



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki kar
Általános- és Felsőgeodézia Tanszék

Fotogrammetriai szoftverek összehasonlító vizsgálata
2021.

Konzulens:
Dr. Siki Zoltán

Készítette:
Nagy Zoltán

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	1
1. Bevezetés.....	3
2. Napjaink fotogrammetria szoftverei.....	4
2.1. Structure from Motion	4
2.2. Képek készítésére vonatkozó általános szabályok	5
2.3. Kamerakalibráció.....	6
2.4. A programok általános feldolgozás lépései	7
2.5. Szoftverek bemutatása	8
3. Feldolgozási folyamat bemutatása	12
3.1. Autodesk Recap Photo.....	12
3.2. RealityCapture	14
3.3. Meshroom.....	15
3.4. WebODM	17
4. Fotogrammetria mérnöki alkalmazásban	18
4.1. Hardverek bemutatása	19
4.2. Lézerszkenneres mérés	19
4.3. Képek készítése	21
4.3.1. Fényképezés a mobillal	21
4.3.2. Fényképezés a fényképezőgéppel.....	23
5. Feldolgozás.....	24
5.1. Autodesk Recap Photo.....	24
5.2. RealityCapture	28
5.3. Meshroom.....	31
5.4. WebODM	34
6. Összehasonlítások	36
6.1. Mobillal készült modellek vizsgálata	37
6.1.1. Futási idők	37
6.1.2. Adatok mennyisége	38
6.1.3. Eltéréstérképek	39



6.2. Fényképezőgéppel készült modellek vizsgálata	45
6.2.1. Futási idők.....	45
6.2.2. Adatok mennyisége.....	46
6.2.3. Eltéréstérképek	47
7. Eredmények összefoglalása.....	53
8. Összefoglalás.....	54
Irodalomjegyzék.....	56
Köszönetnyilvánítás	57
Ábrajegyzék	58
Mellékletek.....	59

1. Bevezetés

„A fotogrammetria az a művészet, tudomány és technológia, amely segítségével megbízható információkat nyerhetünk tárgyakról és környezetünkről, fényképek készítésével, mérésével és értelmezésével, valamint távérzékelő rendszerekből származó digitális energiaminták segítségével” (angolról fordítva, Colwell 1997)

Fotogrammetriával az egyetemi tanulmányaim során találkoztam legelőször, megismerkedtem a történelmével és matematikai hátterével majd a ma használatos gyakorlati alkalmazásokkal is. Érdekesnek találtam a folyamatot, hogy a kétdimenziós információból algoritmusok segítségével térbeli adatokat állíthatunk elő. Az egyszerű, akár a ma már mindenki zsebében megtalálható mobiltelefon kamerája segítségével, a mérnöki alkalmazásban is használható terméket tudunk előállítani. Az egyetemi tananyag egy-két szoftvert mutat be részletesen. Jelenleg a reneszánszát éli a technológia, főként a gépi látás fejlődésének köszönhetően, így a feldolgozószoftverek piacán az elmúlt 5-10 évben sok új program, illetve fejlesztés jelent meg. Ezeknek a programoknak a szeretném bemutatni a feldolgozási folyamatát és összehasonlítani végeredményeiket, hogy azok mennyire használhatóak mérnöki alkalmazásokban, akár kis mennyiségű terepi adatgyűjtést követően is. Célom a minimális fénykép mellett, ami akár egy mobiltelefonnal is elkészíthető, a lehető legpontosabb modell készítése a teljes objektumról. A geometriai pontosság vizsgálata mellett összehasonlítottam a feldolgozási időket, a kapott adatok mennyiségét, a programok feldolgozás során kínált beállítási lehetőségeit, illetve a végtermék térhálómódellesztétikai értékét, kinézetét.

A szoftverek kiválasztásánál figyelembe vettem, hogy melyek azok, amelyek könnyen elérhetőek. Lehetőség szerint legyen köztük szabad, nem kereskedelmi fejlesztésű. Olyan, ami nem igényel semmilyen emberi beavatkozást a feldolgozás során. Legyen a vizsgálatban olyan program, ami lépésiben paraméterezhető és olyan, ami „black box” típusú, más szóval nem ismerjük a feldolgozási algoritmusokat.

Várakozásaim alapján a feldolgozás pontossága nem fogja elérni a szerkezeti ellenőrzésekhez szükséges pontosságot, amit lézerszkennelt pontfelhővel el lehet érni, de nagyobb eltérések kimutatására már alkalmas lehet. Illetve a háromdimenziós térhálómódellek vizuálisan jobban visszaadják a valóságot, mint egy pontfelhő. Ezt fel lehet használni látványtervek készítésére, akár irodában projekttegyeztetések alatt a helyszíni állapotok megjelenítésére. Ezenkívül, ami kevésbé tartozik a mérnöki felhasználáshoz, de társadalmi szempontból fontosnak tartom, hogy az épített kulturális értékeink megőrzésére is tökéletesen alkalmas lehet a technológia.

Hasonló munkák készültek már szakdolgozat Szabó Márton: „3D-s felületmodellek előállításának lehetőségei – webes és asztali alkalmazások összehasonlítása” (Szabó, 2004), illetve szakmai előadás Gáti Bence: „Nyílt forráskódú programok alkalmazása a pontfelhő feldolgozásában” (Gáti, 2018) címmel.

2. Napjaink fotogrammetria szoftverei

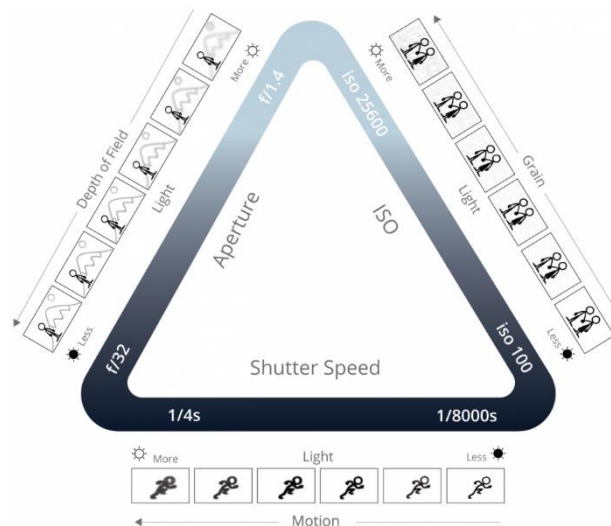
2.1. Structure from Motion

„A fotogrammetriai szoftverek a feldolgozás első lépéseként zömében a Structure from Motion (SfM) eljárást alkalmazzák a ritka pontfelhő előállítására. Ez az algoritmus arra a feltételezésre épül, hogy egy mozgó fényképezőgéppel készítenek felvételeket egy mozdulatlan tárgyról. Az SfM-algoritmust elsősorban a gépi látás céljára fejlesztették ki, de jól használható a fotogrammetriai feldolgozás automatizálására is.” (Siki, Lehoczky, 2020)

Az SfM eljárás több lépésből áll, első lépésben a kulcspontok (Feature) automatizált megkeresése fut le. Ezek a pontok a jól elkülöníthetők és a környezetük könnyen azonosítható a képen. A kulcspontok megtalálására többféle algoritmus létezik. A leggyakrabban alkalmazott a SIFT (scale-invariant feature transform). Használatos még a SURF, ORB, KAZE. „Ezeket a leíró algoritmusokat úgy építették fel, hogy egyszerre egy kis régiót (paraméterezhető számú szomszédos pixelt) vizsgáljanak a képeken.” (Siki, Lehoczky, 2020) Az algoritmus a kulcsponthoz generál egy számsorozatot, emellett hozzárendeli a képkoordinátákat is. Az azonos kulcspontokhoz hasonló számsorozat tartozik, de más és más képkoordinátákkal rendelkeznek. Egy nagy előnye az említett megoldásoknak, hogy a kulcspontokat azonosító számsorozat méret- és irányfüggetlen. Így nem számít milyen távolról készült a kép, illetve az sem, ha a vízszintestől eltérő szögben áll. A különböző képeken azonosított, egymásnak megfelelő kulcspontok alapján megkapjuk a képek egymáshoz viszonyított helyzetét. A tájékozás mellet a legalább két képen azonosnak tekintett pontok háromdimenziós helyzetei is előállnak, ez hívjuk a ritka pontfelhőnek. (Qin, 2021) A pontok vetítési sugaraira felírhatjuk az egyenleteket, majd az így kapott egyenletrendszert megfelelő durvahiba szűrési módszert alkalmazva kiegyenlítjük, ezt hívjuk sugárnyaláb kiegyenlítésnek. (Jancsó, 2016) Ezzel minimalizáljuk a pontjaink koordináta a hibáit és finomítjuk a kameráink belső, illetve külső tájékozási adatait is.

2.2.Képek készítésére vonatkozó általános szabályok

A jó végtermékhez a kiindulási alapnak is megfelelőnek kell lennie, így van ez a fotogrammetriában is. Amennyiben a képeink nem megfelelőek a feldolgozáshoz, nem a kívánt eredményt fogjuk elérni vagy nem is jutunk eredményre. A képeinknek jó minőségűeknek kell lenniük, nem művészeti értelemben, hanem a műszaki paraméterek tekintetében. A felvételeink lehetőleg ugyanazon kamera beállítások mellett készüljenek, ne változtassuk a fókusztávolságot, fényérzékenységet, rekesznyílást, illetve a záridőt. Ezek a beállítások fontosak, hogy a képeink élesek legyenek, a lehető legkevesebb zajt tartalmazzanak és a mélységélesség is megfelelő legyen. (Barsi, 2019) Ezek az beállítások összefüggenek egymással, ezt az alábbi ábrán látható háromszög jól szemlélteti.



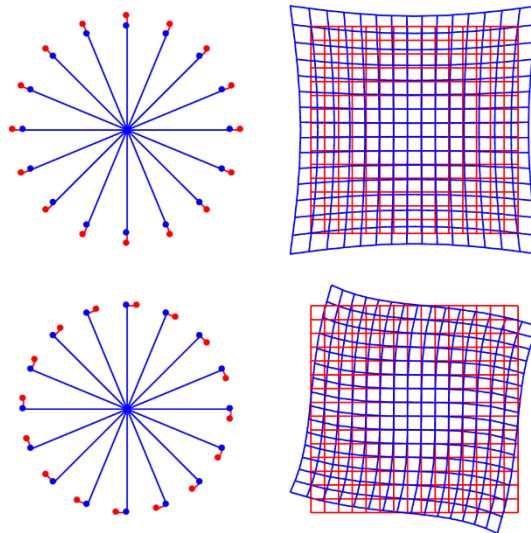
1. Ábra Expozíciós háromszög

A záridő (shutter speed) csökkentésével a képünk sötétebb lesz, de a mozgó objektumok is élesek maradnak. Mivel a fotogrammetriában mozdulatlan objektumról készítünk képeket, inkább a háromszög másik kettő részével kell foglalkoznunk. Az első az úgynevezett ISO (International Organization for Standardization) érték. Ez befolyásolja az elkészült fotó fényességét. Minél nagyobb ez az érték annál több zaj jelenik meg az elkészült fényképen, így törekedni kell az érték alacsonyan tartására a fotók készítése közben. Mindeközben arra is figyelni kell, hogy megfelelő mennyiségű megvilágítás legyen különben a képünk túl sötét lesz. A rekesznyílás méretének csökkentésével kevesebb fény éri a szenzort, viszont a mélységélesség megnövekszik, és ennek meglehetősen fontos a fotogrammetriai felhasználásra készült fényképeknél.

Ideális körülményeket egy műteremben lehetne teremteni, ezzel állandó értékeken tartani az összes beállításunkat. Ez természetesen egy híd méretű tárgynál kivitelezhetetlen így a lehetőségekhez mérten kell alkalmazkodni a környezethez.

2.3.Kamerakalibráció

Az elkerülhető előzőekben felsorolt hibákon kívül számolnunk kell a kameránk szabályos hibájával is. Az ideális kamera egy lyukkamera, melynél nem lép fel a radiális és tangenciális elrajzolás, de a lencsével rendelkező képalkotó eszközökben igen.



2. Ábra Radiális és tangenciális elrajzolás

A torzításokat az alábbi egyenletekkel írhatjuk le:

Radiális elrajzolás

$$x_{torzított} = x * (1 + k_1 * r^2 + k_2 * r^4 + k_3 * r^6)$$

$$y_{torzított} = y * (1 + k_1 * r^2 + k_2 * r^4 + k_3 * r^6)$$

Tangenciális elrajzolás

$$x_{torzított} = x + (2 * p_1 * x * y + p_2 * (r^2 + 2 * x^2))$$

$$y_{torzított} = y + (p_1 * (r^2 + 2 * y^2) + 2 * p_2 * x * y)$$

Ahol x, y a torzítatlan képkoordináták, r az origótól mért távolság, k_1, k_2, k_3 a radiális elrajzolás paraméterei, p_1, p_2 a tangenciális elrajzolás paraméterei.

Az elrajzolások mértéke eszköz és beállításfüggő, így egy kalibrációval csak az adott beállításokkal készített képeket tudjuk javítani, ezért is fontos, hogy egy feldolgozás során egyféle beállítással dolgozzunk. (Barsi, 2019) A képeket feldolgozás előtt is javíthatjuk, ha egy kalibráló szoftverrel meghatároztuk a paramétereket. Ennél egy sokkal kényelmesebb, de kevésbé szabatos megoldás, ha a feldolgozó szoftverekben levő kalibrációra hagyatkozunk.

2.4.A programok általános feldolgozás lépései

A fényképek elkészítése után elkezdhetjük a feldolgozást. Programonként vannak kisebb-nagyobb eltérések a feldolgozás menetében, de az alapelvek, lépések ugyan azok. A képek betöltése után a programok kinyerik az EXIF (EXchangeable Image file Format) információkat a képekből. Ez tartalmazza képfelbontást, fókusz távolságot, záridőt, ISO-értéket. Ezeket az információkat a program hasznosítani tudja a feldolgozás során. Ezeken felül akár a kép készítés helyének GPS koordinátáit is tárolhatja, akár RTK pontossággal is, amennyiben megfelelő eszközzel rendelkezünk pozíciónk rögzítéséhez.

Esetlegesen a feldolgozás elején megadhatjuk az illesztőpontokat, amennyiben a szoftverünk ezt támogatja, vagy akár a ritka pontfelhő elkészülte után.

Ezután következik a 2.1.-ben bemutatott SfM eljárás, amennyiben paraméterezhető a program, itt megadhatjuk mennyi kulcspontot akarunk kinyerni, mennyi a minimális egyezés szám, ami képpárt alkot. milyen szögekben állhatnak egymáshoz képet a képpárok, illetve minden olyan beállítás, ami befolyásolja a képeink relatív tájékozásának számítását.

Az SfM-ből nyert ritka pontfelhőt követi a sűrű pontfelhő előállítása, ehhez szükség van minden képnél az egyes pixelek mélységértékének a számítására, ez a számítás igen hosszú időt vesz igénybe és erőforrás igényes is, bár jól párhuzamosítható. Azokból a pixelekből lesz végül térbeli pont, melyek egy adott helyen vannak a térben, bizonyos eltéréseken belül, a programok a pontosság érdekében általában minimálisan négy képen előforduló pontokat használnak (a geometriai megoldáshoz két kép elegendő lenne).

Ha pontfelhőre van csak szükségünk ezen a ponton véget is ért a feldolgozás. A programok többsége viszont kínál még további feldolgozási lehetőségeket. Térháló modellt készít a pontfelhőből, amit a képekből kinyert textúrákkal lát el. Ortofotót generál, amennyiben georeferált volt a modellünk.

Összefoglalva a feldolgozási folyamat:

1. Képek megadása, EXif információ kinyerése
2. Illesztőpontok megadása(opcionális)
3. SfM
4. Illesztőpontok megadása (opcionális)
5. Sűrű pontfelhő előállítása
6. Térhálómódell, Ortofotó előállítása

2.5.Szoftverek bemutatása

Az alábbiakban olvasható az általam választotta szoftverek rövid bemutatása. Kis történeti áttekintéssel, fontosabb, egyedibb funkciók leírásával, jelenlegi fejlesztési irány, utolsó kiadott verzió leírásával.

Autodesk ReCap Photo



A terméket már a 2010-es évek óta fejlesztik, egészen 2017 végéig ReMake néven futott akkor került átnevezésre, ekkor került bele külön a drónnal készült fényképek feldolgozásának lehetősége. A felhő alapú feldolgozás 300 képet támogat a tárgy modellezésnél és 1000 képet a drón fotó típusú feldolgozásból. Kiválaszthatjuk, hogy drónfotókat vagy földről készült képeket szeretnénk-e feldolgozni. Előbbinél lehetőségünk van illesztőpontokat megadni. A másodikonál erre nincsen lehetőség. Hogy a két feldolgozás miben különbözik részleteiben arra csak következtetni tudunk, mivel ezzel az információval nem szolgál számunkra az Autodesk. Miután lefutott a feldolgozás letölthetjük a modellünket, a programnak saját megjelenítő és szerkesztő funkciója is van. Részeket vághatunk le, a felületet módosíthatjuk kihúzással betolással. Ellenőrizhetjük a modell topológiáját, a hibákat akár egyenként, vagy az összeset automatikusan javíthatjuk, törölhetjük a hibás részeket. A modelltől különböző információkat kaphatunk, térfogat, illetve felület nagysága. Modellünk méretarányát amennyiben a tárgy modellezést választottuk 2 pont és köztük lévő távolság megadásával tudjuk beállítani.

A programhoz folyamatosan adnak ki javításokat, de nagy fejlesztés a drón fotók külön választása óta nem történt.



RealityCapture

A szoftvert a hasonló nevű Capturing Reality nevű cég fejleszti, a zárt tesztverziót 2015-ben adták ki, majd egy év múlva megnyitották a felhasználók számára is. A program kombinálni tudja a fotogrammetriával előállított modellt földi lézerszkenneléssel előállított pontfelhővel is. Ennek köszönhetően a felhasználók köre igen nagy, a játék- és filmipartól kezdve, a mérnöki munkákon át, a kulturális örökségek digitális megőrzéséig. A feldolgozandó képmennyiségben nincsen szoftveresen korlátozott határ, csak a hardverünk erőssége szab ennek határt, a minimális rendszerkövetelmények 64 bites operációs rendszert 8 GB RAM-ot és egy minimum 1 GB-os Nvidia videokártyát írnak elő. A program egy teljes modellalkotási folyamatot lehetővé teszi, minden lépésben rendelkezik állítható paraméterekkel, sokszor ezek csak valamilyen arányszámok, pontos magyarázatot nem nyújt számunkra a program, milyen algoritmus fut le a háttérben. Ebben a programban is lehetőségünk van a kész modellt tisztítani, akár még textúrázás előtt így számítási időt takaríthatunk meg a nem szükséges részek eltávolításával. A dolgozat írásakor a programból nem volt még elérhető ingyenes diákverzió, de a 2021-es tulajdonos váltásnak a készítő cégnél jó hatása volt a program árára. Egy érdekes fizetési modellel rendelkeznek, minden ingyenesen használható a programon belül, kivéve bármiféle formátumú export ekkor kell kifizetni az elkészült modellünket, aminek az árazása a felhasznált képeink pixelszámától függ.

A fejlesztőgárda folyamatosan ad ki új frissítéseket a szoftverhez, ezek általában valamilyen új funkcióval bővítik a programot. A program legfrissebb verziója 2021 júliusában jelent meg, ez több hasznos mérnöki alkalmazású funkciót tartalmaz, lehetőség nyílt tetszőleges formájú alakzatok terület és felület számítására, illetve szintvonalakat generálhatunk a felületmodellünkből.

Meshroom



Az első verzió 2015-ben jelent meg ez még csak a SfM-t tartalmazta, szóval csak ritka pontfelhő előállítására volt képes. 2018-ban adták ki azt fejlesztést, ami már egy teljes modellezési folyamatot tett lehetővé. A program fejlesztése ezután se állt le, a már meglévő részeket hatékonyabbá tették, illetve megjelent a 360° panoráma képek készítésének lehetősége is. A programot az ALICEVISION association fejleszti, ez a szervezet nonprofit formában működik, céljuk a háromdimenziós digitalizációs technológia közös érdekekben történő hasznosítása. A program ennek köszönhetően ingyenes és a forráskódja mindenki számára elérhető, ezzel is lehetővé téve a lelkes önkéntes fejlesztők hozzájárulását az alkalmazás további fejlesztéséhez. Az lelkes önkénteseknek köszönhetően a feldolgozás során felmerülő problémáinkat a szoftver hivatalos fórumán feltehetjük, és nagy valószínűséggel már valaki találkozott a problémával és segítséget nyújt, illetve az is előfordulhat, hogy már a megválaszolt kérdést találjuk meg a problémára.

A program rendelkezik grafikus és konzolos felülettel is, a grafikus felület kialakítása igen egyedi, feldolgozási blokkokból áll, ezeknek vannak bemenő és kimenő ágai, a blokk külön-külön paraméterezhető, mindegyik a feldolgozás más részéért felelős, és külön-külön futtathatóak egy esetleges paraméter változás után. Az egyes futtatások eredményét a program eltárolja így akár, ha változtatással elért eredmény nem felel meg, visszaléphetünk az előző verzióra. A programban jelenleg még nincs lehetőség az elkészült modell szerkesztésére.

A program akár ebbe az irányba is fejlődhet tovább, illetve a mérnöki alkalmazások kapcsán is van tere a fejlesztésnek, illesztőpontok megadásának lehetőségével.



WebODM

Az első verzió 2013-ban jelent meg, az Open Drone Map fejlesztői csapata jóvoltából. A már létező ODM (Open Drone Map) egy parancssoros drónfotogrammetriára fejlesztett szoftver. Ennek egy továbbvitele a WebODM, ami már grafikus felülettel rendelkezik még hozzá egy interneten keresztül elérhető felülettel. Így a nagy teljesítményű szerverhez, amin a program fut bárhol is hozzáférhetünk és feldolgozhatjuk a méréseinket. Bár kevesebb paraméterezési lehetőségünk van a webes felületen, mint a parancssoros verzióban ez is elegendő a szoftver mérnöki alkalmazásában. A neve is sugallja, hogy a program elsősorban a nadírból fotózott drónfelvételek feldolgozására készült, de már támogatja a tetszőleges orientációjú képeket is. Ezen kívül rengeteg mérnöki munkában hasznosítható funkcióval rendelkezik.

- Ortomozaik készítés
- Terep- és felszínmodell számítás
- Szintvonal számítás
- Multispektrális képek feldolgozása

Természetesen ez a program is képes sűrű pontfelhő, illetve hálómódel előállítására. A webes felület rendelkezik egy GCP szerkesztővel is, ezen a képeinken ki tudjuk jelölni az illesztőpont helyzetét, illetve megadhatjuk a vetületi rendszerben ismert koordinátákat is. Ennek a funkciónak egy hátránya van, bár a legtöbb használatos vetületi rendszert ismeri a program, jelenleg csak UTM (Univerzális Transzverzális Merkcator) vetületben exportálható belőle az adat.

Az utolsó frissítést 2021. szeptemberében adták ki, ez főként javításokat tartalmazott, egy igen érdekes újítás mellett, a program mostantól támogatja az Apple új ARM64-es processzor technológiáját. Ez azt mutatja, hogy a fejlesztők követik az iparági fejlesztéseket és naprakészen tartják a programjukat.

3. Feldolgozási folyamat bemutatása

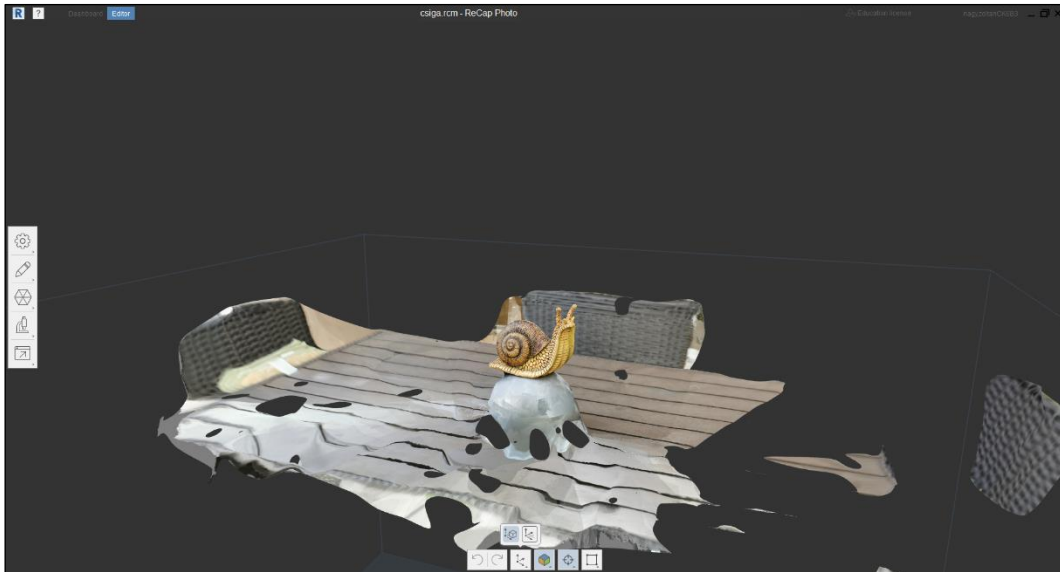
A következőkben az egyes programok feldolgozási folyamatát fogom bemutatni egy egyszerűbb, viszonylag kevés képet tartalmazó minta adathalmazon. A képeket a 4.2.1-ben bemutatott mobiltelefonnal készítettem. A feldolgozás tárgya egy kerti, csiga szobor. Azért erre esett a választásom, mert méreteiben könnyen kezelhető, tömör, lyuk nélküli alakzat és felületében, illetve festésében ideális a fotogrammetriához.



3. Ábra Modellezés tárgya, csiga szobor

3.1. Autodesk Recap Photo

Az Autodesk megoldásának használatához egy klienst kell telepítenem, ezen belül tudtam feltölteni a képeket. Kiválasztottam, hogy egy tárgyat szeretnék modellezni, kiválasztottam a képeimet és megvártam amíg a projekt állapota „feldolgozási sorban” -ra váltott. Miután lefutott a feldolgozás letöltöttem a modellt és megtisztítottam a szükségtelen részekről.



4. Ábra Nyers térhálós modell

A tisztítás után a modell háromszögeinek számát egymillióra csökkentettem. Majd javítottam a fellépő topológiai hibákat, ez általában előjön a modell egyszerűsítése után. A modellt „obj” (object) formátumban exportáltam.

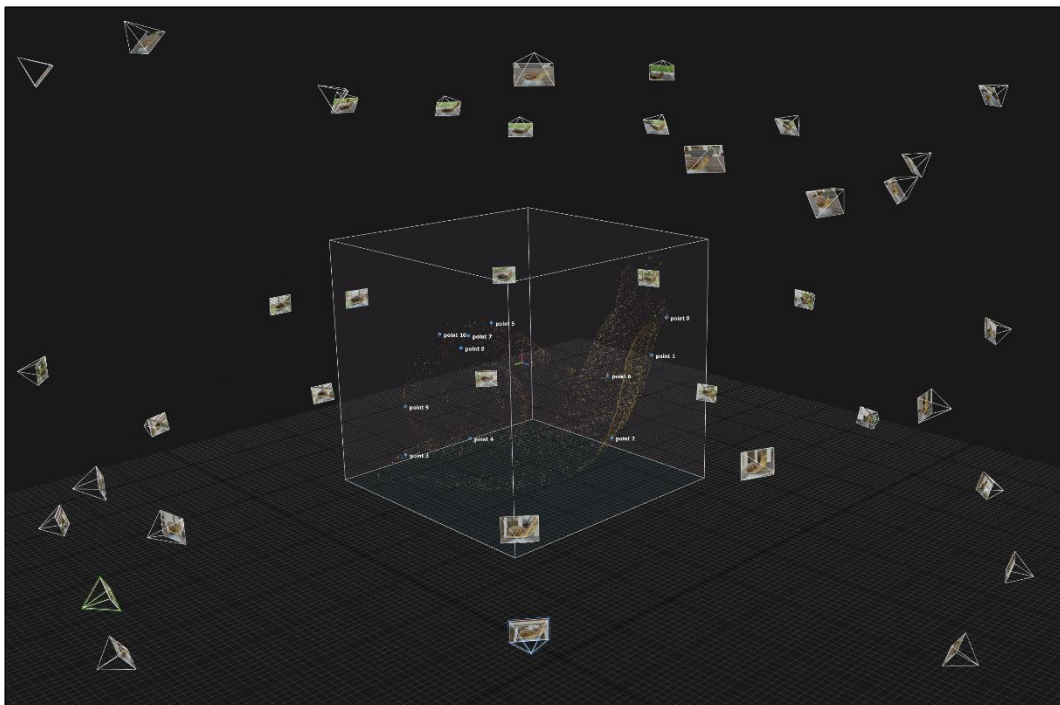


5. Ábra Autodesk ReCap Photo, az elkészült modell

3.2. RealityCapture

A program első indításakor egy a feldolgozás lépésit bemutató ablak fogad minket, ami végigvezeti a felhasználót egy kész modell megalkotásán, ez nem tér ki a részletekre, de mindenképpen egy pozitívum a kezdő felhasználók számára.

A programba a képeket „drag and drop” módszerrel hívtam be. A program az Exif információkat is felhasználja a feldolgozás során, illetve amennyiben a kamera szerepel az adatbázisban annak a paramétereit is figyelembe veszi. A feldolgozás a SfM-mel kezdődik, itt számos beállítást tehetünk meg, ami paramétereket változtatja. Az első futtatás során rájöttem, hogy szükséges lesz illesztőpontokat elhelyeznem a képeken mivel, több komponensre szedte szét a képsorozatot. Végül 10 illesztőpontot jól elosztva a teljes modell felületén sikerült egy számomra elfogadható eredményt kapnom. Ezeket a pontokat már az SfM futtatása előtt megadhatjuk a képeken, de utána is lehetőség van rá. Amennyiben ezek a pontok egy helyi rendszerben rendelkeznek koordinátával, érdemes előtte megadni mivel így a modellünk mérethelyes és georeferált is lesz. Amint lefutott az SfM megkaptam a ritka pontfelhőt, ebből egy előnézett hálómoddelt alkottam, hogy lássam van-e probléma a modellel.



6. Ábra Ritka pontfelhő kamera pozíciókkal és illesztőpontokkal

Ezután lehatároltam azt a térrészt, ahol a tárgyam volt, így a program csak ebből készített hálómoddelt, ezzel sokat lehet spórolni a számítási időn. Amint elkészült a térhálómódell,

megtisztítottam az egyértelműen nem hozzá tartozó részekről, ezek különálló kis objektumok voltak, illetve a modell aljánál lévő kiálló háromszögek. Ebben az állapotában már elláthatnám textúrával a modellt, de még rengeteg háromszögből állt, ezek számát körülbelül egymillióra csökkentettem, így egy megjeleníthetőségében jobban kezelhető modellt kapva. A kész modellt „ply” (Polygon File Format) formátumban mentettem ki, ez az egyik leggyakrabban használt formátum térhálómodellek tárolására.

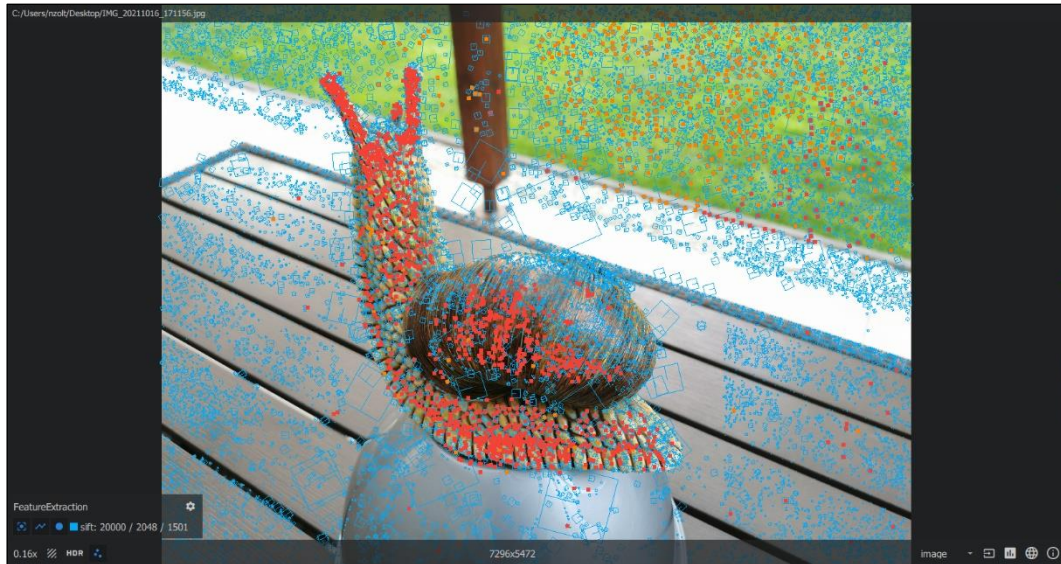


7. Ábra RealityCapture, az elkészült modell

3.3.Meshroom

A program a letöltés után rögtön futtatható nincs szükség telepítésre. Egy új megnyitott projektben, egy előre elkészített fotogrammetriai feldolgozási lépéssor (angolul pipeline) található, ez a legtöbb egyszerű feldolgozás során elegendő lesz, amennyiben egy térhálómodellt szeretnénk végeredményként kapni. A képek betöltése után rögtön kinyeri az a képekben található EXif információkat. A program rendelkezik egy kamera adatbázissal, ebben tárolja az egyes kamerákhoz tartozó szenzorméreteket, amiket felhasznál a feldolgozás során. A mobiltelefonom kamerája nem volt benne az adatbázisban, így egy plusz sor hozzáadásával a szövegszerkesztőben ezt meg tudtam tenni. A kulcsponatok kinyerése után a program képpárokat alkot majd ezeken azonosítja az egymásnak megfelelő kulcsponatokat. Külön érdekessége a programnak, hogy az azonosított kulcsponatokat a képeken megjeleníti, illetve más színnel kiemeli melyek azok, amelyeket más képeken is azonosítani tudott, az SfM

lefutása után pedig egy harmadik színnel a háromszögeléshez használt pontokat emeli ki. Ez a funkció hasznos lehet tanulási szempontból, hogy milyen felületeken milyen eredményesen talál kulcspontokat a program.



8. Ábra A megtalált kulcspontok kékekkel, a legalább két képen megtalálhatóak narancssal, a ritka pontfelhőben leképződtek pedig pirossal láthatóak

A SfM után a ritka pontfelhőnk megjelenik a grafikus ablakban a kamera pozíciókkal együtt. Sajnos nincsen lehetőség lehatárolni a további feldolgozásra szánt területet. Ettől a ponttól kezdve következtek az időigényesebb feladatok, a mélység térkép számítás minden egyes képre és ezek segítségével előállt sűrű pontfelhő térháló modellé alakítása, majd a modell tisztítása, élék simítása és legvégül a textúrák generálása. Az alapértelmezett kimenet „.obj”, de elérhető más gyakran használt formátum is.



9. Ábra Meshroom, az elkészült modell

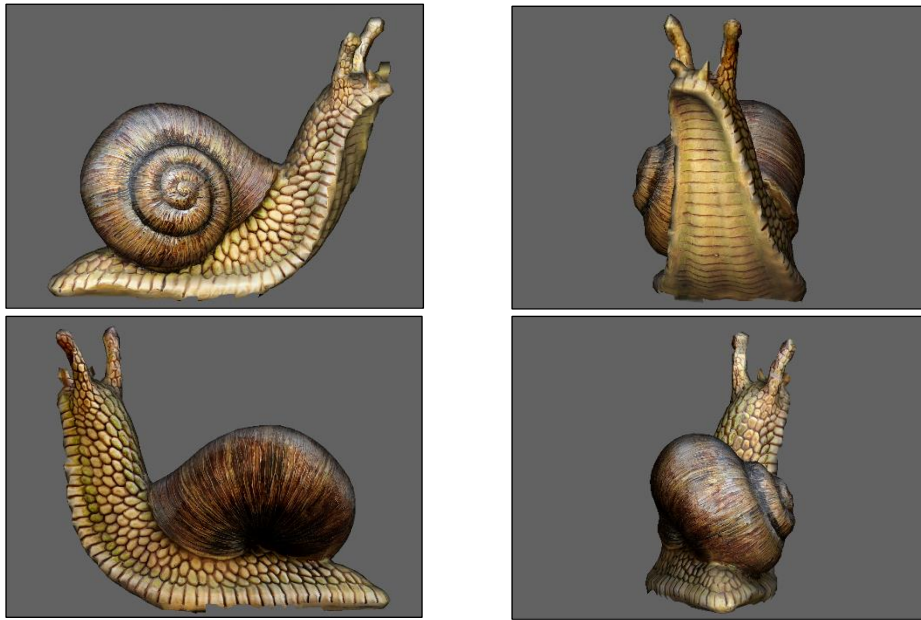
3.4.WebODM

A webes felületre belépve létrehoztam egy új projektet, amin belül külön feldolgozási feladatként szerepelnek a külön adathalmazból történő feldolgozások. A képeimet feltöltöttem majd kiválasztottam az előre összeállított beállítások közül a 3D modellt. A feldolgozás lefutása után letöltöttem a térháló modellt és megtisztítottam. Ennél az egy programnál tapasztaltam problémát a modell alkotásnál, a képek alapján is látható, hogy sokkal kevesebb háromszögből épül fel, mint a többi, annak ellenére, hogy a sűrű pontfelhő nagyságrendileg megegyező számú pontot tartalmaz.



10. Ábra A feldolgozásból nyert pontfelhő

Ennek az oka az, hogy a modellezés tárgyát képző csigán kívül más pontok is leképződtek a térben és a térháló készítésnél a program a megadott maximális kimeneti háromszögszámot egyenlően elosztotta az összes pont között, nem sűrítette ott, ahol a pont sűrűség nagyobb volt.



11. Ábra WebODM, az elkészült modell

4. Fotogrammetria mérnöki alkalmazásban

A bemutatott minta feldolgozásokon jól látszik, hogy kisebb tárgyak modellezésére jól hasznosítható a technológia, illetve a kiválasztott szoftverek. A következőkben egy mérnöki műtárgy felmérését, modellezését fogom bemutatni a kiválasztott szoftverekkel, illetve két különböző fényképezőgép segítségével. A mérnöki létesítmény egy vasúti híd, név szerint a Hamzsabégi Vasúti Híd, ami a Bartók Béla út és a Karolina út kereszteződése felett található Budapesten. Céлом az volt, lehetőség szerint a képek száma minimális legyen, ezzel a terepi és a feldolgozási időt is csökkentve. Az egyes programok az azonos alapanyagból más és más eredményekre vezettek, ezeket hasonlítottam össze egy referencia lézerszkenneléssel. Az egyes programoknál különböző nehézségek adódtak, ezeknek okaira és esetleges megoldásokra is kitérek, a különböző programmal készült modellek vizsgálatakor.

4.1. Hardverek bemutatása

A programok közül kettőt tudtam (Reality Capture, Meshroom) azonos számítógépen futtatni. Ez a saját otthoni PC-m volt, ami az alábbi paraméterekkel rendelkezik.

- Operációs rendszer: Windows 10 Professional
- CPU: AMD Ryzen 2600 3,4 Ghz (6 mag, 12 szál)
- GPU: Nvidia Geforce GTX 1070 8GB
- RAM: 16 GB DDR4 3000Mhz
- Háttértár: SSD 256 GB (Operációs rendszer) 2 TB HDD (programok, feldolgozandó képek)

A WebODM a tanszék egyik szerverén futott ez az alábbi paraméterekkel rendelkezik.

- Operációs rendszer: Linux Debian 10
- CPU: Intel(R) Core(TM) i7-10700 CPU @ 2.90GHz (8 mag 16 szál)
- GPU: Intel
- RAM: 16 GB
- Háttértár: 3 TB SSD

Az Autodesk Recap Photo feldolgozása a cég saját szerverein történik a felhőben, erről nem található információ milyen hardvert tartalmaz.

Hardverek számadataiból látszik, hogy a tanszéki szerver processzora mind egy szál, mind több szál teljesítményben felülmúlja az otthoni számítógépemét nagyjából 30%-kal. Videókártya tekintetében viszont az otthoni számítógépem múlja felül a tanszéki szerveret. A szerver javára válhat még gyorsaság tekintetében, hogy a feldolgozandó képek mind a program az SSD-n volt, ami nagyobb írási olvasási sebességet biztosít, mint a HDD.

4.2. Lézerszkenneres mérés

A referencia pontfelhőt földi lézerszkenneléssel állítottam elő. A felméréshez a tanszék Leica C10-es szkennert használtam. A műszer két egységbe osztott akkumulátorral rendelkezik, így akár munka közben is lehet cserélni őket kikapcsolás nélkül. Ez a szkennel 532 nm hullámhosszú zöld lézerfényt használ a felméréshez, ami a látható tartományban van. Ezért a környezet zavarásának elkerülése érdekében csak a szkennel főpontjának síkja felett

szkenneltem. A szkennер hatótávolsága 300 méter, a beállított felbontás 5 cm-es köz 100 méteren volt, ezzel bőven alkalmas volt a körülbelül 30 méterre lévő híd felmérésére.



12. Ábra Leica C10 lézerszkennер háttérben a felmért hiddal

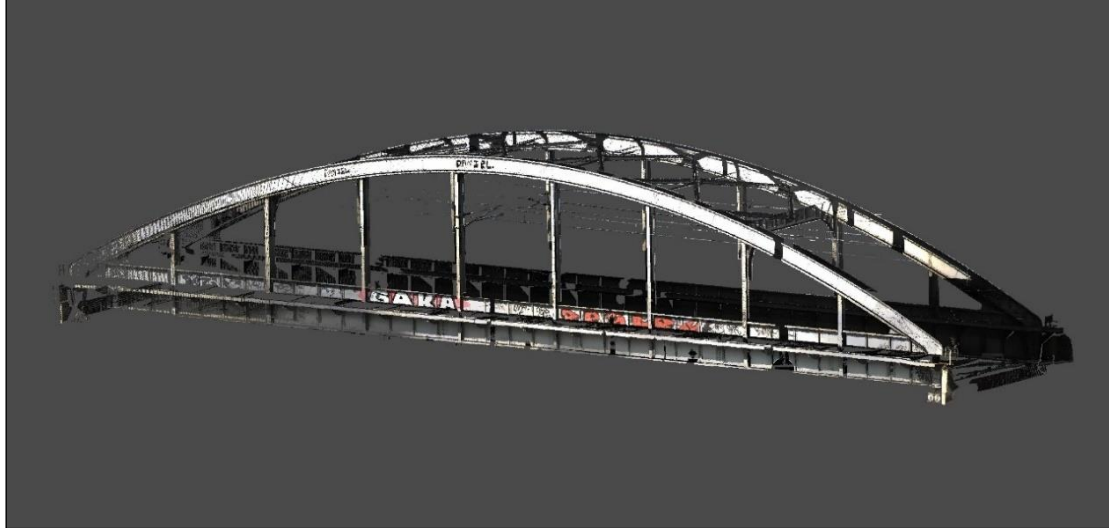
Két álláspontot létesítettem a híd két oldalán, innen történtek a szkennelések. Mivel maga a híd az álláspontból az egyik irányba helyezkedett el, ezért a tér ezen részét szkenneltem csak az adott állásból, ezzel időt takarítva meg az amúgy hosszadalmas folyamatból. Így egy-egy állás körülbelül 15 percet vett igénybe a színezett pontfelhőhöz szükséges fényképek készítésével együtt. A két szkennelést 4 ponttal illesztettem össze, ebből kettő a két álláspont volt. A másik kettő a hídfők közelében lévő lámpaoszlopra kihelyezett Leica HDS 6" fekete-fehér tárcsa volt.



13. Ábra Leica HDS 6" tárcsa az egyik állásponton

A tárcsák közepének pozícióját Trimble Focus 6w mérőállomás segítségével határoztam meg egy helyi rendszerben. A mérőállomás segítségével további 5-5, a híd két oldalán lévő, jól azonosítható pont koordinátáját határoztam meg a helyi rendszerben, hogy ezeket később a

modellek transzformálásához használhassam fel. Az így előállított pontfelhő 4,2 millió pontot tartalmazott nyers állományként, a tisztítás és zajszűrés után pedig 3,5 milliót. A pontok átlagos távolsága a pontfelhőben körülbelül 2 cm.



14. Ábra Tisztított pontfelhő Cloud Compare-ben megjelenítve

4.3.Képek készítése

A fényképezés során a lehetőségekhez mérten próbáltam magam tartani a 2.2.-ban leírtakhoz. A képek egy részét napfényes időben készítettem. itt elkerülhetetlen volt pár ellenfényes kép készítése is. A képek másik felét felhős időjárás mellett sikerült készíteni, így sötétebb képeket kaptam, de ellenfény nem volt.

4.3.1. Fényképezés a mobillal

A képeket a saját mobiltelefonommal készítettem, ez egy Huawei P30-as készülék. Ez egy 40 MP-es fő szenzorral rendelkezik, és f/1,8-as rekesznyílás értékkel. A fókusz távolság 6 mm, az ISO és záridő állítását automatikusan hagytam.

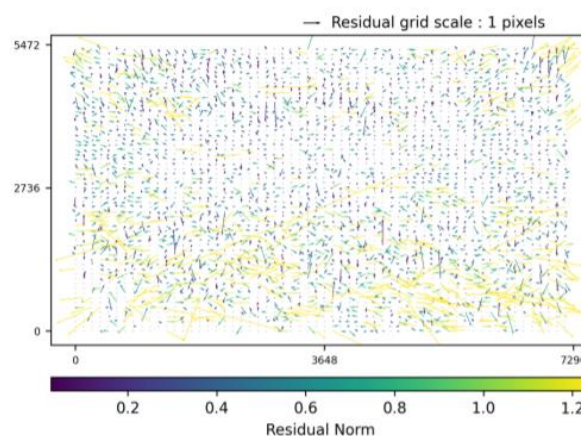


15. Ábra Huawei P30

A telefon saját fotó alkalmazását nem tudtam használni mivel ez szoftveresen javít az elkészített fényképeken, így kevésbé megbízhatóan használható eredményt biztosít a fotogrammetria számára. Szerencsére az Android operációs rendszerre rengeteg ingyenes kamera alkalmazás létezik, ezek közül az Open Camerát választottam. Ezzel a nyers kamera által készített képet kaptam meg jpg fájlformátumban. Összesen 96 darab képet használtam az elkészítettek közül a feldolgozáshoz.

A WebODM a feldolgozás során a kamerát kalibrálja, ennek eredménye a 16. ábrán látható.

	k1	k2	k3	p1	p2	focal	aspect_ratio	cx	cy
Initial	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7500	1.0000	0.0000	0.0000
Optimized	0.0643	-0.0971	0.0668	0.0002	0.0008	0.7680	1.0000	0.0027	-0.0012



16. Ábra Javítási együtthatók és elrajzolások, mobiltelefon

Az elrajzolási paramétereket tartalmazó összefüggések a 2.3 fejezetben találhatóak. A további négy érték a kamera szenzorára vonatkozik, ezeket egy úgynevezett kamera mátrixban foglalhatjuk össze.

Kamera mátrix

$$\begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ahol f_x, f_y a fókusz távolság vektorkomponensei, c_x, c_y a kép javított origójának koordinátái a javítás nélküli rendszerben, az egy pedig a méretaránytényező, ami, mint esetemben is ideálisan egy.

4.3.2. Fényképezés a fényképezőgéppel

Mivel saját fényképezőgéppel nem rendelkezttem, ezért egy kölcsönkapott eszközt használtam, egy Canon EOS 600D-t, ami 18 MP-es szenzorral rendelkezett. A képeket f/8-as rekesznyílás értékkel és 18 mm-es fókusz távolsággal készítettem. A ISO és záridő beállítását az automatikára bíztam.

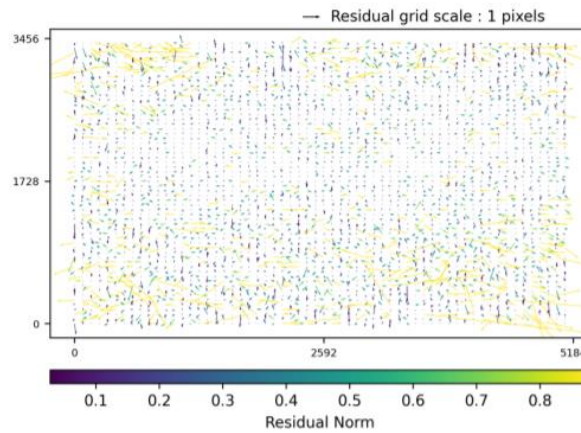


17. Ábra Canon EOS 600D

A fényképezőgéppel elkészített felvételek közül 99 darabot használtam, ez több mint a mobiltelefonnal készített képek száma, de ha az összes felhasznált pixelek számát tekintjük még mindig kevesebb mint a mobiltelefonnal készült képeké.

A WebODM által készített kalibráció eredménye a 18. ábrán látható

	k1	k2	k3	p1	p2	focal	aspect_ratio	cx	cy
Initial	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7831	1.0000	0.0000	0.0000
Optimized	-0.1599	0.1095	0.0582	0.0016	0.0011	0.8380	1.0000	-0.0016	0.0035



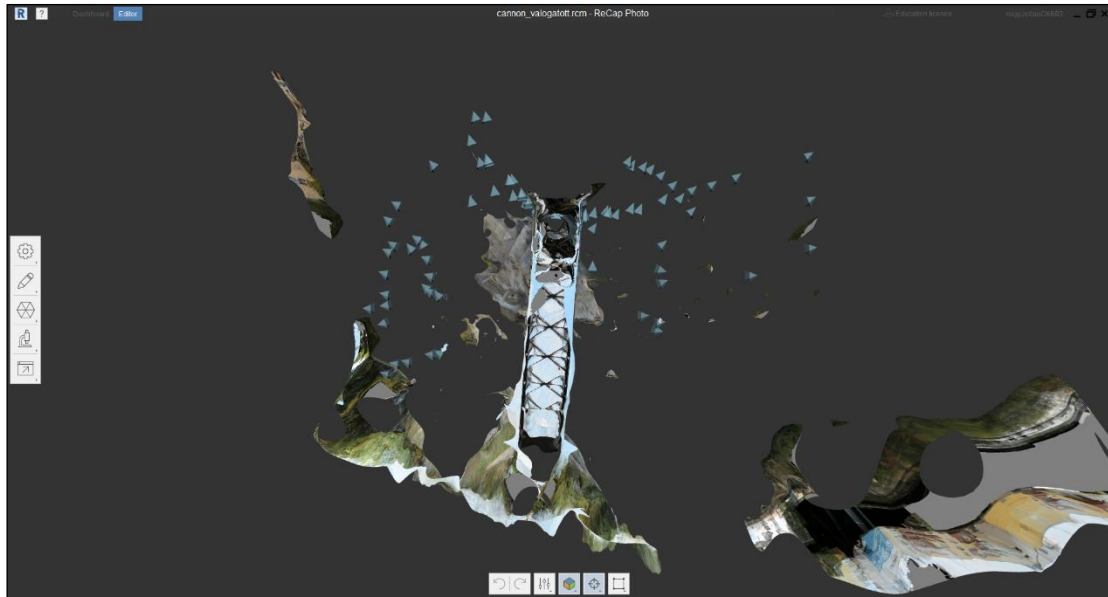
18. Ábra Javítási együtthatók és elrajzolások, fényképezőgép

A két kalibrációt összevetve látjuk, hogy a mobil kamerájának nagyobb elrajzolási vannak, míg a fényképezőgépnél ezek inkább a kép szélein lépnek csak fel. Ez volt a várható eredmény, a drágább szenzor, ami cél specifikus, jobb tulajdonságokkal rendelkezik.

5. Feldolgozás

5.1. Autodesk Recap Photo

A feldolgozás lefutása után, rögtön előjött az első probléma, ami több programnál is jelentkezett, mind a két készülékkel készült képek esetében. A híd egy szimmetrikus szerkezet a hossz és keresztmetszeti tengelyére is, és a két hídfő is megegyezik a rajta lévő tábláknak köszönhetően, ezért a ReCap a képek egymáshoz képesti elhelyezkedését rosszul határozta meg. A tájékozás alapján, csak az egyik hídfő alatt volt meg az összekötés és a két oldalon készült képeket is úgymond egymásra toltá, és a híd másik végénél mintha nem is készült volna fénykép. A képen látható kék háromszögek a képkészítések rosszul feltételezett pozíciói.



19. Ábra Kamerahelyzetek rossz meghatározása a fényképezőgéppel készült fényképeknél

Ezt a modellt az összehasonlítás során nem használtam fel, mert nem értékelhető eredményekhez vezetett volna. Így kénytelen voltam más megoldást keresni.

Mivel ennél a programnál nem állíthatóak a paraméterek, amikkel esetlegesen megoldható lenne ez a probléma, több kulcsponthoz kereséssel, minimális közös kulcspontszám megadásával két kép között és más az SfM-et befolyásoló paraméter változtatásával, ezért a híd két oldalát két külön modellt készítettem fel. Így az képek illesztése már sikerült, és a két oldalt a bemért pontokkal transzformáltam a közös helyi rendszerbe. A déli oldalról készült képek modelljének RMSE (négyzetes közép eltérés) 2,46 cm lett míg az északi oldalról 3,37 cm a fényképezőgép esetében. A mobiltelefonnal 2,79 cm és 4,55 cm. Az első táblázatból hiányzó pontokat durva hiba miatt hagytam ki a transzformációból. A hiba oka, hogy bár a modell elkészült mindkét oldalról, a híd egyes részei eltolódva képződtek le ezért az ott bemért illesztőpontokat nem tudtam használni.

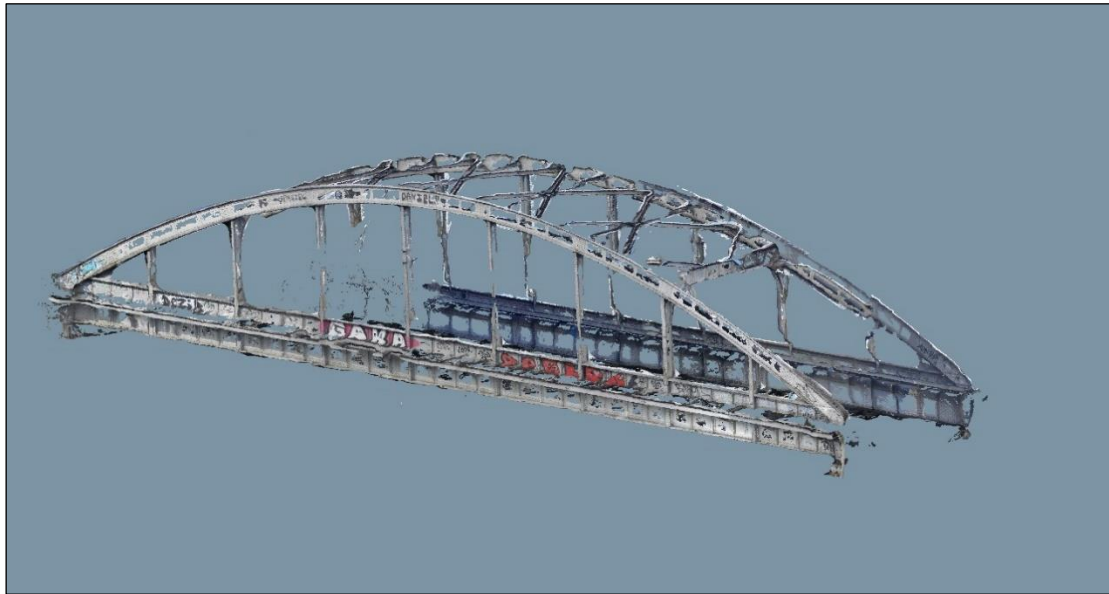
Pontszám	Mobiltelefon [cm]	Fényképezőgép [cm]
901	-	2,84
902	3,31	4,71
903	6,40	3,27
904	3,22	-
905	-	2,05
906	3,38	-
907	2,56	2,15
908	3,31	2,48
909	1,45	2,69
910	2,82	-
RMSE	D: 2,79 É: 4,55	D: 2,46 É: 3,37

1. Táblázat ReCap Photo transzformációs ellentmondások

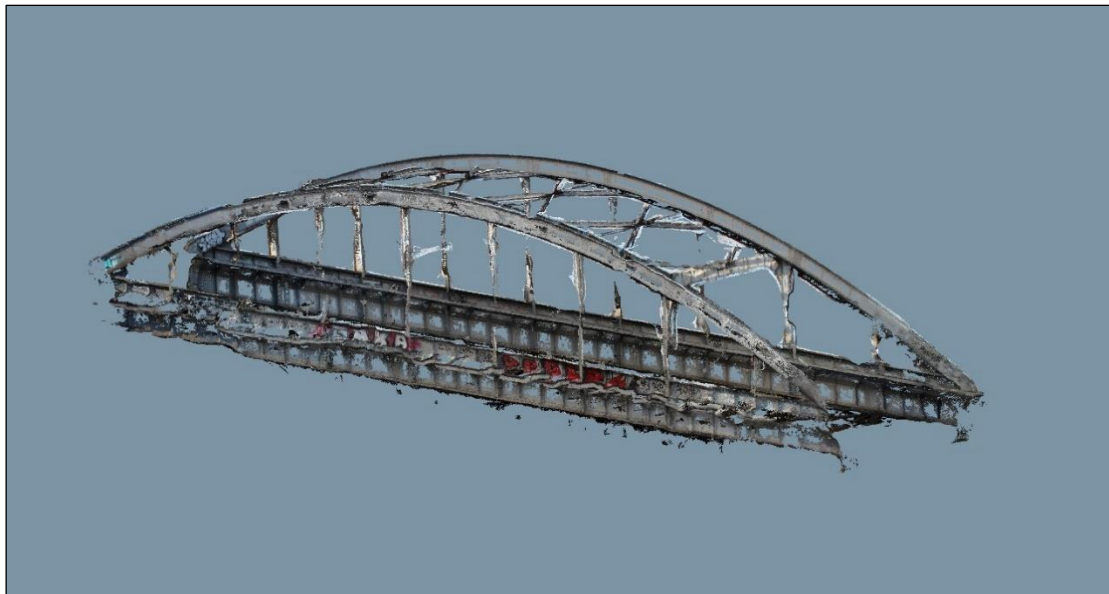
A tisztítás során SOR (Statistical outlier Filter) alkalmaztam, illetve kézzel töröltem az egyértelműen hamisan leképződött pontokat.

A programból a lehető legkevésbé feldolgozott eredményt szerettem volna kinyerni, így a térhálómodell felületének sarokpontjait Cloud Compare-ben elláttam RGB színekkel a textúrák alapján és ezt, mint pontfelhő használtam fel.

Feldolgozási idő tekintetében, ami az emberi munkát jelenti ennél a programnál volt a legkevesebb, feltöltjük a fotó csomagot, letöltjük a modellt. Ez egy igen kényelmes munkafolyamat, de komplikáltabb modellek esetében, mint amilyen a vizsgált híd is semmilyen ráhatásunk nincs az eredményre a folyamat során.



20. Ábra ReCap Photo, mobiltelefon, színezett pontfelhő



21. Ábra ReCap Photo, fényképezőgép, színezett pontfelhő

5.2. RealityCapture

A feldolgozás elején teszteltem mindkét forrásból jövő adaton, hogy a program mennyi maximális kulcspont és milyen, a képek átlagos átfedési nagyságára vonatkozó beállítás mellett adja a legjobb eredményt. A kulcspontok számát képenként 60000-ben maximalizáltam, az átfedést közepesnek állítottam be. A feldolgozás elején bevittam a bemért pontokat a programba és amelyik képen szerepeltek, azon meg is jelöltem őket. A ritka pontfelhő elkészülte után megtekinthetjük a pontok koordináta ellentmondásait, és a maximális vetítési eltérést a jelölt ponthoz képest pixel mértékegységben. A kiegyenlítés utáni ellentmondások középértéke és átlaga rendre 0,47 pixel és 0,80 pixel és a mobiltelefonnál 0,67 pixel és 0,88 pixel lett.

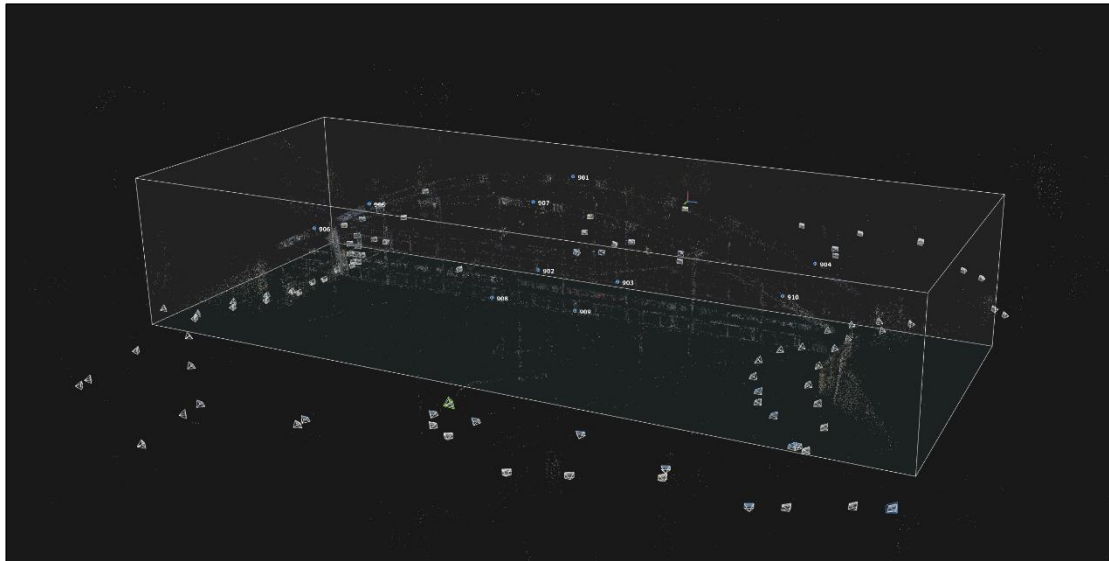
Pontszám	Mobiltelefon [mm / pixel]		Fényképezőgép [mm / pixel]	
901	3,4	1,75	2,7	2,54
902	0,8	1,38	4,0	1,72
903	0,5	1,29	4,6	1,24
904	0,5	0,75	5,3	1,43
905	0,6	1,66	4,2	1,29
906	1,8	1,15	1,9	1,56
907	3,2	1,98	2,5	2,23
908	2,5	1,78	4,1	1,26
909	0,8	1,39	4,5	1,14
910	0,3	1,28	4,7	1,36
RMSE	1,8	1,48	3,9	1,63

2. Táblázat RealityCapture Koordináta ellentmondások és maximális vetítési eltérések

Láthatóan a fényképezőgéppel készült modellnél az ellentmondások nagyobbak, ennek oka valószínűleg a kisebb felbontás, mivel így kevésbé megbízhatóan tudtam a pontokat a képeken jelölni. Ennél a programnál lettek a legkisebbek az ellentmondások a helyi rendszerbe történő transzformáció során, ez annak a következménye, hogy míg a többi szoftvernél a már kész modellt tudtam csak transzformálni, itt az illesztőpontokat a képeken sokkal szabatosabban tudtam jelölni, mint egy pontot a pontfelhőben.

Mindkét adatforrás feldolgozása probléma nélkül sikerült, 1-1 képet mindkét adathalmazból ki kellett vennem a kulcspontok félreazonosítása miatt. Az ilyen képek megkeresésére a

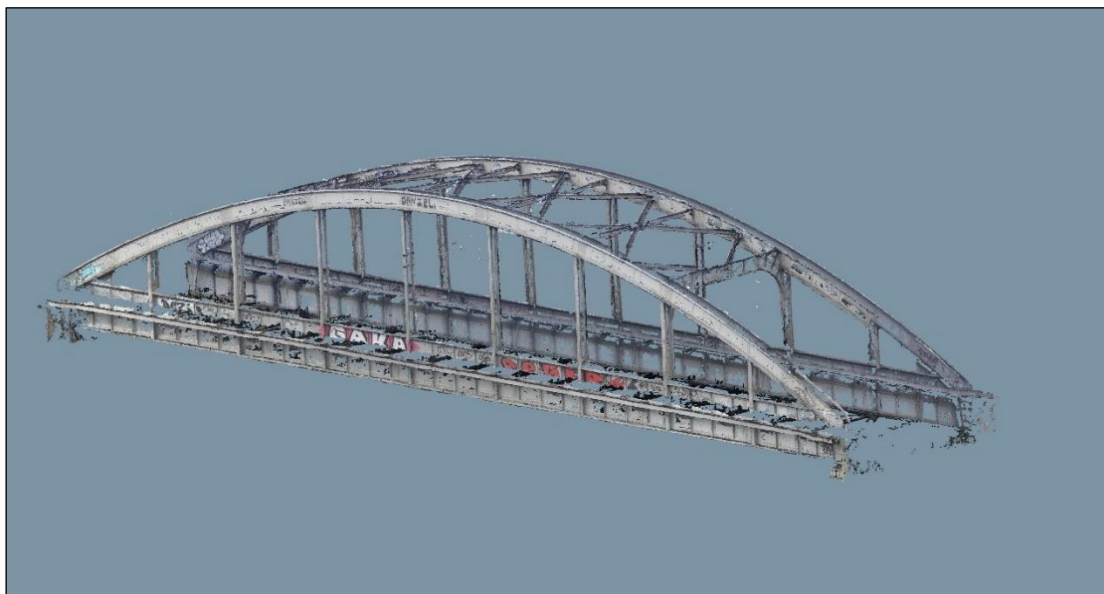
programban külön eszköz van, ahol határérték állításával tudjuk szűrni a képeinket a kulcspontok ellentmondására.



22. Ábra Lehatárolt ritka pontfelhő kamerapozíciókkal és illesztőpontokkal

A hídszerkezetre lehatárolt régióból a program megalkotta a sűrű pontfelhőt és a térháló modellt. Ezek még nem rendelkeznek színnel vagy textúrával itt két opció közül választhatunk. Színezés vagy textúrázás, a színezés esetén, ami egy gyorsabb folyamat, a sűrű pontfelhő pontjai kapnak egy RGB színt. Ezt használtam a nyers sűrű pontfelhő színezésére, amit az összehasonlításban is használtam. A térháló modellnél pedig a textúrázást, ez magában foglalja a modell felületének a „kiterítését” és felosztását, erre kerülnek rá a képekből kinyert textúrák. Ez időigényesebb feladat, viszont a modell valóságosabb lesz.

A feldolgozás számítása a programban kimondottan gyors, de mivel feldolgozás közben állíthatjuk a paramétereket, lehatárolhatjuk a feldolgozandó területet, emberi munkaidőből többet igényel, mint egy olyan program, amiben nincsen lehetőségünk a feldolgozási lépések közben módosítani a folyamatot.



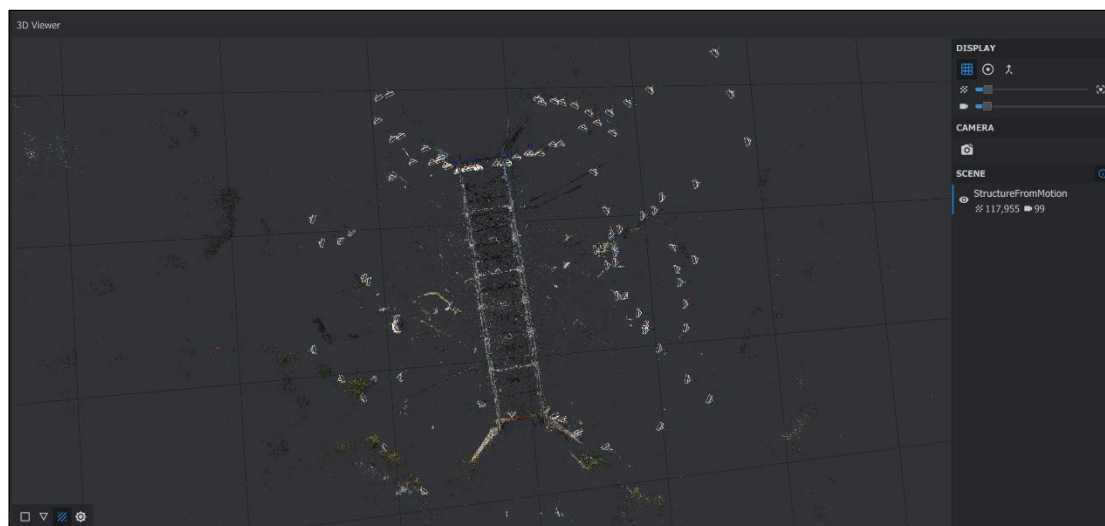
23. Ábra RealityCapture, mobiltelefon, színezett pontfelhő



24. Ábra RealityCapture, fényképezőgép, színezett pontfelhő

5.3.Meshroom

Ennél a programnál is fellépet az a probléma, mint a ReCap Photo-nál, hogy rosszul azonosította az összetartozó képpárokat. A hivatalos fórumon is volt kérdés ezzel kapcsolatban, és lehetséges megoldásokat is találtam a válaszok között. Az egyik a több kulcspont használata volt, így itt is 60000-re növeltem a képenkénti maximális számot. Illetve megadtam egy minimális kulcspontszámot, ami két kép között szükséges a pár megtalálásához. Ezen kívül növeltem a képpár között megengedett maximális szöget és csökkentettem a minimálisat. A program parametrizálhatóságának köszönhetően a fényképezőgéppel készült képeket sikerült egy projektben feldolgoznom. A négyzetes közép eltérés (RMSE) 0,65 pixel lett. Meg kell viszont említenem, hogy a textúrázott térháló modellt megvizsgálva, észrevehető, hogy van olyan fénykép, ami a híd rossz oldalára került az SfM során, haloványan látszik a déli oldalon lévő grafiti az északon is.



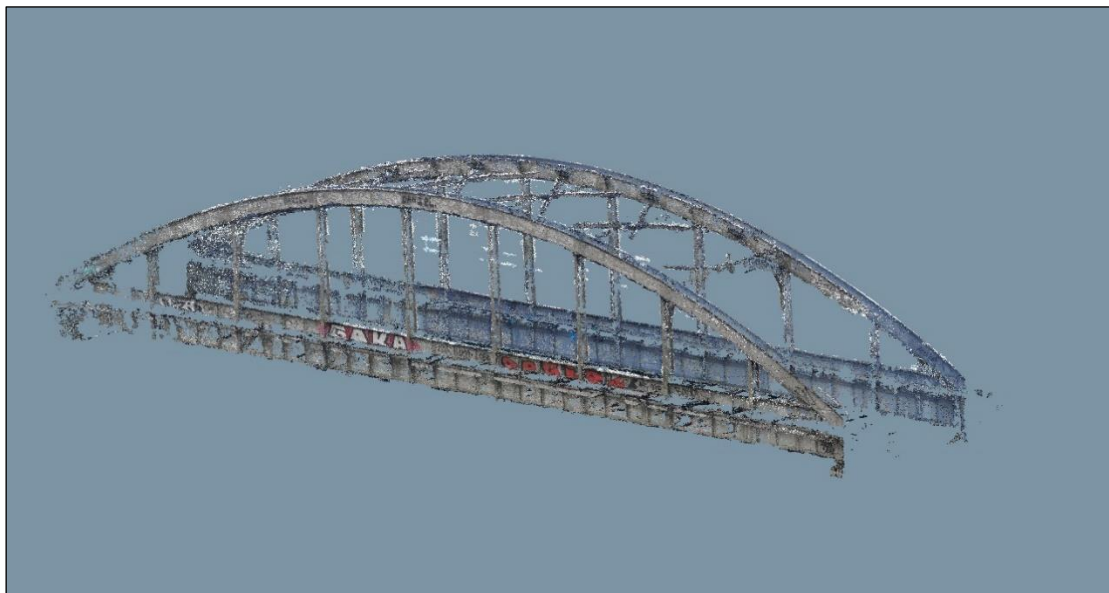
25. Ábra Meshroom, fényképezőgép, ritka pontfelhő és fényképek helyzetének felülnézete

Mobiltelefonnal készített fényképek esetében, nem működött a paraméterek finomhangolása. Így a ReCap Photo-nál bemutatott megoldáshoz folyamodtam és két projektre bontottam a fotók feldolgozását, és ezeket végül Cloud Compare-ben raktam össze egy pontfelhővé, illetve térhálómodellé. A négyzetes közepes eltérés 0,76 pixel és 0,75 pixel lett.

Pontszám	Mobiltelefon [cm]	Fényképezőgép [cm]
901	2,15	3,36
902	1,22	3,04
903	1,25	2,77
904	1,09	3,51
905	1,47	2,46
906	2,30	2,63
907	2,01	1,85
908	2,14	3,65
909	0,53	0,98
910	2,00	2,51
RMSE	D: 1,91 É: 1,49	2,28

2. Táblázat Meshroom transzformációs ellentmondások

A feldolgozási paraméterek állítása sok lehetőséget megnyitott előttem, egyúttal jócskán meghosszabbította feldolgozással töltött időt, mivel a sok opciót tesztelve próbáltam egyre jobb modellt létrehozni.



26. Ábra Meshroom, mobiltelefon, színezett pontfelhő



27. Ábra Meshroom, fényképezőgép, színezett pontfelhő

5.4.WebODM

Az első teszt futtatások során Az előre definiált „3D modell” paraméterbeállításával készítettem el a modelleket. Ez nem vezetett megfelelő eredményre, ezért növeltem a képenkénti maximális kulcspontszámot és a kulcspontok leírására szolgáló attribútum minőségét. Ezzel elértem, hogy sikeres legyen az SfM, ne legyenek félreazonosított képek. A következő paraméter, amit állítottam a sűrű pontfelhő sűrűsége volt. Alapértelmezetten a program a képek mélységképeit kisebb felbontásban készíti el a bemeneti felbontásnál, ezáltal a sűrű pontfelhőben kevesebb pont fog leképződni. Ez a beállítást a normál értékről magasra raktam, sajnos olyan beállítási lehetőség nem volt, ami a bementi felbontást vette volna alapul. A program képes a képek EXif információjában tárolt GPS koordinátákat felhasználni a feldolgozás során, a mobiltelefonnál lett volna lehetőségem ezt kihasználni, de a fényképek készítésekor ezzel még nem voltam tisztában, így nem kapcsoltam be a pozíció rögzítését.

A négyzetes közép eltérés pixeleken mérve a mobiltelefon esetében 1,05 pixel, még a fényképezőgép esetében 0,88 pixel.

Pontszám	Mobiltelefon [cm]	Fényképezőgép [cm]
901	3,62	1,24
902	0,73	1,37
903	0,33	0,66
904	2,27	-
905	1,01	2,04
906	0,85	1,03
907	1,44	-
908	1,13	1,19
909	1,68	3,51
910	2,20	2,56
RMSE	1, 57	1,92

3. Táblázat WebODM, transzformációs ellentmondások

A kimenetként nyert pontfelhő ennél a programnál nem nyers, hanem egy újramintavételezett állomány, ez a pontfelhő állandó pontsűrűségéből látszik.



28. Ábra WebODM, mobiltelefon, színezett pontfelhő



29. Ábra WebODM, fényképezőgép, színezett pontfelhő

6. Összehasonlítások

Ebben a részben olvasható az általam elkészített modellek vizsgálata. A fényképezőgépre és mobiltelefonra egyaránt. A futási időket a programok „log” (napló) fájljaiból nyertem ki, így a futási idők ténylegesen a számítással eltöltött perceket jelentik. Az emberi munka ráfordítást az egyes programoknál az 5. Feldolgozás résznél fejttem ki. Az Autodesk Recap Photonál nincs értelme a feldolgozási időről írni mivel nem ismerjük a hardvert, másodsorban a képeink feltöltése után a feldolgozás csak akkor veszi kezdetét amennyiben a felhőben van kapacitás, ellenkező esetben a projektünk várólistán lesz egy virtuális sorban.

A képekből kinyert adatokat is táblázatos formában foglalom össze. Ritka pontfelhő az SfM eljárásból nyert pontokat tartalmazza. A nyers pontfelhő a programból kimentett, manuálisan nem módosított állapotot jelenti. A tisztított pontfelhő már csak a hídszerkezetre korlátozódik, manuálisan és a Cloud Compare-ben található zajsztűrés segítségével tisztított. Ezeknek az arányát is összevetem, hogy mennyi hasznos információ született a feldolgozásból, függetlenül a pontfelhő sűrűségétől. A felhasznált képek darabszámból megkapjuk hány megapixel állt a programok rendelkezésére. A Pont/MP arány megmutatja, hogy egy megapixelre hány hasznos pont (tisztított pontfelhő) jutott.

Legvégül bemutatom a referencia lézerszkenneléshez képest a pontfelhőim eltérését. Itt is a Cloud Compare-t használtam azon belül is pontfelhő-pontfelhő eltérést vizsgáltam. Az egyszerű pontfelhő-pontfelhő távolság számítás az olyan pontfelhőknél, amik, nem egyenletes sűrűséggel rendelkeznek, illetve hiányok, lyukak találhatóak bennük nem a legpontosabb eredményt adja. Pontosabb eredményre jutunk, ha pontok kis környezetében meghatározzuk azok milyen területet alkotnak és ehhez képesti távolságát vesszük a hasonlított pontfelhő béli pontnak. Szerencsére a Cloud Compare-ben erre is van lehetőségem. Az így készült különböző távolság határok között színezett ábrák és hisztogramok segítségével szeretném bemutatni az egyes szoftverek feldolgozási minőségét és következtetéseket levonni az eredmény használhatóságáról mérnöki szempontból.

6.1. Mobillal készült modellek vizsgálata

6.1.1. Futási idők

Program	Reality-Capture	Meshroom	WebODM
SfM (perc)	1	30+35	-
Sűrű pontfelhő (perc)	90	64+52	-
Térháló készítés (perc)	40	6+4	-
Textúrázás (perc)	8	20+17	-
Teljes feldolgozás(perc)	139	228	136

4. Táblázat Mobiltelefonos adathalmazon mért futási idők¹

A Meshroom-os feldolgozás mivel két projektben történt ezért a részeit időket mindkettőre kiírtam. A legelső szembetűnő érték a Reality Capture SfM-je, a ritka pontfelhőt szinte azonnal megkapjuk a feldolgozásunk során, ez egy igen nagy előny, hiszen így látjuk a képeink megfelelőek lesznek-e a kívánt feldolgozáshoz. Az SfM legidőigényesebb részlete a kulcspontkeresés, ezt a Reality Capture-ben egy adott képre a program egyszer csinálja meg, egy más paraméterekkel futatott SfM esetén így nagyobb sebességet érhetünk el. A Meshroom blokkos feldolgozása is hasonló lehetőségeket rejt, de sebességében nem közelíti meg a másik programot. Mivel a WebODM feldolgozás jelentése nem tartalmazza az egyes részfolyamatok futási időit ezért itt csak a teljes futási időt tudom összevetni a másik két programmal. Ez a mobiltelefonos képeknél közel megegyezik a RealityCapture feldolgozási idejével.

¹ A WebODM más hardveren futott, ezt figyelembe kell venni az idők összehasonlításában.

6.1.2. Adatok mennyisége

Program	Lézerszkennelés	Autodesk Recap	Reality- Capture	Meshroom	WebODM
Ritka pontfelhő (ezer pont)	-	-	128	94,5	36
Nyers pontfelhő (millió pont)	4,2	3,2	23	0,8	23
Tisztított pontfelhő (millió pont)	3,5	2,1	20,5	0,68	16,3
Arány (%)	83	65	89	85	70
Felhasznált képek (db)	-	71	95	83	96
Megapixelek szám (db)	-	2840	3800	3320	3840
Pont/MP (db)	-	739	5394	205	4245

5. Táblázat Mobiltelefonos adathalmazból nyert adatok mennyisége

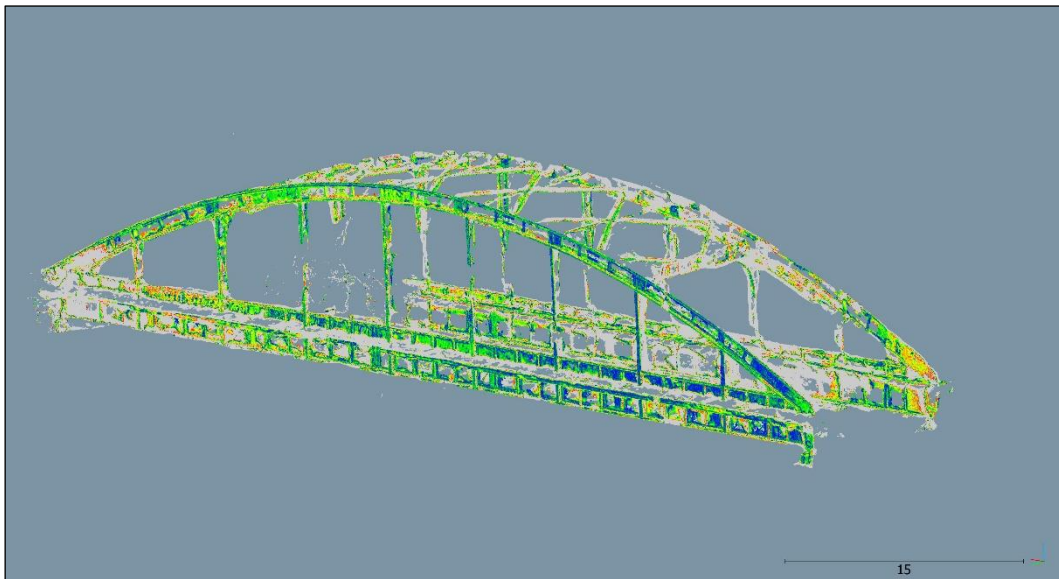
A RealityCapture és a WebODM nagyságrendileg hasonló mennyiségű nyers adatot szolgáltatott, azonban a tisztított pontfelhő méretében már tapasztalható eltérés. Az Autodesk terméke nagyságrendileg hasonló pontszámot produkált, mint a referencia lézerszkennelés. A Meshroom-ból meglepően kevés adatot sikerült kinyerni. Arányaiban viszont a kevés adatból nagyrésze hasznos volt, a ReCap Photo szolgáltatotta a vizsgálat szempontjából legtöbb használhatatlan adatot. A feldolgozáshoz ténylegesen felhasznált képek számának ismeretében kiszámítottam mennyi pontot kaptam a tisztított pontfelhőben megapixelenként, ebben is jeleskedett a RealityCapture.

6.1.3. Eltéréstérképek

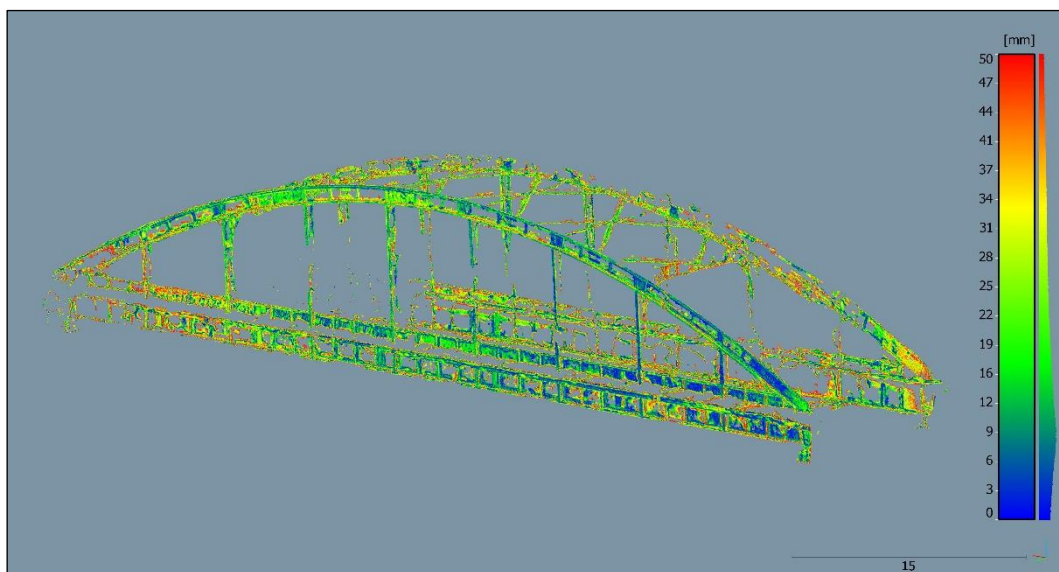
Azzal a feltételezéssel éltem, hogy az 5 cm-nél nagyobb eltéréssel rendelkező pontok, durva hibások vagy nem képződtek le a szkennelésben, így nincs összehasonlítási alap azon a területen a fotogrammetriából kapott pontfelhőhöz.

A színezés az eltérés mértékét jelzi, a szürke szín pedig az 5 cm-nél nagyobb távolságra lévő pontokat.

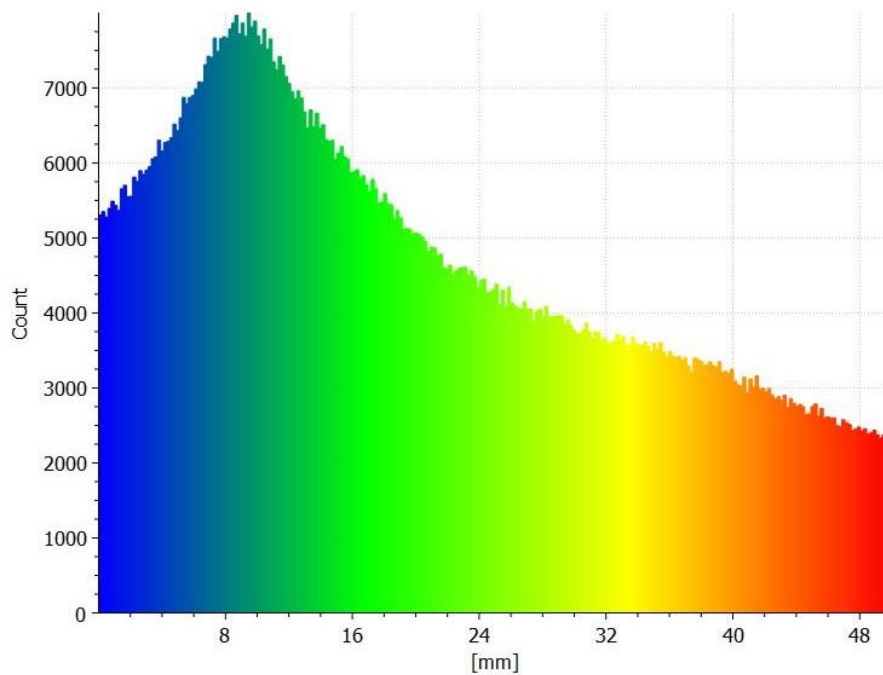
Autodesk ReCap Photo



30. Ábra ReCap Photo, mobiltelefon, 5 cm-es eltérés feletti pontok szürkével



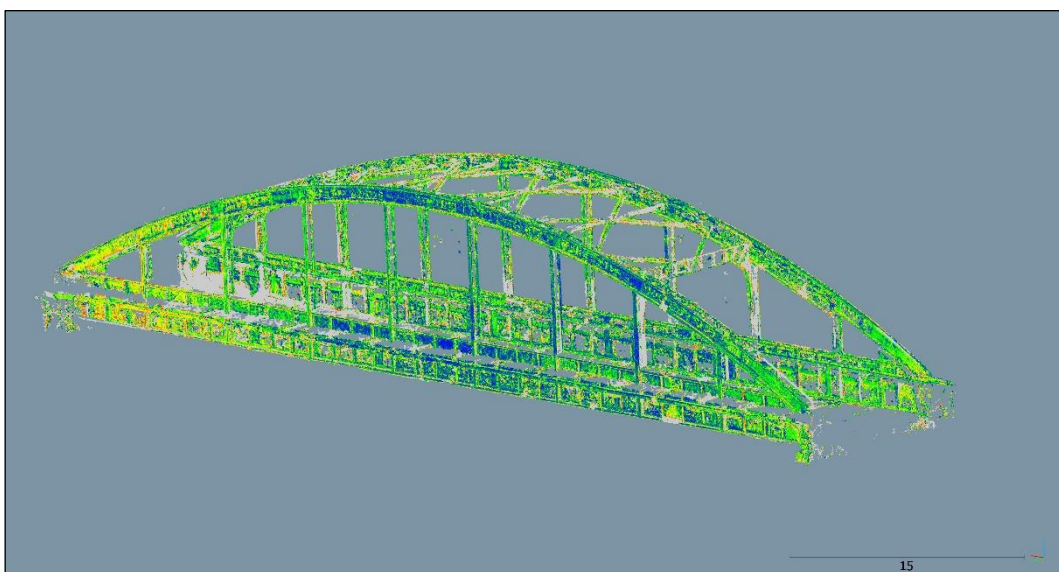
31. Ábra ReCap Photo, mobiltelefon, eltérések alapján színezett pontfelhő



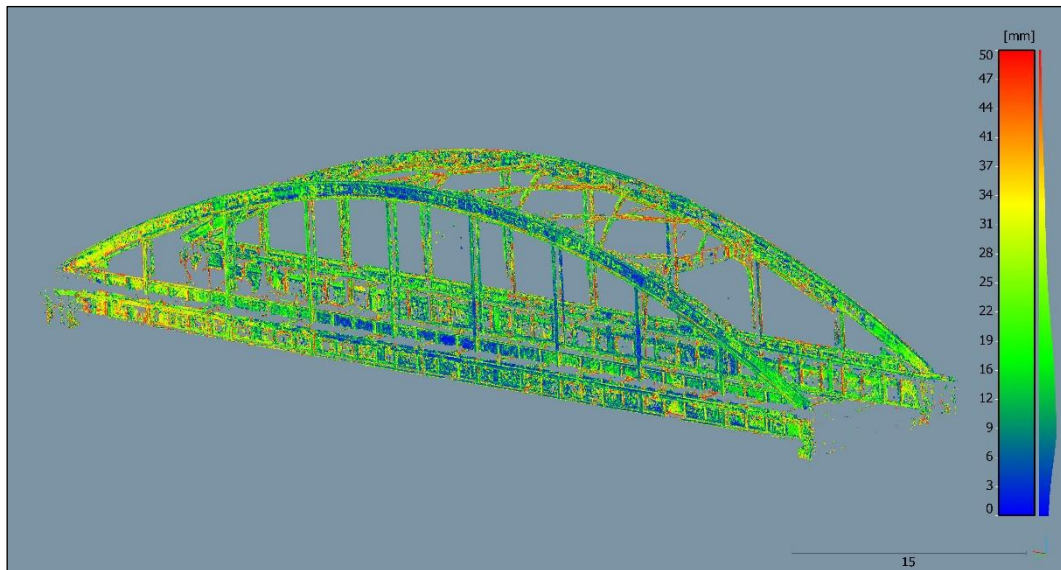
32. Ábra ReCap Photo, mobiltelefon, eltérésértékek hisztogramja

A tisztított pontfelhő pontjai közül 1,2 millió volt a határértéken belül, ez a pontok 57 %-át jelenti. Az átlagos távolság 20 mm volt és az értékek szórása 14mm lett.

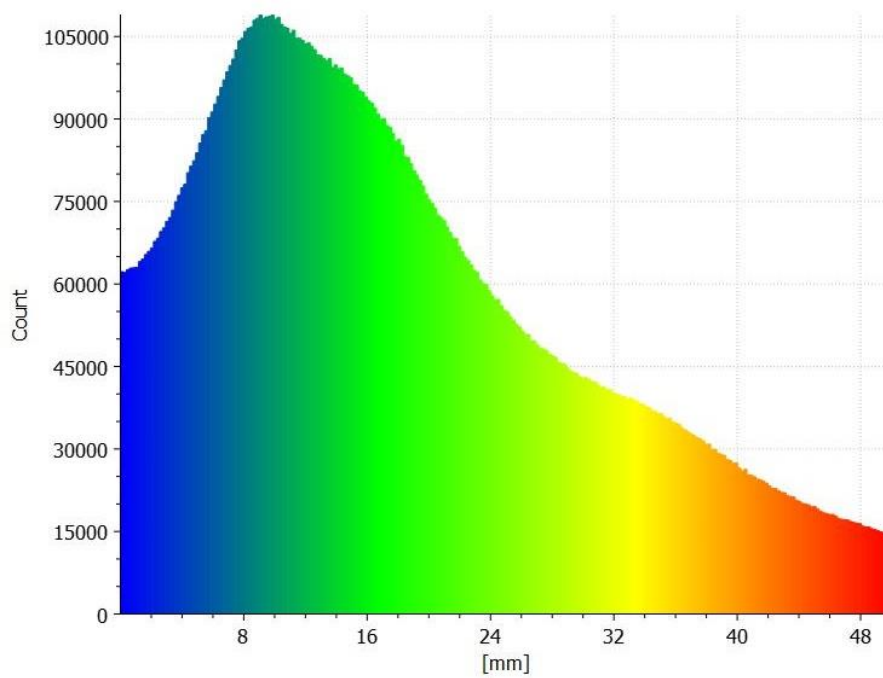
RealityCapture



33. Ábra RealityCapture, mobiltelefon, 5 cm-es eltérés feletti pontok szürkével



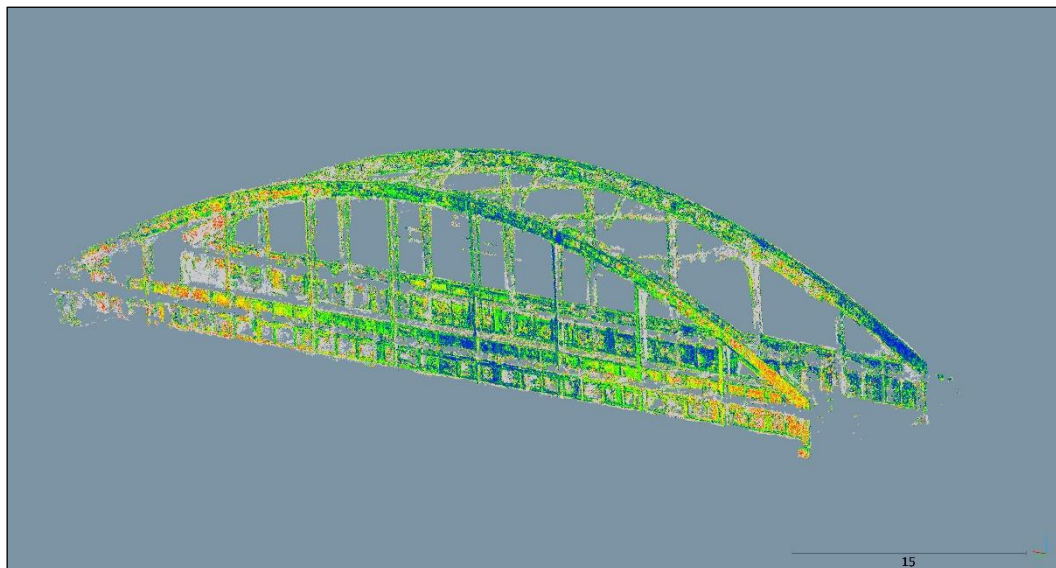
34. Ábra RealityCapture, mobiltelefon, eltérések alapján színezett pontfelhő



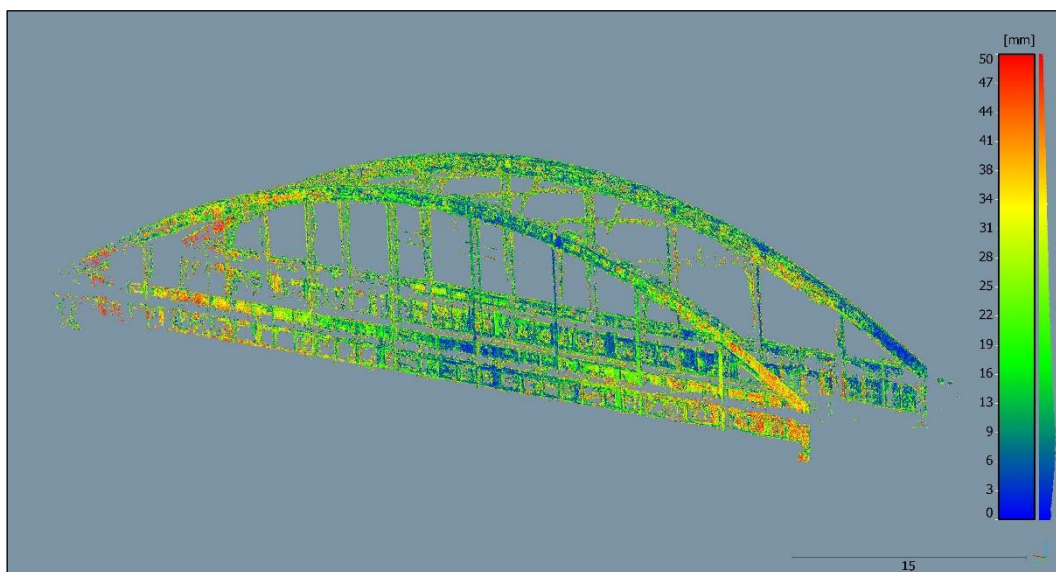
35. Ábra RealityCapture, mobiltelefon, eltérésértékek hisztogramja

A tisztított pontfelhő pontjai közül 15 millió volt a határértéken belül, ez a pontok 73%-át jelenti. Az átlagos távolság 18 mm volt és az értékek szórása 12 mm lett.

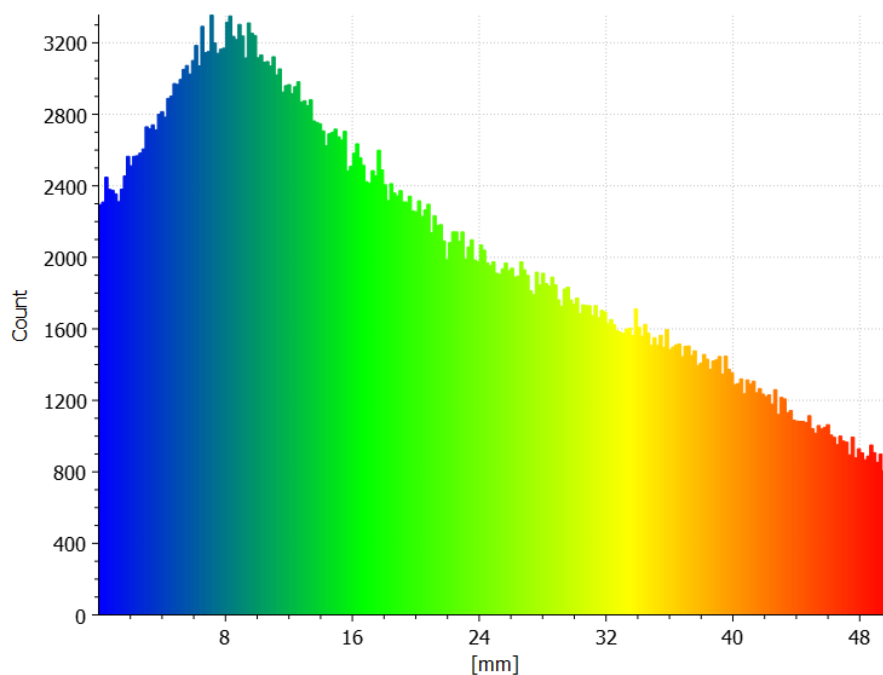
Meshroom



36. Ábra Meshroom, mobiltelefon, 5 cm-es eltérés feletti pontok szürkével



37. Ábra Meshroom, mobiltelefon, eltérések alapján színezett pontfelhő



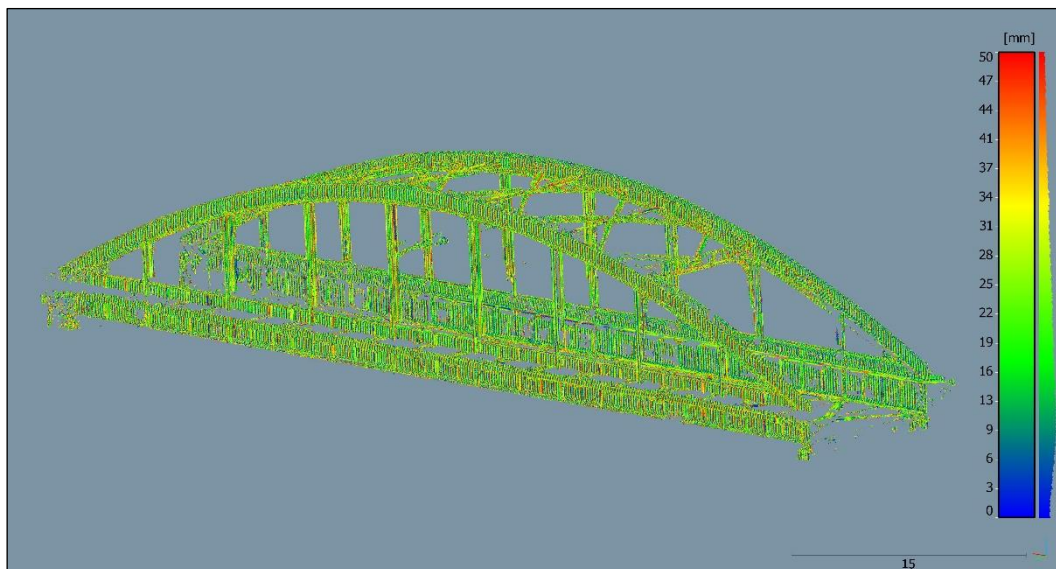
38. Ábra Meshroom, mobiltelefon, eltérésértékek hisztogramja

A tisztított pontfelhő pontjai közül 520 ezer volt a határértéken belül, ez a pontok 76%-át jelenti. Az átlagos távolság 20 mm volt és az értékek szórása 13 mm lett.

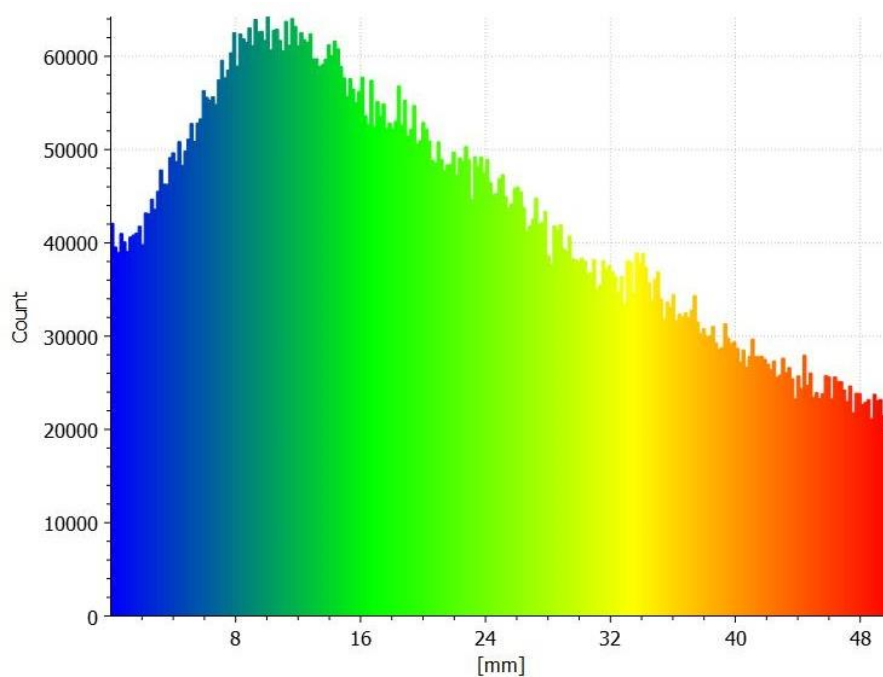
WebODM



39. Ábra WebODM, mobiltelefon, 5 cm-es eltérés feletti pontok szürkével



40. Ábra WebODM, mobiltelefon, eltérések alapján színezett pontfelhő



41. Ábra WebODM, mobiltelefon, eltérésértékek hisztogramja

A tisztított pontfelhő pontjai közül 11 millió volt a határértéken belül, ez a pontok 67%-át jelenti. Az átlagos távolság 21 mm volt és az értékek szórása 13 mm lett.

6.2. Fényképezőgéppel készült modellek vizsgálata

6.2.1. Futási idők

Program	Reality-Capture	Meshroom	WebODM
SfM (perc)	1	84	-
Sűrű pontfelhő (perc)	19	200	-
Térháló készítés (perc)	19	53	-
Textúrázás (perc)	6	11	-
Teljes feldolgozás(perc)	55	348	133

6. Táblázat Fényképezőgépes adathalmazon mért futási idők²

A táblázat alapján látható, hogy a Reality Capture sokkal gyorsabb voltezen az adathalmazon. Itt is látható mekkora különbség van az SfM feldolgozási idejében. A WebODM hasonló időt produkált, mint a mobiltelefonos adathalmazon. A Meshroom a kisebb felbontású képeken hosszabb feldolgozási időt produkált, ennek az oka, hogy több kép feldolgozása nem lineárisan növeli a feldolgozási időt, hanem exponenciálisan, és a fényképezőgépes adathalmazt egyben dolgoztam fel nem két részben, mint a mobiltelefonnal készült képeket.

² A WebODM más hardveren futott, ezt figyelembe kell venni az idők összehasonlításában.

6.2.2. Adatok mennyisége

Program	Lézerszkennelés	Autodesk Recap	Reality- Capture	Meshroom	WebODM
Ritka pontfelhő (ezer pont)	-	-	144	118	42
Nyers pontfelhő (millió pont)	4,2	1,7	10,1	1,3	12
Tisztított pontfelhő (millió pont)	3,5	0,9	7,3	1	6
Arány (%)	83	53	72	77	50
Felhasznált képek (db)	-	94	98	99	99
Megapixelek szám (db)	-	1692	1782	1782	1782
Hasznos Pont/MP (db)	-	532	4097	561	2974

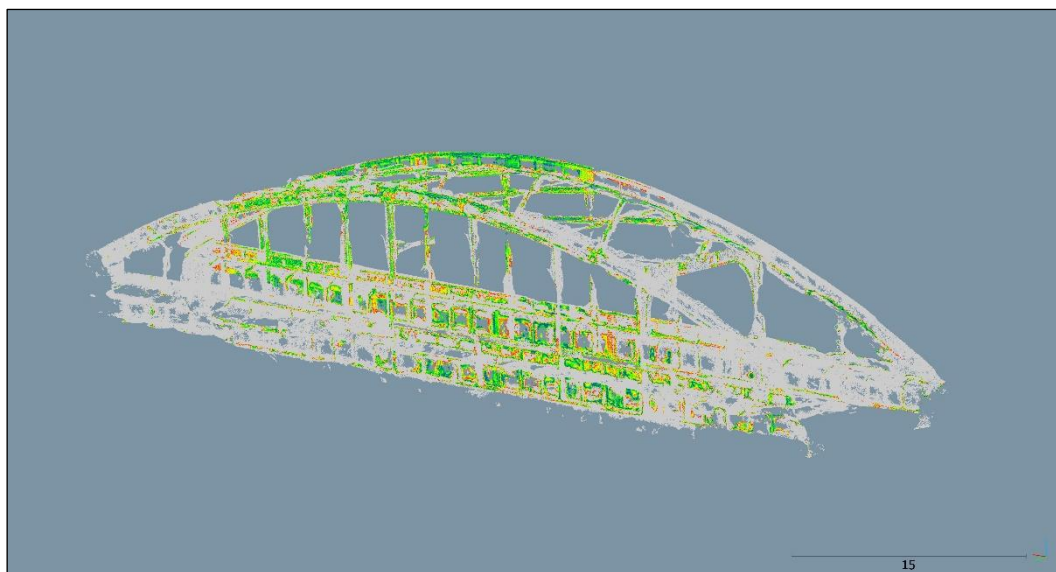
7. Táblázat Fényképezőgépés adathalmazból nyert adatok mennyisége

Hasonlóan a mobiltelefonos adatokhoz, itt is a RealityCapture és a WebODM produkálta a legtöbb pontot tartalmazó pontfelhőt. Az ReCap Photo és a Meshroom egy nagyságrenddel kevesebb pontot szolgáltatott. A hasznos pontok arányában egyik program sem érte el a lézerszkennelés hatékonyságát. A megapixelenként hasznos pontok számában a RealityCapture érte el a legjobb eredményt. A Meshroom és a ReCap Photo a leggyengébbet fej-fej mellett.

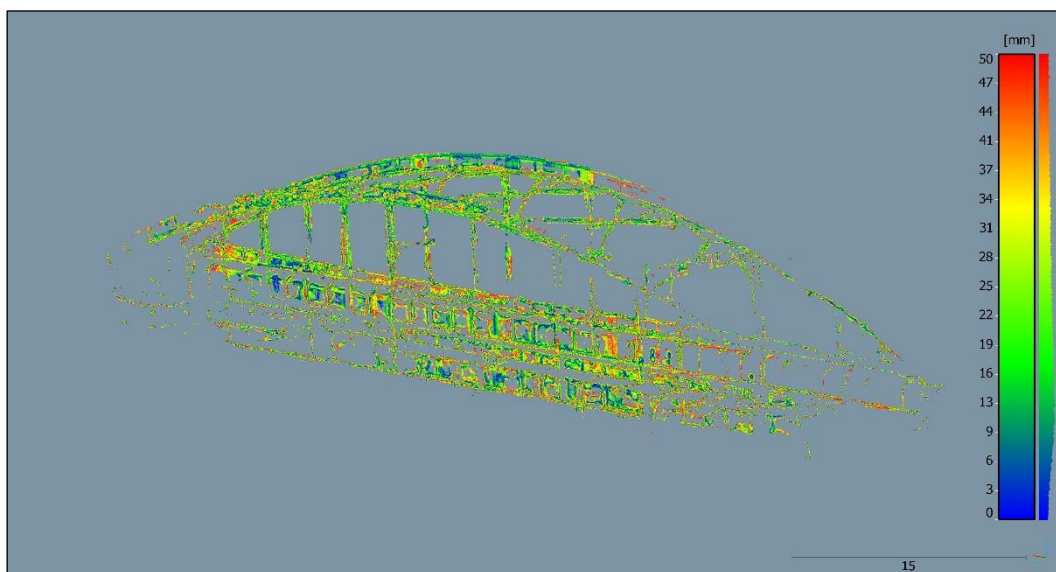
6.2.3. Eltéréstérképek

A fényképezőgépes adathalmazból készült pontfelhők eltéréstérképeire is a 6.1.3-ban leírtak vonatkoznak.

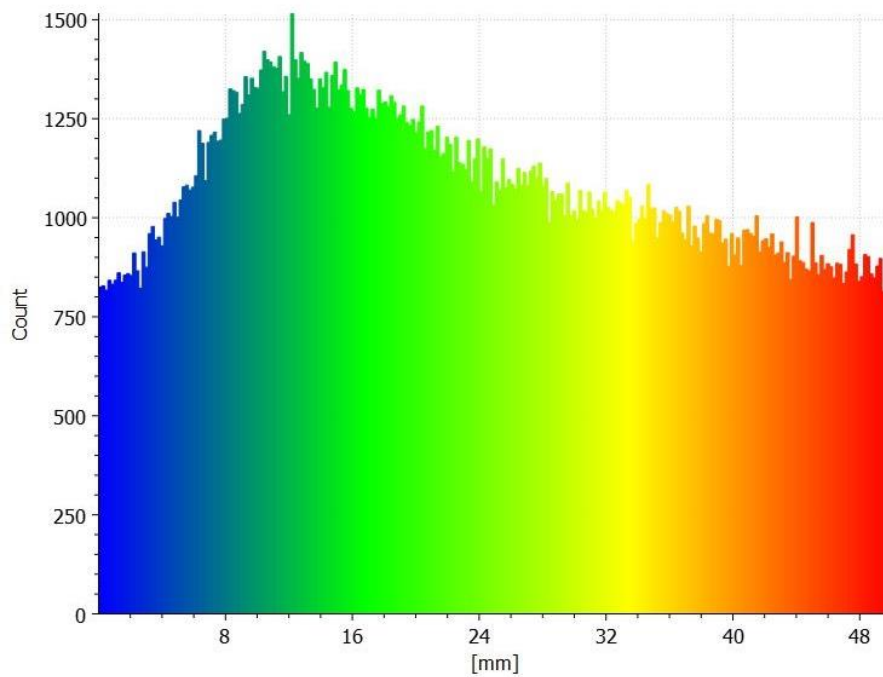
ReCap Photo



42. Ábra ReCap Photo, fényképezőgép, 5 cm-es eltérés feletti pontok szürkével



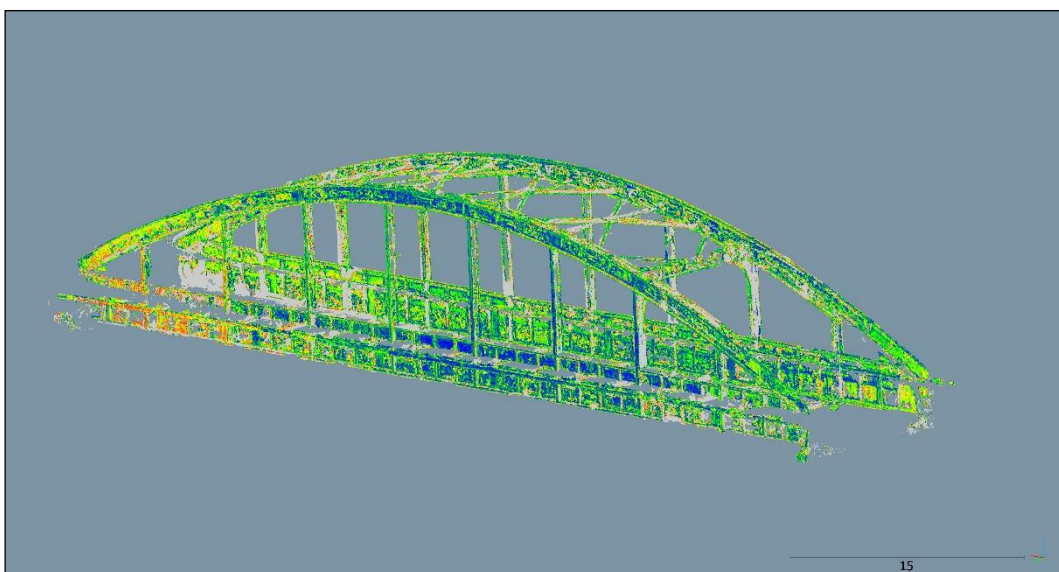
43. Ábra ReCap Photo, fényképezőgép, eltérések alapján színezett pontfelhő



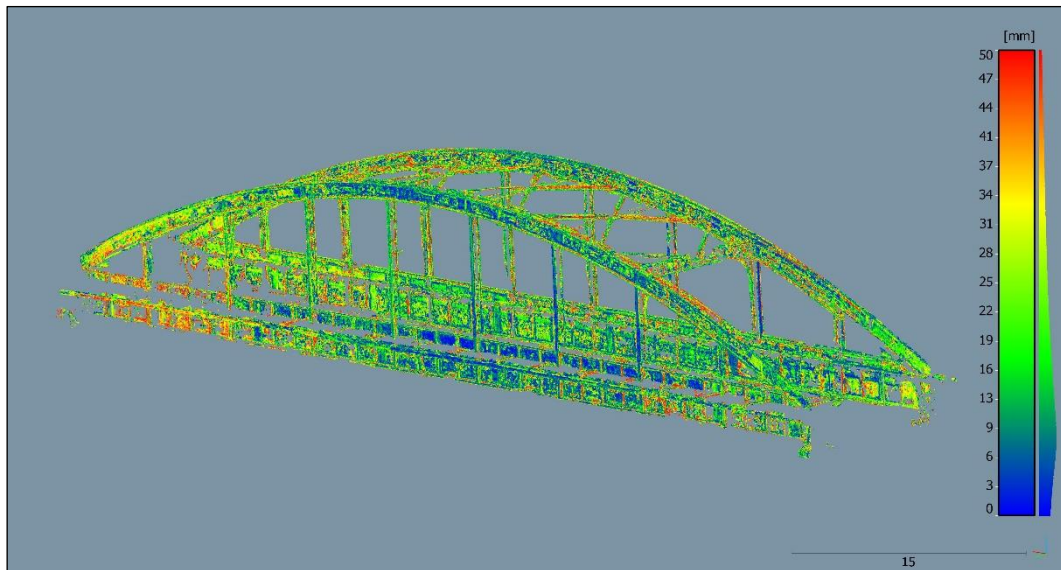
44. Ábra ReCap Photo, fényképezőgép, eltérésértékek histogramja

A tisztított pontfelhő pontjai közül 276 ezer volt a határértéken belül, ez a pontok 31%-át jelenti. Az átlagos távolság 24 mm volt és az értékek szórása 14 mm lett.

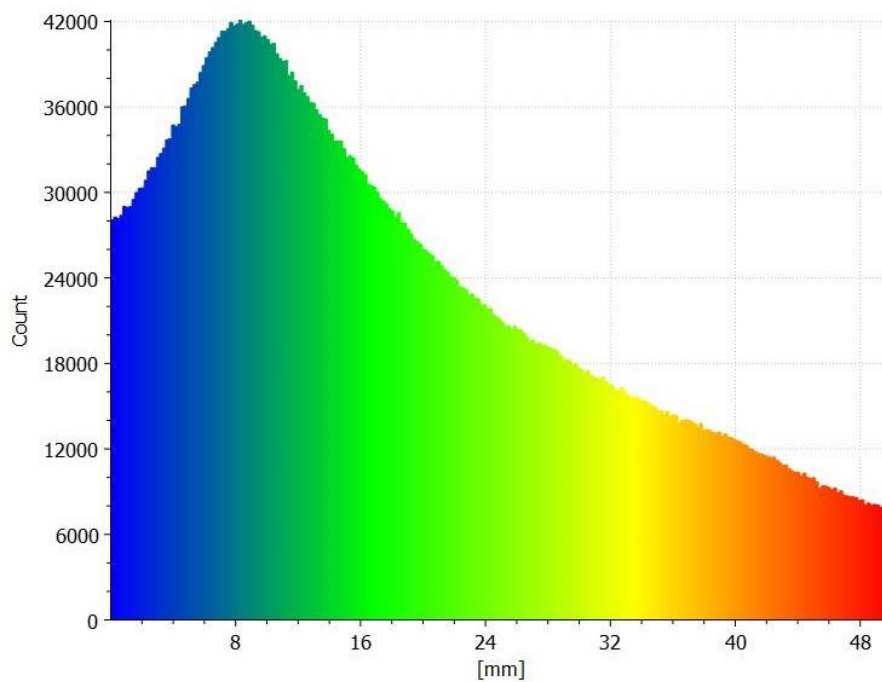
RealityCapture



45. Ábra RealityCapture, fényképezőgép, 5 cm-es eltérés feletti pontok szürkével



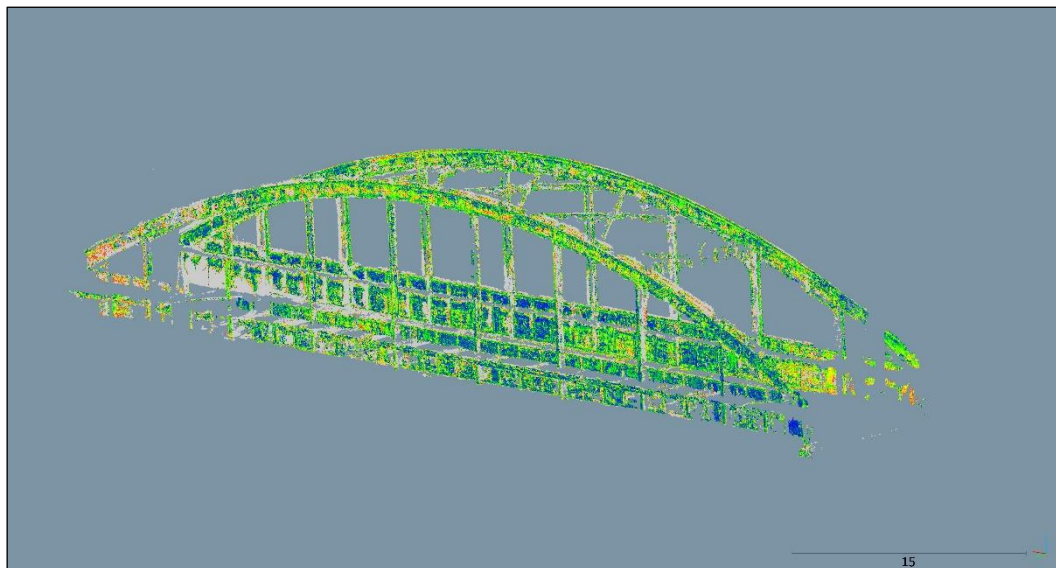
46. Ábra RealityCapture, fényképezőgép, eltérések alapján színezett pontfelhő



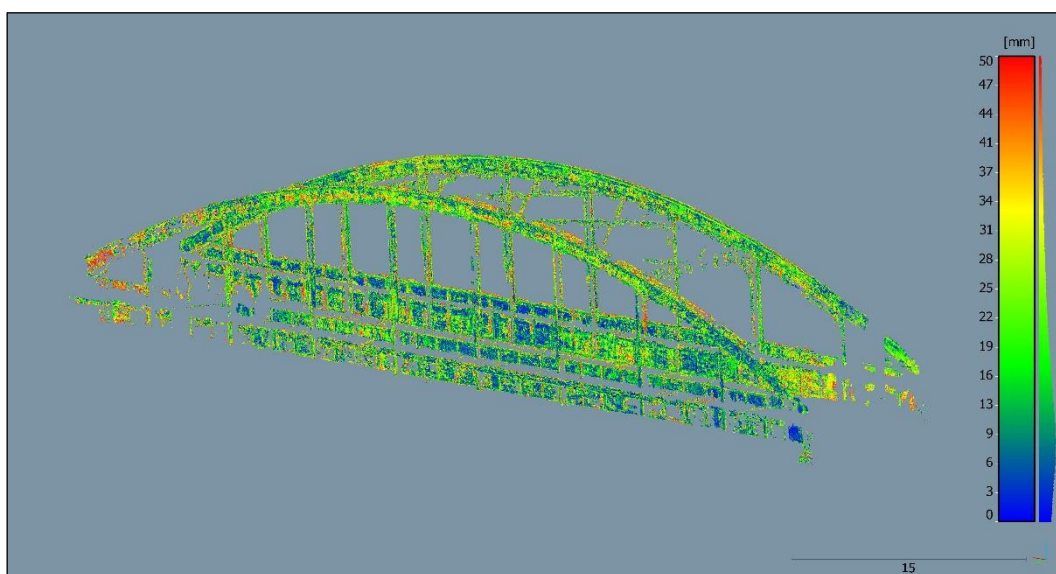
47. Ábra RealityCapture, fényképezőgép, eltérésértékek histogramja

A tisztított pontfelhő pontjai közül 5,9 millió volt a határértéken belül, ez a pontok 80%-át jelenti. Az átlagos távolság 19 mm volt és az értékek szórása 13 mm lett.

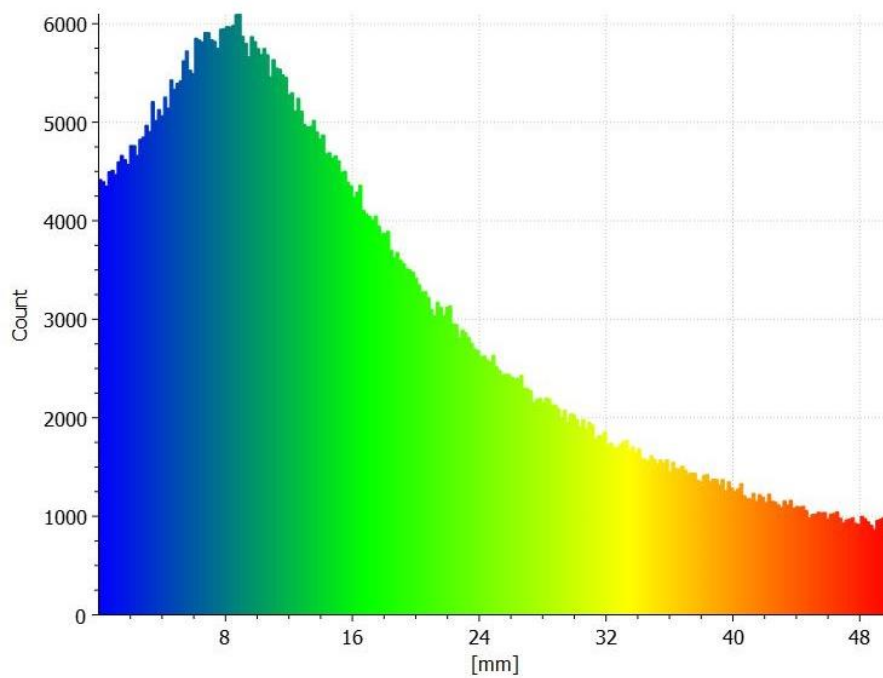
Meshroom



48. Ábra Meshroom, fényképezőgép, 5 cm-es eltérés feletti pontok szürkével



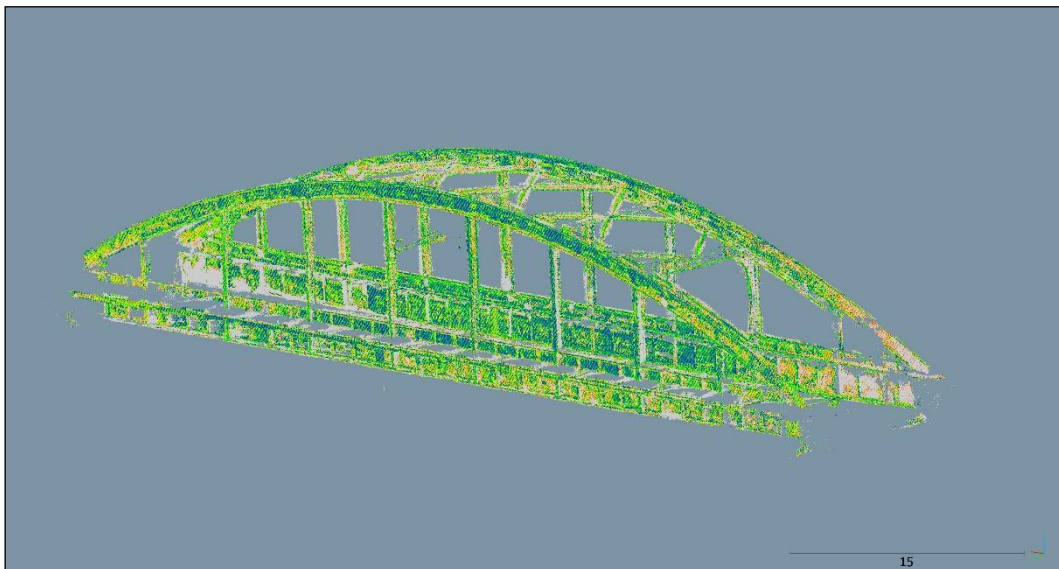
49. Ábra Meshroom, fényképezőgép, eltérések alapján színezett pontfelhő



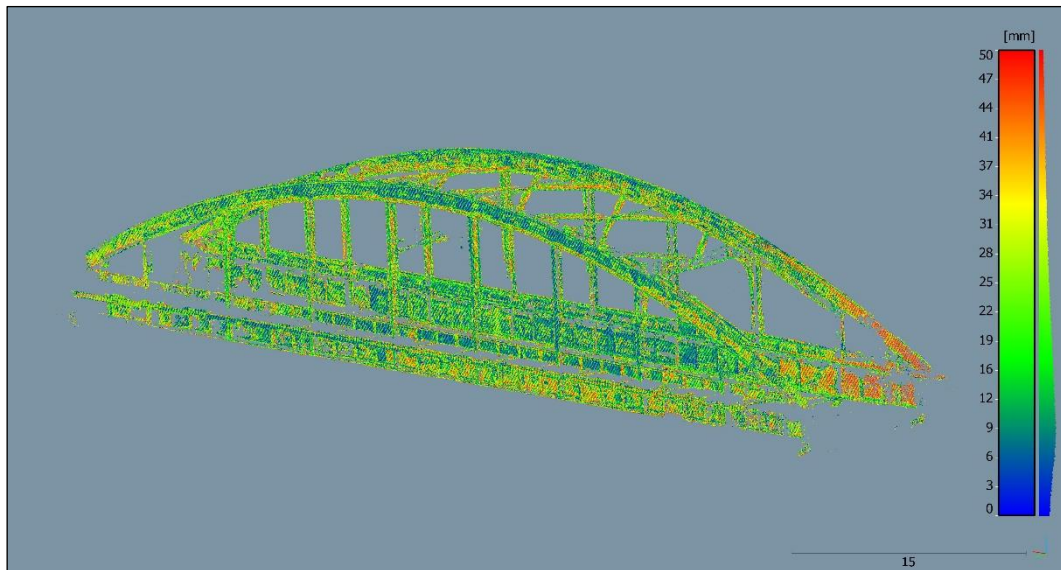
50. Ábra Meshroom, fényképezőgép, eltérésértékek hisztogramja

A tisztított pontfelhő pontjai közül 777 ezer volt a határértéken belül, ez a pontok 78%-át jelenti. Az átlagos távolság 17 mm volt és az értékek szórása 12 mm lett.

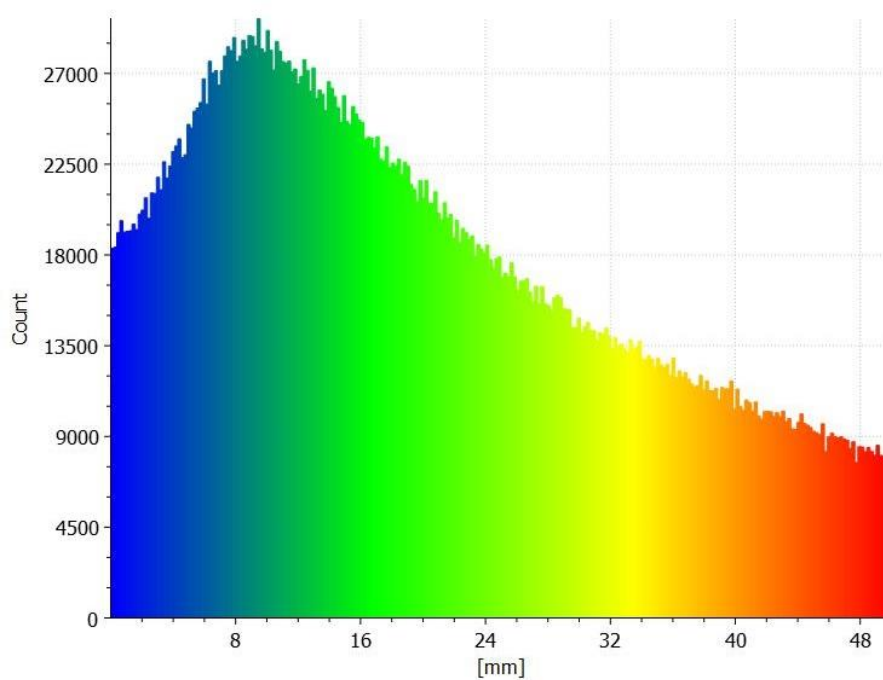
WebODM



51. Ábra WebODM, fényképezőgép, 5 cm-es eltérés feletti pontok szürkével



52. Ábra WebODM, fényképezőgép, eltérések alapján színezett pontfelhő



53. Ábra WebODM, fényképezőgép, eltérésértékek hisztogramja

A tisztított pontfelhő pontjai közül 4,5 millió volt a határértéken belül, ez a pontok 75%-át jelenti. Az átlagos távolság 20 mm volt és az értékek szórása 13 mm lett.

7. Eredmények összefoglalása

Megvizsgálva a mobiltelefonos és fényképezőgépes adathalmazból készített összehasonlításokat nem mondhatjuk ki egyértelműen, hogy valamelyik készülék felülmúlna ebben a feldolgozásban a másikat. A nagyobb felbontás miatt a mobiltelefonnal készített képekből nagyobb sűrűségű pontfelhőt kaptam. A fényképezőgépes adathalmazból viszont, a ReCap Photo kivételével, a többi programban nagyobb lett az 5 cm-nél kisebb pontfelhő-pontfelhő távolságot mutató pontok aránya. Illetve a kisebb felbontás miatt a feldolgozási idő is megrövidül egyes szoftvereknél.

Kontrolált körülmények között egy laboratóriumban, konstans beállítások mellett biztosan ki tudnánk mutatni a két szenzor közötti különbségeket a fotogrammetriai feldolgozás szempontjából. A terepi méréssel a sok változó miatt erre nem volt lehetőségem.

Az összes feldolgozásról elmondható, hogy a legnagyobb eltéréseket a lézerszkenneléshez képest a híd végeinél kaptam. Ennek oka, hogy a híd közepén lévő pont a tőle balról, szemből és jobbról készült fényképeken is látszik addig a hídvégeken ez inkább két irányra módosul. Ennek orvoslására két ötletem van, a fényképeket kell készíteni, nem csak a híd végéig, hanem jócskán túlmenve azon. A másik megoldás pedig drónos repüléssel a híd egészéről minden irányból fényképek készítése, ezzel a megoldással viszont értelmét veszíti az alap elképzelésem, hogy egyszerű eszközökkel készítünk fényképet és azt használjuk a feldolgozás során.

Amikor azokat az ábrákat értelmezzük, amik az 5 cm-nél nagyobb eltérésű pontokat is mutatják, fontos olyan szemmel nézni, hogy nem feltétlen az összes pont durva hibás, mivel a szkennerral két helyen álltam csak fel, sok olyan terület van, ahonnan kitakarás miatt nem gyűjtött információt. Erre jó példa a 36. Ábra, a híd jobb oldalán alul a szürke folt, ez egy tábla kitakarása. Ezen kívül ezt még függőleges híderendák gerincében lehet megfigyelni.

A legkisebb eltéréseket a híd olyan felületein kaptam, ahol nem homogén felület volt, hanem valamilyen változatosság, szegecsek vagy grafiti.

A kapott eredményekből a pontosságra vonatkozóan azt a következtetést tudom levonni, hogy szerkezeti acél elemek elhelyezésének ellenőrzésére nem alkalmas, bizonyos megkötések mellett monolit szerkezetek felmérésére használható lehet, építészeti felmérésre, látványmodellek készítésére megfelelő.

8. Összefoglalás

Legvégül szeretném magukat a programokat egy kézzelfogható rendszerben értékelni az elért eredményeik alapján, ez tartalmazza az objektív eredményeket és az én szubjektív véleményemet is. Az egyes szempontokat egytől háromig terjedő pluszjelekkel fogom jellemezni. Az értékelés szempontjai:

Adatmennyiség

Mennyi pontot tartalmazó pontfelhőt kaptunk és ezekből a pontokból mennyi volt, amit fel tudtunk használni.

Gyorsaság

Feldolgozás mennyi időt vett igénybe. (Autodesk ReCap Photo-nál ezt nem értelmezem)

Adatminőség

Milyen eltérések adódtak az összehasonlításoknál, voltak-e rosszul azonosított képpozíciók, sikerült-e egy projektben feldolgozni az összes képet.

Paramétereizhetőség:

Milyen beállításokat tehetünk meg a programon belül ezek mennyire vannak dokumentálva, hogy mire van hatásuk és milyen algoritmus fut a háttérben.

Felhasználói felület

Mennyire könnyen tanulható a program használata, a munkafolyamat átláthatósága programmal való dolgozás élménye.

Támogatás

Mennyi dokumentáció, segédanyag áll rendelkezésre a program használatához. Hivatalos fórumok, fejlesztőkhöz köthető hírcsatornák.

Ár

Mennyibe kerül a program használata. Az Autodesk megoldása 448 €/év- től elérhető, a RealityCapture örök licensze 3232€ vagy 14 ezer feldolgozott megapixelenként 10 €. A Meshroom és a WebODM ingyenesen elérhetőek. (Magasabb ár, kevesebb pluszjel)

Térháló modell esztétikai értéke

A programok által készített textúrázott térhálómodell kinézetére vonatkozó értékelés.

Program	Autodesk ReCap Photo	Reality- Capture	Meshroom	WebODM
Adatmennyiség	+	+++	+	+++
Gyorsaság	NA	+++	+	++
Adatminőség	+	+++	++	++
Paraméterezhetőség	+	++	+++	++
Felhasználói felület	+++	++	+	++
Támogatás	++	++	+++	+++
Ár	++	+	+++	+++
Térháló modell esztétikai értéke	++	+++	++	+

8. Táblázat Fotogrammetriai szoftverek értékelése

A programoknak egy kihívásokat tartalmazó adathalmazon kellett helytállniuk, ez nem mindnek sikerült hibátlanul, de kaptam jó eredményeket a kereskedelmi és nyílt forráskódú szoftverekből egyaránt. Sokat számított mennyire paraméterezhető az adott program, illetve az illesztőpontok használta is sokat segített. Az Autodesk megoldása, bár jól teljesített a szobor feldolgozásban, a hídnál már gyengén szerepelt. A Meshroom-ból sikerült kis eltérésekkel rendelkező modellt kapnom, de a feldolgozás hosszú ideig tart, illetve hiányolom belőle az illesztőpontok megadásának lehetőségét. A legjobban a WebODM és a RealityCapture teljesített. A WebODM beállítási lehetőségein, látszik, hogy nem földi fotogrammetriára fejlesztik, hanem drónfelvételek feldolgozására, de megfelelően kezeli az ilyen típusú fényképeket is. A RealityCapture-ból egy megfelelő részletességű, pontosságú modellt kaptam, még hozzá mindezt meglepően nagy sebességgel. Érdekes lenne megvizsgálni ez a program mire képes a lézerszkennelés és fotogrammetria kombinálásával.

Irodalomjegyzék

Colwell, R.N., History and place of photographic interpretation, 1997.

Rongjun Qin, Geometric Processing for Image-based 3D Object Modeling, 2021

https://www.researchgate.net/publication/353065367_Geometric_Processing_for_Image-based_3D_Object_Modeling

Dr. Siki Zoltán, Lehoczky Máté, Fotogrammetriai feldolgozószoftverek, 2020, Geodézia és Kartográfia 2020/2 (72. évf.), 23. oldal

<https://edit.elte.hu/xmlui/handle/10831/47276>

Dr. Jancsó Tamás, Felmérés lézeres letapogatással és pilóta nélküli felvevő rendszerekkel, MMK-GGT Továbbképzési tananyag 2016-2017, 2016

http://mmk-ggt.hu/tovabbkepzes/2017/4_lezer_szkenner.pdf

Dr. Barsi Árpád, 16. előadás: Képkészítés, eszközválasztás, Fotogrammetria és lézerszkennelés (BMEEOFTAG43), 2019

Dr. Barsi Árpád, 17. előadás: Kalibráció, Fotogrammetria és lézerszkennelés (BMEEOFTAG43), 2019

Szabó Márton, 3D-s felületmodellek előállításának lehetőségei – webes és asztali alkalmazások összehasonlítása, szakdolgozat, 2014

http://lazarus.elte.hu/hun/digkonyv/szakdolg/2015-bsc/szabo_marton.pdf

Gáti Bence, Nyílt forráskódú programok alkalmazása a pontfelhő feldolgozásában, Nyílt forráskódú térinformatika munkaértekezlet, Budapest 2018

<http://www.agt.bme.hu/gis/workshop7/eloadasok/GatiBence.pdf>

Autodesk ReCap Photo hivatalos oldala

<https://knowledge.autodesk.com/support/recap/>

Utolsó elérés: 2021.11.02.

RealityCapture hivatalos oldala

<https://www.capturingreality.com/>

Utolsó elérés: 2021.11.02.



WebODM hivatalos oldala

<https://www.opendronemap.org/docs/>

Utolsó elérés: 2021.11.02.

Meshroom hivatalos oldala

<https://alicevision.org/#photogrammetry/>

Utolsó elérés: 2021.11.02.

Cloud Compare hivatalos oldala

<https://www.danielgm.net/cc/>

Utolsó elérés: 2021.11.02.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani Dr. Siki Zoltánnak a dolgozat elkészítéséhez nyújtott konzulensi munkájáért. Továbbá Barta Márk évfolyamtársamnak, akinek fényképezőgépét használtam a munkám során.

Ábrajegyzék

1. Ábra Expozíciós háromszög.....	5
Forrás: https://www.bhphotovideo.com/explora/photography/tips-and-solutions/the-exposure-triangle	
2. Ábra Radiális és tangenciális elrajzolás	6
Forrás: https://link.springer.com/article/10.1007/s10851-018-0833-x/figures/1	
3. Ábra Modellezés tárgya, csiga szobor.....	12
4. Ábra Nyers térháló modell	13
5. Ábra Autodesk ReCap Photo, az elkészült modell.....	13
6. Ábra Ritka pontfelhő kamera pozíciókkal és illesztőpontokkal.....	14
7. Ábra RealityCapture, az elkészült modell	15
8. Ábra A megtalált kulcspontok késsel, a legalább két képen megtalálhatóak narancssal, a ritka pontfelhőben leképződtek pedig pirossal láthatóak	16
9. Ábra Meshroom, az elkészült modell.....	17
10. Ábra A feldolgozásból nyert pontfelhő	17
11. Ábra WebODM, az elkészült modell	18
12. Ábra Leica C10 lézerszkennelő háttérben a felmért hídval	20
13. Ábra Leica HDS 6" tárcsa az egyik állásponton	20
14. Ábra Tisztított pontfelhő Cloud Compare-ben megjelenítve	21
15. Ábra Huawei P30	22
16. Ábra Javítási együtthatók és elrajzolások, mobiltelefon	22
17. Ábra Canon EOS 600D	23
18. Ábra Javítási együtthatók és elrajzolások, fényképezőgép	24
19. Ábra Kamerahelyzetek rossz meghatározása a fényképezőgéppel készült fényképeknél .	25
20. Ábra ReCap Photo, mobiltelefon, színezett pontfelhő	27
21. Ábra ReCap Photo, fényképezőgép, színezett pontfelhő	27
22. Ábra Lehatárolt ritka pontfelhő kamerapozíciókkal és illesztőpontokkal.....	29
23. Ábra RealityCapture, mobiltelefon, színezett pontfelhő	30
24. Ábra RealityCapture, fényképezőgép, színezett pontfelhő	30
25. Ábra Meshroom, fényképezőgép, ritka pontfelhő és fényképek helyzetének felülnézete .	31
26. Ábra Meshroom, mobiltelefon, színezett pontfelhő	32
27. Ábra Meshroom, fényképezőgép, színezett pontfelhő	33
28. Ábra WebODM, mobiltelefon, színezett pontfelhő	35
29. Ábra WebODM, fényképezőgép, színezett pontfelhő.....	35
30. Ábra ReCap Photo, mobiltelefon, 5 cm-es eltérés feletti pontok szürkével	39
31. Ábra ReCap Photo, mobiltelefon, eltérések alapján színezett pontfelhő	39
32. Ábra ReCap Photo, mobiltelefon, eltérésértékek hisztogramja	40
33. Ábra RealityCapture, mobiltelefon, 5 cm-es eltérés feletti pontok szürkével.....	40
34. Ábra RealityCapture, mobiltelefon, eltérések alapján színezett pontfelhő	41
35. Ábra RealityCapture, mobiltelefon, eltérésértékek hisztogramja	41
36. Ábra Meshroom, mobiltelefon, 5 cm-es eltérés feletti pontok szürkével	42
37. Ábra Meshroom, mobiltelefon, eltérések alapján színezett pontfelhő	42
38. Ábra Meshroom, mobiltelefon, eltérésértékek hisztogramja	43
39. Ábra WebODM, mobiltelefon, 5 cm-es eltérés feletti pontok szürkével	43

40. Ábra WebODM, mobiltelefon, eltérések alapján színezett pontfelhő	44
41. Ábra WebODM, mobiltelefon, eltérésértékek hisztogramja.....	44
42. Ábra ReCap Photo, fényképezőgép, 5 cm-es eltérés feletti pontok szürkével.....	47
43. Ábra ReCap Photo, fényképezőgép, eltérések alapján színezett pontfelhő	47
44. Ábra ReCap Photo, fényképezőgép, eltérésértékek hisztogramja.....	48
45. Ábra RealityCapture, fényképezőgép, 5 cm-es eltérés feletti pontok szürkével.....	48
46. Ábra RealityCapture, fényképezőgép, eltérések alapján színezett pontfelhő	49
47. Ábra RealityCapture, fényképezőgép, eltérésértékek hisztogramja.....	49
48. Ábra Meshroom, fényképezőgép, 5 cm-es eltérés feletti pontok szürkével.....	50
49. Ábra Meshroom, fényképezőgép, eltérések alapján színezett pontfelhő	50
50. Ábra Meshroom, fényképezőgép, eltérésértékek hisztogramja.....	51
51. Ábra WebODM, fényképezőgép, 5 cm-es eltérés feletti pontok szürkével	51
52. Ábra WebODM, fényképezőgép, eltérések alapján színezett pontfelhő.....	52
53. Ábra WebODM, fényképezőgép, eltérésértékek hisztogramja	52
1. Táblázat ReCap Photo transzformációs ellentmondások	26
2. Táblázat RealityCapture Koordináta ellentmondások és maximális vetítési eltérések	28
3. Táblázat Meshroom transzformációs ellentmondások	32
4. Táblázat WebODM, transzformációs ellentmondások	34
5. Táblázat Mobiltelefonos adathalmazon mért futási idők	37
6. Táblázat Mobiltelefonos adathalmazból nyert adatok mennyisége	38
7. Táblázat Fényképezőgépes adathalmazon mért futási idők	45
8. Táblázat Fényképezőgépes adathalmazból nyert adatok mennyisége	46
9. Táblázat Fotogrammetriai szoftverek értékelése.....	55

Mellékletek

Az alábbi linken érhetőek el a dolgozathoz tartozó mellékletek.

<https://drive.google.com/file/d/1Tep5CfdmTPZX6bH1JjNdD8JjP2cADw9/view?usp=sharing>

Pontfelhők, térhálós modellek és az azokról készült nagy felbontású képek. A pontfelhők és térhálós modellek megtekintésére a Cloud Compare szoftvert javaslom, ez ingyenesen letölthető a következő linken keresztül.

https://www.danielgm.net/cc/release/CloudCompare_v2.11.3_setup_x64.exe