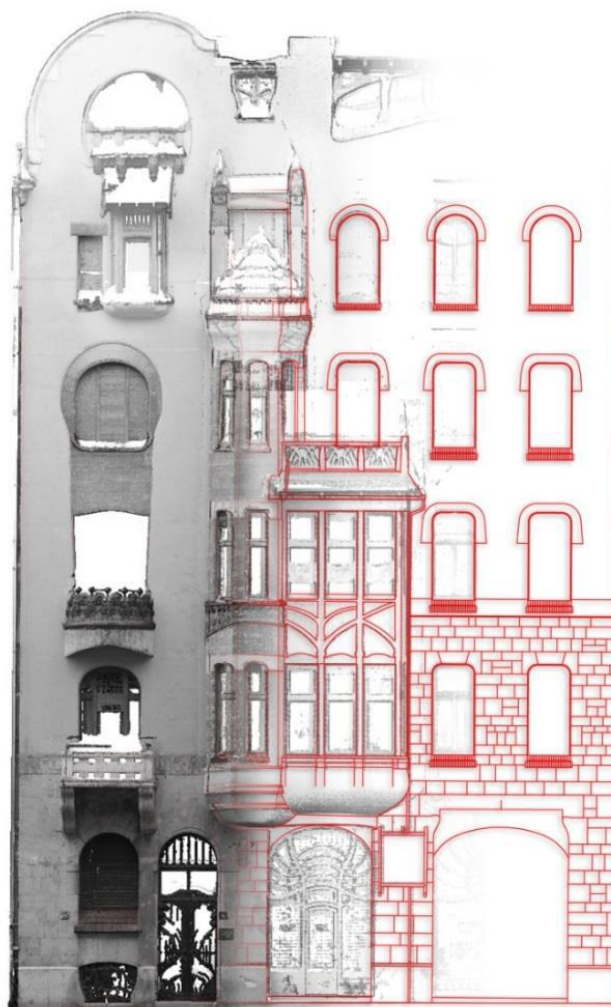
A fotogrammetria elsődlegesen a térképészeti és topográfiai felmérések során terjedt el, mivel fő feladata a térképezés, a pontsűrítés továbbá a részletek kiértékelése. Ugyanakkor más szakterületek is hatékonyan képesek alkalmazni a fotogrammetria által alkalmazott módszereket. Ezek közül az egyik, az építészet és műemléki felmérés, mely a kezdetek óta töretlen népszerűséggel hasznosítja a fényképmérés nyújtotta előnyöket. Az épületek homlokzatai, az apróbb részleteket tartalmazó egyéb építészeti alkotások vagy műemlékek geodéziai módszerekkel nem rögzíthetők olyan részletgazdagságon, mint ahogyan azt egy fénykép képes megjeleníteni. [6]

A fotogrammetria gyakorlati alkalmazása az építészetben jelent meg először, s később vált önálló tudományággá. 1859-ben a párizsi Notre-Dame székesegyház tornyainak magasságát földi felvételek segítségével állapították meg. A 20. század elején a Wright fivérek által megalkotott első működőképes repülőgépek hozták el a légi fotogrammetria kialakulását, az első ilyen felvételek még katonai célokat szolgáltak. [4]

Az építészeti és műemléki felmérések körében az elsődleges módszer a földi fotogrammetria. Napjaink egyre népszerűbb és egyre dinamikusabban fejlődő területe az UAV felvételezés, szintén ebbe a szegmensbe tartozik. A légi fotogrammetria jelenléte ez esetben másodlagos, speciális megoldást képvisel a termovíziós felvételezés.

Az elvégezhető feladatok köre változatos: [6]

- homlokzatrajzok, alaprajzok, metszetek előállítása,
- belső terek feltérképezése,
- állapot- és átalakítás előtti felmérések,
- épületkárok rögzítése,
- tetőkataszter felmérése.



3. ábra: Homlokzatrajz [7]

Az épületek, műemlékek fotogrammetriai felmérését legtöbb esetben állagmegóvási, átalakítási, illetve felújítási tevékenységek miatt készítik. Annak érdekében, hogy a növeljék a pontosságot, valamint legapróbb részletek is megjelenjenek a felvételezések a szokásostól nagyobb méretarányban történnek. Az esetlegesen takarásban lévő részekről külön képek készülnek. A sűrűn beépített, szűk utcahálózatú városrészek megnehezítik, hogy egyetlen képen rögzítésre kerüljön egy-egy épület homlokzata. Ekkor ún. fotómozaikot állítanak elő, több kép felhasználásával, összeillesztésével, azonos rendszerben kiértékelve. [6]

Épületkárok felmérése többnyire igazságügyi szakértői állásfoglalás részeként készül. A vizuális megjelenítés bővebb információt hordoz, mint a szöveges dokumentum. Vitás esetekben újabb adatok nyerhetők a felvételekből. A műemlékvédelem speciális alkalmazási lehetőség, a digitális technológiával kiegészítve lehetőséget nyújt arra, hogy a fotogrammetriai úton előállított utcaképbe beillesszék az újonnan tervezett épület homlokrajzát. Vizsgálva, mennyire illeszkedik környezetébe az új ingatlan. [6]

A tetőkataszteri felmérés hazánkban még gyerekcipőben járó nyilvántartás. Az UAV eszközökkel is végrehajtható, alacsony repülési magasságból megvalósított légifényképezéssel a tudatos döntéshozatalt segíthetjük elő. Optimális felbontásnál készített felvételek segítségével a tetők területi adatai mellett rengeteg egyéb információ nyerhető pl. a fedelek hajlásszöge, az épületek magassága, ereszek hossza, kémények száma és állapota. Ezeket kiegészítve számszerűsített adatokkal (pl. besugárzás mértéke, kiváltott energia értéke, megtakarított CO₂ mennyisége stb.) az ingatlantulajdonosok számára rendelkezésre állna épületük tetejének napenergia szerinti hasznosíthatósága. A megújuló energiaforrások alkalmazásában egyre nagyobb teret nyer a napenergia. Az újonnan létrejövő adatbázis segítségével optimalizálni lehet a napelemek és napkollektorok háztetőkön történő elhelyezését.

3.4. 3D modellezés

A kiértékelési technológiák egy különleges fajtája a háromdimenziós modellezés. A műszaki tudományterületek kapcsán az adatrögzítés mellett különösen fontos szerepe van a vizuális élménynek, a szemléltetésnek. A különböző ábrák, diagramok, modellek célja a megértés megkönnyítése, a dolgok, jelenségek és folyamatok még kifejezőbb megjelenítése. A szemléltetőeszközök közül talán a modellkészítés a legnehezebb feladatot jelentő szegmens. Az utóbbi évek szoftver és hardver fejlesztéseinek köszönhetően a háromdimenziós modellezés ugrásszerű léptékben fejlődött. Ennek a modernizációs folyamatnak köszönhetően széles körben vált elérhetővé, továbbá költséghatékony megoldás, valamint magas minőséget képvisel. [8]

A háromdimenziós modellezés esetében a tereptárgyak és az őket jellemző tulajdonságaik objektumorientált módon kapcsolódnak egymáshoz, vagyis egy-egy típushoz rendelünk értékeket, nem pedig tényleges objektumokhoz. Így egy logikailag egységes adatbázisba rendezve a program képes lesz az objektumnyelvű programozás során megjelenő fogalmak (hierarchia, öröklődés, polimorfizmus stb.) hozzárendelésére. Ez az eljárás a térinformatikai rendszerek egyik közös sajátossága. A modell megalkotásához a modellezendő felületről eltérő szögekből, de egymással átfedésben rögzített felvételekre van szükség. A kifejezetten modellkészítő szoftverek ezeket az átfedésben lévő képeket vetik össze, azok tartalmát és a metaadatait vizsgálva. Így határozzák meg az egyes objektumok egymáshoz viszonyított helyzetét. Előbb egy pontfelhő, majd ezek felhasználásával, síklapokból képzett 3D modell hozható létre. A kiértékeléshez használt képeket utólag húzzák rá a modellre, megalkotva az objektumok digitális mását, mely után az állományok georeferálhatók. [9] A létrejövő modellek a térinformatikai rendszerekben válnak objektumokká. Az előállított végtermékek később más területeken és szoftverekben is alkalmazhatók. Tipikus példa erre a Google Earth, ahol a felhasználók által készített és beillesztett 3D modellek is előfordulnak.

A háromdimenziós modellkészítésnek egyéb felhasználási területei:

- ipariális tervezés, ellenőrzés,
- mérnökgeodéziai feladatok,
- régészet és műemlékvédelem,

- városrendezés és várostervezés,
- közúti balesetek, helyszínelések,
- gyógyászat,
- építészeti és építőmérnöki alkalmazások.

A modellező rendszerek csoportosítása több szempont alapján lehetséges, a topológiai megközelítés szerint két nagy csoportra bonthatók. Azok a rendszerek, amelyek olyan objektumok megjelenítésére alkalmasak, melyek kétdimenziós pontsokaságra képezhetők le, alkotják a manifold modellező rendszereket. A nemmanifold topológiájú modellek ezzel szemben nem valószerűek, és kétdimenziós pontsokaságra történő leképezésük sem megoldható, mivel eltérő dimenziójú, egymáshoz kapcsolódó alapegységekből épülnek fel. A manifold modellek alakját jellemző adatok teljessége szerint megkülönböztethető teljes- és nem teljes értékű modellező rendszerek. [10]

Nem teljesértékű modellező rendszerek

A huzalváz-modell az ábrázolni kívánt objektum megfelelő geometriai pontjait összekötő vonalakat jeleníti meg, felületeket viszont nem tartalmaz. A vonalak lehetnek egyenesek, ívek és görbék. A módszer hátránya, hogy nem minden esetben egyértelmű a szemléltetés, mivel nincsenek meghatározva az egyes felületeket körbefutó vonalak. Továbbá nem alkalmas térfogat- és tömegszámításra valamint bonyolultabb alakzat megadására sem. Ugyanakkor a felület- és palástmodellek alapjául szolgálhat, modellszerkesztések közbenső állapotmegjelenítésre alkalmazható. [10]

A felületmodellnél kötetlen formájú, de zárt és véges felületfoltok jelennek meg, ezek határozzák meg az egyes felületrészeket, amelyek az objektumokat határolják. Ezek a felületfoltok geometriai értelemben pozícionálva vannak, viszont a modell topológiai információkat nem hordoz. A felületrészek valójában nem érintkeznek egymással, csak látszólagosan kapcsolódnak össze. Ezért továbbra sem alkalmasak térfogat és tömegszámításra, numerikus modell előállítására. [10]

Teljesértékű modellező rendszerek

A palástmodell az előző két rendszer ötvözte, mely az ábrázolandó objektumot poliéderes közelítéssel vagy valószerű geometriával jelenti meg. Arra a módszerre épít, hogy minden objektumnak egy jól lehatárolható véges felületet van, amely

tulajdonképpen egy zárt palást. A palástot felületlapok határozzák meg, amiket élek határolnak, az élek pedig csomópontokba futnak össze. A poliéderez palástmodell sík lapok segítségével határozza meg a modellt, a valósághű palástmodell szabadformájú felületeket is használ, ezáltal a valósághoz még közelebb álló, pontosabb modell állítható elő. Ez a modell már alkalmas térfogat- és tömegszámításra. [10]

A testmodell vagy térfogatmodell a modellezni kívánt objektumokat szabályszerű, zárt és véges ponthalmazként jeleníti meg. Az objektumokat teljes valójukban, ám jellemzően és tömören jeleníti meg, kiegészítve az testet alkotó alapegységek kapcsolatának leírásával. Az előző modelleknél egyszerűbb, de merevebb modell, alkalmas halmazalgebrai műveletek elvégzésére. [10]



4. ábra: Az ösküi kerektemplom 3D modellje, Lehoczky Máté munkája [11]

3.5. Pilóta nélküli légi járművek alkalmazása

A pilóta nélküli légi jármű olyan repülő szerkezet, melynek irányítását és üzemben tartását nem az eszközön tartózkodó személy látja el. Az a környezet, amely az UAV működését biztosítja, ideértve az irányítást végző személyt, mindazon berendezések összességét, melyekkel az eszköz távvezérelt módon irányítható, alkotja a pilóta nélküli légi jármű-rendszert (UAS). [12] Az UAV-k kezdetben katonai feladatokat szolgáltak, leginkább felderítések és támadások során. Hadügyi felhasználásuk továbbra is megmaradt, ugyanakkor békés célú, polgári alkalmazásuk egyre jelentősebb. A növekvő igények miatt a repülési szektor egyik legdinamikusabban fejlődő ágazata, az élet számos területén hatékonyan alkalmazható és felhasználható megoldásokat nyújt.

Az UAV-k több esetben hatékonyabban képesek ellátni feladatokat, mint a pilóták által vezetett légi járművek. Ezeket a területeket az angol nyelvű szakirodalomban megjelenő D3 jelzés jelöli, amely a dull, dirty és dangerous szavak kezdőbetűiből áll. [13]

A dull szó az olyan hosszú és monoton, egyhangú feladatokat jelöli, melyek végrehajtása nagy figyelmet és összpontosítást igényel. Ezek a tényezők egy ember esetében az idő múlásával romlanak, amelyek veszélyeztethetik a tervezett cél végrehajtásának sikerét, továbbá magára a személyzetre is kockázatot jelenthetnek. Ilyen típusú feladatok tipikusan a légi felderítések és megfigyelések, a nagy távolságokra történő szállítások. [13]

A dirty olyan állapotra vagy környezetre utal, amely vegyileg, biológiailag vagy radiológiailag szennyezett, így közvetlen veszélyt jelentene a repülőgépen tartózkodókra. Az ilyen szennyezésekkel járó eseményeknél kulcsfontosságú szerepe van a légi felméréseknek, melyek elősegítik a mentés megszervezését és a károk felszámolását. UAV-k segítségével ezek a feladatok a pilóták egészségének kockáztatása nélkül hajthatók végre. [13]

Az elvégzendő feladat veszélyességére utal a dangerous szó, ami elsősorban katonai tevékenységek közben fordulhat elő, légitámadás során. Békés célú feladatok ellátása esetén is fennállhatnak veszélyes körülmények. Ilyen lehet egy nagyfeszültségű vezeték, vagy egy erdőtűz megfigyelése. Olyan esetekben, amikor az időjárás nem teszi lehetővé

a biztonságos repülést, a feladatot viszont mindenképpen végre kell hajtani, UAV alkalmazását veszik számításba. [13]

A pilóta nélküli légi járművek csoportosítása több szempont szerint lehetséges (méret, teljesítmény, típus és kialakítás, tömeg, teherbírás, irányítás stb.). Dolgozatomban a felhasználási területek szerinti felosztást választottam, rámutatva mennyire változatos és milyen sok helyütt hasznosítható ez a technológia. Ezek a teljesség igénye nélkül: [12] [14]

- távérzékelés, fotogrammetria,
- légi fényképek készítése,
- precíziós gazdálkodás, mezőgazdaság,
- infrastruktúra műszaki ellenőrzése (vezetékek, utak ellenőrzése),
- műszaki mentési feladatok irányítása,
- szűnyoggyérítés,
- planetológia,
- kulturális- és örökségvédelem, régészet,
- temetőkataszter,
- természeti katasztrófák (vulkánkitörések),
- nukleáris balesetek,
- vegetációvizsgálat, erdőgazdálkodás,
- áru- és személyszállítás,
- kutatási és egyéb tudományos tevékenységek,
- természeti és környezeti megfigyelések,
- turizmus,
- látványterv készítése (3D modell),
- őrző-védő szolgáltatások, távfelügyelet,
- állami feladatok (rendvédelem, határvédelem, hatósági feladatok, katasztrófavédelem, bűnügyi felderítés és bűnüldözés, légi megfigyelés stb.).

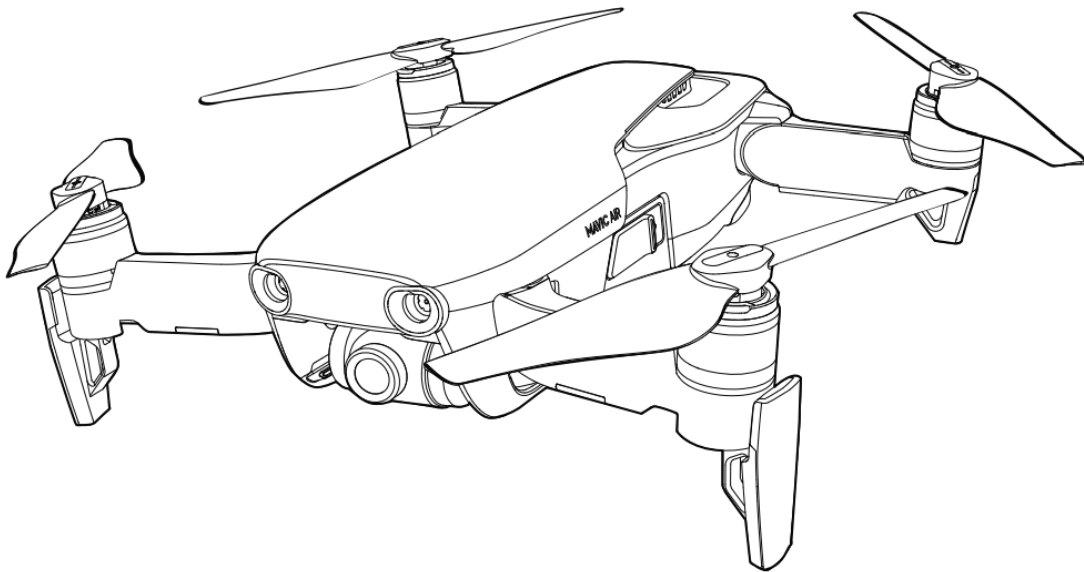
A hatósági feladatok közül – személyes érintettségem miatt – külön szeretném kiemelni és sorra venni a földhivatali osztályok munkájához kapcsolódó felhasználási lehetőségeket. [9]

- alappontok helyszínelése,
- geodéziai mérőtornyok állapotának felmérése,
- időszakos helyszínelések,
- bejelentéskötelezett munkák ellenőrzése,
- határszemplék, parlagfűfelderítés,
- termőföld más célú hasznosítását érintő helyszínelések,
- térképezési hibák javítása,
- térképfelújítások, újfelmérések.

4. ADATGYŰJTÉS

A fotogrammetria elsődlegesen mérőképek kiértékelésével jut a terepre vonatkoztatott adatokhoz. A technológia fejlődésével azonban egyre inkább elterjedőben van az amatőr képek fotogrammetriai célú kiértékelése. A mérőfényképekkel szemben az amatőr képek pontos geometriája nem ismert, ezért feldolgozásuk hosszadalmasabb, bonyolultabb geometriai összefüggések szerint zajlik. Ugyanakkor az amatőr képek előállítása sokkal egyszerűbb, de pontosságuk nem olyan megbízható. [16]

A terepi adatgyűjtés végrehajtása két ütemben valósult meg. Először a felvételek készültek el, melyet a lézerszkennelés követett. A fényképek készítése során az UAV irányítását – a megfelelő jártassággal és magabiztossággal bíró – konzulenseim végezték, az anyagi károkozás elkerülése végett. A szkennelésre egy hónappal a reptetést követően került sor.



5. ábra: DJI Mavic Air UAV [17]

4.1. Az UAV bemutatása

A felvételezés egy DJI Mavic Air típusú quadcopterrel történt. A DJI vállalat egyik jól bevált termékcsaládja a Mavic, az Air változat 2018 januárjában jelent meg. Az eszköz a kompakt UAV-k közé sorolható, könnyen hordozható, mivel karjai összecsuksukhatók. Kis mérete ellenére örökölte a Mavic sorozatra jellemző felszereltséget. Kamerája lehetővé teszi a 4K videórögzítést, valamint akár 12 megapixeles fotók készítésére is alkalmas. A rázkódás és elmosódás nélküli felvételek készítését egy 3 tengelyes gimbal biztosítja, amihez a kamerát rögzítették. [17]

Az eszköz több intelligens repülési móddal bír, melyek lehetővé teszik az összetettebb felvételek készítését. A felhasználó két repülési mód közül választhat: P (pozicionálás) mód és S (sport) mód. Előbbinél az UAV műholdak, valamint a vizuális rendszerek felhasználásával tájolja be magát. Ez a mód automatikus akadály elkerülést biztosít, továbbá az intelligens repülési módok kizárólag ekkor aktívak. A sport módban csak GPS alapú helymeghatározás van, az UAV vizuális rendszerei ki vannak kapcsolva. Ekkor az eszköz nem érzékeli, és nem kerül el önvezérelve az akadályokat. Létezik egy harmadik mód is, az úgynevezett ATTI mód (attitude), mely gyenge GPS jel, valamint kikapcsolt vizuális rendszerek során automatikusan kerül bekapcsolásra. Ekkor lehetséges repülési veszély áll fenn, mivel a légi jármű nem képes önálló helymeghatározásra, továbbá automatikus fékezésre. A külső tényezők hatásai (pl. szél) ebben a módban felerősödnek, ez okozhat horizontális irányú elmozdulást, ami beltérben jelenthet veszélyt. [17]

Az UAV gimbalja, kamerája és egyéb funkciói a DJI GO alkalmazással is vezérelhetők. A kopter első használata előtt aktiválás szükséges, melyet az alkalmazáson keresztül végezhetünk el. Az applikációból visszajelzést kaphatunk a Mavic Air repülési állapotáról, a figyelmeztetésekről. Akadályok érzékelése esetén piros sávok villannak fel az okos eszközön, figyelmeztetve a pilótát a veszélyhelyzetre. A képernyőn helyet kapott még egy töltöttségi szintet jelző ikon, az aktuális repülési mód, a kamera paraméterei, a GPS-jelerőssége, a vizuális rendszer állapotjelzői, gimbal-csúszka, amely a gimbal dőlésszögét mutatja. A repülési telemetria adataira támaszkodva nyomon követhetjük az UAV kiindulási ponttól mért távolságát, magasságát horizontális és vertikális sebességét. [17]

Gimbal

A Mavic Air egy 3 tengelyes gimballal van felszerelve, mely a kamera stabilizálását szolgálja. Ez az eszköz biztosítja a kamera tiszta és remegéstől mentes kép- és videórögzítését. A gimbal dőlése -90° és $+17^\circ$ közötti tartományban szabályozható.

Mozgatása két üzemmódban lehetséges. A követés módban a gimbal iránya és az UAV elülső oldala egyforma szöget zár be egymással a felvételezés során. FPV módban a gimbal mozgása igazodik az UAV mozgásához, olyan élményt adva ezáltal, mintha a felvételező is az eszközön foglalna helyet. [17]

Kamera

A Mavic Air kamerája 1/2,3 hüvelykes CMOS szenzorral van ellátva, amely másodpercenként 30 képkockát tud rögzíteni. Ezzel 4K videók készítésére alkalmas, az elkészült felvételek kiterjesztése MOV és MP4 lehet. Az állóképek maximális felbontása 12 megapixel, több képfelvételi mód közül választhatunk: egyetlen kép, sorozatfelvétel, időközi, nagy dinamikatartományú, panoráma. A kamera élőképét 720p felbontásban a DJI GO applikációban, a csatlakoztatott okos készüléken keresztül követhetjük. [17]

MicroSD-kártyahely

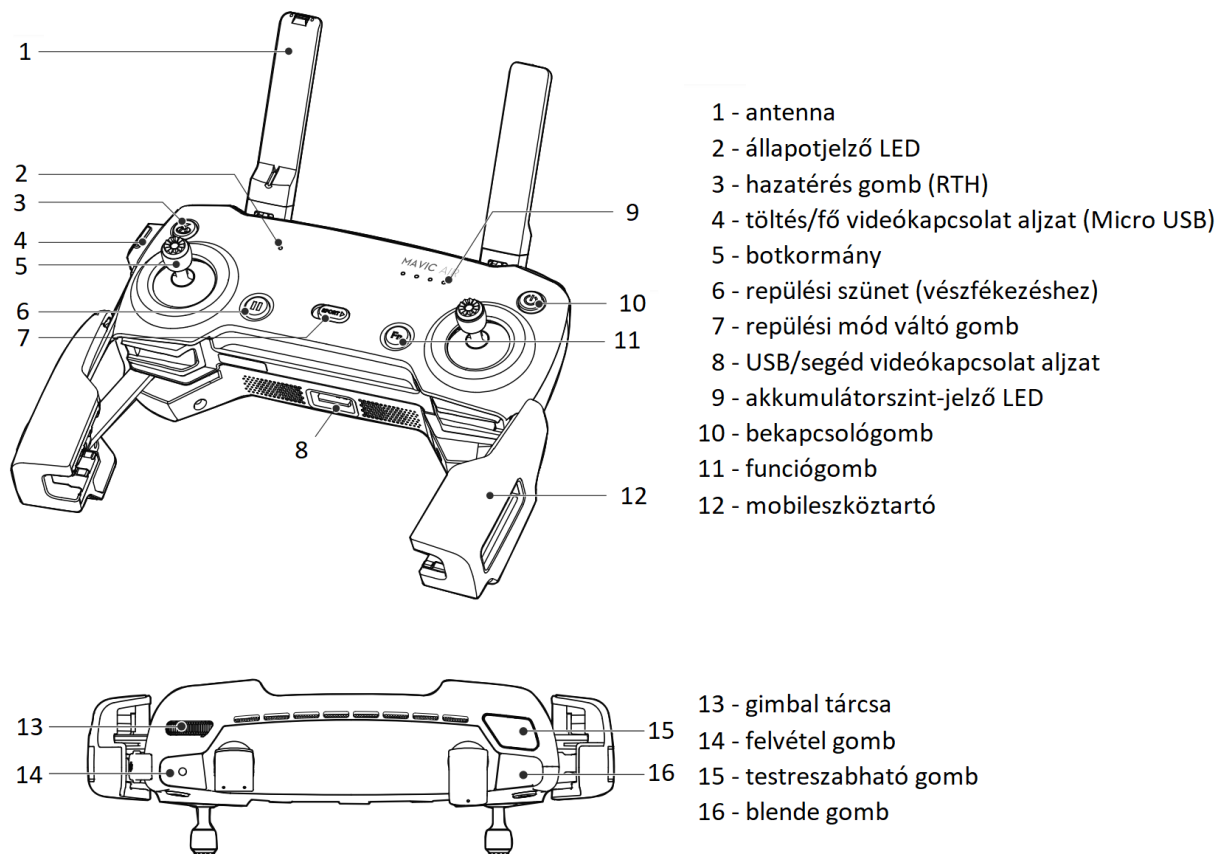
A Mavic Air belső tárhelye 8 GB, de az eszköz támogatja a tárhely bővítését microSD-kártyával. Az írási és olvasási sebesség gyorsasága miatt ehhez legalább UHS-1-es osztályú kártya szükséges. [17]

Távírányító

A távírányító Wi-Fi technológián keresztül létesít kapcsolatot a Mavic Air-rel. Az irányításért felelős rendszer és az élőkép jeltovábbítása alapértelmezetten 2,4 GHz-en folyik, de az eszköz képes az 5,8 GHz-es adatátvitelre is. A távírányító akkumulátorról működik, kapacitása 2970 mAh, ami 3 órás üzemidőt biztosít. Hasonlóan az UAV-hez ezt az eszközt is a könnyed hordozhatóság jegyében tervezték, az adatátvitelt biztosító antennák és a mobil eszköztartó fülek behajthatóak, a tájolást és mozgást segítő botkormányok levehetőek, így az eszköz könnyebben tárolható. A bekapcsoló gomb egyszeri megnyomásával az akkumulátor szint ellenőrizhető, újbóli megnyomás és

nyomva tartás után a távirányító bekapcsol. A távirányító és az UAV a DJI GO applikáción keresztül kapcsolható össze. A folyamat végeztével a távirányító állapotjelző LED-je folyamatos zöld jelzést ad. [17]

A botkormányok között kapott helyet a repülési mód kapcsolója, a bal oldali botkormány mellett az RHT-gomb található, melyet lenyomva tartva a hazatérési folyamat indítható el. A távirányító hátoldalán foglal helyet a gimbal tárcsa, mellyel a kamera dőlése szabályozható, e fölött található a felvétel gomb, amivel videót rögzíthetünk, a blende gombbal fénykép, vagy sorozatfelvétel készíthető. [17]



6. ábra: Mavic Air távirányító [17]

4.2. Reptetés

A reptetésre 2021. október 13-án a délelőtti órákban került sor. A felszállást megelőzően néhány lépésben ellenőrizni kell az eszközöket:

- töltöttségi szintek megfelelő állapota (UAV, távirányító, okos eszköz),
- az UAV karjai és futóművei teljesen kihajtott helyzetben vannak,
- a légcsavarok biztonságosan rögzítésre kerültek,
- a gimbal, a kamera és a motorok optimálisan működnek,
- az érzékelők és a kamera lencséje tiszta,
- az UAV csatlakozott-e az applikációhoz.

Az ellenőrző lista befejeztével az első használatbavétel alkalmával érdemes a DJI GO applikációban a repülő szimulátor alkalmazást lefuttatni. Ennek segítségével elsajátíthatók az alapvető repülési technikák, a biztonságos használathoz szükséges szabályok. A repülés során az érvényben lévő törvényeket és rendeleteket figyelembe kell venni. A polgári felhasználású pilóta nélküli légi járműveket biztonsági okokból előre szabályozzák, hogy bizonyos repülési határértékeket ne léphessenek túl. Ilyenek a magassági- és távolsági maximum értékek és a tiltott zónák.

A repülés végrehajtásakor figyelembe kell venni a környezeti követelményeket is:

- ködös, esős, havas időben az UAV használata nem javasolt. A 10 m/s-ot meghaladó szeles időben szintén kerülni kell a használatot,
- vízfelületeket, nagyfeszültségű villanyvezetékeket, fákat és egyéb akadályokat szintén kerülni kell. A magasabb épületek, nagyobb méretű fémszerkezetű építmények zavarólag hathatnak a fedélzeti iránytűre, akadályozhatják a GPS működését,
- a hőmérséklet és a tengerszint feletti magasság kihatással lehetnek az akkumulátorok teljesítményére. [17]

4.3. A felvételek készítése

Az UAV-vel rögzített képek az ösküi evangélikus templom belső teréről készültek. A reptetést konzulenseimre bíztam, mivel bár irányítottam már ilyen eszközt, azt kizárólag nyílt térben tettem. A képek elkészítéséhez három eszközt használtunk:

- DJI Mavic Air UAV,
- távirányító,
- okostelefon.

A repülés célja a belső tér teljes rögzítése volt, részletgazdagságából adódóan a legtöbb felvételen az oltár és a szószék környezete köszön vissza.

Az oltár előtti közlekedő részen egymástól nagyságrendileg 1 méteres távolságra öt pont került kijelölésre. Ezen pontok felett, átlagosan 1,5 méteres magasságból indulva, körülbelül fél-fél méterenként készült egy-egy kép. A kamera iránya a képek készítése közben változatlan volt.

A padsorok közötti közlekedő útról mindkét oldalsó falra és karzatra merőlegesen, ám az előbbiektől eltérve nagyobb vertikális távolságot alkalmazva valamivel kevesebb fotót rögzített az UAV. Ezt követően a toronytér felé nézve, az orgona irányába is felmérésre került a templom.

A műholdas helymeghatározó rendszerek feltétele a megfelelő jelerősség, ez biztosítja, hogy a Mavic Air repülés közben stabilan képes tartani pozícióját. A mérést nehezítette, hogy a gyenge GNSS jel miatt a függőleges mozgás során, ha minimálisan is, de néha vízszintes irányban is elmozdult a gép. További nehézség volt, hogy a feladat végrehajtásához egy akkumulátor állt rendelkezésünkre, mely a gyártó adatai szerint 21, levegőben eltöltött percet garantál. Éppen ezért is volt szükségem gyakorlott pilótákra, hogy limitidőn belül elkészüljön a kellő mennyiségű kép. Végül 30 állásban, összesen 170 képet rögzített az eszköz.

4.4. A digitális képet terhelő hibák

A digitális kép tekinthető úgy, mint egy kétdimenziós mátrix. Elemei egy $\Delta\xi \cdot \Delta\eta$ felületet képeznek, amit pixelnek nevezünk. Helyük ismert, a mátrixok jelöléséhez hasonlóan sor- és oszlop indexszel adjuk meg. Értékük 0 és 255 közé eső egész szám, szürkeségi fokozata pedig bináris kódolással tárolt. Színes képek rögzítésekor ez a szürkeségi fokozat több spektrális zónában is rögzítésre kerül. [16]

A digitális eszközökkel készült képeket is terhelik azok a hibák, melyek a centrális vetítés és az optikai leképezés során előfordulnak. További hibaforrásként kell tekinteni a digitális rögzítők érzékeléséből és a szkennelés sajátásaiból eredő torzulásokra. Ilyen hibák: [16]

- a képalkotó sugárnyaláb torzulása, mely eredhet a lencse elrajzolásából, de okozhatja refrakció is,
- a tárgysíknak a síktól való különbsége, ezt okozhatja a földgömbület, de gyakoribb az eltérő magasságokból eredő, nem megfelelő helyen történő leképződés,
- a perspektív torzulás akkor jelentkezik, amikor a leképződés nem egymással párhuzamos síkok mentén megy végbe,
- a szenzoron belül az érzékelő felületen az egyes elemek szabálytalanul helyezkednek el,
- szkennelésnél a letapogatás sebessége nincs összhangban az érzékelő méretével (eredménye: affín torzulás).

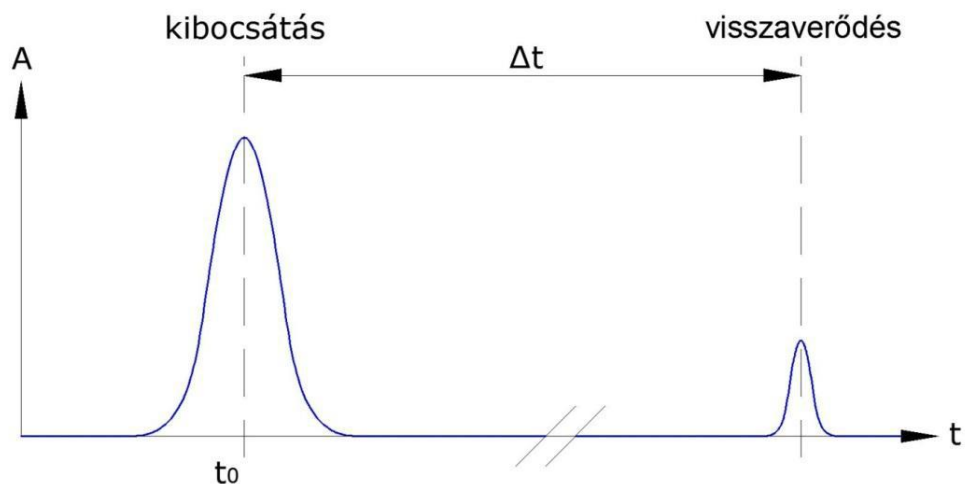
4.5. A lézerszkennelés folyamata

A távérzékelésen belül egy viszonylag új eljárást képvisel a földi lézerszkennelés, mely az 1980-as évek végén jelent meg. A technológiai előrehaladásnak köszönhetően ez a módszer egyre több szakterületen jelenik meg, egyre nagyobb teret hódít magának, hatékonyan alkalmazva az általa nyújtott lehetőségeket. A hazai szakirodalom leggyakrabban az angol elnevezés kezdőbetűiből összeálló TLS (terrestrial laser scanning) mozaikszót használja a földi lézerszkennelés említésekor. A mérés a többi távérzékelési módszerhez hasonlóan közvetett módon, lézersugár alkalmazásával valósul meg. Ez az aktív távérzékelési eljárás a lézeres távmérés elvén alapszik, ugyanakkor a pontok mérése jóval nagyobb sebességgel zajlik, mint a geodéziai mérőállomások esetében. [18]

Működési elve a következő: a szkennertől kibocsátott lézersugár visszaverődik a felmérendő objektum felületéről a műszerbe. A visszaverő felületeken pontok keletkeznek, melyek a felbontáshoz illeszkedő rácsszerkezetben egy pontfelhőt képeznek. A felmérés céljától függően érdemes megválasztani a mérés felbontását és a pontfelhő sűrűségét is, mivel a nagy adatmennyiség akár hátráltató tényezőt is jelenthet a feldolgozás során. A műszerbe visszaérkező lézersugár intenzitásértékkel bír, amely további információt hordoz a vizsgált területről továbbá annak környezetéről. Az intenzitásérték egy hányados, amely a kibocsátott- és a műszerbe visszaérkező lézersugár arányszáma. Értéke több tényezőtől függ, ilyen lehet pl. az objektum anyaga, színe. Egy világosabb felületről a lézersugár nagyobb intenzitásértékkel verődik vissza, mint egy sötétebből, mivel itt az elnyelődés mértéke kisebb. A geodéziai mérőállomásokhoz hasonló a lézerszkennertől adatnyerése. Rögzíti a kibocsátott fény irányát, valamint a visszaverődési pont és a műszer közti távolságot, majd ezeket felhasználva saját koordináta rendszerében számítja a pontok térbeli koordinátáit, továbbá tárolja azokat. Az utófeldolgozás során természetesen más rendszerbe is beilleszthető a pontfelhő. [18]

A távolságmérés két módszer szerint történik: időméréssel vagy fázisméréssel. A mérés elvégzéséhez használt Leica P40 az időmérési módszeren alapuló szkennerek közé tartozik, ezért részletesebben erre térnék ki.

A külföldi szakirodalmak ToF rövidítést használnak az ilyen típusú műszerekre, mely a Time of Flight angol elnevezésből ered. A lézer egy gerjesztett elektromágneses hullám, a műszer a működése során egy nagyenergiájú impulzust vagy impulzussorozatot bocsájt ki, a visszatérő jeleket a vevőegység rögzíti. A kibocsátás, valamint a visszaérkezés között eltelt idő megméréseivel az időméréses távmérés alapképletének segítségével a távolság számítható. $2D = v * t_{futási\ idő}$, ahol D a keresett távolság, v a lézer ismert terjedési sebessége a közegben, t pedig a futási idő, azaz a kibocsátás és visszaérkezés között eltelt idő. Ebből adódik: $D = \frac{v}{2} * t_{futási\ idő}$. A futási idő pontos meghatározásához az impulzusfüggvénynek azon pontjait kell megkeresni, melyek a legkönnyebben azonosíthatók, melyekkel a kibocsátás és a visszaérkezés időpontját is egyértelműen azonosítani tudjuk. Ezek a pontok az impulzusfüggvény maximumai, a közöttük eltelt idő a keresett mennyiség. Így akár néhány centiméteres távolságok is meghatározhatók, a mérés feldolgozása a teljes impulzus visszatérte után kezdődik el. [19] Ezen módszer előnye, hogy a távolságmérés megbízhatósága nem függ a mérendő távolságtól, a koncentrált energiájú impulzussal pedig akár több száz méterre is lehet mérni.



7. ábra: Az időméréses távolságmérés módszere [18]

Méréseinket – legyen az akár lézerszkennelés – minden esetben hibák terhelik. Ezek több tényezőtől függenek, mint például a műszerhibák, külső körülmények vagy a szkennelt objektum hibái. A TLS hibaforrásai négy csoportba sorolhatók: [20]

A műszert véletlen és szabályos hibák terhelik. Előbbiek a távolság- és szögmérésre vannak hatással, utóbbiak az idő- és hőmérsékletmérő rendszerek pontatlanságából erednek, amivel az elektronikus távolságmérést befolyásolhatják. [20]

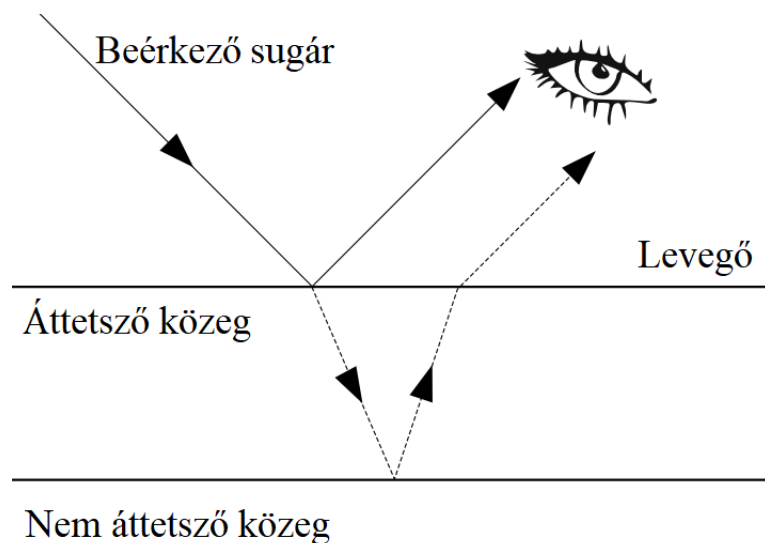
A lézersugár szélessége alapvető hibaforrás, mely a pontfelhő helyzetét és eredményét lényegesen meghatározza. A lézersugár szélességének növekedésével nőhet a sugár által bejárt távolság. [20]

Szintén a lézerhez köthető hibaforrás a többutas terjedés, mivel geometriai értelemben a lézer nem pontszerű. Mikor eléri a vizsgált objektumot, az éleknél kétfelé osztódhat. Ekkor két irányból érkezik vissza a műszerbe a sugár. Az egyik valóban az irányozni kívánt pontról, a másik viszont egy közeli, szomszédos pontról, mely a hossz mérésben és a pont helyzetében is hibát eredményezhet. [20]

A szögmérés pontatlanságai a mozgó eszközök, így a forgó tükör hibáiból erednek. Ezen hibák közeli tárgyakra történő kalibráló mérésekkel kimutathatók. A tengelyhibák a hagyományos geodéziai mérőállomásoknál megfigyelhető hibákkal megegyeznek: [20]

- állótengely hibái,
- fekvőtengely hibái,
- kollimáció tengelyének a hibái, azaz a szkennertükör középpontja és a lézersugár középpontja nem esik egybe.

A szkennelt objektum is alapvetően meghatározza a mérés eredményét. A reflektancia, vagyis a visszaverő képesség nagymértékben meghatározza a visszatérő jel erősségét. A sötétebb felületek intenzitásértéke alacsonyabb, a világosabb felületekéénél. [20]



8. ábra: Többutas visszaverődés, (saját szerkesztés) [20]

Áttetsző anyagoknál a fénytörés miatt előfordulhat, hogy a beérkező lézersugár több helyről is visszaverődhet. [20]

A környezeti hatások főként a nagy távolságokat felölölő mérések esetén jelennek meg, ekkor az atmoszférikus tényezőket is figyelembe kell venni. A hőmérséklet hirtelen ingadozása, a páratartalom vagy a légnyomás hatással van a lézer működésére. [20]

A hőtágulás miatt a műszerállvány, de maga a műszer is csekély mértékben elcsavarodhat. A mérést befolyásolhatja a letapogatott felület hőmérséklete is. [20]

Akár a természetes vagy mesterséges erős fényforrások is interferenciát okozhatnak a mérőjelben, ezzel hibás távolságértéket eredményezve. Ez a hibahatás szűrőkkel korrigálható. [20]

A műszer egy-egy állásponton a szkennelés közben akár hosszú percekig is eltartóan, folyamatos mozgást végez. A mérés közbeni vibráló mozgás hatására a szkennerek kis mértékben, de elmozdulhat helyéről. Így a pontosság csökkenhet. [20]

Az utolsó csoportot a mérési módszerekhez köthető hibák alkotják. Ez eredhet akár a nem megfelelő műszer kiválasztásából vagy éppen a rosszul megválasztott álláspontok helyéből. A felbontási beállítások, így a rosszul megválasztott pontsűrűség hatással lehet a mérési zajra és a mérési időre is. Továbbá a feldolgozás módszereiben is lehetnek esetleges hibaforrások. [20]

4.6. A Leica P40 bemutatása

A lézerszkennelést egy Leica P40 típusú műszerrel hajtottam végre, amit a Pannon Geodézia Kft. bocsátott rendelkezésemre. Tanulmányaim során még nem találkoztam ilyen műszerrel, ezért az eszköz kezelésében Lehoczky Máté volt segítségemre.

A svájci székhelyű Leica P40-es lézerszkennere több, mint öt évvel ezelőtt jelent meg a piacon. A műszer alapja egy 360 fokban forgatható fejegység, amelyhez tartozik a Canon EOS kamera és tükör. Ez utóbbi automatikusan választ az oszcilláló vagy forgó mozgás közül. A kamera felbontóképessége 4 megapixel, hibrid rendszer révén lehetőség van a valós idejű kép- és videó rögzítésre, továbbá teljes panorámakép rögzítésére is. A könnyebb pontra állás érdekében a műszer rendelkezik a mérőállomásokon is megszokott lézeres vetítővel, továbbá kéttengelyű kompenzátorral. A műszer menüje egyszerűen és logikusan felépített, magyar nyelven is elérhető, ezért használata némi gyakorlást követően könnyedén megtanulható. A színes kijelzős érintőképernyőt a szkennerekhez tartozó érintőceruzával lehet kezelni. A mérések során keletkező adatokat (mérési állományokat, fényképeket és mozgóképeket) a nagy tárolókapacitású (256 GB) merevlemezre rögzíti a szkennerek. Ezek kiolvasása ethernet, vezeték nélküli hálózat vagy USB porton keresztül adathordozóra történik. A tápellátást két lítiumion-akkumulátor nyújtja, mely folyamatos használat mellett – a gyártó adatai szerint – kültéren 5,5, míg beltérben (szobahőmérsékleten) 7,5 óra üzemidőt biztosít. Emellett a műszertalpon elhelyezett tápbemenettel az elektromos hálózatra is csatlakoztatható a műszer. A Leica P40 masszív felépítésű készülék, súlya a két akkumulátorral felszerelve meghaladja a 13 kilogrammot. [21]

Fizikai paraméterek	
Hosszúság	238 mm
Szélesség	358 mm
Magasság	395 mm
Tömeg	12,25 kg (akkumulátorok nélkül), 13,05 kg (akkumulátorokkal)
Pontosság	
Szkennelés megbízhatósága	1,2 mm + 10 ppm
Szögmérési megbízhatóság (vízszintes/magassági)	8"/8"
3D pozíció megbízhatóság	50 m-nél 3 mm, 100 m-nél 6 mm
Célkövetés	50 m-nél 2 mm
Kéttengelyű kompenzátor	felbontás: 1", pontosság 1,5"
Szkennelési sebesség	akár 1 000 000 pont/másodperc
Észlelés nyílásszöge	
Vízszintes	360°
Magassági	290°
Adattárolás	
SSD	256

1. táblázat: Leica P40 specifikáció [21]



9. ábra: Leica P40 lézerszkenner [21]

4.7. Szkennelés folyamata

A templom szkennelésére 2021. november 23-án, a déli órákban került sor. A műszerrel összesen 4 álláspontot létesítettünk, a teljes felmérés mintegy másfél órát vett igénybe.

Miután kiválasztottam az első álláspontot, amely az oldalajtó mellé esett, felállítottam a műszert. Az állótengelyt a szkennер szelencés libellájának segítségével függőlegessé igazítottam, majd bekapcsoltam azt. Első lépésként egy új projektet hoztam létre, ebbe a munkaállományba rögzítve a méréseket. A továbbiakban rögzítésre kerültek a szkennelés paraméterei, így a hatókör, a felbontás, és a felvételekre vonatkozó jellemzők. A felmérés helyszíne a kisebb méretű templomok körébe tartozik, így nagy felbontással dolgozhattam. A megfelelő mennyiségű természetes fénynek köszönhetően a fényerősségen nem kellett állítanom, közepes szinten hagytam.

Mindegyik állásponton teljes területre vonatkozó szkennelést választottam, ezzel a szkennер egy teljes 360 fokos kör mentén végezte el a méréseket az álláspontok körül. A többi állásponton az egyes mérések között nem állítottam jeltárcsákat. Mivel a Leica Cyclone feldolgozó program lehetővé teszi, hogy illesztőpontok elhelyezése nélkül, csupán vizuális interpretáció útján közös tárgypontok alapján végezzem el.

A mérés indításakor Scan+Image ikont választottam ki, így a műszer a mérés befejezése után képeket is készített. Egy-egy állásponton a teljes program 25-27 perc alatt futott le. Minden állásponton 274 darab kép készült. A szkennelés és a képkészítés idejére a mérendő területet elhagytam, illetve a műszer forgásával szinkronban mozogtam, hogy biztosan ne takarjak ki semmi részletet.

Miután minden állásponton végeztem a mérésekkel a műszer tárhelyéről egy adathordozóra mentettem a nyers mérési anyagot.

5. 3D MODELL KÉSZÍTÉSE AZ AGISOFT METASHAPE-BEN

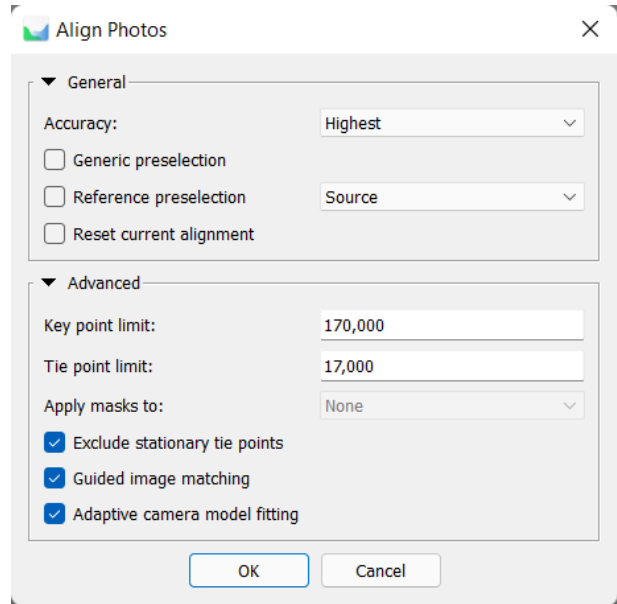
A modell megalkotásához az orosz Agisoft cég által fejlesztett Metashape programot használtam. Ez a fotogrammetriai alkalmazás korábban PhotoScan néven volt ismert. Használatával textúrált modellek, georeferált ortomozaikok, DSM/DTM modellek állíthatók elő fotók felhasználásával. A névváltoztatás ellenére a korábban megismert egyszerű felépítésű kezelőfelület megmaradt. Használata némi angoltudással és egy kis gyakorlással könnyedén elsajátítható. Előnye, hogy a program az egyes feladatrészeket automatikusan hajtja végre. A modellalkotás lépései egymást követik, a megfelelő sorrendben haladva kell a következő munkafolyamatot indítani. A felhasználónak a bemeneti adatok és paraméterek megadása után elég csak felügyelni a program futását. Hátránya, hogy erőforrásigénye nagy. A bonyolult számítási feladatok elvégzéséhez legalább 4 GB, vagy azt meghaladó RAM-ra és megfelelő grafikus feldolgozóegységgel bíró videokártyára van szükség. Esetemben a minimális rendszerkövetelmények éppen csak rendelkezésre álltak, némelyik munkafolyamat több óra alatt futott le.

5.1. A felvételek tájékozása

A program elindulása után egy üres munkaterület nyílik. A modelltér közepén egy navigációs gömb látható, melynek forgatásával az egész munkánk tetszőlegesen igazítható. A modelltér alatt, a Console menüpontban a hardverre vonatkozóan kapunk információkat, továbbá itt jelennek meg szöveges formában az egyes munkafolyamatok, az alkalmazott beállításokkal. Ez .txt formátumban is kimenthető további felhasználás céljából.

Első lépésként a képeket kell behívni a megnyitott üres munkaterületbe. Ezt megelőzően érdemes a fotókat átnézni, hogy biztosan ne legyen közöttük elmosódott vagy homályos, kiégett esetleg nagyon árnyékos. Célszerű végig futni a képek kontraszt és fényegyensúlyán is, ellenőrizve, hogy ezek nagyjából egyforma paraméterekkel bírnak. A későbbi hatékonyabb azonosíthatóság és a program által létrehozott textúra szempontjából ezek fontos lépések. A képeket a Workflow – Add Photos paranccsal lehet a Metashape-be importálni.

A behívott képeket ezt követően tájékozni kell. A Workflow – Align Photos menüpontban hajtható végre ez a művelet. A felugró ablakban több paraméter is állítható, én a pontosságra a legmagasabb Highest értéket választottam. Minél magasabb a minőség, annál több számítást végez a program, ezzel arányosan növekszik a ráfordított idő is. Pixelhibák minimalizálása érdekében a Keypoint limit-et 170 000-re, a Tiepoint limitet 17 000-re állítottam, amivel a hiba átlagos értéke 1,36 pixel lett.



10. ábra: A képek tájékozása

A program nem nyílt forráskódú, ezért csak feltételezni lehet, hogy más fotogrammetriai programhoz hasonlóan keresztkorrelációt használ a képek tájékozásakor a közös pontok azonosításához. Keresztkorreláció során a program a közös képrészeket keresi, a módszer során az egyik képen kiválaszt a rácspont helyét, majd azonosítja a vizsgált pixelt és a körülötte lévő képrészek pixeleit. A képrészlet 3*3 és 35*35 pixel méretű lehet, feltétele, hogy mindig páratlan számból álljon, ezzel garantálva, hogy a középső pixel biztosan azonosítható legyen. A Metashape kijelöli a keresési felületet, majd ezen belül illesztéssel próbálgatja a többi képet egymásra. A korrelációs együtthatóval (ρ) vizsgálja a program a képegyezést, melynek értéke -1 és 1 közé eshet. Amennyiben ρ értéke 0, a vizsgált képrészletek teljes mértékben különböznek, ha az értéke pontosan 1, tökéletes az egyezés a képrészletek között. Amennyiben a korrelációs együttható értéke egy előre definiált értéket elér (amely jellemzően 0,7), az illeszkedés elfogadható. [22]

Értéke az alábbi képlettel számítható:

$$\rho = \frac{\sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C (g_1(r, c) - \mu_1)(g_2(r, c) - \mu_2)}{\sqrt{\sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C (g_1(r, c) - \mu_1)^2 \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C (g_2(r, c) - \mu_2)^2}} \quad (1)$$

Ahol g_1 a célterületi pixel szürkeségi értéke, g_2 a keresési területen lévő pixel szürkeségi értéke, r és c sor- és oszlop indexek, μ_1 és μ_2 a szürkeségi értékek átlagai, R és C a mintaterület sor- és oszlopszáma. Azok a felületek, melyek homogének a képillesztés során rossz eredményeket szolgáltatnak, mivel nagy számban fordulnak elő azonos intenzitású pixelek. Ezt maszkolással lehet kiküszöbölni. [22]

A program a képek összeillesztésén túl külső és belső tájékozást is végez, ezzel a képek készítésének helyeit és a tájékozási elemeket kapjuk meg. A külső tájékozással egyúttal megkapjuk, hogy a kép- és tárgykoordináta-rendszerek egymáshoz képest milyen mértékben fordultak el. A külső tájékozás két részre bontható: relatív- és abszolút tájékozásra. Az alábbi táblázat a tájékozásokat foglalja össze:

Tájékozás	Kapcsolat	Paraméterek	Matematikai modell	Mérendő közös pontok
Belső	$u, v \rightarrow \xi, \eta$	Képenként 6 db $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$	Affin transzformáció	Keretjelek $n \geq 4$
Relatív	$\xi_1, \eta_1, \xi_2, \eta_2 \rightarrow X_M, Y_M, Z_M$	5 db $b_y, b_z, \varphi_2, \omega_2, \kappa_2$	Komplanár feltétel	Gruber pontok $n \geq 6$
Abszolút	$X_M, Y_M, Z_M \rightarrow X_G, Y_G, Z_G$	7 db $X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, \Phi, \Omega, K, m$	Térbeli hasonlósági transzformáció	Illesztőpontok $n \geq 3$
Kettős képkapcsolás	$\xi_1, \eta_1, \xi_2, \eta_2 \rightarrow X_G, Y_G, Z_G$	12 db $X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, \varphi_1, \omega_1, \kappa_1$ 1 $X_{02}, Y_{02}, Z_{02}, \varphi_2, \omega_2, \kappa_2$ 2	Kollineár egyenletek	Illesztőpontok, képenként $n \geq 4$

2. táblázat: Képtájékozások [22]

A belső tájékozással a mért pixelkoordináták segítségével határozhatjuk meg a képkoordinátákat, valamint visszaállíthatjuk a felvételezés vetítési sugarait, melyek együtt alkotják a sugárnyalábot. A relatív tájékozás során, a képeken megmért

képkoordinátákat egy közös modell koordináta-rendszerbe számítjuk át, ezt a későbbiekben az abszolút tájékozással lehet valamilyen geodéziai koordináta-rendszerbe transzformálni. Kettős képkcsoláskor a tájékozások végrehajtása legtöbbször sugárnyaláb kiegyenlítéssel történik. A tájékozások azért lényegesek, hogy a centrális vetítés alapegyenleteit fel lehessen írni. [22]

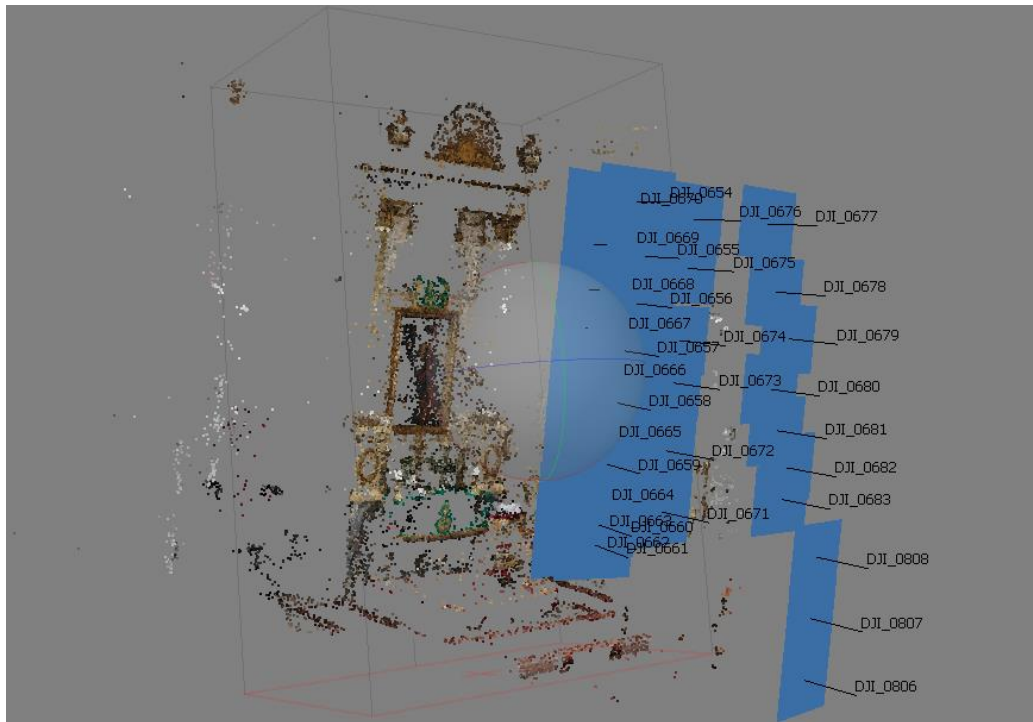
$$\xi = \xi_0 - c_k \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (2)$$

$$\eta = \eta_0 - c_k \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (3)$$

Ahol:

- ξ és η : a képfőpontra redukált képkoordináták,
- X_G, Y_G, Z_G : terepi koordináták,
- X_0, Y_0, Z_0 : vetítési centrum koordinátái,
- r_{ij} : irány koszinusz, ahol $r_{ij} = f(\varphi, \omega, \kappa)$,
- c_k : kameraállandó.

A tájékozás eredményeként egy ritka pontfelhő jött létre. A pontfelhő mellett a modell térben megjelenik még a képsíkok és tárgysíkok egymáshoz viszonyított helyzete a fényképezés pillanatában rögzített kameratengelyekkel. Láthatók a képek egymáshoz való viszonyai is. A folyamat olyan pontokat is generál, melyek a modellalkotáshoz nem feltétlenül szükségesek. Ezek a fölös pontok törölhetők, melynek hatására átláthatóbbá válik a munkaterület.



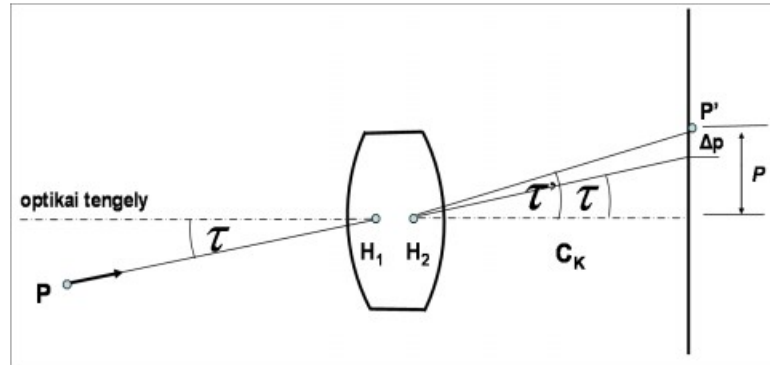
11. ábra: Ritka pontfelhő és a kameratengelyek

5.2. A kamera kalibrációja

A felmérés során használt DJI Mavic Air kamerája fotogrammetriai szempontból amatőr kamerának számít. Az amatőr kamerák belső adatai nem ismertek, ezért a felvételek torzulásai közvetlenül nem szüntethetők meg. A belső adatok a kamera jellemzőire vonatkozó pontos adatokat adják meg, ilyen például a fókusz távolság, a lencsetorzítás vagy a pixel- és kép koordináták közötti kapcsolat.

A Metashape szoftver olyan kiegészítő modullal rendelkezik, amely képes maga elvégezni a kamera kalibrációját, meghatározva ezzel a belső adatokat, ezáltal biztosítva azt, hogy amatőr kamerák is használhatók legyenek fotogrammetriai célokra. Képegyeztetésnél a program kezdő adatokat számol, melyek az optimalizáláshoz szükségesek. Az egyik ilyen adat a fókusz távolság, ami milliméterben értelmezendő. Ha a fókusz távolság és az érzékelő pixelmérete ismert, akkor a fókusz távolság pixelméterben is kifejezhető. Ha ismertek ezek a belső adatok beviteljük őket a programba, így a számítások során ezzel fog számolni a Metashape. Ha a fókusz távolság ismeretlen, akkor az 50 milliméteres alapértéket veszi. A képegyeztetéssel egyidejűleg a program a kamera kalibrációs adatait is számítja.

A képtorzulások leggyakrabban az elrajzolás hibájából adódnak. Ekkor egy adott P pont irányból, az optikai tengellyel τ szöget bezáró fénysugár a kamera lencsésjén keresztülhaladva megtörik, és a bemeneti szögtől különböző τ' szöggel lép ki. Így a P pont Δp értékkel távolabb képződik le.



12. ábra: Az elrajzolás [23]

A torzulás megszüntetéséhez a Δp értékét kell meghatározni. Ez számítható a képpont és a főpont radiális távolságából, a kameraállandóból és a beesési szögből.

$$P = c_k * tg\tau + \Delta p \quad (4)$$

$$\Delta p = P - c_k * tg\tau \quad (5)$$

A centrális vetítés geometriájából adódik, hogy a főponttól egyforma távolságra eső pontokat azonos nagyságú hiba terheli, melyek a kép szélei felé nőnek. Ez azt jelenti, hogy az elrajzolás körszimmetrikus hibát eredményez az egész képre vonatkozóan.

A Metashape a kalibráció során a következő adatokat számítja:

- f_x, f_y : pixelben mért fókusztávolság x és y irányú összetevőkkel,
- c_x, c_y : a főpont koordinátái,
- b_1, b_2 : az affín transzformációt leíró adatok,
- k_1, k_2, k_3 : a radiális elrajzolás koeficiensei,
- p_1, p_2 : a tangenciális elrajzolás koeficiensei.

A tájékozáshoz a belső paramétereken túl a torzulások megszüntetéséhez az alábbi külső adatok is meghatározásra kerülnek:

- X, Y, Z – a pontok koordinátái a helyi rendszerben,
- u, v - a vetített pont koordinátái a kép koordináta-rendszerben,
- f - fókusztávolság,
- w, h - a kép pixelben vett szélessége és magassága.

A program egy korrelációs mátrixban, táblázatos formában is megjeleníti a kalibrálási paramétereket.

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	K1	K2	K3	P1	P2
F	2795.22	2.26806	1.00	-0.15	0.01	-0.90	0.52	-0.67	0.67	-0.29	-0.27
Cx	6.88701	0.359304		1.00	-0.00	0.21	-0.13	0.15	-0.15	0.47	0.05
Cy	-29.4631	0.312377			1.00	-0.07	-0.04	0.01	-0.01	0.06	0.48
B1	137.313	2.04423				1.00	-0.30	0.48	-0.49	0.18	0.35
K1	0.224471	0.000492236					1.00	-0.95	0.92	-0.36	-0.03
K2	-0.672806	0.00186933						1.00	-0.99	0.35	0.09
K3	0.488416	0.00198992							1.00	-0.34	-0.10
P1	0.000276211	3.93012e-05								1.00	0.07
P2	0.00167625	3.66967e-05									1.00

3. táblázat: Korrelációs mátrix

Azzal, hogy a program számítja a kamera elrajzolását, egyben meg is szünteti az általa okozott hibákat. Teljesen hibamentes geometriai modell nem írható fel, valamekkora leképezési hiba mindig terhelni fogja a kamerát.

5.3. A sűrített pontfelhő generálása

A következő lépés a sűrített pontfelhő generálása, mely már egy összetettebb képet nyújt a modelltől. A Workflow – Build Dense Cloud paranccsal indítható a folyamat. A felugró ablakban ismét ki kell választani a számítás minőségét, ezt Medium-nak választottam, ami egyben a pontfelhő sűrűségét is jelöli. A mélységszűrés 4 lehetősége:

- Disabled: azaz figyelmen kívül hagy,
- Mild: a legfinomabb szűrési mód, elsősorban közelről készült képeknél, tárgyak modellezésénél használható, ahol sok a részlet,
- Moderate: közepes tartomány, általános tereptárgyak modellezéséhez,
- Aggressive: leginkább függőleges irányú fényképeknél, ahol a részletesség elhanyagolható.

A sűrített pontfelhő generálását először Ultra High minőségben indítottam el, amit a hardverem már nem bírt el. A folyamat elindult, de némi gondolkodás után hibaüzenettel megszakadt. Ezt követően High-ra állítottam a beállítást, amely mellett bár lefutott a pontsűrítés, de a későbbi lépésekre vonatkozóan nem kaptam kielégítő végeredményt. Ezért maradt a Medium szint, a mélységszűrésre pedig Moderate-et választottam. A generálás viszonylag hamar, mintegy 7 perc alatt lefutott. A létrejött sűrített pontfelhő távolabbról szemlélve egybefüggő felületnek tűnik, közelebbről vizsgálva azonban látszik, hogy a pontok közötti tér még nincs kitöltve.

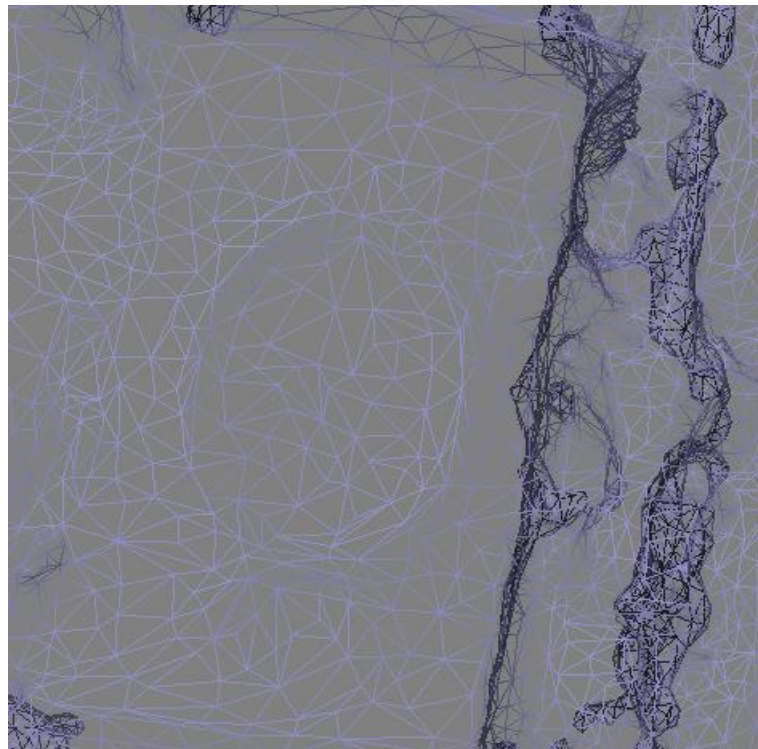
A generálás során itt is keletkezhetnek olyan pontok vagy pontfelhők, melyek nem kapcsolódnak a modellhez. A ritka pontfelhőhöz hasonlóan, itt is lehet törölni a felesleges pontokat, a megnövekedett pontszám miatt ez nagyobb odafigyelést igényel.



13. ábra: Sűrített pontfelhő, törlés előtt

5.4. A felületgenerálás

A következő lépés a sűrített pontok közötti üres részek kitöltése, azaz a felületgenerálás. Ez a Workflow – Build Mesh funkcióval indítható. A Metashape ekkor egy háromszögekből álló hálót generál a szomszédos pontok összekötésével. A Face count legördülő menüben állítható be a maximálisan létrehozandó poligonok száma, a legmagasabb High értéket választottam. A Custom beállítással lehetőség van tetszőleges poligonszámot megadni, kis érték esetén túlságosan nyers, durva hálót kapunk, magas poligonszám esetén vizualizációs problémák merülhetnek fel más szoftvereknél. Az Advanced fület lenyitva állítható az Interpolation, melyet bekapcsolva hagytam. Így a szoftver a lyukakat bezárta.



14. ábra: A felületmodell háromszöges hálója

5.5. A textúrázás

A modellkészítés zárólépése a textúrázás. Egymagában a felületmodell a további vizsgálatok elvégzéséhez még nem ad megfelelő eredményt. Textúrával kell ellátni, amit a program a felvételekből generál. Tulajdonképpen ráhúzva őket a felületmodellre. Minősége főként a felvételek minőségétől és felbontásától függ.



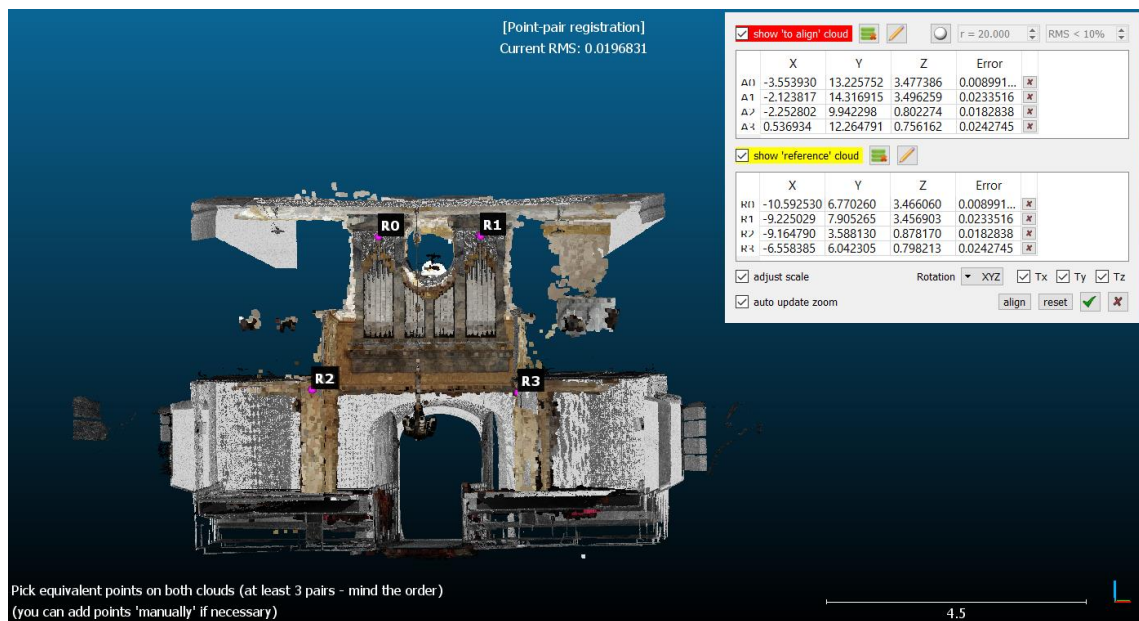
15. ábra: Textúrált modell az oltárról és a szószékről

6. PONTOSSÁGVIZSGÁLAT – CLOUDCOMPARE

A modellkészítés során létrejött sűrű pontfelhőt és a lézerszkennelésből származó pontfelhőt pontosságvizsgálat céljából a CloudCompare szoftverben hasonlítottam össze. Ehhez először az Agisoft Metashape-ből exportáltam a sűrű pontfelhőt E57 formátumban. A lézerszkennelés összeillesztett, nyers pontfelhőjét ugyancsak E57 kiterjesztésben exportáltam a Leica Cyclone-ból.

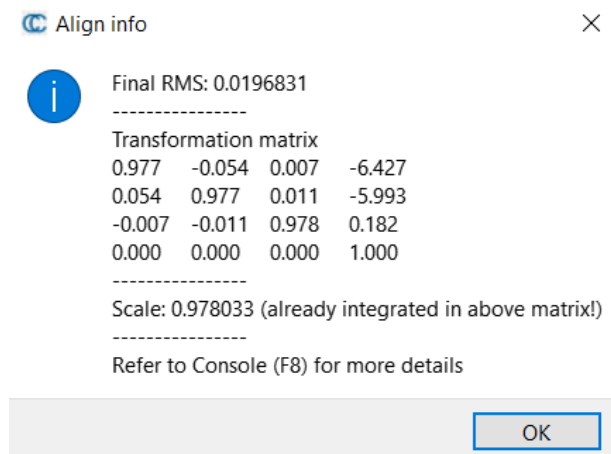
A CloudCompare ingyenesen hozzáférhető háromdimenziós pontfelhő feldolgozó- és szerkesztő szoftver, amely octree struktúrát használ. Nagyméretű pontfelhőket képes kezelni, több 10 vagy akár 100 millió pont feldolgozására is alkalmas. Eredetileg kifejezetten háromdimenziós pontfelhők és háromszöghálók összevetésére tervezték. Később általános pontfelhőszerkesztő programmá fejlesztették.

Első lépésként a két pontfelhőt hívtam be, ezeken az oltár rész a szószékkel, valamint az orgona és környezete szerepel. Az összehasonlíthatóság lefuttatásához a pontfelhőket egymáshoz kellett transzformálni. Ehhez elég mindössze 4 közös pont. A folyamatot ugyanakkor nehezítette, hogy a Metashape-ből származó pontfelhő sűrűsége elmaradt az ideálistól. Így egy-egy vizsgált pont esetén nagyobb a személyi hibából, valamint a mérési bizonytalanságból fakadó hiba. A nagyobb térbeli megbízhatóság végett több különböző síkban jelöltem ki illesztőpontokat, ahogy az alábbi ábrán is látszik az orgona részén.



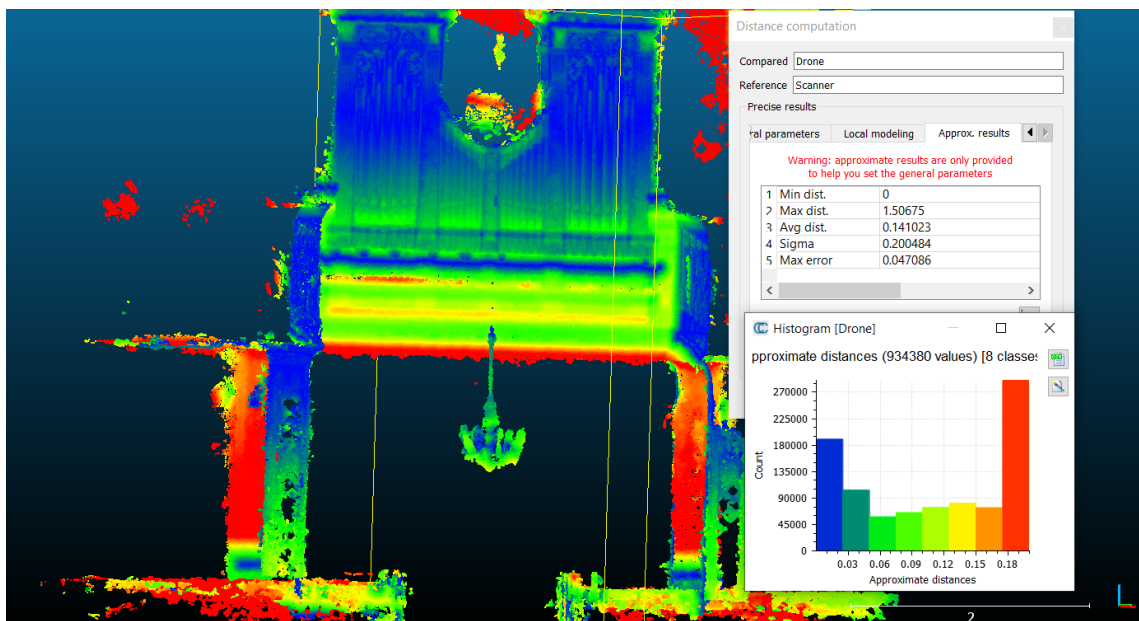
16. ábra: Az orgona transzformálása

Négy illesztőpont felhasználásával a transzformáció pontossága 2 centiméterre adódott. Ez az eltérés egyfelől eredhet a vizuális azonosításból vagy a pontfelhők pontosságából is. A 17. ábrán a „Final RMS” mutatja a négyzetes középhiba értékét méterben.



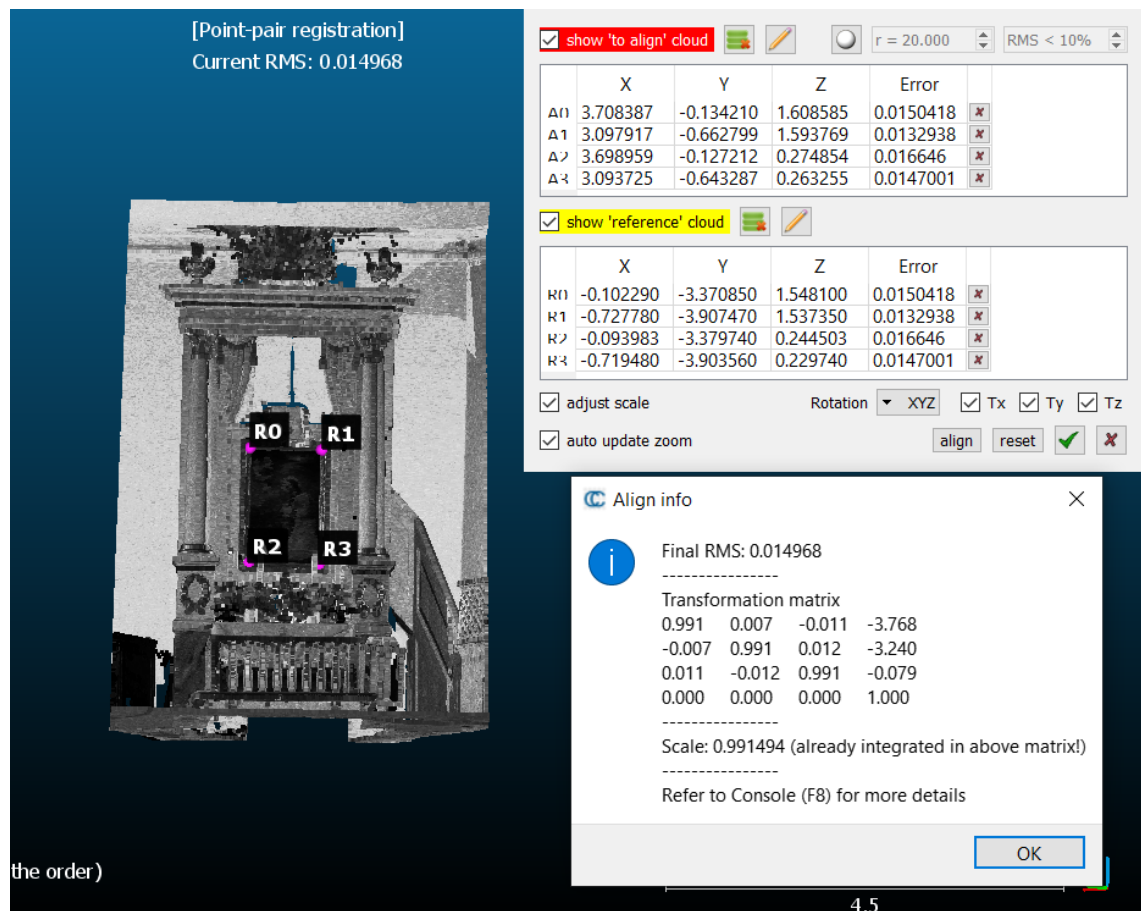
17. ábra: Az illesztés pontossága

Megállapítható, hogy az eltérések mértéke a fotogrammetriai szempontból jó átfedéssel és az előmetszéshez optimálisabb szöget bezáró képekkel lefedett területeken a pontfelhő pontosabb. A hisztogramon ezek kék és zöld színnel jelennek meg. Ezzel szemben a takartabb vagy élesebb szöget bezáró képeknél az eltérés mértéke is megnő, ezek a piros színnel megjelenő részek (a modell szempontjából ezek el is hagyhatóak). A nagyobb eltérések az éleknél, objektumok határoló felületeinél mutatkoznak, pl. a lámpa külső peremén.



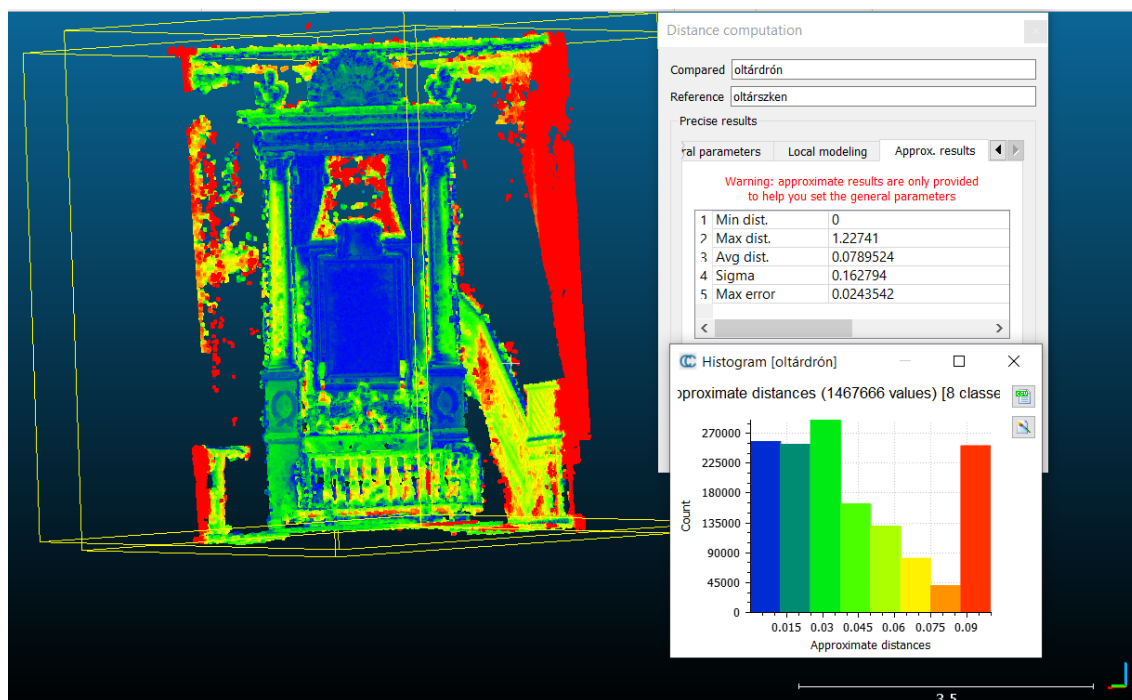
18. ábra: A pontfelhők közötti eltérés

Az oltár és a szószék kapcsán az azonosíthatóság jobb volt, mint az orgonánál. Az illesztés pontossága is jobb lett, 1.5 centiméter.



19. ábra: Az oltár és szószék transzformálása, az illesztés pontossága

A sík felületeknél, így a képnél, valamint az oszlopok talpzatánál látszik, hogy a pontosság kifogástalan, a korlátoknál, ívesebb felületeknél a kisebb képátfedés és a rosszabb geometria miatt nagyobb a hiba.



20. ábra: A pontfelhők közötti eltérés

7. MŰSZAKI LEÍRÁS

A dolgozat célkitűzése egy háromdimenziós modell létrehozása volt UAV felvételek felhasználásával az ösküi evangélikus templombelsőről. A feladat megoldását az alábbi szakaszokra bontottam:

- adatgyűjtés,
- 3D modell építése,
- pontosságvizsgálat.

Az adatgyűjtés két külön terepi napot vett igénybe. 2021 októberében a repülést, novemberben a lézerszkennelést hajtottam végre.

Az adatgyűjtést követően kezdődhetett a feldolgozás, amit a felvételek kiválogatásával kezdtem. Az oltártérre és az orgonára koncentrálni, azokat a képeket választottam ki, melyek megfelelően élesek, elmosódás mentesek voltak. A modellépítés első lépéseként az Agisoft Metashape-be behívtam a képeket, és tájékoztam őket. Ez volt a legidőigényesebb munkarész, közel 3 és fél órát vett igénybe. Eredményül a 11. ábrán látható ritka pontfelhőt kaptam. A jobb átláthatóság és kezelhetőség miatt a felesleges pontokat töröltem. Második lépésként sűrített pontfelhőt generáltam, ez látható a 13.

ábrán. A generálás végeredményén már jól felismerhető az oltár sziluettje, főként a sík felületeknél. A munkafolyamatot a felületgenerálással folytattam, aminek alapját az előző lépésben készített sűrített pontfelhő képezte. A szoftver a szomszédos pontok összekötésével háromszög alakú poligonokat hozott létre, melyek összességében egy hálót alkotnak. Az egyik oszlop tartópillére vehető ki a 14. ábrán látható kivágaton. A modellkészítés utolsó lépése a textúra ráhúzása volt a felületmodellre. Ezt az UAV felvételeiből generálja a program. Végeredményként ez látható a 15. ábrán.

A pontosságvizsgálathoz először a lézerszkennerek nyers mérési adatait kellett feldolgozni, majd az egyes álláspontokat egy állományba illeszteni. Ehhez a Leica Cyclone programot használtam. Az összehasonlításhoz E57 fájlokat exportáltam, amiket a CloudCompare programba hívtam be. Az oltárra és az orgonára is készült összevetés, amihez előbb a pontfelhőket egymáshoz kellett transzformálni. Az illesztéshez kiválasztott pontok a 16. és 19. ábrán láthatók. A középhiba értéke az orgona esetében 2 centiméterre, az oltár esetében 1,5 centiméterre adódott, amit a rendelkezésemre álló eszközök figyelembevételével elfogadhatónak véltem.

A dolgozat készítése során számos értékes tapasztalattal gazdagodtam. Új felmérési módszereket ismertem meg, ezekhez kapcsolódóan pedig, eddig ismeretlen szoftverekbe is betekintést kaptam. Meglátásom szerint az ilyen típusú munkák esetén, ahol UAV-val készített fotókkal történik a modellezés a legnagyobb kihívást maga a repülés jelenti. Beltérben különösen nagy felelősség hárul a pilótára, mivel ilyen helyzetben önálló helymeghatározásra és fékezésre az eszköz magától nem képes. Az anyagi károkozás elkerülése végett ezért bíztam az UAV irányítását tapasztalt konzulenseimre. Kültéri munkáknál meglátásom szerint hatékonyabban alkalmazható ez a technika (bár itt is előfordulhatnak akadályok pl. vezetékek, fa, épületek).

A fotókkal történő modellezés pontosságát, az előálló végtermék minőségét alapvetően meghatározza a képek felbontása, geometriai tulajdonsága. A geometriai tulajdonságoknál a képek torzulását és a felvételek egymáshoz viszonyított helyzetét kell szem előtt tartani. Előbbi esetében az Agisoft Metashape nagy pontossággal jár el, s automatikusan javítja azokat. A felvételi elrendezésnél ismét a pilóta képességei számítanak, az ő szem-kéz koordinációján múlik, hogy megfelelő átfedésben és lehetőleg egyenlő eloszlásban készüljenek felvételek a tereptárgyakról. A felvételkedészítés

menyiségét döntően az UAV üzemideje határozza meg. Esetemben egy akkumulátor állt rendelkezésre, amely kb. 21 perc repülési időt biztosított. Az energiaforrás merülése miatt a karzatokról és a padozatról csak kis átfedésben készültek képek. Homogenitásuk miatt a szoftver nem igazán tudott megbirkózni a modellbe illesztésükkel, néhány képet egyáltalán nem sikerült tájékoznia.

A hasonló felméréseket általában lézerszkennerral végzik, a pontosság ellenőrzésére ezért esett választásom erre az adatgyűjtő módszerre. A lézerszkennerek és az UAV-s felvételezésnek egyaránt vannak előnyei és hátrányai. Az UAV egyértelmű előnye, hogy a felvételek tetszőleges magasságból készíthetők, ezzel a nehezebben hozzáférhető felmérendő részek is könnyedén elérhetők. Ezzel szemben a szkennerek magassága a műszerállvány függvényében változtatható. Az UAV hátránya, hogy beltérben az irányítása nagyobb koncentrációt igényel, fennáll a veszélye egy esetleges lezuhanásnak, károkozásnak. Ugyanakkor az anyagi ráfordítás szempontjából az UAV pénztárcabarátabb. Pár százezer forintos ráfordítással megfelelő minőségű felvételeket rögzítő eszköz vásárolható, míg egy lézerszkennerek ára a tíz millió forintot is meghaladhatja.

8. ÖSSZEGZÉS

A szakdolgozatom témakörének kiválasztására 2020 őszén került sor, amit a műemlék kiválasztása követett. Személyes kötődéseim révén a várpalotai és az ösküi evangélikus templomok merültek fel bennem lehetséges helyszínekként. Szem előtt tartva a repüléssel járó kockázatokat, választásom az utóbbi templomra esett.

A feladat első részeként a felvételek készültek el egy DJI Mavic Air UAV-vel. A végrehajtásban konzulenseim segítségére támaszkodtam, Dr. habil Jancsó Tamás Tanár Úr irányította az eszközt, míg Dr. Udvardy Péter Tanár Úr a reptetés megtervezésében és az UAV folyamatos szemmel tartásában vett részt. A felvételezés a templom belső terének rögzítésére irányult, külön koncentrálni az oltárra és a szószékre, de az orgonáról, a karzatokról és a padozatról is készültek képek, összesen 170 darab. A műveletek végrehajtása során probléma nem merült fel.

A feladat második részeként a templom szkennelésére került sor egy Leica P40 lézerszkennerral. Az eszköz kezelésében Lehoczky Máté földmérő segített. Összesen négy állásponton, teljes területre vonatkozóan végeztem a mérést. A pontfelhőket a Leica Cyclone feldolgozó programban vizuális módon, közös tárgyponatok alapján illesztettem össze.

A háromdimenziós modellt az Agisoft Metashape programmal készítettem el. A szoftver az UAV által rögzített képeket használta fel a modell megalkotásához. Az egyes műveletek meghatározott sorrendben követték egymást, így állt elő a modell. A képeket először tájékoztam, amivel létrejött egy ritka pontfelhő. Ezt sűrítettem, majd felületet generáltam. Végezetül a felülethálóra textúrát húzott a szoftver.

A modellalkotás és a szkennelés során létrejött pontfelhőket pontosságvizsgálat céljából a CloudCompare programban vettem össze. Az oltárról és a szószékről készített modell megbízhatósága 1,5 cm körüli lett. Az orgonáról is készült egy modell, amelynek pontossága valamivel rosszabb, 2 cm közeli. Úgy gondolom, ezek az értékek kielégítik a módszerrel szemben támasztott pontossági elvárásaimat. A rendelkezésemre álló hardver tekintetében a modellezést sikeresnek tekinthetem, ez az technológia alkalmas lehet az épületek állapotfelmérésére, vizsgálatára.

9. SUMMARY

During fall of 2020 I have chosen the main aspect of my thesis, which was followed by the monument selection. Due to personal reasons and bondings the Lutheran Church of Várpalota and Öskü presented themselves as the main potential venues. Attentively to the flying relevant risks the latter monument, Öskü Lutheran Church was chosen.

As the first significant step of this task, recordings were taken by the means of a DJI Mavic Air UAV. My consultant supported me during execution: Dr. habil Tamás Jancsó controlled the device, while Dr. Péter Udvardy assisted on UAV constant monitoring and planning the procedure of flying. Aim of recording was to capture the interiors of church with special focus on the altar and pulpit. However the organ, the galleries and the floor were also recorded in altogether 170 images. No deviation were experienced during the procedures execution.

In regards of second part of the task, church was scanned with a Leica P40 laserscanner. Mr. Máté Lehoczky land-surveyor supported me with device handling. All in all four stands were set, measurement was performed referring to full area. Point clouds were matched based on common object points with Leica Cyclone processing program using visual method.

3D model was made by Agisoft Metashape program. Images recorded by UAV were used for model creation. Individual process steps had been following each other one-by-one, that is how the model was generated. With compassing the images first, rare point cloud was supervised. After codensing them, I generated a surface. At last, texture was pulled over on the surface web.

I compared the cloudpoints emerged during modelling and scanning by CloudCompare program with the purpose of accuracy examination. Accuracy of the models about altar and pulpit were approximately 1,5 cm. A model was also created about the organ had a somewhat worse accuracy of around 2 cm.

In my judgement, the results are definitely met with the accuracy requirements related to this methodology. From the viewpoint of available hardware, the modelling activity can be considered successful, the technology could be also applicable to condition surveys and studies of buildings and monuments.

10. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] ÖSKÜ KÖZSÉG TÖRTÉNETE, <https://osku.hu/index.php?p=tortenelem>
(utolsó letöltés: 2021. 12. 13.)
- [2] AZ ÖSKÜI EVANGÉLIKUS EGYHÁZ TÖRTÉNETE,
<https://osku.lutheran.hu/2tortenet> (utolsó letöltés: 2021. 12. 13.)
- [3] ÖSKÜI EVANGÉLIKUS EGYHÁZKÖZSÉG,
<http://www.szombathely-lutheran.hu/egyhaztortenet/egyhazkozseg0ce8-100.html?page=0,0> (utolsó letöltés: 2021. 12. 13.)
- [4] BALÁZSIK V. 2011: Fotogrammetria, 1. A távérzékelés fogalma, a fotogrammetria és a távérzékelés kapcsolata – Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar
- [5] ENGLER P. 2011: Fotogrammetria, 2. A fotogrammetria geometriai és matematikai alapjai – Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar
- [6] BALÁZSIK V. 2011: Fotogrammetria, 15. A fotogrammetria speciális alkalmazási lehetőségei – Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar
- [7] FEHÉR A. 2014: Top art technológiai megoldások a műemlékvédelemben, építészetben, https://www.mensor3d.com/wp-content/uploads/Muzeum_Digit_Web.pdf
(utolsó letöltés: 2021. 12. 13.)
- [8] DR. JANCsó T. 2011: Fotogrammetria 12, Digitális fotogrammetria – Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar
- [9] POKROVENSZKI K. – VÁGVÖLGYI B. – TÓTH Z. 2016: A csókakői vár feltárása során alkalmazott 3D fotogrammetriai módszerek gyakorlati tapasztalatai – Magyar Régészet online magazin
- [10] MOLNÁR L. – DR. VÁRADY K. 2012: CAD Tankönyv – Geometriai modellezés
- [11] LEHOCZKY M. 2019: Az ösküi kerektemplom 3D modellje
https://sketchfab.com/3d-models/rotunda-4a50129eb15d445bb87e0afbc61a8595?utm_medium=embed&utm_source=website&utm_campaign=share-popup (utolsó letöltés: 2021. 12. 13.)
- [12] SÁNDOR ZS. – BOROS P. 2017: Pilóta nélküli légi járművek okozta kihívások a légiforgalmi irányításban – Közlekedéstudományi Szemle
- [13] PALIK M. – RESTÁS Á. 2014: A pilóta nélküli légi járművek alkalmazásának lehetőségei az árvízi védekezésben – Repüléstudományi Közlemények

- [14] BAKÓ G. 2015: UAV és RPAS technológia a légi távérzékelésben – Interspect Csoport
- [15] HAJTMAN Z. 2017: A drónok felhasználásának lehetőségei a földhivatali osztályoknál
- [16] BALÁZSIK V. 2011: Fotogrammetria, 4. Mérőfénykép fogalma, jellemzői, mérőfénykép torzulások – Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar
- [17] DJI MAVIC AIR USER MANUAL V1.0,
<https://dl.djicdn.com/downloads/Mavic%20Air/Mavic%20Air%20User%20Manual%20v1.0.pdf> (utolsó letöltés: 2021. 12. 13.)
- [18] DR. LOVAS T. – DR. BERÉNYI A. – DR. BARSÍ Á. 2012: Lézerszkennelés, BME Építőmérnöki Kar Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék
- [19] TARSOLY P. 2015: Geodézia II – Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar Geodézia Tanszék
- [20] C. COȘARCĂ – A. JOCEA – A. SAVU 2011: Analysis of error sources in Terrestrial Laser Scanning
http://revcad.uab.ro/upload/18_144_Paper11_RevCAD09_2009.pdf (utolsó letöltés: 2021. 12. 13.)
- [21] LEICA SCANSTATION P40/P30 USER MANUAL
<https://surveyequipment.com/assets/index/download/id/735/>
<https://surveyequipment.com/assets/index/download/id/457/>
(utolsó letöltések: 2021. 12. 13.)
- [22] DR. JANCsó T. 2017: Digitális fotogrammetria – Óbudai Egyetem Alba Regia Műszaki Kar
- [23] BALÁZSIK V. 2011: Fotogrammetria, 3. A fotogrammetria optikai és fotográfiai alapjai – Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar

11. ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A centrális vetítés. BALÁZSIK V. 2011: Fotogrammetria, 1. A távérzékelés fogalma, a fotogrammetria és a távérzékelés kapcsolata – Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar
2. ábra: A fotogrammetria felosztása. BALÁZSIK V. 2011: Fotogrammetria, 1. A távérzékelés fogalma, a fotogrammetria és a távérzékelés kapcsolata – Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar
3. ábra: Homlokzatrajz. FEHÉR A. 2014: Top art technológiai megoldások a műemlékvédelemben, építészetben.
4. ábra: Az ösküi kerektemplom 3D modellje, Lehoczky Máté munkája. LEHOCZKY M. 2019: Az ösküi kerektemplom 3D modellje
5. ábra: DJI Mavic Air UAV. DJI MAVIC AIR USER MANUAL V1.0
6. ábra: Mavic Air távirányító. DJI MAVIC AIR USER MANUAL V1.0
7. ábra: Az időméréses távolságmérés módszere. DR. LOVAS T. – DR. BERÉNYI A. – DR. BARSÍ Á. 2012: Lézerszkennelés, BME Építőmérnöki Kar Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék
8. ábra: Többutas visszaverődés. C. COȘARCĂ – A. JOCEA – A. SAVU 2011: Analysis of error sources in Terrestrial Laser Scanning – alapján, saját szerkesztés
9. ábra: Leica P40 lézerszkennner. LEICA SCANSTATION P40/P30 USER MANUAL
10. ábra: A képek tájékozása.
11. ábra: Ritka pontfelhő és a kameratengelyek.
12. ábra: Az elrajzolás. BALÁZSIK V. 2011: Fotogrammetria, 3. A fotogrammetria optikai és fotográfiai alapjai – Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar
13. ábra: Sűrített pontfelhő, törlés előtt.
14. ábra: A felületmodell háromszöges hálója.

- 15. ábra: Textúrált modell az oltárról és a szószékről.
- 16. ábra: Az orgona transzformálása.
- 17. ábra: Az illesztés pontossága.
- 18. ábra: A pontfelhők közötti eltérés.
- 19. ábra: Az oltár és a szószék transzformálása, az illesztés pontossága.
- 20. ábra: A pontfelhők közötti eltérés.

12. TÁBLÁZATJEGYZÉK

- 1. táblázat: Leica P40 specifikáció. LEICA SCANSTATION P40/P30 USER MANUAL
- 2. táblázat: Képtájékozások. DR. JANCsó T. 2017: Digitális fotogrammetria – Óbudai Egyetem Alba Regia Műszaki Kar
- 3. táblázat: Korrelációs mátrix.

13. MELLÉKLETEK

A dolgozathoz csatolt adathordozón az alábbi mellékletek szerepelnek:

- 1. számú melléklet – UAV felvételek
- 2. számú melléklet – 3D modell PDF formátumban
- 3. számú melléklet – 3D modell Metashape formátumban
- 4. számú melléklet – Modell riport
- 5. számú melléklet – Lézerszkenner nyers mérései