



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Alba Regia Műszaki Kar
Geoinformatikai Intézet



SZAKDOLGOZAT

Kamera kalibráció laborban

OE-AMK

Hallgató neve: Nyitrai Zsombor

2022

Hallgató törzskönyvi száma: T-000417/FI12904/A-G



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Alba Regia Műszaki Kar
Geoinformatikai Intézet

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Nyitrai Zsombor

Szaktervezési száma: SZD22011414104520

Törzskönyvi száma: T000417/FI12904/A-G

Neptun kódja: XXXXXXXXXX

Szak: földmérő és földrendező mérnök

Specializáció: Geoinformatika specializáció

A dolgozat címe: Kamera kalibráció laborban

A dolgozat címe angolul: Camera Calibration in Laboratory

A feladat részletezése:

1. Szakirodalom és Internetes források alapján ismertesse a kamera kalibráció lehetséges módszereit.
2. Tervezzen meg egy 11x11 pontból álló térbeli teszttmezőt 1x1 m-es felületre. Geodéziai méréssel határozza meg az elkészült teszttmező pontjainak koordinátáit egy helyi koordinátarendszerben.
3. Készítse el a teszttmezőről a felvételeket két különböző digitális kamerával.
4. Állítsa össze a rendelkezésre álló szoftver alapján a kamera kalibrációk technológiai folyamatát.
5. Végezze el a kalibrációt két különböző kamerára. Elemezze a kapott eredményeket.
6. Az elvégzett munkát műszaki leírásban összegezze.

Intézményi konzulens neve: Dr. habil Jancsó Tamás

A kiadott téma elévülési határideje: 2024. 12. 15.

Beadási határidő: 2022. 12. 15.

A szaktervezési: Nem titkos.

Kiadva: Székesfehérvár, 2022. 10. 12. PH

Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom: 2022. 12. 15.

belső konzulens

külső konzulens



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Alba Regia Műszaki Kar
Geoinformatikai Intézet

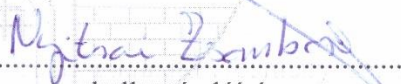
HALLGATÓI NYILATKOZAT

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

Egyéb jelentős segítséget nem vettem igénybe.

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

Kelt: Budapest, 2022. 12. 04.


.....
hallgató aláírása

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani minden olyan személy számára, aki bármilyen segítséget nyújtott abban, hogy ez a szakdolgozat megvalósulhasson, köszönöm a sok lelki és fizikai támogatást, minden kedves szót és tettet!

Elsősorban szeretném megköszönni konzulensemnek, Dr. habil. Jancsó Tamásnak, hogy lehetőségem volt számomra ezt a témát kidolgoznom, és minden kérdésem esetén készséggel segített, hogy időben haladhassak a megvalósításban.

Tartalomjegyzék

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	5
BEVEZETÉS.....	8
1. FOTOGRAMMETRIAI BEVEZETŐ	10
2. A KÉPALKOTÁS LEHETSÉGES ESZKÖZEI.....	13
2.1. MÉRŐKAMERÁK	13
2.2. AMATŐR KAMERÁK – TÜKÖRREFLEXES FÉNYKÉPEZŐGÉPEK.....	15
3. KAMERA MODELL LEÍRÁSA	16
3.1. KAMERA BELSŐ ADATAI	16
3.2. A KÉPALKOTÁS HIBÁI.....	17
4. KAMERA KALIBRÁLÁSA.....	20
4.1. LABORBAN	20
4.2. ILLESZTŐPONT-MEZŐVEL	22
4.3. KALIBRÁCIÓ TESZTÁBRÁK ALAPJÁN.....	24
4.3.1. Sík tesztábrák alkalmazása.....	24
4.3.2. Térbeli tesztábra alkalmazása	25
4.4. CSILLAGOK ALAPJÁN VÉGZETT KALIBRÁCIÓ.....	26
5. KAMERA KALIBRÁCIÓ KIEGYENLÍTÉSEL	28
5.1. KIEGYENLÍTŐ SZÁMÍTÁSOK A FOTOGRAMMETRIÁBAN.....	28
5.2. KIEGYENLÍTÉS KAMERÁK KALIBRÁCIÓJA ESETÉN.....	31
6. KAMERA KALIBRÁCIÓ TÉRBELI TESZTÁBRÁVAL – EGYEDI MÓDSZER ALAPJÁN.....	35
6.1. PROJEKT ELŐKÉSZÍTÉSE, TERVEZÉSE ÉS MEGVALÓSÍTÁSA	35
6.2. A LÉTREJÖTT PONTMEZŐ BEMÉRÉSE GEODÉZIAI MÓDSZERREL, MÉRÉS FELDOLGOZÁSA.....	36
6.3. TÉRBELI TESZTÁBRA FELVÉTELEINEK ELKÉSZÍTÉSE	38
6.4. FELVÉTELEK KIÉRTÉKELÉSE, FELDOLGOZÁSA.....	39
6.5. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE, ÖSSZEHASONLÍTÁSA	42
7. ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEK.....	57
8. TAPASZTALATOK, ÖSSZEGZÉS (MŰSZAKI LEÍRÁS)	58
9. SUMMARY.....	60
JEGYZÉKEK.....	62

ÁBRAJEGYZÉK	62
FELHASZNÁLT IRODALOM	64
MELLÉKLETEK	66

BEVEZETÉS

Szakedolgozatom az Óbudai Egyetem, Alba Regia Műszaki Kar Földmérő és földrendező mérnöki szak Geoinformatikai szakirány záró feladataként készítettem el.

Szakedolgozatom témája a kamera kalibráció laborban, térbeli tesztábra alapján. Vizsgálom a sík és térbeli kalibráció közötti eltéréseket a képek számának vizsgálatával egyedi térbeli pontmező segítségével.

Szakedolgozatom első részében leírom a fotogrammetria rövid történeti áttekintését, majd kitérek az alkalmazott koordináta-rendszerekre. Ezt követően bemutatom a geometriai és digitális képalkotás lehetséges eszközeit, ezek hibáit. Ez a rész azért fontos, mert lényegében ezen hibákat szeretnénk kiküszöbölni, ehhez szükséges a kamerák kalibrálása. A kalibráció célja a kamera belső adatainak meghatározása, vagyis a geometriai modelljének megalkotása. Erre több módszer is létezik. Sorra veszem a kalibráció lehetőségeket, amit a kiegyenlítő számítások nélkül nem lehetne megoldani.

Szakedolgozatom második része a gyakorlati megvalósítást, geodéziai bemérést, a felvételek elkészítését és annak feldolgozását tartalmazza. Következtetéseket vonok le az eredmények alapján, majd egy műszaki leírással zárom a dolgozatot.

Szakedolgozatom témájának azért ezt választottam, mert korábban már készítettem egy Tudományos Diákköri Dolgozatot és úgy gondoltam, hogy a szakma ezen területe lesz a jövő, a viszonylag gyors, nagy pontosságú, egyszeri hatékony adatgyűjtés. Fontosnak tartom kiemelni, hogy a megfelelő szakképesítés és jogi szabályozások tekintetében, mind a megrendelő, mind a kivitelező számára a „gyors” és költséghatékony technológiák alkalmazása a cél.

Az építészetben számos olyan terület van, ahol ez a módszer egyre nagyobb teret hódít. Egyre nagyobb az igény manapság a geodéziában is, ezen belül a mérnökgeodéziában. Az elvégezhető feladatokra néhány gyakorlati alkalmazási lehetőség: mozgásvizsgálatok széleskörű alkalmazása (iparban: karcsú magas építmények; vízépítésben: völgyzárógátak, partfalak; bányászatban: süllyedési horpák, bányaművelés okozta mozgások; gépiparban: gépsorok ellenőrzése, termékvizsgálat; energiaiparban: atomerőművek, olajipari létesítmények; egyéb) mozgások vizsgálata és ellenőrző

mérések elvégzése. További feladatok elvégzésére is alkalmazhatóak: a műemlék épületek-, épületek homlokzatrajzának elkészítése, belső terek felmérése, épületkárok meghatározása, tetőkataszter készítése, régészeti (lelőhelyek felkutatása, ásatási területek lehatárolása, felmérése, leletek feltárásának dokumentálása és tárgyak rekonstruálása) kutatások, és még egy jó pár területen [1].

Ilyenek lehetnek még az előkészítő munkafolyamatok, mint például a pontsűrítési, jelölési és illesztőpont mérési feladatok. A lézer szkennelésnek köszönhetően már 3 dimenziós világot is képesek vagyunk készíteni 3D-ben. Ezzel olyan virtuális alapú valós környezetet teremtve, amelyben pontos mérések végezhetőek. Ezeknek a modelleknek köszönhetően bármikor képesek vagyunk adatokat kinyerni térképezési, tervezési, felmérési feladatokhoz.

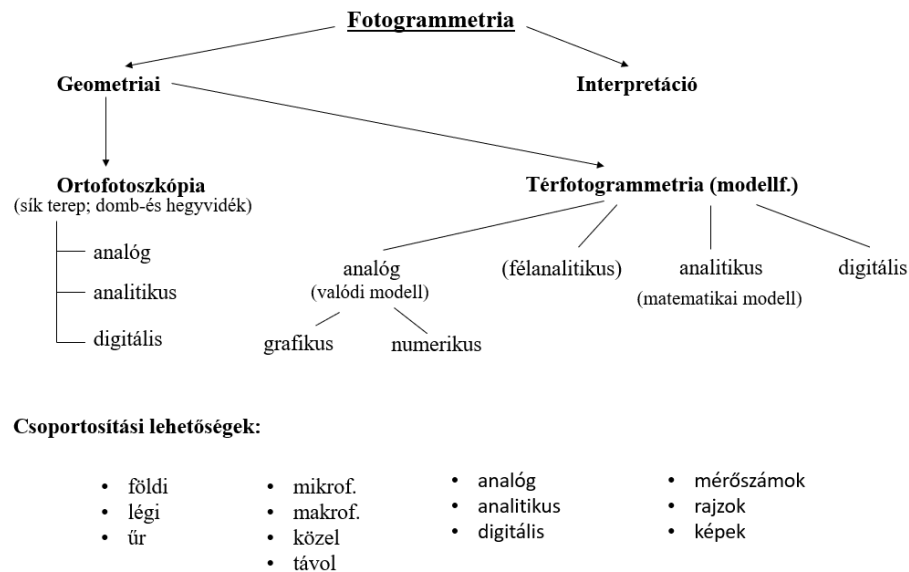
1. FOTOGRAMMETRIAI BEVEZETŐ

A fotogrammetria görög eredetű szó, jelentése fényképmérés [2]. Van egy másik definíciója az ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing – Nemzetközi Fotogrammetriai és Távérzékelési Társaság) szerint: „a tárgyak helyének és alakjának fényképek alapján történő meghatározásra szolgáló művészet és tudomány.” Ez a tudomány terület magában foglalja a különböző technológiákkal történő kép rögzítését, mérését és értelmezését. Alkalmazásával fizikai tulajdonságokra is következtetni tudunk, valamit környezetben lejátszódó jelenségeket figyelhetünk meg és végezhetünk ezekkel kapcsolatos méréseket [2].

Fotogrammetria születése egybeesik a fényképezés felfedezésével, ami a XVII. század elejére tehető. Kezdetekben gyakori alkalmazása az építészetben volt, és csak később fejlődött ki önálló tudomány területté. Ekkoriban még csak földi fotogrammetriáról, de a kor előrehaladtával már légi- és űr fotogrammetriáról is beszélhetünk. Ez a repülőgépeknek és a világháborúknak köszönhető [3].

A fotogrammetria fogalma napjainkban: A fotogrammetria egy időben nagy területekről származó felvételek (drón, légi, űr vagy földi) összesége vagy már ismert modell szerint leképződő (LIDAR) adatkészletek, melynek feldolgozása során meghatározzuk a metrikus adatokat. Ezen adatok egy meghatározott vonatkoztatási rendszerben értelmezhetőek. A felmérendő terület nagysága relatívan értelmezhető, amit mi határozunk meg. Lehet egy térbeli művészeti alkotás, akár egy részletére, egy épületre, egy településre, az egész országra kiterjedően, vagy akár a föld egészre is. A kép – térkép térbeli és tartalmi transzformációs lehetőségének megteremtése a lényeg [3].

A következő ábra (1. ábra) a fotogrammetria felosztását mutatja meg, mind analóg, mind pedig analitikus és digitális formában.



1. ábra: A fotogrammetria felosztása [2]

Digitális fotogrammetriában alapvetően öt koordináta rendszert különböztetünk meg [4], [5].

- pixel koordináta-rendszer

Közvetlenül a digitális kép előállító rendszer, a digitális kamera szenzorán értelmezett képmátrixnak felel meg. A koordináta-rendszert teljes egésze a digitális kép alkotó pixelek összessége. Kezdőpontja a szenzor bal felső sarka, az u , v tengelyek mértékegység nélküliek. Koordinátái a szenzoron belüli sor oszlop index értékkel adhatók meg, számításnál ezek törtrészeit is figyelembe tudjuk venni [6].

- képpkoordináta-rendszer

A koordináta rendszer kezdőpontja a kép közepe (M), tengelyei (ξ, η) egymásra merőlegesek. Van még egy (H) pontunk, mely nem esik egybe az M ponttal, a vetítési centrum merőleges vetülete a képsíkra. Ezt a koordináta-rendszert akkor alkalmazzuk, ha a filmre készült képet szkenneléssel digitálissá alakítjuk [5].

- kamera koordináta-rendszer

Ez a rendszer is a képpontok helyének meghatározására szolgál, de már térben, minden képpontot egy x_k térbeli vektor ad meg. Kezdőpontja O vetítési középpontban van, a z_k tengely merőleges a kezdőpontból a képsíkra. A x_k és y_k pedig párhuzamosak a ξ, η tengelyekkel. A z_k tengely mentén minden képpont koordinátája a C_k kameraállandóval lesz egyenlő [5]. A térbeli x_k képpont-vektor elemei így alakulnak:

$$x_k = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi - \xi_0 \\ \eta - \eta_0 \\ -C_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

- modell koordináta-rendszer

Ez egy olyan térbeli koordináta-rendszer, melyben egy képpár egymáshoz mért helyzetét tudjuk értelmezni. Kezdőpontja a baloldali kép vetítési centruma. Az X_M tengely általában a vetítési centrumokat összekötő szakasz (bázis). A Y_M tengely párhuzamos a η_1 tengellyel és a Z_M tengely pedig keresztül megy a képfőponton [5].

- tárgykoordináta-rendszer

Az illesztőpontok meg vannak adva a mérendő objektumra vonatkozóan. A feldolgozás során az ismeretlen pontok koordinátái ebben a rendszerben lesznek meghatározva. Lehet helyi vagy geodéziai, de mindenképpen úgy tekintünk rá, hogy ebben történik a térképezés vagy a pontmeghatározás [5].

2. A KÉPALKOTÁS LEHETSÉGES ESZKÖZEI

Napjainkban már a CCD és a CMOS szenzorok teszik lehetővé a digitális fénykép elkészítését.

Ezekkel az érzékelőkkel ellátott fényképezőgépek alkalmasak lehetnek fotogrammetriai adatnyerésre is. Nagyszámú fényérzékeny elem található a szenzorokon, melyek mátrix vagy vonalas elrendezésben helyezkednek el. A beérkező fény hatására a szenzor minden egyes érzékelője elektromos töltést tárol, melyek kiolvashatóak, feldolgozhatóak és digitális jellé alakíthatóak át [7], [5].

A digitális kameráknál megkülönböztetünk digitális mérő és digitális analóg kamerákat.

2.1. Mérőkamerák

A digitális mérőkamerák légi és földi kamerákat. A digitális mérőkamerák kizárólag fotogrammetriai célokat szolgálnak. Pontosabbak, megbízhatóbbak, mint amatőr társai. Belső adatai, hibái pontosan ismertek. A mérőkamerák sajátosságaihoz tartozik még, hogy képesek egy időpillanatban több spektrális tartományban elkészíteni a felvételeket [7].

A technikai vívmányoknak köszönhetően ma a legnagyobb földi mérőkamera, amelyet még nem adtak át, de képsíkját már tesztelték 3200 megapixelre képes. Mit is jelet a 3200 megapixel? Ahhoz, hogy legyen viszonyításunk, ezt azt jelenti, hogy 25 kilométerről is látható lenne egy golflabda. A Vera C. Rubin Obszervatóriumban az LSST kamera segítségével tervezik elkészíteni minden idők legnagyobb csillagászati filmjét, és rávilágítani az univerzum még rejtve fedett titkai felett, a sötét anyagokra és energiákra. Valamint asztrofizikai kutatások során szeretnék használni. Ennyit a jövő kitekintéséről, ezt, mint érdekesség említettem meg, hogy napjainkban hol tart a tudomány [8].



2. ábra: LSST kamera és a cikkben publikált képek [8]

A földi mérőkameráknál átmenetet képeznek azok, melyek eredetileg film alapúak voltak, de később ellátták őket digitális szenzorral. Ilyen típusú eszköz állt rendelkezésemre, melyet az egyetem biztosított. A Rolleiflex 6008D is egy ilyen, melyre egy Phase One digitális hátfalat szereltek. Az objektív pedig egy Super-Angulon 2,8/50 mm metric. A digitális kamerák is alkalmasak fotogrammetriai kiértékelésre, de ehhez kalibrálni kell őket, pontosan ismernünk kell a fent megemlített adatokat és hibákat [9].



3. ábra Rolleiflex 6008D tükörreflexes mérőkamera [10]

2.2. Amatőr kamerák – tükörreflexes fényképezőgépek

Az amatőr kamerák első sorban szabad felhasználásúak és nem fotogrammetriai célra lettek gyártva. Ma már nem csak a sima fényképezőgépek tartoznak ebbe a csoportba. Az elmúlt 5-6 évben az informatikai eszközök fejlődésével a kamerák is nagyot léptek előre, abból kiindulva, hogy egy közép kategóriás mobil telefonon is már 3 vagy több kamera van. A kamera belső adatainak hiányában nem használhatók fel közvetlenül fotogrammetriai célra [7].

Szerkezeti felépítésüket és bonyolultságukat tekintve:

- mobiltelefonok kamerái,
- kompakt kamerák,
- Bridge kamerák: átmenetet képeznek a kompakt és a komolyabb DSLR kategóriák között,
- MILC kamerák: tükör nélküli, cserélhető objektíves,
- SLR, illetve a DSLR tükörreflexes kamerák [7].

Az amatőr kamera egy Sony Alpha digitális tükörreflexesfényképezőgép volt (4. ábra).



4. ábra: Sony Alpha tükörreflexes fényképezőgép [11]

3. KAMERA MODELL LEÍRÁSA

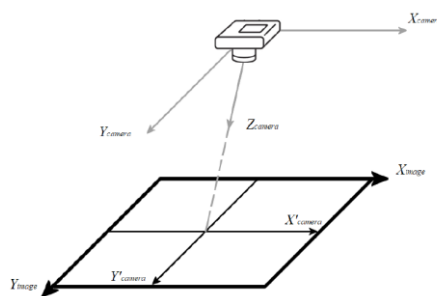
Szakdolgozatomhoz az Agisoft Metashape programot használtam a képek feldolgozásához, ezért ennek alapján ismertetem a kamera belső adatait. Majd röviden leírom a képalkotási hibákat, melyek a képet terhelhetik.

3.1. Kamera belső adatai

A program számos parametrikus lencsetorzítási modellt támogat. Konkrét modell, amely a legjobban közelíti a valós torzítási mezőt a feldolgozás előtt. Mindegyik feltételezi a centrális vetítésű kamerát. A nemlineáris torzítások modellezése a Brown-féle torzítási modell segítségével történik [12], [13].

A kameramodell a helyi kamerakordinátában lévő pontkoordinátákból történő transzformáció határozza meg a rendszert a képkoordináta és pixelkoordináták között. A helyi kamerakordináta-rendszer origója a kamera vetítési központjában van. A Z tengely mutat a nézési irány felé az X tengely jobbra, az Y tengely lefelé mutat.

A kép koordinátarendszerének origója a bal felső pixel közepén található (koordinátákkal $(0.5, 0.5)$). A kép koordinátarendszerében az X tengely jobbra, az Y tengely lefelé mutat. Kép a koordinátákat pixelben mérjük [13].



5. ábra: Képi- és kamera koordináta rendszer [13]

A helyi kamerakordináta-rendszerben lévő pontok képsíkra vetítésére használt egyenletek a következők, az alábbiakban minden támogatott kameramodellhez megadva. A számításhoz használt paraméterek és képleteinek rövid leírása a program alapján a (2-8) képletekben található [13].

Az egyenletekben a következő definíciókat használjuk [13]:

- (X, Y, Z) - pont koordináták a helyi kamera koordináta-rendszerben,
- (u, v) - vetített pontkoordináták a kép koordinátarendszerében (pixelben),
- f - fókusztávolság (pixelben),
- c_x, c_y - főpont eltolás (pixelben),
- K_1, K_2, K_3, K_4 - radiális torzítási együtthatók (dimenzió nélküli),
- P_1, P_2 - érintőleges torzítási együtthatók (dimenzió nélküli),
- B_1, B_2 – affinitási és nem ortogonalitási (ferdeségi) együtthatók (pixelben),
- w, h - kép szélessége és magassága (pixelben).

Frame kamerák számítása (képmezős) [13]:

$$x = X / Z \quad (2)$$

$$y = Y / Z \quad (3)$$

$$r = \sqrt{(x^2 + y^2)} \quad (4)$$

$$x' = x(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + K_4 r^8) + (P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2 xy) \quad (5)$$

$$y' = y(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + K_4 r^8) + (P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1 xy) \quad (6)$$

$$u = w * 0.5 + c_x + x'f + x'B_1 + y'B_2 \quad (7)$$

$$v = h * 0.5 + c_y + y'f \quad (8)$$

3.2. A képalkotás hibái

Az objektívekben alkalmazott lencsék a gyártásból adódóan hibával terheltek.

A beeső fénysugarak nem az elméletileg meghatározott pontban képződnek le. A gyártók törekednek rá, hogy ezen hibák mértéke elenyésző legyen. Hétköznapi felhasználásban ez nem jelent problémát, de amint fotogrammetriai célokra szeretnénk használni, ismernünk kell pontosan ezen hibák mértékét, hogy ezekkel a képet a számítás során korrigálni tudjuk [5].

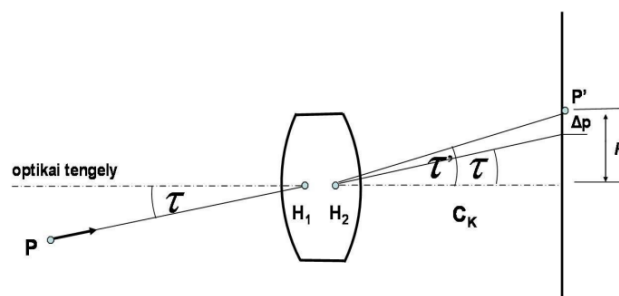
A lencsék képalkotási hibáit két nagy csoportba soroljuk. Az egyik a képéletlenséget-, a másik pedig a radiális eltorzulást okozó hibák [14].

A képéletlenséget okozók rontják a képminőségét, de geometriai torzulást nem okoznak. Ezeket csak felsorolás szintjén említem, mivel számunkra a geometriai torzulások a lényegesebbek. Ezek lehetnek: gömbi eltérés (szférikus aberráció) és kóma, színi eltérések (kromatikus aberráció), pontnélküliség (asztigmatizmus) és képöblösség.

Geometriai torzulást, elrajzolást okozó hibák [14], [4]:

A kiértékelés szempontjából jelentős: negatívan hatnak a képek kiértékelése során nyert adatok pontosságára. Nagysága bizonyos tartományon belül elfogatható mértékű.

Elrajzolás:

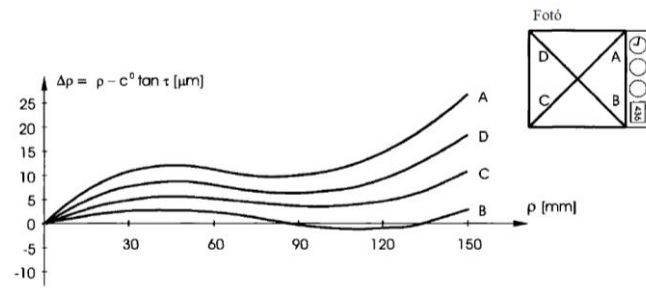


6. ábra: Elrajzolás [14]

Elrajzoláskor a P pont a képsíkon P' pontban képződik le, távolsága az optikai tengelytől pedig p lesz. A Δp értékkel tér el a hibátlanul tekinthető leképezési helytől. A Δp értéke, az elrajzolási hiba meghatározható, ha ismerjük p képpont radiális távolságát a főponttól, a kamera állandót (C_K) és a τ szöget [15].

$$\Delta p = p - C_K * \tan \tau \quad (9)$$

Az elrajzolás értéke lehet negatív vagy pozitív. Azok a fénysugarak, melyek az optikai tengely irányából haladnak át, azok a lencsén áthaladva sem törnek meg. Ezen fénysugarak a kameratengely dőléspontjában képződnek le. Ennek elrajzolása zérus. Azonban ahogy távolodunk a kép főponttól a kép szélei felé az elrajzolás mértéke nő, ebben az esetben az majdnem körszimmetrikus. Ezt a következő ábrán a képátlók mentén megfigyelhetjük [14].



7. ábra Az autokollimációs főpontra vonatkozó A-D négy félátló radiális optikai elrajzolása [16]

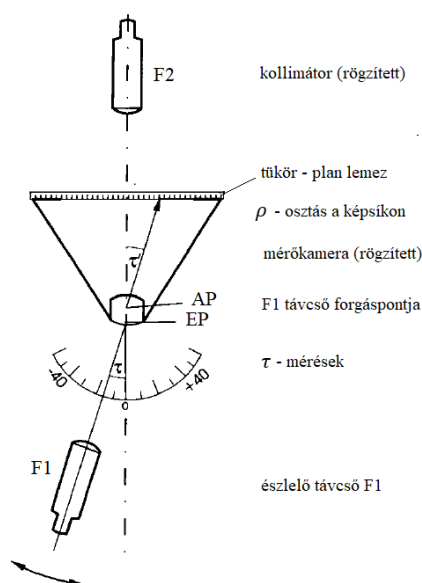
4. KAMERA KALIBRÁLÁSA

A kalibráció célja, a fényképezőgép belső tájékozási elemeinek meghatározása. Így megalkothatjuk a kamera modelljét, melynek segítségével a feldolgozásnál a helyes geometriai sugárnyalábot állítjuk vissza. Főbb paraméterek, amelyeket meg akarunk határozni a főtáv, kamera állandó és az elrajzolás. Négy típusa van.

4.1. Laborban

Ebben az esetben goniométert, kollimátort és más optikai eszközöket használunk, a fénysugarak közvetlen mérésével az objektíven keresztül.

Optikai goniométeres eljárást.



8. ábra Vázlatos ábrázolása egy foto-goniométer működése [16]alapján

Goniométeres kalibráció során egy forgatható vagy egymáshoz képest pontosan rögzített, adott τ_i szögekkel elforgatható kollimátorokból álló padot használunk, melyek lehetnek egy síkban vagy egymásra merőlegesek. Mérés előtt a távcsövet az F_1 alaphelyzetbe állítjuk, így az F_2 távcsövet autokollimátor helyzetbe állítjuk. A kamera képsíkjába egy nagy pontosságú, beosztásokat tartalmazó tükröződő üveglemezt helyezünk el. Ezt követően a kamerát úgy állítjuk oda, hogy a belépő pupilla közepe a forgástengelyre

essen. Az F_1 távcsővel észleljük a H autokollimációs főtípót, melynek kezdőpontja lesz az r távolság mérésakor. A szög mérés során mérjük a τ szögeket, vagyis a H főtíponhoz és az irányzott rácspontához tartozó szögek különbségét. Az üveglemezen kerek beosztásonként választjuk meg az értékeket, általában 10 mm-ként. Minden méréshez számítható az elrajzolás értéke [16]:

$$\Delta r = r - c_0 \cdot tg\tau \quad (10)$$

A c_0 kameraállandót szeretnénk ennek során pontosítani, az objektív fókusz távolsága a folyamat során pontosabb lesz. Ezt a mérési sorozatot a kamera minden negyed főtíkjában elvégezzük. Az ebből kapott elrajzolási görbék szimmetrikusak kell legyenek és fedniük kell egymást. Erre bevezetünk egy S szimmetria főtípót. Újra kiszámoljuk az elrajzolásokat, így közelebb kerülnek egymáshoz, melyre már illeszteni, szerkeszteni tudunk egy középgörbét. Ekkor felszerkesztünk egy kiegyenlítő egyenest, melynek azon pontját, ahol elmetszi a közelítő görbénket le tudjuk olvasni az r_0 és Δr_0 értéket. Ehhez tartozik egy τ szögérték is. A középgörbe elfogadása miatt a c_0 kameraállandót korrigálni kell, a változás mértéke számolható [5].

$$\Delta c_k = \frac{\Delta r_0}{tg\tau_0} \quad (11)$$

A szimmetria-főtíponra vonatkoztathatóan már megadható az egyenlet a végleges kamera állandóra.

$$c_k = c_0 + \Delta c_k \quad (12)$$

A kalibráció során mért, számított értékeket, táblázatokat, görbéket egy kalibrációs jegyzőkönyvben kell rögzíteni, melynek tartalmaznia kell:

- kalibráció dátuma,
- kamera, objektív pontos megnevezése,
- kalibráció által meghatározott kameraállandó,
- autokollimációs főtípon: A valódi optikai tengely talppontja a képsíkon, más néven képfőtípon. Sajnos ez a pont a gyakorlatban sohasem egyezik meg az elméleti képfőtíponttal. Az autokollimációs főtípon és az elméleti képfőtípon távolsága radiális, optikai elrajzolásból adódik. Ennek hibáját a lencserendszer hibája és a képsík nem tökéletesen a síkba fektetése okozza. A képsíkra elméletben az

elméleti optikai tengely merőlegesen érkezne, de ez a valódi optikai tengellyel csak ideális esetben párhuzamos ezzel.,

- szimmetria-főpont: Az optikai képalkotásban a fénysugár a tárgy felőli vetítési centrumon, a belépő pupilla közepén halad át és fizikai meghosszabbítása a képsíkon dőfi ki.,
- keretlejek a képközéppontjára vonatkoztató koordináták,
- elrajzolási értékek, táblázatok, görbék.

Ez a technológiai a hétköznapiakban nem terjedt el, mert időigényes és speciális laborra van szükség [15] [5].

4.2. Illesztőpont-mezővel

A centrális vetítés alapegyenletét, melyet kollineár egyenletnek is hívunk (13), kibővítjük a képhez tartozó $\Delta x, \Delta y$ korrekciós értékekkel, amelyekre az optikai elrajzolás és a szenzor affín torzulása miatt van szükség [5].

$$\begin{aligned}\xi &= \xi_0 - c_k \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x \\ \eta &= \eta_0 - c_k \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y\end{aligned}\tag{13}$$

Tegyük fel, hogy van elegendő, n számú pontjellel ellátott illesztőpontunk, vagyis a pontokkal, amelyeknek ismerjük a terepi koordinátáit (X_i, Y_i, Z_i) . Több felvételen rendelkezünk legalább két ponttal, amin meg tudjuk mérni minden illesztőpont $\Delta x, \Delta y$ képkoordinátáját. Az illesztőpontokat úgy helyezzük el a terepen, hogy azok egyenletesen helyezkedjenek el és legyen köztük mélységkülönbség [5].

Így fel tudjuk írni az egyenletet mindegyik illesztőpontra. Képenként az egyenletben ismeretlenek lesznek a külső tájékozási elemek, kameránkként a belső tájékozási elemek és a $\Delta x, \Delta y$ korrekciós értékeket leíró függvény paraméterei, tehát a kalibrációs adatok. A korrekciókat leíró paramétereket három fő csoportba sorolhatjuk [5]:

- radiális elrajzolást (A_1, A_2, A_3),
- tangenciális elrajzolást (B_1, B_2),

- affín torzulást (C_1, C_2)

leíró paraméterek. A felírt egyenletek számának meg kell haladnia az ismeretlenekét.

A feladat sugárnyaláb-kiegyenlítéssel oldható meg, a legkisebb négyzetek módszere szerint, fokozatos közelítéssel.

Most vegyük sorra az elrajzolást leíró paramétereket csoportok szerint.

Feltételezzük a *radiális elrajzoló paraméterek* (A_1, A_2, A_3) meghatározásánál, hogy a Δr_i elrajzolás értéke a szimmetria-főpontra körszimmetrikus. Így a Δr_{rad} radiális elrajzolás modellje a kép teljes területére egy függvénnyel megadható [6].

$$\Delta r_{rad} = A_1 \cdot r^3 + A_2 \cdot r^5 + A_3 \cdot r^7, \quad (14)$$

ahol r a szimmetria-főponttól mért radiális távolságot jelöli és kiszámítása a következő képlet szerint lehetséges:

$$r = \sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (\eta - \eta_0)^2} \quad (15)$$

A Δx_{rad} és Δy_{rad} radiális elrajzoló értékek pedig a következőképpen számíthatóak:

$$\begin{aligned} \Delta x_{rad} &= (\xi - \xi_0) \frac{\Delta r_{rad}}{r} \\ \Delta y_{rad} &= (\eta - \eta_0) \frac{\Delta r_{rad}}{r} \end{aligned} \quad (16)$$

Az A_1, A_2, A_3 paraméterek geometriai értelemben a következő jellemzőkkel bírnak:

- Ha $A_1 > 0$, akkor a torzulási kép hordó alakú, ellenkező esetben, ha $A_1 < 0$, akkor túpárna elrendezésű a kép.
- Ezen paraméterek A_2 és A_3 elrajzolója egy harmadfokú parabolikus forma szerint alakul. Az A_2 legjobban a kép szélén érvényesül, míg az A_3 paraméter ezen hatást még jobban fokozza.

A *tangenciális elrajzoló paramétereit* (B_1, B_2), akkor vesszük számításba, ha feltételezzük, hogy az objektívet alkotó lencsék központonlag el vannak csúsztatva vagy dőlve, ezt nevezzük központosítási hibának. Ezt a következő függvényekkel tudjuk modellezni [6]:

$$\begin{aligned} \Delta x_{tan} &= B_1(r^2 + 2(\xi - \xi_0)^2) + 2B_2(\xi - \xi_0)(\eta - \eta_0) \\ \Delta y_{tan} &= B_2(r^2 + 2(\eta - \eta_0)^2) + 2B_1(\xi - \xi_0)(\eta - \eta_0) \end{aligned} \quad (17)$$

Ez a torzulás elhanyagolható mértékű a mérőkamerák objektívének esetében, a radiálishoz képest. Amatőr kamerák esetén be kell vonni ezen elrajzolás hatásának paramétereit is a modell megalkotásánál.

Az *affin torzulást leíró paramétereknek* (C_1, C_2), akkor vesszük figyelembe a hatását, ha feltételezzük, hogy a pixel koordináta-rendszer és az ebből származó képkoordináta-rendszer nem derékszögű, illetve, ha a koordináta tengelyeken eltérnek a léptékek, vagyis nem egységes a méretarány. A korrekció számításához a következő függvények kell használni [6]:

$$\begin{aligned}\Delta x_{aff} &= C_1(\xi - \xi_0) + C_2(\eta - \eta_0) \\ \Delta y_{aff} &= 0\end{aligned}\tag{18}$$

Összegezve a centrális vetítés egyenletében a $\Delta x, \Delta y$ tagjai a következő korrekciókat kapják [6]:

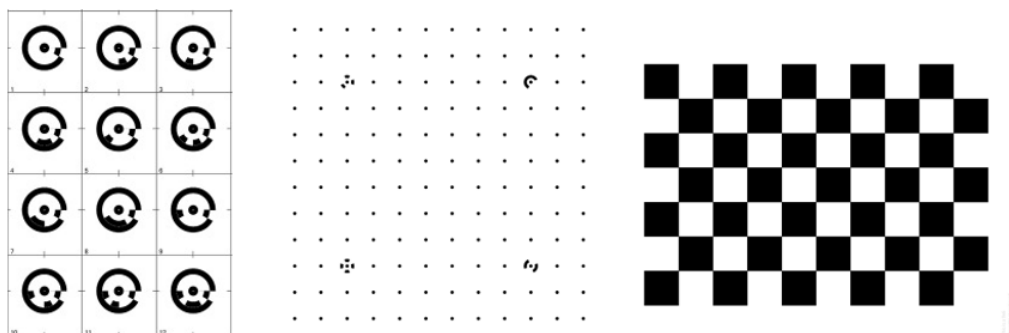
$$\begin{aligned}\Delta x &= \Delta x_{rad} + \Delta x_{tan} + \Delta x_{aff} \\ \Delta y &= \Delta x_{rad} + \Delta x_{tan} + \Delta x_{aff}\end{aligned}\tag{19}$$

A feladatot csak fokozatos közelítéssel lehet megoldani, a kezdő értékek a mért ξ, η képkoordináták lesznek, míg a $\Delta x, \Delta y$ korrekciók kezdő értéke nulla. Iterációs folyamat során kapjuk meg az értékeket. Így javíthatjuk a koordinátákat. Probléma lehet, ha az ismeretlenek és a paraméterek között korreláció lép fel. Ez kiküszöbölhető egy kis odafigyeléssel [5].

4.3. Kalibráció tesztábrák alapján

4.3.1. Sík tesztábrák alkalmazása

Lehetőség van a kalibrációt olyan közel-fotogrammetriai módszerrel elvégezni, ahol az illesztőpontok szerepét egy sík tesztábra tölti be. Több ilyen ábra létezik (9. ábra). A megbízhatóság növelése érdekében a felvételeket több nézőpontból kell elkészíteni, miközben a kamerát is forgatjuk a szenzor síkjában.



9. ábra: Kalibrációhoz használható ábrák [17], [18], [19]

Ügyelni kell arra, hogy a kamera ne legyen merőleges a tesztábrára és az utóbbi minél jobban töltse ki a kép területét. A képek elkészítése után a program automatikusan felismeri és megméri a tesztábra pontjait és pontszámokat is rendel hozzá. Több elrendezésű, mintázatú pontjelek léteznek erre a célra. Egyik ilyen egy szabálytalan elrendezésű, melyek egyedi kódot is tartalmaznak – pöttyök, vagy egyéb jelek, a geometriai elrendezés szerint. A másik ilyen megoldás egy szabályos elrendezésű pontok vagy rácsháló, amit a sarkoknál négy egyedi kódolt jel egészít ki. A program ezt is automatikusan felismeri és orientálja a tesztábrát [5].

Az automatizált mérés után a program a (3.1 fejezetben) leírtak alapján kiszámolja a belső tájékozási elemeket és a torzulásokat leíró paramétereket.

A kamera ilyen jellegű kalibrálásához több program is létezik, például: - Agisoft Metashape, Matlab, Bingo és a PhotoModeler.

A végeredményt minden esetben egy kalibrációs jegyzőkönyv adja, továbbá grafikonon meg tudjuk jeleníteni a radiális és tangenciális elrajzolást.

Ez egy gyakori módszer, amellyel kalibrálhatóak az amatőr kamerák, de a pontosabb eredményekhez javasolt olyan pontmező használata, amelynek mélységi tartománya is van. Az iterációval végzett kiegyenlítés során, ezzel a módszerrel csökkenthető a paraméterek között fellépő korreláció.

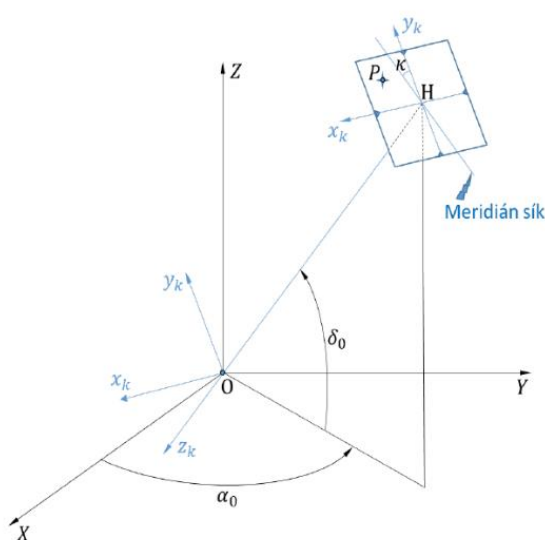
4.3.2. Térbeli tesztábra alkalmazása

Vizsgálatot végeztem ezen módszerrel kapcsolatban, mely átmenetet képez a sík és az illesztőpont mezős kalibráció között.

A síkbeli és az illesztőpontos kalibrációval megegyezik, annyi különbséggel, hogy itt az illesztőpontok a síkhoz képest térben vannak elhelyezve. Dolgozatomban ezt a kalibrálási eljárást vizsgáltam meg. Ehhez készítenem kellett egy térbeli rácsot. Ennek a rácsálózatnak határoztam meg első lépésként a vízszintes és magassági koordinátáit. Célom az volt, hogy egy fokkal pontosabb eredményt kapjunk a kalibráció során a síkhoz képest, de ne kelljen illesztőpont mezőt létrehozni hozzá, mivel az helyhez kötött és területileg nagy kiterjedésű. Lényegében leegyszerűsítve ez egy illesztőpont-mező kicsinyített mását hoztam létre. Előnye, hogy hordozható kivitelben alakítottam ki, így a folyamat bárhol, helytől függetlenül elvégezhető. A téma kifejtéséről és eredményeiről a későbbiekben írok (6. fejezettől).

4.4. Csillagok alapján végzett kalibráció

A csillagok helyettesíthetik a terepi illesztőpontokat a kalibráció során. Ismernünk kell az elkészített felvételek helyzetét egy égi koordináta-rendszerhez képest, illetve nagy pontossággal kell megmérnünk a képen a csillagok helyzetét, mint pontok képkoordinátáit (ξ, η) . A kamera belső adatait (c_k, ξ_0, η_0) és $\Delta x, \Delta y$ képkoordináta-korrekciókat felhasználva, fel tudjuk írni a kapcsolatot az égi- és a képkoordináta-rendszer között [5].



10. ábra: Kalibráció csillagok alapján, kapcsolat a koordináta rendszerek között [20]

A P ponttal jelölt csillag koordinátáját megadhatjuk az égi koordináta-rendszerben, ahol α rektanszcenziós és δ deklináció szögek a csillag égi helyzetét jelöli ki [5].

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha \cdot \cos \delta \\ \sin \alpha \cdot \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (20)$$

Ahol K a képpontra mutató vektor hossza [5].

$$K = \sqrt{(\xi - \xi_0 - \Delta x)^2 + (\eta - \eta_0 - \Delta y)^2 + c_k^2} \quad (21)$$

A képpont koordináta-rendszert térben elforgatva az égi koordináta-rendszerbe, felírhatjuk a kapcsolatot a két rendszer között [5].

$$R \begin{bmatrix} \xi - \xi_0 - \Delta x \\ \eta - \eta_0 - \Delta y \\ -c_k \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (22)$$

Innen az egyenletet átrendezve, az első és második egyenletet elosztva a harmadikkal, két egyenletet tudunk felírni. Így már kiegyenlítéssel tudjuk számolni azzal a feltétellel, hogy a Δx és Δy csak a radiális elrajzolást tükrözik. Az egyenletrendszert nullára rendezve már számítható.

A csillagok alapján történő kalibrálás esetén öt csillagra van szükség, hogy elvégezzük a feladatot. Érdemes a felvételeket zenit irányba elkészíteni, így csökkentve a légkör atmoszférikus hatását. Fontos még, hogy a képek elkészítésekor jegyezzük fel a pontos időt, a hőmérsékletet, az expozíció beállítási adatait, légnyomást, földrajzi szélességet és hosszúságot, a kamera elfordulási szögeit és a zenittávolságot. Erre azért van szükség, mert így a csillagászati katalógusból, program segítségével meghatározhatók a fotókon leképződött α és δ szög. Illetve a ξ, η mért koordinátákat is meg kell javítanunk a légkör refrakciós hatása miatt [5], [20].

5. KAMERA KALIBRÁCIÓ KIEGYENLÍTÉSSEL

A kiegyenlítő számítás nem csak a geodéziai mérések feldolgozására alkalmazható alapvető módszer.

Szakmánkban számos területen tudjuk alkalmazni ezt a matematikai módszert. Jelen esetben a fotogrammetriai kiegyenlítésben, de használható továbbá egydimenziós magassági és kétdimenziós vízszintes hálózatok, a mozgásvizsgálati hálózatok és a szatellitageodézia háromdimenziós hálózatainak kiegyenlítésére, távérzékelési adatok és további bizonyos mérnöki problémák megoldására is.

5.1. Kiegyenlítő számítások a fotogrammetriában

A digitális fotogrammetriában a koordináták kiszámításához méréseket végzünk a képeken vagy a térmodellen. A mérések számának meg kell haladnia a számításhoz minimálisan szükséges mennyiséget, amik még hibával terheltek. Ebben az esetben van szükségünk a kiegyenlítésre. Arra törekszünk, hogy a legnagyobb valószínűséggel becsüljük meg az ismeretlen paramétereket. A lehetséges kiegyenlítési módszerek közül a legkisebb négyzetek módszerét alkalmazzuk. Az egyenleteink lehetnek lineárisak vagy nem-lineárisak, melyeket a mérési eredményekből írhatunk fel. A lineáris egyenletrendszerek egyszerűen megoldhatóak, míg a nem-lineáris egyenletrendszereket linearizálnunk kell, melyek Taylor-sorba fejtés után fokozatos közelítéssel, iterációval oldhatók meg. A kiegyenlítés eredménye akkor mondható megbízhatónak, ha a durva hibával terhelt méréseket ki tudjuk szűrni. Feltétele a várható érték ismerete, melyet a kiegyenlítés után is megbecsüljük [6].

Megoldásai lehetnek:

- ***A legkisebb négyzetek módszere:***

Tegyük fel, hogy van n mérésünk, amelyek véletlenszerűen terheltek hibával. A méréseket l vektorba írjuk. Az ismeretlen u db paramétert kiegyenlítéssel határozzuk meg, ami az x vektorban van elrendezve. Feltételezzük, hogy méréseink meghaladják az ismeretlenek számát ($n > u$). A mért érték és az ismeretlen között f funkcionális kapcsolat

van, de a mérés során fellépő hibákat a v_i javítás kompenzálja. Arra törekszünk, hogy a javítások négyzetösszege minél kisebb legyen, azaz a

$$\mathbf{v}^T \mathbf{v} \rightarrow \min \text{ feltétel teljesítsük.} \quad (23)$$

Ennek megfelelően a javítási egyenletek felírhatók mátrix alakban:

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (24)$$

Lineáris egyenletrendszer esetén minden ismeretlennek van egy a_{ik} együtthatója, amely egy $\mathbf{A}$ mátrixba rendezhető. A javítási egyenlet a következő alakot ölti:

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (25)$$

Az $\mathbf{x}$ vektort csak akkor tudjuk kifejezni, ha az $\mathbf{A}$ mátrixot négyzetes mátrixszá alakítjuk, és a méréshez bevezetjük a $\mathbf{P}$ súlymátrixot. Ehhez az egyenlet mindkét oldalát megszorozzuk $\mathbf{A}^T \mathbf{P}$:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \mathbf{x} \quad (26)$$

Ha az $\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{v}$ tag nulla, akkor a $\mathbf{v}^T \mathbf{v} \rightarrow \min$ feltétel teljesül. Egyszerűsítjük a képletet, hogy (2) képletet megkapjuk:

$$\mathbf{N}\mathbf{x} - \mathbf{n} = 0 \quad (27)$$

Ezután a megoldás (28) szerint adódik:

$$\mathbf{x} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{n} \quad (28)$$

legyen. A fotogrammetriában a méréseket általában függetlennek tekintik, így általában azonos súllyal, 1-es értékkel szerepelnek. Ezért a képlet egyszerűsíthető a $\mathbf{P}$ súlymátrix (identitásmátrix) elhagyásával. Ha kiszámoltuk az ismeretlenek $\mathbf{x}$ vektorát, akkor most kiszámolhatjuk a javításokat is:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{l}. \quad (29)$$

A javítások alapján most ki tudjuk számítani a súlyegység középhibáját (a posteriorit) a kiegyenlítés után:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{n-u}}. \quad (30)$$

Az N^{-1} mátrix a súlykoefficiens mátrix, amelyet Q -val jelölünk, átlós elemei pedig az ismeretlenekhez tartozó szórásnégyzetek lesznek. Ekkor az egyes ismeretlenek középhibái (31) szerint számíthatók:

$$\sigma_{xk} = \sigma_0 \cdot \sqrt{q_{kk}} \quad (31)$$

- **Fokozatos közelítéssel végzett kiegyenlítés:**

Akkor használatos, ha a feltételi egyenlet nem lineáris. Ebben az esetben a kiinduló egyenletet linearizálni kell. Az ismeretlenek hozzávetőleges értékeinél (32)

$$\mathbf{x}^0 = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0]^T \quad (32)$$

az egyenletet Taylor-sorral alakítjuk úgy, hogy csak az első deriváltakat használjuk fel. Ezért az $\mathbf{A}$ alakmátrix a következőképpen írható fel:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_u} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_u} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Az $\mathbf{A}$ mátrix elemeit a megadott ismeretlen szerint parciális deriválással kapjuk meg úgy, hogy a többi ismeretlen helyére behelyettesítjük az előzetes értékeket.

Az ismeretlenek vektora ekkor két részre osztható: egy kezdeti értékre és az ahhoz tartozó dx pontosításra (34):

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}^0 + d\mathbf{x} \quad (34)$$

Az 1. tiszta tagvektort úgy alakítjuk ki, hogy a közelítésből számított $f(\mathbf{x}^0)$ függvényértékből kivonjuk az l_m mért értéket.

$$\mathbf{l} = \mathbf{l}_m - \mathbf{f}(\mathbf{x}^0) \quad (35)$$

Ekkor a javítási egyenlet így néz ki:

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A}d\mathbf{x} \quad (36)$$

A normál egyenletrendszer a következőképpen írható fel:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} d\mathbf{x} = \mathbf{N} d\mathbf{x} - \mathbf{n} = 0 \quad (37)$$

A $d\mathbf{x}$ megoldásvektor pedig:

$$d\mathbf{x} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{n} \quad (38)$$

képlettel kiszámolható. Ezután hozzáadjuk a dx -ben számított értékét az ismeretlen előzetes értékekhez, vagyis elvégezzük a pontosítást:

$$x^{-1} = x^0 + dx. \quad (39)$$

Ily módon zárul az első iteráció. Az első iteráció végén pontosított ismeretlenek lesznek az új előzetes értékek a következő iterációhoz. Ezt a folyamatot addig folytatjuk, amíg dx értéke el nem éri az előre meghatározott ε értéket. Az iteráció csak akkor konvergál, ha a kezdeti értékek kellő pontossággal meg lehet adni. Ez a kiegyenlítési módszer a következő feladatokhoz használható számításokhoz: sugárnyaláb-kiegyenlítés, relatív tájékozás, térbeli hátrametszés [5].

5.2. Kiegyenlítés kamerák kalibrációja esetén

A kamera kalibrálásával kapcsolatos gyakorlati problémák jellemzően a következő esetekben merülnek fel a kiegyenlítés során [6]:

- A paraméterek közötti korreláció:

A belső tájékozási paraméterek becsléséhez önkalibrálás segítségével végzett sugárnyaláb-kiegyenlítés alkalmazása általában a meghatározandó értékek között korrelációt eredményez. Bármely szignifikáns korreláció jelenlétét a kovariancia mátrix elemzésével lehet megállapítani. A magas korrelációs értékek lineáris függőségeket jeleznek az egyes paraméterek között, és ezt el kell kerülni [6]. Gyakran előfordulnak korrelációk a következő paraméterek között:

- kameraállandó és főpont koordinátái között,
- A_1 , A_2 és A_3 bizonyos mértékben mindig korrelál, mivel ezek a radiális elrajzolást leíró polinom paramétereit jelentik,
- főpont x irányú koordinátája és C_1 affin paraméter vagy alternatívaként főpont y irányú koordinátája és C_2 között [6].

Ck	1.000										
Xh	0.017	1.000									
Yh	-0.071	0.011	1.000								
A1	-0.122	-0.001	0.010	1.000							
A2	0.037	-0.002	-0.010	-0.966	1.000						
A3	-0.006	0.005	0.010	0.905	-0.981	1.000					
B1	0.018	0.930	0.010	-0.003	-0.005	0.006	1.000				
B2	-0.034	0.010	0.905	0.004	0.002	-0.002	0.006	1.000			
C1	0.147	-0.010	-0.002	0.077	-0.106	0.108	-0.019	-0.006	1.000		
C2	0.002	-0.028	-0.028	0.007	-0.009	0.010	-0.014	-0.036	0.000	1.000	
	Ck	Xh	Yh	A1	A2	A3	B1	B2	C1	C2	

11. ábra: Példa a kalibrált kamera paraméterek közötti korrelációra [6]

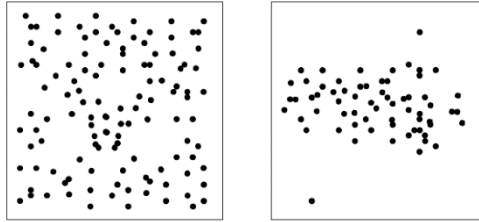
A (11. ábra) a belső tájékozás paraméterei közötti korrelációs mátrixot szemlélteti. A megfelelő mérési hálózat 140 képből áll. Nagyobb korrelációs együtthatók jelennek meg az A paraméterek, valamint a főpont koordináták (jelen esetben X_h és Y_h) és a tangenciális torzítás B paraméterei között [6].

A paraméterek közötti korreláció nagyrészt figyelmen kívül hagyható, ha az objektum rekonstrukcióját és a kamera kalibrálását egy időben számítják ki, mint: az önkalibrálással végzett sugárnyaláb-kiegyenlítés esetében. Mindazonáltal a statisztikai szignifikanciával nem rendelkező paramétereket megfelelő vizsgálati eljárásokkal ki lehet mutatni, és ki lehet zárni a funkcionális modellből. Ha az egyes belső tájékozási paraméterek korrelálnak, akkor a későbbi, különálló számításokban már nem képviselik teljesen a választott kamera modellt. Általánosságban elmondható, hogy a térbeli tesztmezővel való kalibrálás alacsonyabb korrelációkat és megbízhatóbb kamera paramétereket eredményez [6].

A főpont koordináták és az esetleges affin transzformációs paraméterek meghatározásához megfelelő dőlésszögű képek (az optikai tengely körüli elfordulások) szükségesek, ha a vizsgálati mező nem biztosítja a referencia pontok megfelelő eloszlását, vagy ha nem lehet elegendő konvergencia képet készíteni. A főpont koordinátái erősen korrelálnak a külső tájékozási paramétereikkel, ha az ferde tengelyű képek nem állnak rendelkezésre [6].

- A képformátum nem teljes méretének használata:

A kamera kalibrálásának képi sorrendjét úgy kell elrendezni, hogy a teljes képkészletet összesítve megvalósuljon az egész képformátum használata. Csak ekkor lehet meghatározni a teljes formátumra érvényes torzítási paramétereket. Azt is meg kell jegyezni, hogy az optikai tengely nem nézhet minden képen az objektum közepére. A kamerát különböző irányokba kell állítani [6].



12. ábra: A képpontok optimális (bal) és gyenge (jobb) eloszlása [6]

- Nagy torzítású objektívek használata:

Számos nagy látószögű és szuper széles látószögű objektív nagy torzítást okoz a kép sarkainál. Ezeknél az objektíveknél a szabványos torzítási modellek gyakran elégtelenek, és a sarkokban ábrázolt pontok kisebb pontosságát eredményezik. A probléma még kritikusabbá válik, ha a képformátumot hiányosan használják a kalibrálási szakaszban. Abban az esetben, ha kétség merül fel, érdemes figyelmen kívül hagyni a képformátum külső, 10%-ában végzett méréseket [6].

- Kamerastabilitás hiánya:

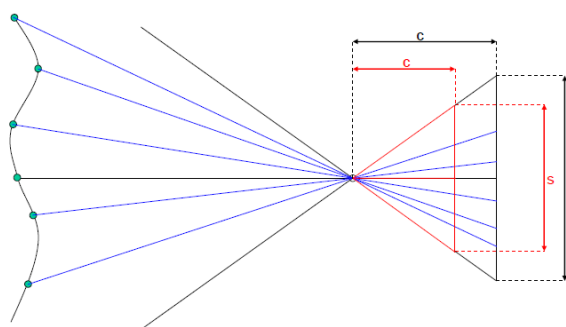
A belső tájékozás meghatározása bizonytalanabbá válik, ha a kamera geometriája képről képre változik egy sorozaton belül, például hőhatások miatt, az objektív laza rögzítése vagy a képérzékelő instabil rögzítése miatt a fényképezőgép házában. Ebben az esetben minden kamerához külön modell tartozik. A legtöbb felvételezési konfiguráció azonban csak kis számú kamera egyidejű kalibrálását teszi lehetővé [6].

- Hiányzó méretarány-információk a megtekintési irányból:

Ha a méretarány nem ismert a megtekintési irányban, mint például a sík tesztmezők ortogonális képei esetében, a kameraállandó és a tárgy távolsága nem határozható meg egyértelműen. Csak egy ismert távolság (pl.: ismert referencia pontok használatával) vagy egy ismert koordináta összetevő (pl.: egy sík tesztmező konvergens képe alapján) elegendő a kameraállandó kiszámításához. Egyszerű alternatívaként a sík tesztmező konvergens képeinek hálózata lehetővé teszi a kameraállandó meghatározását, de egy ilyen megoldás gondos beállításokat igényel. Egy másik alternatíva, ha a kameraállandót rögzített értékre állítják be, és nem határozzák meg a kiegyenlítéskor. A későbbi mérések során ebből az eljárásból eredő esetleges méretarány hibák javítása csak a tárgytérben megadott referenciahosszak használatával végezhető el [6].

- Ismeretlen pixelméret a képérzékelőben:

Számos egyszerű digitális fényképezőgép (fogyasztói kamerák, mobiltelefon-kamerák) esetében gyakran nem áll rendelkezésre elegendő műszaki adat. Ha hiányzik a képérzékelő pixelméretének vagy a fizikai érzékelő formátumának meghatározásához szükséges információ, akkor tetszőleges pixel méret állítható be. Bár ebben az esetben a képkoordináta-rendszer is önkényesen méretezett, a kalibrált paramétereket (különösen a kameraállandót) a kiválasztott érzékelő skálához viszonyítva határozzák meg. A belső tájékozás által meghatározott sugárnyaláb formája valójában ugyan az marad [6].



13. ábra: Az érzékelő formátuma és a fő távolság [6]

A kiegyenlítés mellett meg kell említeni még a hibaszűrést is. Ez nem mindig egyszerű feladat. A hiba forrása lehet nagy-, közepes-, és kisméretű (például: pontszámok felcserélése, pontok elazonosítása a képen, pontatlan adatbevitel, pontatlan sztereoszkópikus irányzás, stb) [6].

Szűrési módszerek, melyek alkalmazhatóak:

- Data snooping módszer,
- A RANSAC (Random Sample Consensus) módszer,
- robosztus becslések:
 - L_p -normás becslések,
 - a legkisebb négyzetek elve szerint történő kiegyenlítés olyan súlyfüggvényekkel, melyekkel a durva hibához tartozó súlyokat redukáljuk [6].

6. KAMERA KALIBRÁCIÓ TÉRBELI TESZTÁBRÁVAL – EGYEDI MÓDSZER ALAPJÁN

6.1. Projekt előkészítése, tervezése és megvalósítása

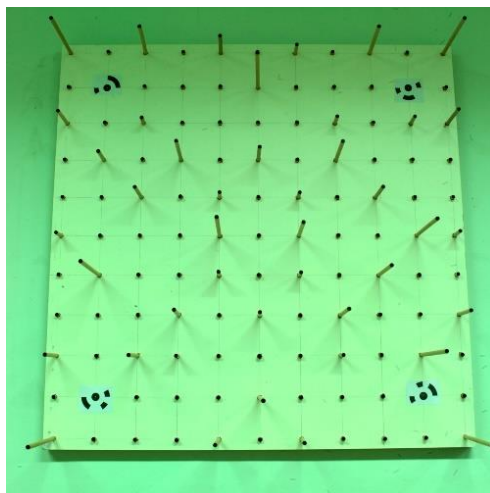
A projekt előkészítése először egy elméleti elgondolás volt. Több kutatás, publikáció is született ebben a témában. A főbb információk birtokában egy alap koncepció kezdett körvonalazódni. Ez egy pontmező létrehozása térben, „hordozható” méretben, amelyet felhasználok a kalibrációhoz.

Első lépésként a pontmezőt kellett kialakítanom. Ehhez kezdetben egy kicsinyített prototípust készítettem, ami egy rétegelt bútorlapból és pár darab hornyos fa tipliből állt. Készítettem még egy minta vázlatot, hogy hogyan is képzeltem el a pontok elhelyezkedését a teszthez. Ezen információk birtokában kerestem fel témavezetőmet, Dr. habil. Jancsó Tamást. Arra a következtetésre jutottunk, hogy 1 m x 1 m-es teszthez hozzak létre, figyelembe véve a felvételi távolságot a térbeli ábrától, határoztuk meg a „pálcikák” méretét. Ennek mérete maximum 20 centiméter hosszú, átmérője pedig 10 mm. A pálcikák méreti eloszlása a következő volt: 10-10 darab 20, 15, 10 és 5 centiméteres. Ez adja a térbeli elhelyezkedés mélységkülönbségeit.

A térbeli tesztábra alapja egy 1,05x1,05 méteres dupla vastagságú fehér bútorlap volt. Erre szabályos elrendezéssel, 10-10 centiméterenként, saját kezűleg felszerkesztett rácshálózattal (a szerkesztéshez fém derékszögű-, illetve méteres vonalzókat használtam) jelöltem ki a furatok helyét. A 10-10 cm adta meg a 11x11 metszéspontot, így 121 db pontot kapva. A furatokat egy speciális, bútorok csapoláshoz használatos kiegészítő szerszám segítségével tudtam merőlegesen az alap felületre fúrni, illetve a kívánt furatmélységet is be tudtam állítani. Az előre legyártott elemeket az egyetemen a fotogrammetria laborban helyeztem el addig, amíg a karbantartó kollégák felhelyezték az általunk kiválasztott helyre.

Ezt követően egy előre megbeszélt időpontban elhelyeztük Tanár Úrral a „pálcikákat”, itt jegyzem meg, hogy törekedtünk a szabálytalan elrendezésre. Többé kevésbé sikerült is, majd egy próba fényképezés keretein belül megvizsgáltuk a képen való elhelyezkedéseit. Sajnos, itt szembesültünk azzal a problémával, hogy a kis távolságok miatt a szélén lévő

nagyobb kinyúlásos „pálcikákat” át kellett helyezni. Így már nem takartak ki pontjeleket. A négy darab pontjel felragasztását követően már lehetőség volt a geodéziai mérésre (14. ábra).



14. ábra: Kalibrációhoz készített tábla (Fotogrammetria labor)

6.2. A létrejött pontmező bemérése geodéziai módszerrel, mérés feldolgozása

A fotók elkészítését megelőzően bemértem a pontokat mérőállomással, melyeket a későbbiekben ellenőrzésre, a kalibrálás referencia pontjaiként használtam fel. A feladat megoldásához az egyetem által biztosított GeoMax ZTS600 mérőállomást használtam. A laborban három szabad állásponton álltam fel a műszerrel és egy Leica prizmával, ügyelve a felvételi távolság megtartására, illetve a geometriai elhelyezkedésre, ami a kis hely miatt nehézkes volt. A benti, állandó hőmérséklet és körülményeket tekintve az állvány elcsavarodásával, egyéb külső tényezőket nem kellett figyelembe venni. A műszeren egy új munkaállományt létrehozva kezdhettem is a mérést. Először a legtávolabbi álláson elhelyezett prizmára, majd a többire is mértem irányszöget és távolságot. Ezt követően kezdtem meg a meghatározandó pontok mérést, melyeken korábban akril filccel megjelölt fehér pontok segítettek, hogy más álláspontokról is ugyan azt tudjam megirányozni. Korábbi tapasztalataim alapján egy előre kinyomtatott pontszám listát vittem, amelyre fel tudtam magamnak jegyezni az esetleges észrevételeimet a mérés során. A kis távolságok és az elazonosítás miatt használtam a műszer lézerét. Horizontzárást is végeztem, majd a hálózat pontjaira ismét rámérve

zártam az első állásponton a mérést. Ezt a másik kettő hálózati pontokról is elvégeztem. A mérés során voltak olyan új pontok, melyekre csak irányszöveget tudtam rögzíteni. A kettő álláspont kivételével, álláspontonként 121 pontot mértem, plusz a zárás. A mérést követően a műszerből kiolvastam a nyers mérési állományt, mely formázás és szerkesztés után már használható volt a számításhoz.

A feldolgozásra elkészített mérést a GeoCalc geodéziai feldolgozó program segítségével számoltam ki. A program elindítását követően az Adatrögzítő Mérési adatok – koordináták menüpont alatt behívható a mérési állományt, ahol a formátumot GeoCalc-AR-re állítottam át. Itt hozzá adtam még egy általam kialakított koordináta állományt, ami a kezdő és végpont koordinátáját tartalmazta. Ezt úgy választottam meg, hogy a kezdő pont 1001(0,0,100) a végpont a legtávolabb eső álláspont koordinátája a y értéke a mért távolság legyen 1003 (4.773,0,0), figyelembe véve a koordinátarendszer sodrásirányát. A távolságredukció számítást és a magasságkülönbség számítása ikon után a Konvertálással az adatok átkerülnek a számításhoz használatos menüpontokhoz. Itt a Hálózatkiegyenlítés menüpontnál először a Beállításoknál a következőket állítottam be: Kiegyenlítés előtti középhibáknál iránymérésre és távmérésre 2'' és 2 mm + 2 mm/km-t, átlagos távolságnak 5 m-t állítottam be. A kiegyenlítést az iránymérés és a távmérés súlyától függetlenül vettem figyelembe, hibahatár nélkül. Ezt követően a Munkaterületnél a kék nyíllal tovább az Előzetes számításhoz. Itt az összes pontot hozzá adtam és előzetes koordinátát számoltam a pontokra.

Hálózatkiegyenlítés / Vízszintes kiegyenlítés										
				Iránymérés			Távmérés			
AP	IP	Hz	Tvet	Javítás	Hibahatár	Statisztika	Javítás	Hibahatár	Statisztika	#
1001	1002	322.2211	1.837	21.3		13.36	2		0.85	1
	1003	303.2052	4.772	-3.1		-1.81	6		3.10	2
	1	241.2307	2.961	1.1		0.69	25		12.53	3
	2	241.1547	3.205	12.5		12.85	-1		-0.68	4
	3	244.1054	3.138	0.5		0.51	-1		-0.30	5
	4	244.1604	3.309	-2.8		-2.76	-0		-0.12	6
	5	246.3548	3.296	-1.7		-1.61	-6		-2.93	7
	6	247.0334	3.420	-2.5		-2.32	0		0.24	8
	7	248.5034	3.452	3.5		3.15	-5		-2.57	9
	8	249.4236	3.540	-2.8		-2.50	0		0.17	10
	9	252.2416	3.490	-0.3		-0.25	3		1.56	11
	10	252.1234	3.667	2.6		2.26	-1		-0.48	12
	11	255.2215	3.562	0.0		0.00	25		12.35	13
	12	253.2220	3.729	-0.4		-0.32	1		0.74	14
	13	252.0530	3.671	-4.2		-3.60	2		1.14	15
	14	250.5959	3.601	-7.4		-6.51	-1		-0.78	16

15. ábra: Vízszintes hálózat kiegyenlítése (GeoCalc)

Tovább lépve a Vízzintes kiegyenlítéshez a Kiegyenlítés gombra kattintva kaptunk meg a táblázatban az értékeket. A kiugró javításokat kivéve (megfelelő mezőre kattintva piros lesz, így azt kihagyva) a számításból ismét lefuttatjuk a kiegyenlítést. Itt még beállítottam a Hálózati dátumot az 1001-es pontra $Y = 300$ és $X = 400$ -ra, az elforgatás pedig nulla volt, hogy a koordinátákat ne lehessen felcserélni. Tovább gombbal a Magassági kiegyenlítésnél hasonlóképpen jártam el, mint a vízszintes kiegyenlítésnél. A végeredményeket .pdf formátumba mentettem ki, illetve exportáltam egy koordináták nevű .txt fájlt, ami tartalmazta a már kiegyenlített értékeket. A számítás során kapott eredményeket mellékelem a szakdolgozatomhoz.

6.3. Térbeli tesztábra felvételeinek elkészítése

Először a Rollei (2.1) (3. ábra) fényképezőgéppel készítettem el a felvételeket Tanár Úr segítségével. Itt az ideális távolság a gyártó által megadott 2,33 méter lett volna. Odafigyelve erre az értékre és hogy minél jobban kitöltssem a képet fényképeztem. A fényképezőgép állvány fel-le mozgatásával és annak döntésével értem el a megfelelő helyzetet. 22-es blende, végtelenre állított fókusszal és automata záridő szabályzással, a Rollei S single kép beállítással készítettem el a képeket. Mivel mérőkamerával készítettem, itt elég volt négy álláspontról összesen nyolc képet készítenem, melynek megoszlása 4 álló helyzetű és négy kilencven fokkal elforgatott. Erre azért van szükség, hogy a szenzor és a képalkotási hibákat minél jobban ki tudjuk mutatni. Ezt követően szükség volt a Capture One nevű programra, mivel a Rollei tömörített felvételeket készít. Ez a program kifejezetten ehhez a szenzorhoz lett kifejlesztve. Itt megtekinthetők a már elkészített képek és itt tudjuk kiolvasni, átalakítani a tömörített (TIF) képeket, hogy a későbbiekben használhatóak legyenek. Ebben a programban végeztem el a képek általános képjavítását (auto adjust) is, úgy, hogy a képélességhez nem nyúltam.

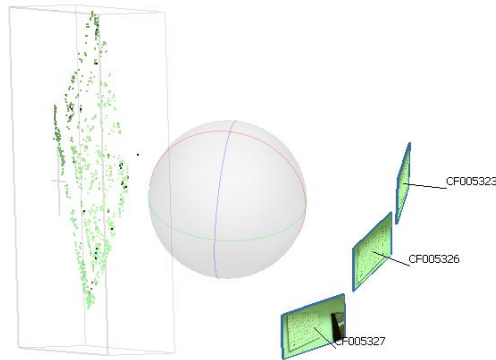
Másodszor már egy amatőr kamerával készítettem el a felvételeket egyedül, mely egy Sony fényképezőgép volt. Itt is figyeltem a felvételi távolságra, ami átlagosan 2 méter volt. A fényképezés során 20-as blende, 2,5 másodperces záridő és végtelenre állított fókusz volt beállítva. Amatőr kameráról lévén szó, itt már nem lett volna elég a nyolc kép. Ebben az esetben is négy álláspontról készítettem, de kettő – kettő képet, így

összesen 12 kép készült ezzel a fényképezővel. Erre azért volt szükség, mert míg a mérőkamera szabályos szenzorral van ellátva, addig a Sony téglalap alakú. Ahhoz, hogy kitöltssem a szenzort egyik oldalra és másik oldalra kellett állítani a fényképezendő területet. Így kaptam pontos értéket a kalibrálás során.

Az eredmények összehasonlítása érdekében nem csak a térbeli illesztőpontmezőről készítettem felvételeket, hanem egy síkbeli kalibrációhoz használatos ábráról is. A síkbeli tesztábra felvételeit nem a szakirodalomban leírtak szerint készítettem el, melynek az volt az oka, hogy össze lehessen hasonlítani a térbelivel. A tesztábrát egy asztalra, közel egy magasságban, a kamera tengelyével helyeztem el. A képeket szemből, bal, illetve jobb oldalról és még jobban kitolva, hegyes szögben készítettem el.

6.4. Felvételek kiértékelése, feldolgozása

A már kiegyenlítéssel megkapott referencia koordinátát és a felvételek elkészítése után következett a kiértékelés, a kamerák kalibrálása. Ehhez az Agisoft Metashape programot használtam. A szoftver széles körű felhasználói lehetőségeket biztosít fotogrammetriai feladatok megoldására. Én csak a kamera kalibrációs adatainak meghatározásához használtam, melynek elméleti háttérét a (3.1) részben írtam le. A következőben a Rollei mérőkamerával készült felvételek feldolgozását mutatom be. A Sony vagy egyéb kamerákkal készült kalibrációt ugyan ezen leírás alapján végeztem el. A kapott eredményeket hasonlítottam össze (6.5 fejezet). Először a Workflow parancs alatt az Add Photos-al hozzá adtam a már korábban elkészített képeket (1. és 2. melléklet). Ezt követően ugyan ezen menü alatt az Align Photos-t futtatam, ahol az Accuracy: High-ként volt beállítva. Itt végeztük el a képek relatív tájékozását.



16. ábra: Képek relatív helyzete (Agisoft Metashape)

Az itt létrejött pontokat a kijelölés után töröljük azért, hogy ezeket ne használja fel majd a kiegyenlítés során (16. ábra). A már korábban koordinatak.txt fájlba megszerkesztett pontszám, X, Y, Z sorrendben lévő referencia, tárgykoordinátánkat a File Import Import Reference hozzá tudjuk adni a projektünkhöz, itt még az Items-nél át kell állítani, hogy Markers legyen. A felugró ablakra Yes to all (3. melléklet).

Import CSV

Coordinate System: Local Coordinates (m)

Rotation angles: Yaw, Pitch, Roll

☐ Ignore labels

Threshold (m): 0.1

Delimiter: ☒ Tab

Columns:

Label	1	Accuracy	Rotation	Accuracy
X:	2	8	Yaw: 5	9
Y:	3	8	Pitch: 6	9
Z:	4	8	Roll: 7	9
			Enabled flag: 10	

Start import at row: 1

Items: Markers

First 20 lines preview:

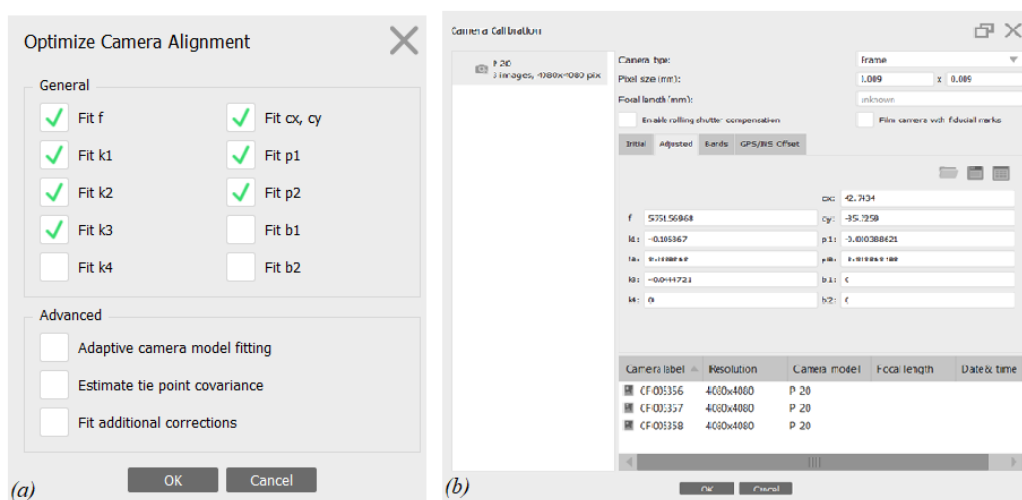
	Label	X	Y	Z	Yaw	Pitch
1	1	297.3644	401.4036	100.5718		
2	2	297.1692	401.5000	100.5786		
3	3	297.3061	401.6081	100.5766		
4	4	297.1615	401.7002	100.5771		
5	5	297.2485	401.8039	100.5778		
6	6	297.1547	401.8984	100.5760		

OK Cancel

17. ábra: Referencia pontok betöltése (Agisoft Metashape)

Az első képre rákattintva a listából az 1. pontra állva jobb egér gombbal a Place Marker listából választottam ki a megfelelő számú pontot. Ezt követően bal egérgombbal tudtam

helyére igazítani, ha esetleg nem volt megfelelő helyen. Az első képen mind a 121 pontot így kellett megmérnem. Itt a lista kép nézetben a két zászló közül a már kész kép zászló ikonja zöldre vált, ezzel jelzi a program, hogy azon a képen már megmértük a meghatározandó pontokat. A második képen az első kép bemérést követően közelítő sugárnyalábok segítik, mutatnak a pontra. Itt is jobb egérgombbal tudunk a listából választani. Itt is a 121 mérést követően a harmadik és a többi képen már megjelennek a pontok kis szürke zászlóval, itt ball egérgomb segítségével rögzítjük, ha jó helyen van, ha nem akkor a helyére igazítjuk. Ha az összes pontot megmértük akkor a szürke zászlók zölddé válnak. Az össze képen megtörtént mérés után a Reference párbeszéd ablakban a Settings felugró beállításnál aktiváljuk a Camera reference és Marker reference funkciókat majd az OK gombbal jóváhagyjuk. Ezt követően már csak a kiegyenlítéssel számolni kívánt paraméterek beállítása van hátra, amit a Tools menüpontnál a Optimize Cameras pont alatt tehetünk meg (18. ábra). Itt én a kiszámolni kívánt paraméterek közül a Cx, Cy, K1, K2, K3, p1 és p2 paramétereket választottam.



18. ábra: Kalibráció – a) paraméterek beállítása, b) eredmények megtekintése

A kalibrációt ugyanitt találjuk meg: Camera Calibration. Az itt kapott eredményeket egy párbeszéd ablakban kapjuk meg, itt be lehet állítani a kamera korábbi kalibrálása által kapott eredményt, ami 51,199. Ezt az értéket a Focal length-nél adhatjuk meg. Ezt az OK gombbal rögzítjük, majd a számítani kívánt paraméterek ismételt megadásával az ismertetett módon futtatjuk a kiegyenlítést. Eredményként megkapjuk a kamera belső adatait, a radiális elrajzolást ábrázolva és függvényként, illetve egy korrelációs táblázatot.

A végeredményt lehet exportálni egy kalibrációs jegyzőkönyvbe a File Export – Generate Report menüpontnál. Itt annyit kell beállítani, hogy a kapott eredmények hibái, hibaellipszisei melyik koordináta síkban legyenek ábrázolva, én szemből szerettem volna menteni, mert így könnyen értelmezhető, ezért a Projection-nél a Right YZ-t választottam ki. Ezen kívül, lehetőség van a már kiegyenlített és pixelkoordinátában meghatározott pontok koordinátáinak is exportálására szöveges állományban. Az itt kapott eredményeket szintén csatolom a dolgozat mellékleteként (4. melléklet).

A síkbeli mérést az Agisoft Metashape programban hasonlóképpen végeztem el, mint a térbeli kalibrációnál. A különbség annyiban mutatkozott, hogy itt nem adtam meg az illesztőpontok koordinátáit, hanem a síkbeli ábra pontjainak távolságát használtam fel referencia értéként.

6.5. Eredmények kiértékelése, összehasonlítása

A kalibráció során kapott jegyzőkönyvekből több adat felhasználásával vizsgáltam meg az eredményeket, melyek a következők voltak: kameraállandó, főpont koordinátái (Cx és Cy) és a hozzá tartozó hiba értékek és a négyzetes középhibák, valamint a súlyegység középhibája. A jegyzőkönyv adatai alapján mikronról mm-re való átváltását számoltam ki először. A kapott eredmények a következő (1. táblázat és 2. táblázat) táblázatokban tekinthetők meg.

	Rollei	Fókusz				Cx				Cy			
		Érték		Hiba		Érték		Hiba		Érték		Hiba	
		pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm
Térbeli:	(0.009)												
	T-56_57_58-R	5751.5700	51.7641	1.20	0.0108	42.7434	0.3847	5.20	0.0468	-35.7259	-0.3215	6.10	0.0549
	T-60_61_62-R	5753.8700	51.7848	1.40	0.0126	-26.4686	-0.2382	5.20	0.0468	-54.2453	-0.4882	6.90	0.0621
	T-57_58_61_62-R	5807.0200	52.2632	5.00	0.0450	-16.5511	-0.1490	9.10	0.0819	-32.9095	-0.2962	14.00	0.1260
	T-56_57_58_61_62-R	5744.8600	51.7037	1.80	0.0162	53.8422	0.4846	6.60	0.0594	-48.1182	-0.4331	9.50	0.0855
	T-57_58_60_61_62-R	5742.4300	51.6819	2.20	0.0198	-34.8791	-0.3139	7.80	0.0702	-51.3744	-0.4624	11.00	0.0990
	T-57_58-R	5756.4100	51.8077	5.60	0.0504	55.1279	0.4962	6.50	0.0585	-57.0099	-0.5131	7.70	0.0693
	T-61_62-R	5759.7500	51.8378	5.90	0.0531	-29.5703	-0.2661	6.90	0.0621	-3.5200	-0.0317	11.00	0.0990
	T-56_60-R	6456.0100	58.1041	22.00	0.1980	227.8620	2.0508	35.00	0.3150	-259.4820	-2.3353	42.00	0.3780
	T-56_57_58_60_61_62-R	5744.0100	51.6961	2.40	0.0216	11.1493	0.1003	8.80	0.0792	-80.6295	-0.7257	12.00	0.1080
	T-34_08_13-R	5754.9200	51.7943	1.10	0.0099	102.2000	0.9198	3.70	0.0333	-33.2593	-0.2993	5.30	0.0477
	T-34_40_08_13-R	5753.8400	51.7846	0.99	0.0089	98.6133	0.8875	3.60	0.0324	-5.1625	-0.0465	4.90	0.0441
	T-34_40_97_08-R	5753.3100	51.7798	0.77	0.0069	110.7570	0.9968	3.30	0.0297	-19.7411	-0.1777	3.40	0.0306
	T-40_97_08-R	5752.7100	51.7744	0.60	0.0054	119.3040	1.0737	2.80	0.0252	-18.6174	-0.1676	2.80	0.0252
	T-40_97_08_13-R	5754.0700	51.7866	0.85	0.0077	107.4990	0.9675	3.30	0.0297	-8.9593	-0.0806	4.30	0.0387
	T-97_08_13-R	5756.6100	51.8095	0.92	0.0083	108.1070	0.9730	3.30	0.0297	-29.3483	-0.2641	4.30	0.0387
Síkbeli:	T-34_40_97_08_13-R	5753.9600	51.7856	0.85	0.0077	101.2700	0.9114	3.20	0.0288	-10.4694	-0.0942	4.20	0.0378
	S-88_91_95-R	5741.62	51.6746	2.2	0.0198	53.658	0.4829	8.4	0.0756	-47.3511	-0.4262	8.2	0.0738
	S-95_91-R	5747.55	51.7280	22	0.1980	55.9415	0.5035	18	0.1620	-41.8791	-0.3769	14	0.1260
	S-96_88_94-R	5742.76	51.6848	1.6	0.0144	48.2077	0.4339	12	0.1080	-41.1975	-0.3708	9.3	0.0837
	S-96_94-R	5739.39	51.6545	16	0.1440	50.9097	0.4582	16	0.1440	-43.3953	-0.3906	17	0.1530
	S-96_95_91_94-R	5740.39	51.6635	2	0.0180	51.5674	0.4641	6.2	0.0558	-55.3663	-0.4983	9	0.0810
	S-88_91_94_95_96-R	5742.07	51.6786	1.3	0.0117	51.2536	0.4613	5.2	0.0468	-59.3878	-0.5345	7	0.0630

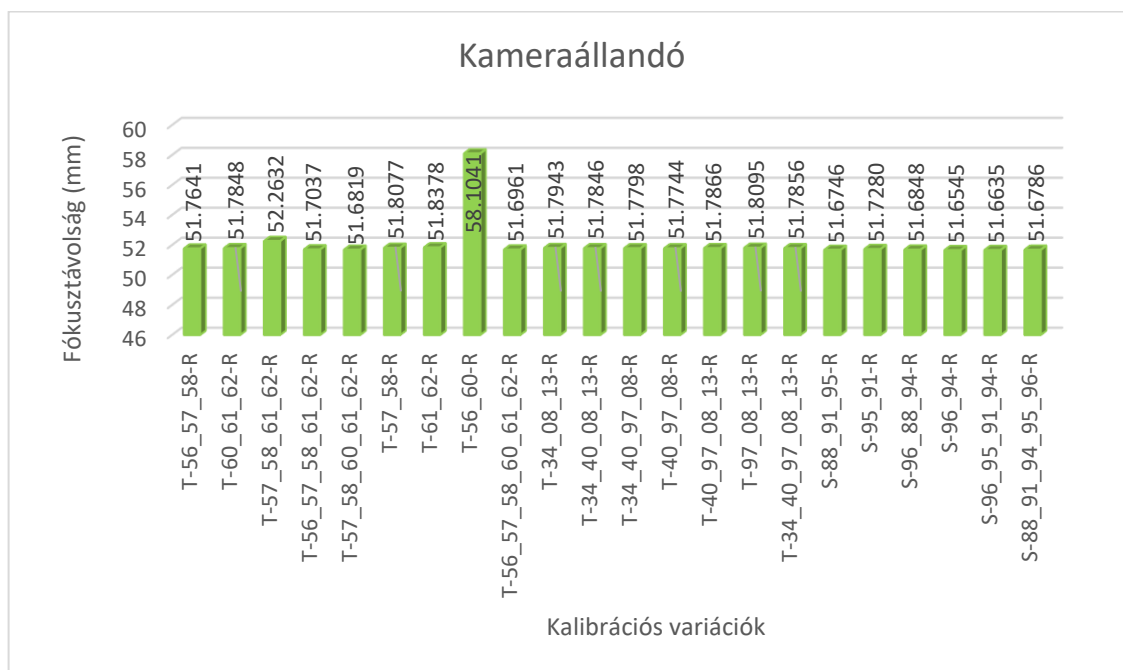
1. táblázat: Kalibrációs adatok átszámítása (Rollei)

	Sony	Fókusz				Cx				Cy			
		Érték		Hiba		Érték		Hiba		Érték		Hiba	
		pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm
	(0.00523)												
Térbeli:	T-15_16_17_18-S	4021.4800	21.0323	2.00	0.0105	-1.7744	-0.0093	3.80	0.0199	-21.1886	-0.1108	3.90	0.0204
	T-15_16_17_18_19_20-S	4022.0000	21.0351	0.59	0.0031	-13.5122	-0.0707	2.10	0.0110	-24.3273	-0.1272	3.20	0.0167
	T-15_16_19_20-S	4017.3400	21.0107	1.70	0.0089	-9.8706	-0.0516	3.10	0.0162	-30.5627	-0.1598	3.30	0.0173
	T-15_16_21_22-S	4029.1400	21.0724	2.00	0.0105	-13.3400	-0.0698	0.81	0.0042	-29.3129	-0.1533	0.87	0.0046
	T-15_16_21_22_23_24-S	4023.7700	21.0443	0.47	0.0025	-10.5917	-0.0554	0.73	0.0038	-29.7629	-0.1557	0.70	0.0037
	T-15_16_kozep-S	4020.9800	21.0297	2.90	0.0152	-2.1369	-0.0112	5.70	0.0298	-34.9064	-0.1826	8.60	0.0450
	T-17_18_19_20-S	4021.6000	21.0330	1.80	0.0094	-5.8491	-0.0306	2.60	0.0136	-17.6351	-0.0922	5.70	0.0298
	T-21_22_23_24-S	4022.3900	21.0371	0.52	0.0027	-6.8163	-0.0356	2.80	0.0146	-33.3239	-0.1743	1.90	0.0099
	T-21_22_k_elf-S	4031.5100	21.0848	2.00	0.0105	-16.3942	-0.0857	5.40	0.0282	-41.8849	-0.2191	7.90	0.0413
	T-23_24_elf-S	4027.2800	21.0627	3.70	0.0194	-0.8329	-0.0044	6.20	0.0324	-30.8657	-0.1614	2.40	0.0126
	T-15_16_17_18_19_20_21_22_23_24-S	4022.9400	21.0400	0.41	0.0021	-10.7317	-0.0561	0.63	0.0033	-29.8695	-0.1562	0.61	0.0032
	T-30_31_32_33_34_37_39-S	4018.7200	21.0179	0.61	0.0032	-14.2612	-0.0746	1.60	0.0084	-34.2446	-0.1791	2.80	0.0146
	T-31_32_33_34_37_39-S	4018.5800	21.0172	0.67	0.0035	-14.2008	-0.0743	1.70	0.0089	-32.8322	-0.1717	3.20	0.0167
Síkbeli:	S-24_25_26_27_28_29-S	4019.17	21.0203	0.86	0.0045	-9.81352	-0.0513	3	0.0157	-38.3469	-0.2006	4.5	0.0235
	S-26_25_22_24_28-S	4015.84	21.0028	1	0.0052	-8.65978	-0.0453	3.9	0.0204	-46.3332	-0.2423	4.8	0.0251
	S-27_25_22_24_29-S	4019.01	21.0194	0.95	0.0050	-10.2675	-0.0537	4.5	0.0235	-36.8031	-0.1925	4.1	0.0214
	S-27_26_28_29-S	4022.96	21.0401	1.6	0.0084	-5.29101	-0.0277	4.9	0.0256	-32.6664	-0.1708	8.1	0.0424
	S-22_24_25_26_27_28_29-S	4018.67	21.0176	0.77	0.0040	-10.6577	-0.0557	2.7	0.0141	-37.8749	-0.1981	3.8	0.0199

2. táblázat: Kalibrációs adatok átszámítása (Sony)

Az 1. táblázatból és a 2. táblázatból is jól megfigyelhetőek a hiba értékeknél a kiugró eredmények. A táblázatban szereplő eredményeket a jobb áttekinthetőség érdekében ábrázoltam diagrammok segítségével, ahol szembe tűnőbbek lesznek a kiugró értékek.

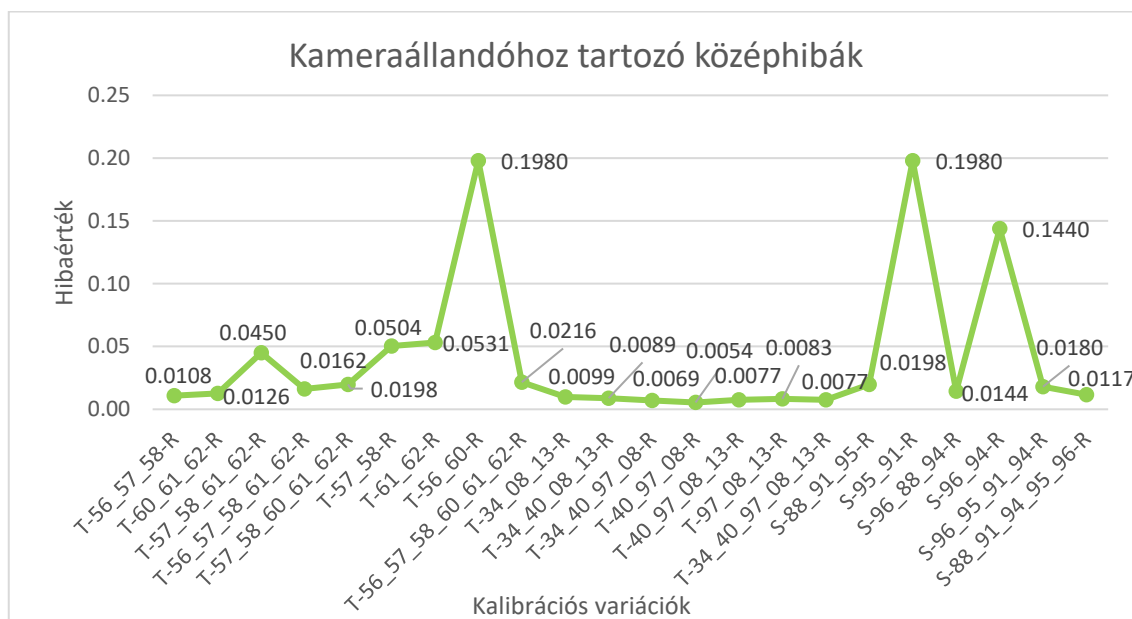
A kalibrációs mező alakját tekintve négyzet alakú, így jobban illeszkedik a Rollei kamerához, ezért ezzel kezdem az eredmények kiértékelését. A kamera kalibrációt elvégeztem síkbeli tesztábrával is. A kalibrációs eredmények jobb beazonosítása érdekében a táblázatokban a felvételek fájl nevének utolsó kettő karakterétén kívül az alábbi rövidítéseket használtam: az első karakter a mező dimenziójára utal, T- mint térbeli és S- mint síkbeli, az utolsó karakter a kamera típusára utal (R- Rollei, S- Sony). A táblázatban szereplő középhiba értékek azért szerepelnek mértékegységgel, mert az illesztőpontmező felhasználásával lett elvégezve a kiegyenlítés. Így azok már nem mértékegység nélküli mennyiségként jelennek meg.



19. ábra: Kameraállandó értékei (Rollei)

Mint a táblázatból is jól kivehető, úgy a 19. ábra alapján is jól látszanak az eltérések. A kalibrációt több képi elrendezés alapján is elvégeztem. A térbeli eredménynél jól látható, hogy az 56_60-as kalibrációnál a képek előnytelen helyzete miatt kaptam igen magas értéket. Ezt a kiugró értéket bent hagytam a kiértékelendő adatok között, de mint „jó” megoldást kizártam. Megfigyelhető, hogy a két kép alapján végzett kalibrációs értékek igen közeli eredményt adnak, ez elmondható a három képes kalibrációról is. A több mint három képpel végrehajtott, eredményeinek eloszlása a kameraállandó értékét tekintve kis mértékben térnek el egymástól, szabályosak. A síkbeli tesztábra alapján kapott értékek között a fókusz távolság tekintetében eltérések csak kis mértéken figyelhetők meg.

A kameraállandó értékeinek vizsgálatához szükséges megnézni a hozzá tartozó középhiba értékeket is, melyből pontosabb képet kapunk az érték elfogadhatóságának tekintetében (20. ábra).

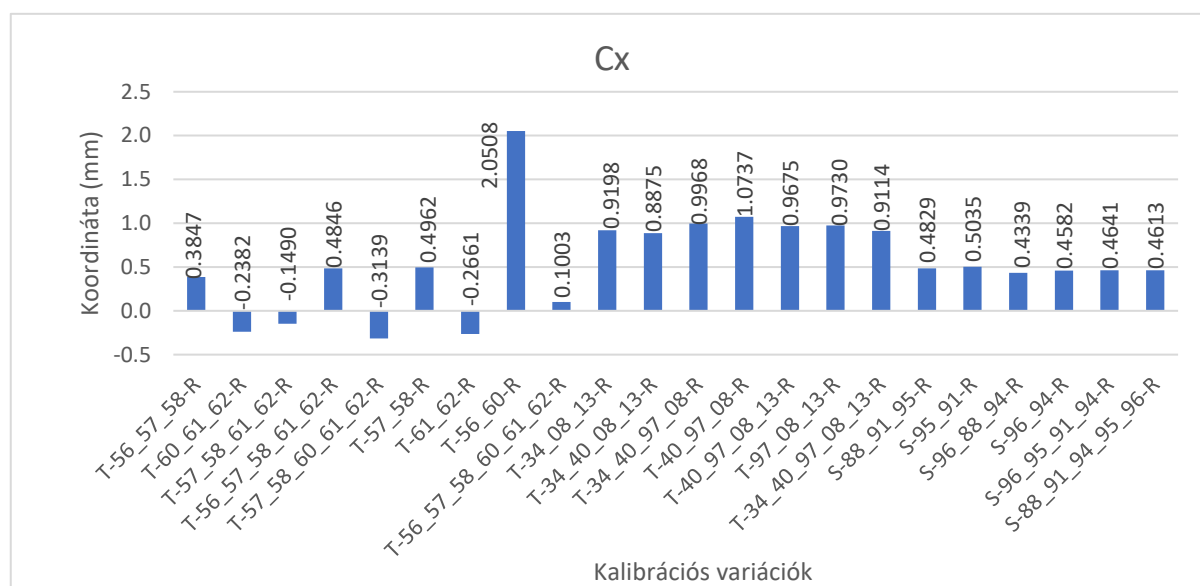


20. ábra: Kameraállandó megbízhatósága mm-ben (Rollei)

A 20. ábra mutatja a kameraállandó megbízhatóságát, amin jól kivehetőek a fókusz távolság kiugró értékei. Tanulmányaim során szerzett tapasztalataim alapján elmondható, hogy a két képpel történő kalibrálás, illetve a kapott adatok figyelembevételével, sokkal kevésbé megbízhatóbb, mint a három képpel történő kalibrálás, mely igaz a térbeli és a síkbeli eredményekre. A síkbeli eredmények tekintetében a két képpel számított értékek nem fogadhatók el, a kalibrációs szakirodalomban megfogalmazott elméleti háttér tekintetében. A térbeli középhibákat figyelve a négyképes eljárás, ami balról és jobbról normál, illetve elforgatott helyzetű képek alapján lett kiszámolva kevésbé pontos, mint a három vagy öt képpel készült kalibráció. Ennek oka feltételezhetően abban keresendő, hogy mint a három és öt képes esetén is szerepelnek balról, szemből és jobb oldalról is felvételek. A hat kép esetén a háromhoz közelítő, de az öt képeshez képest rosszabb érték szerepel. Ez azért következhetett be, mert már a felhasznált illesztőpont koordináták is hibával terheltek. Több (hat) kép esetén a hibák halmozódtak nem csak a felhasznált koordináták miatt, hanem a mérés pontossága is befolyásolja a végeredményt. További tényező lehet a képek mennyire töltik ki a teret és mekkora közöttük az átfedés. Így a mérési eredményhez is nagyobb hiba tartozik. A síkbeli eredményeknél megfigyelhető, hogy az öt képpel történt kalibráció a térbeli három képpel végzett eredményhez közelít. Míg, a három képes

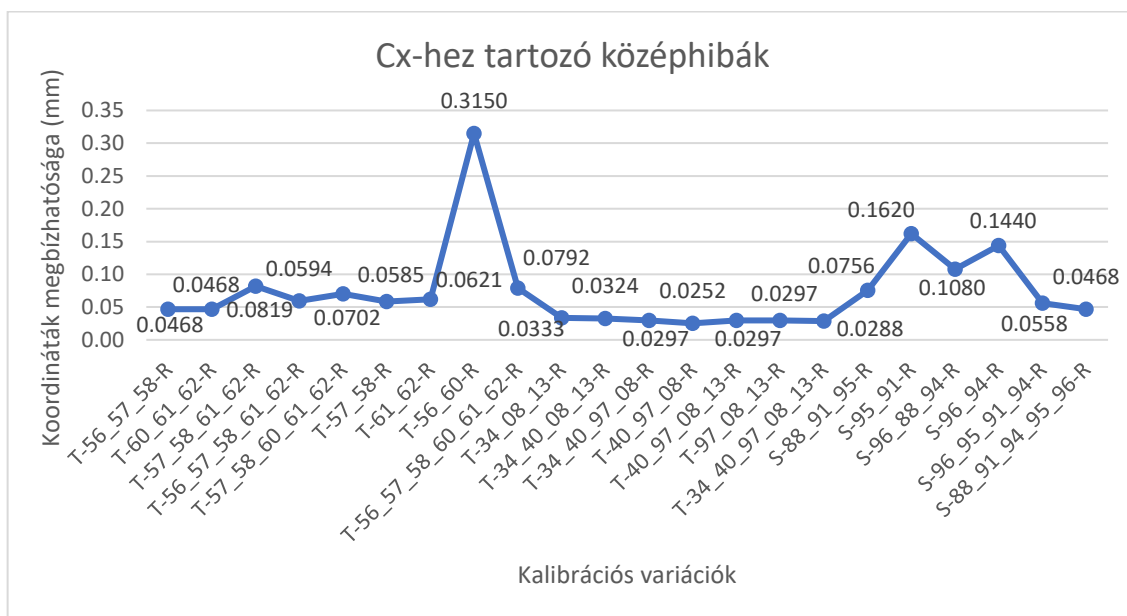
variáció esetén kis mértékben tér el az ötképeshez, de mint említettem nem felel meg az elméleti megfontolások szerint kalibrációs elrendezésnek.

A kameraállandóhoz szorosan kapcsolódó mennyiségek a Cx és Cy (Főpont), amelyeknél megállapítható, hogy széles skálán változnak értékei a különböző variációkat megfigyelve. Önmagukban ezen mennyiségeket nem lehet vizsgálni csak a paraméterek összességében.

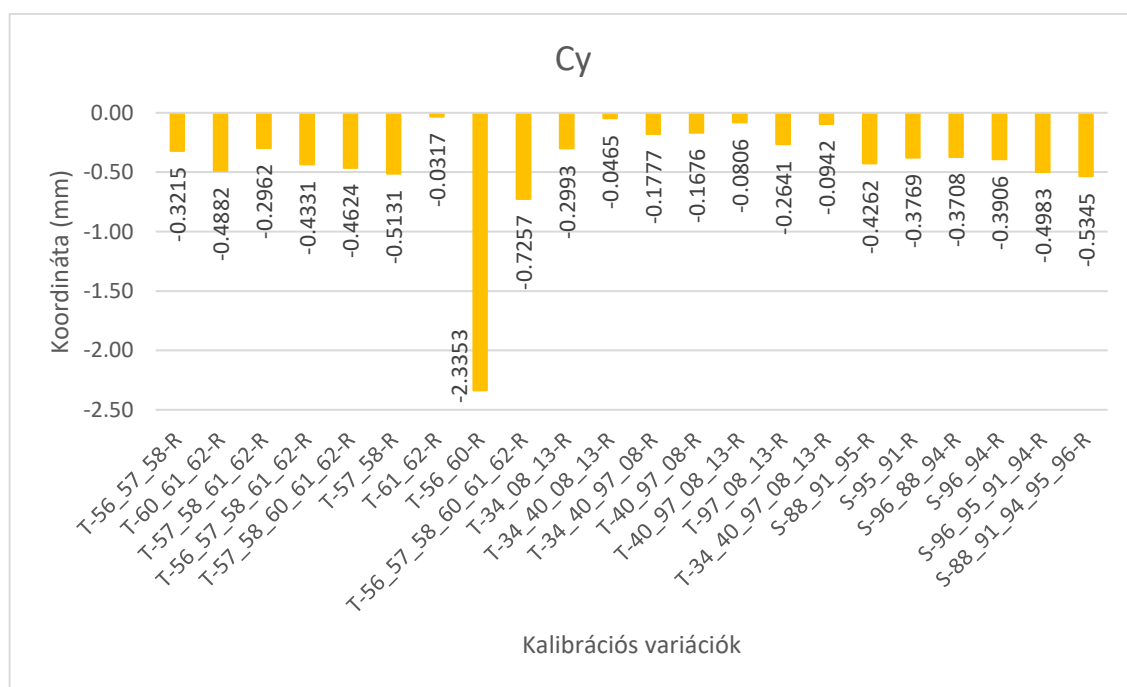


21. ábra: Főpont (Cx) koordináta értékei (Rollei)

A 21. ábra alapján is megfigyelhetőek a nagyban kiugró értékek, de ezeket csak a hibák nagyságával szabad figyelembe venni. Első ránézésre a térbeliek közül kedvezőnek tűnik a hatképeshez tartozó érték, de a többi hibával összehasonlítva a kapott hiba nagynak számít. A megbízhatóságát tekintve elmondható, hogy a három képes variáció mutatkozik a legjobbnak (22. ábra). A síkbeli eredményeket figyelve egységes képet mutat, de a középhibákat megnézve kivehetőek a nagyobb hibák. E tekintetben a több képes variációval kapott Főpont koordináta érték fogadható el megfelelő eredménynek (S_88_91_94_95_96-R).

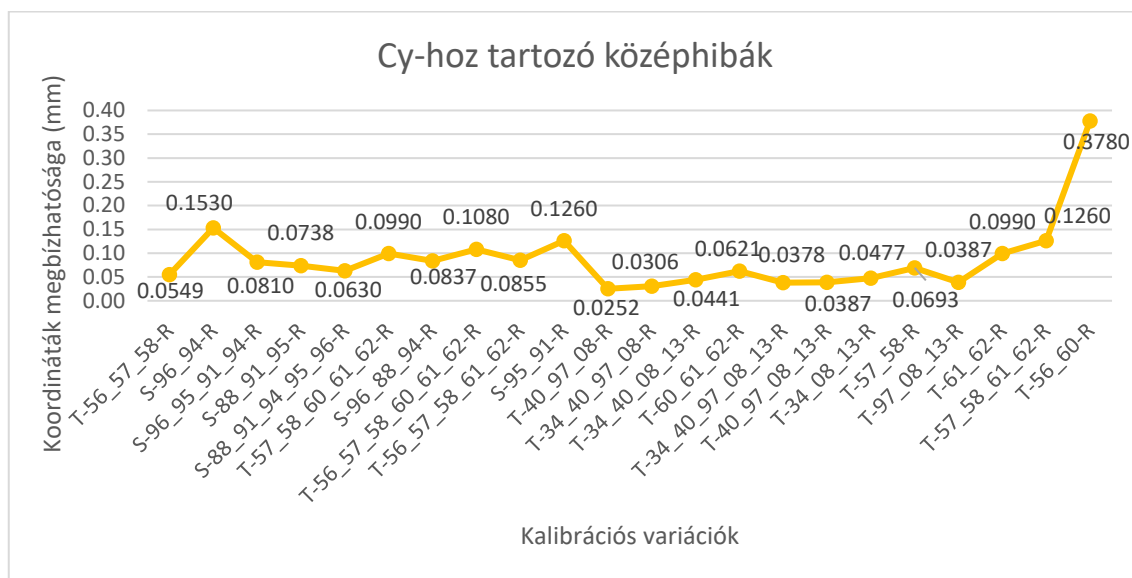


22. ábra: Főpont (Cx) koordináta értékeinek megbízhatósága (Rollei)



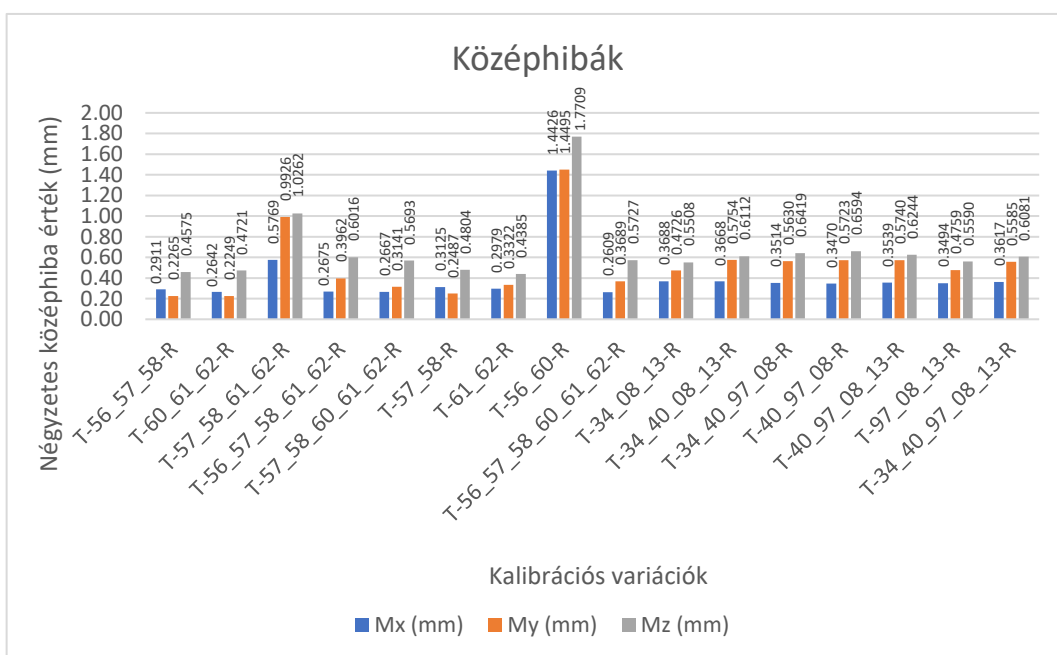
23. ábra: Főpont (Cy) koordináta értékei (Rollei)

A 23. ábra jellemzése ugyan azon elven elemezhető, mint a 20. ábránál. Itt is a középhiba értékeket kell figyelembe venni. A nagyon kiugró értékeket csak a többi paraméter összehasonlításával tudjuk eldönteni, hogy megfelelő-e számunkra.



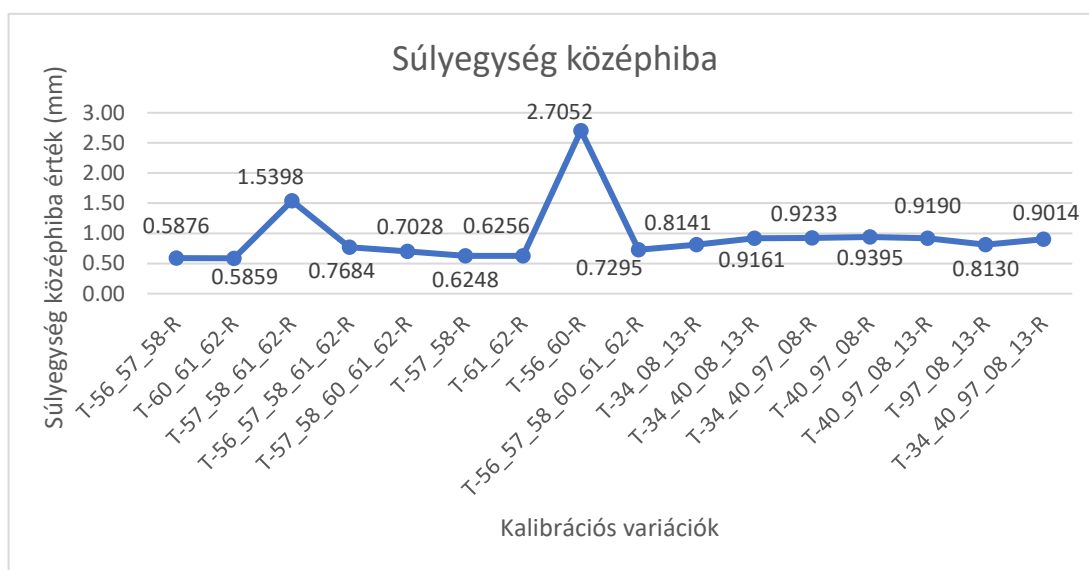
24. ábra: Főpont (Cy) koordináta értékeinek megbízhatósága (Rollei)

Általánosságban elmondható, ha betartjuk a kalibráció folyamata során az általános előírt és tapasztalati szabályokat, akkor nincs nem elfogadható kalibrációs eredmény. A kapott kalibrációs értékek közötti eltérések csak a felhasználhatósági környezetet és annak pontosságát fogja befolyásolni. Természetesen a túlzóan kiugró eredményeket ki kell zárni. Ilyen esetben a két képpel történt kalibráció.



25. ábra: Az Mx, My és Mz négyzetes középhiba értékek diagramos formában ábrázolva (Rollei)

A 24. ábrán jól kivehetőek a méréshez tartozó négyzetes középhibák. Megfigyelhető, hogy a különböző variációk hogyan viszonyulnak egymáshoz. Térbeliek tekintetében legjobbnak tekinthetők a három kép alapján végzett kalibrációk. Ezt követi az öt, illetve hat képes. A négyképesnél jól látszik, hogy a középhiba értékek kicsit megugranak. A két képpel történő vizsgálatot az elején már kizártuk a geometriai és a képek esetleges helyzete miatt.



26. ábra: A kiegyenlítés középhibája illesztőpontok alapján (Rollei)

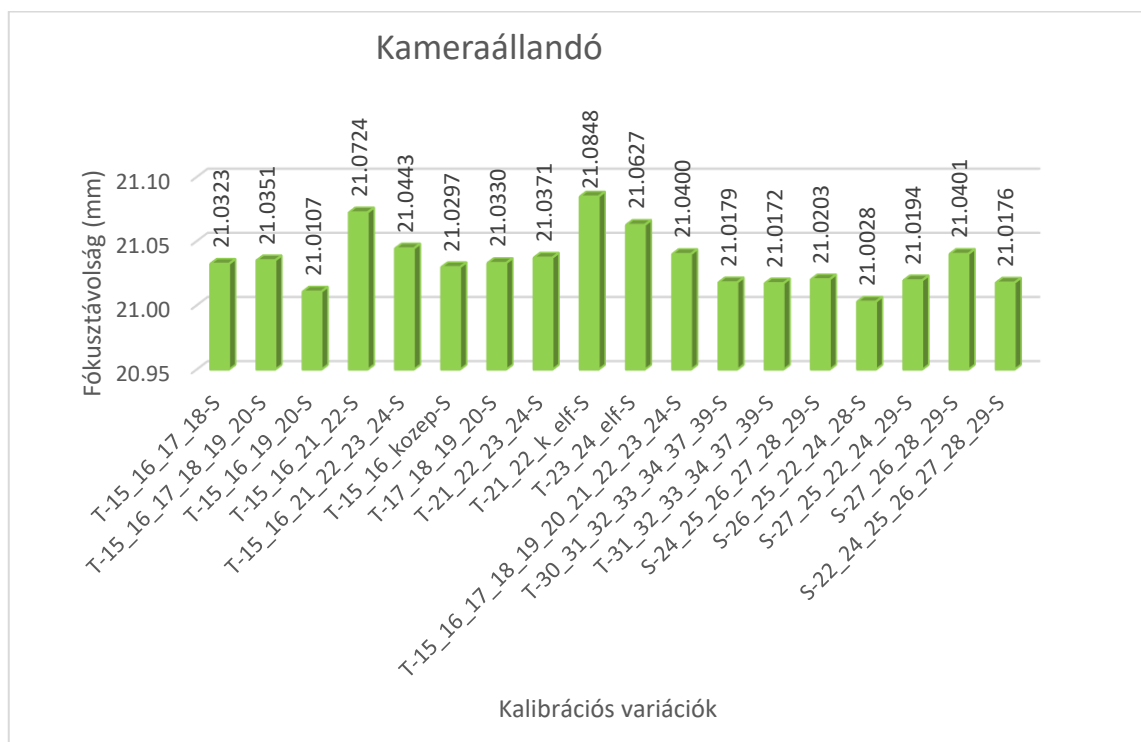
A 26. ábra már nem az egyes koordinátákra vonatkozóan tartalmazza a hibákat, hanem a teljes mérés kiegyenlítésének eredményeit veszi figyelembe. Itt szintén a korábban leírtak érvényesülnek.

A Rollei kamerára vonatkozóan bebizonyosodott a különböző kalibrációk alapján, hogy a három képpel történő kalibrálás elégséges és szükséges feltétele a megfelelő pontosság eléréséhez. Két kép esetén a megbízhatóság az elfogadási határhoz igen közel van, de pontatlanabb és jól látható, ha egy helyről, de különböző helyzetű képeket készítünk, igen kiugró eredmény születik, amelynek oka a kicsi felvételi bázisból és kedvezőtlen geometriai elhelyezkedésből adódik. Két kép esetén még az a tényező is fennáll, hogy az esetleges pontjelek kitakarhatják egymást, vagy épp olyan szögből készültek a képek, hogy csak egy, rosszabb esetben egy képen sincs lehetőség megmérni azokat. A négy képpel történő vizsgálatból az derül ki, hogy nem hozza a várt eredményt. Viszont az öt és hat képpel végzett vizsgálatból látszik, hogy szinte azonos eredmény születik. A

különböző kalibrációk alapján azt a következtetést tudom levonni, hogy a három és a hat kép között a különbséget a hibák halmozódása okozhatja. Az is jól kivehető a pontosság tekintetében, hogy a síkbelihez képest kevesebb képpel térben ugyan-olyan eredmény érhető el kalibrációval.

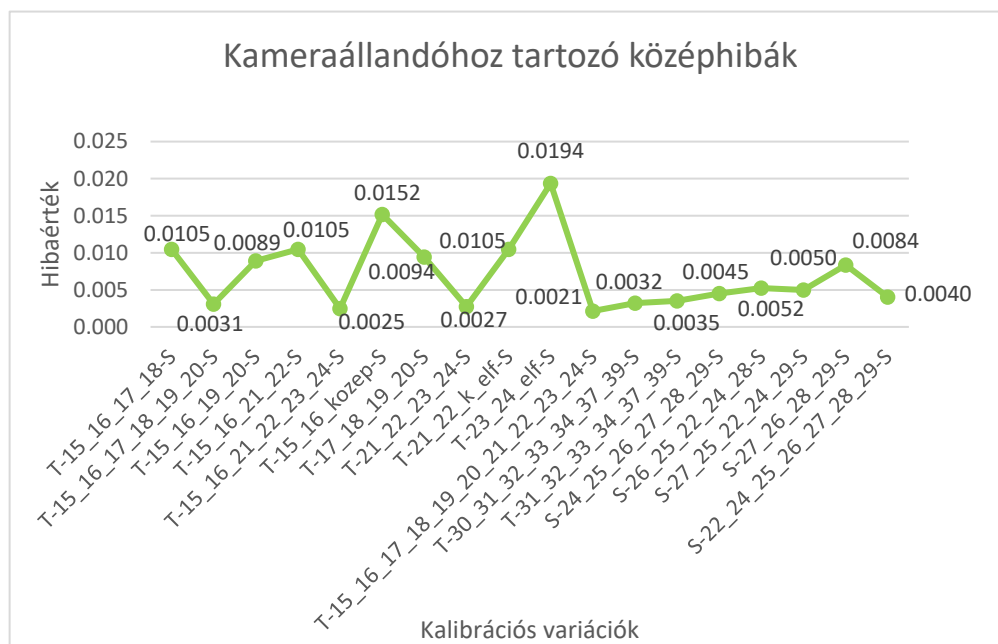
A vizsgálatot nem csak mérőkamerával, hanem egy amatőr kamerával is elvégeztem (Sony Alpha). Ideális lett volna a kamera szenzorához kialakított illesztőpontmezővel elvégezni a kalibrálást, de a feladat így is megvalósítható. A szenzor formáját tekintve feltételeztem, hogy itt nem elegendő a három felvétel alapján való mérés elvégzése. Minimum négy, de meglátásom szerint a hat képre lesz szükség az elfogadható eredmény eléréséhez.

A 27. ábra a Sony kamerához tartozó kameraállandó értékeit láthatjuk. Mint azt a Rollei kamera esetén leírtam, itt is figyelembe kell venni azt, hogy a képek honnan és hogyan készültek. Megdöbbentő képet kaptam a diagram alapján. A térbeli eredményeket vizsgálva a 15_16_kozep, ezek a képek majdnem szemből készültek, és a szenzor miatt, bal és jobb oldalra igazítva a kép szélét. Ebben az esetben közel azonos értéket kapunk, mint egy négyképes kiértékelésnél. Abban az esetben, ha a 21_22_k_elf (középről készült, elforgatott helyezű képek) vizsgáltam, már kiugró érték figyelhető meg, de ez elmondható a mellette lévő 23_24_elf (bal és jobb oldalról készült, elforgatott helyzetű) képekről is. A többi esetet vizsgálva megállapítottam, hogy a négy képes eljárás is változó intervallumú eredményt hoz. A hat képes kalibrálással szinte azonos eredményt kapunk, ami a tíz képpel szinte megegyezik. Ebből következően, nem szükséges tíz képet készíteni, ha elég hat képen elvégezni a mérést és ebből is elfogadható paraméterek születnek. A síkbeli fókusztávolság tekintetében eltérőek az eredmények. Az öt képes tűnik elfogadhatónak, de mint azt a mérőkamera esetén is említettem síknál több kép szükséges az eredmények számításához. Előre vetítve a hét képes variáció tűnik elfogadhatónak. Nézzük a kameraállandóhoz tartozó középhiba értékeket.



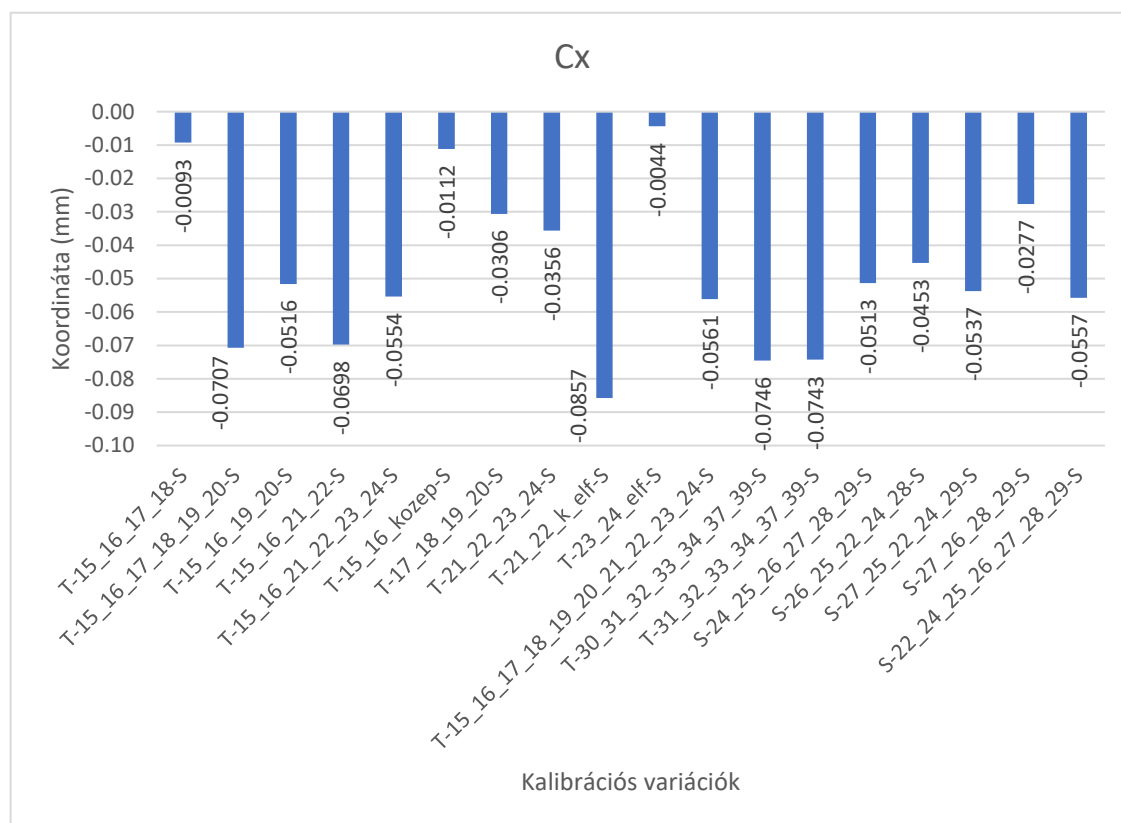
27. ábra: Kameraállandó értékei (Sony)

A kapott eredmények tekintetében itt sem szabad elfeledkezni a hibahatár vizsgálatáról. A 28. ábra alapján jól megfigyelhetők a fent leírtak. Szépen kivehetőek a kiugró és köztes értékek. Térbeli hat képes eljárás eredményei 2-3 mikronhoz közeli hibával szerepelnek.



28. ábra: Kameraállandó megbízhatósága mm-ben (Sony)

Síkbeli esetén ez az érték 4-5 mikronra tehető öt és hét felvétel esetén.



29. ábra: Főpont (Cx) koordináta értékei (Sony)

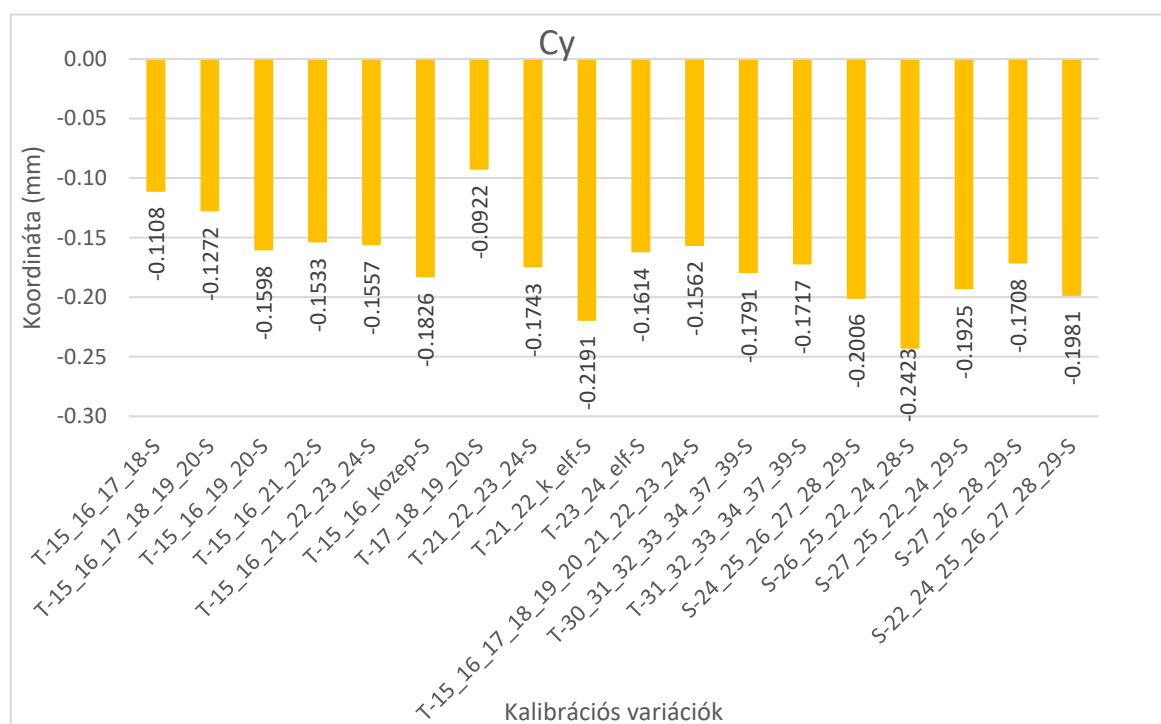
A 28. ábrán látható a főpont Cx koordináta értéke. Hasonló elemzés elvét követve, mint a mérőkameránál elmondható, hogy ezen mennyiségek is szorosan összekapcsolódnak a többi paraméterrel.

A 30. ábra a főponthoz tartozó középhibát mutatja. Térben jelentős kiugrások figyelhetők meg a két kép alapján végzett kalibrálásnál. Értékeinek szórása összefüggésbe hozható azzal, hogy a felhasznált képek az adott eseteknél milyen helyzetűek. Ezek nagyban befolyásolhatják a hibaértéket. Ennél is a hat, illetve a tíz képes kalibrációs érték bizonyul a legmegbízhatóbbnak az összes többihez képest. Síknál megfigyelhető a képek számának növelésével a hiba értékének csökkenése. A hat, illetve a hét felvételes variáció értéke közel azonos.

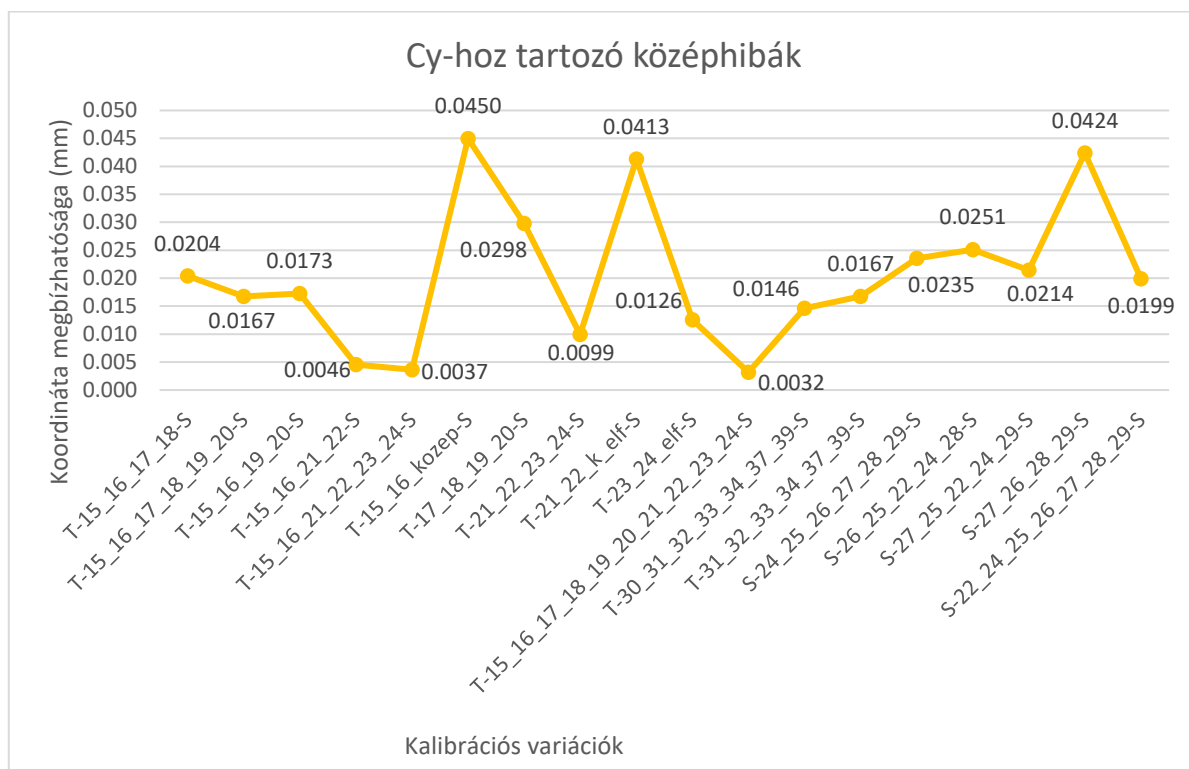


30. ábra: Főpont (Cx) koordináta értékeinek megbízhatósága (Sony)

A Főpont Cy koordináta értéke már sokkal egységesebb képet mutat (31. ábra), mint a Cx-hez tartozó értékek. A hozzá tartozó koordináta megbízhatóságokat a 32. ábra mutatja meg.

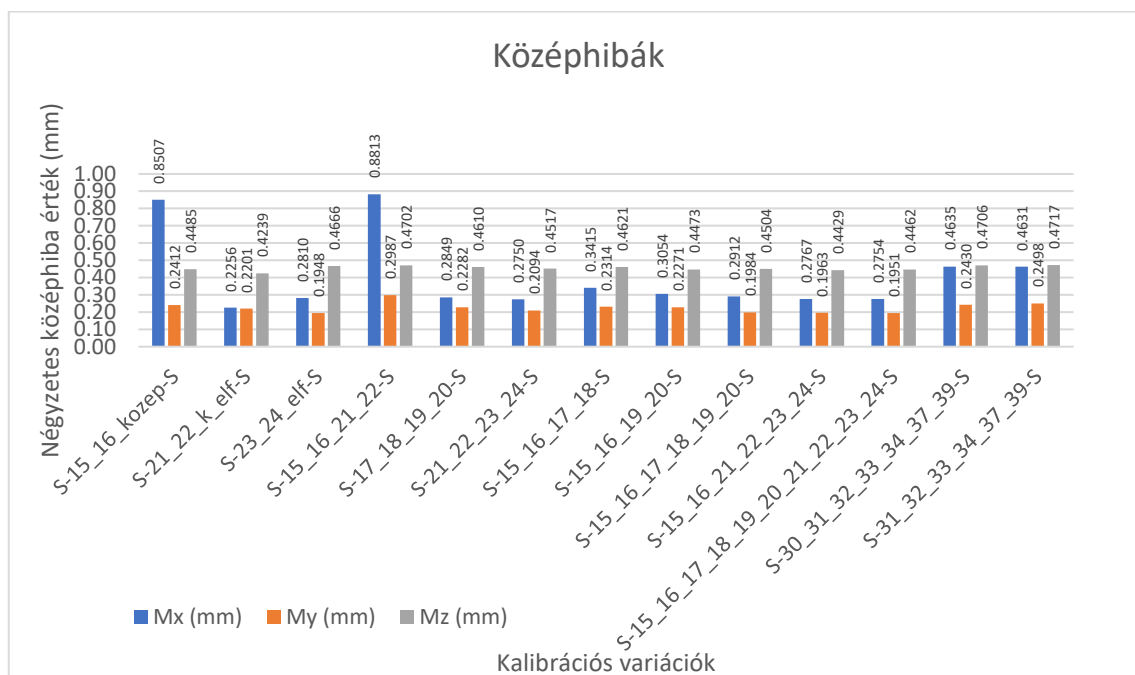


31. ábra: Főpont (Cy) koordináta értékei (Sony)

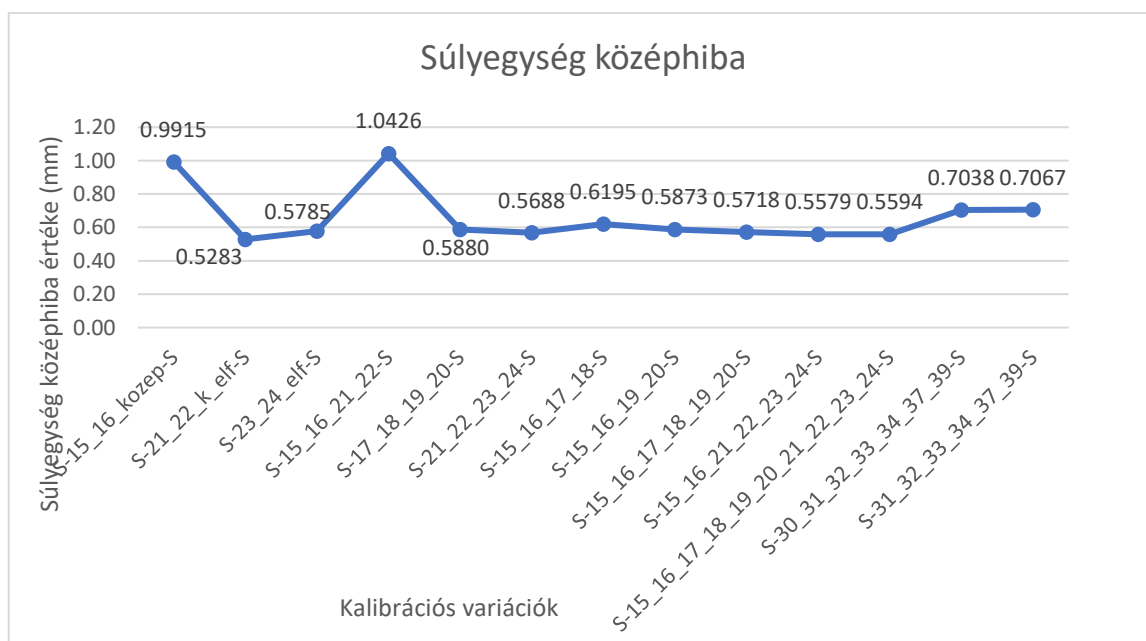


32. ábra: Főpont (Cy) koordináta értékeinek megbízhatósága (Sony)

A 32. ábra majdnem megegyezik a 30. ábra rajzolatával egy-két értéket leszámítva. A 33. ábra az egyes méréshez tartozó négyzetes középhibákat tartalmazza Mx, My és Mz értékekre bontva. Az összesített ábra alapján, a már korábban megfogalmazott meglátásaim helytállónak tűnnek, amely szerint a két képes variációknál a képek helyzete befolyásolja a kapott végeredményt. Látható, hogy itt a paraméter értékek igen közel vannak egymáshoz, így egyértelműen nem dönthető el, melyik adja számunkra az elfogadható kalibrációs eredményt. A számokat megfigyelve kivehető, hogy a négy, illetve a hatképes eljárás alapján kapott számok a kisebbek. Jobban kivehető az adatok, ha megnézzük a teljes kiegyenlítéshez kapcsolódó súlyegység középhibát (34. ábra). A súlyegység középhiba értékekből és a többi Sony kamerához tartozó ábrák alapján arra következtetésre jutottam, hogy a két képes eljárás során a kapott értékek nem tekinthetők elfogadhatónak, azért, mert van egy olyan eset (15_16_kozep) amely kimagaslóan gyenge középhibát mutat. Térben jobb eredmények érhetőek el a négy kép alapján végzett kalibráció során, de ezen értékeknél pontosabb eredmény születik, ha hat felvétellel végezzük. A két hatképes meghatározás között igen kicsi az eltérés. A tíz képes eljárás is a hatképes kalibrációhoz hasonló értéket ad.



33. ábra: Az Mx, My és Mz négyzetes középhiba értékek diagramos formában ábrázolva (Sony)



34. ábra: A kiegyenlítés középhibája az illesztőpontok alapján (Sony)

Összeségében elmondható a térbeliről, hogy bizonyítást nyert, elegendő amatőr kamerák esetén a hat képpel történő kalibrálás. A végeredmény számottevően nem sokkal tér el a tizképeshez képest. A síkkal történő kalibrálási variációs eredményekkel összevetve amatőr kamera esetén a vizsgált felvételek alapján, nem jelenthető ki egyértelműen, hogy

térben kevesebb képpel jobb eredmény érhető. Nagyságrendekkel 1-2 mikor az eltérés a sík és a térbeli kalibrációs eredmények között.

A variációk tekintetében a két különböző kamerával végzett következtetéseim pár mondatban a sík és térbeli eljárás alapján. A Rollei kamera esetén bizonyítást nyert számomra, hogy a síkhoz képest térben kevesebb képpel jobb eredmények érhetőek el a belső tájékozási elemek meghatározásánál. Elegendő három darab felvétel a paraméterek számításához, a síkbeli öt felvételes kalibráláshoz képest. Sony kamera esetén a vizsgált felvételek alapján ez nem mondható el ilyen egyértelműen. Amatőr fényképezőgép esetén legalább hat képre van szükség. Ez a szám lehetséges, hogy csökkenthető, ha az illesztőpontmező illeszkedik a kamera szenzorjához.

7. ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEK

Az általam létrehozott illesztőpontmező alkalmazási lehetőségeit tekintve felhasználható a fotogrammetriában használatos mérőkamerák kalibrálására. Lehetőség van amatőr kamera felvételei alapján is a belső tájékozási elemek meghatározására. Ezek az általános felhasználási lehetőségek. Továbbá felhasználható lehetőség nyílik az UAV kamerák kalibrálására is. Itt a laborban elvégezhető, melynek előnye abban van, hogy a terepen nincs szükség illesztőpontok létesítésére és meghatározására, mivel a kalibrációs mező illesztőpontmezője rendelkezik referencia koordinátával.

8. TAPASZTALATOK, ÖSSZEGZÉS (MŰSZAKI LEÍRÁS)

Szakdolgozatomban eddig részletesen leírtam a kalibrációs folyamatot és az ehhez tartozó eredményeket. Most röviden szeretném összefoglalni az eddig leírtakat.

A fotogrammetria iránt már rég nagy érdeklődést mutattam, pontosabban a kalibrációs lehetőségek iránt. Ebben a témában már több publikáció és kutatás is született [21], [22], [23].

Témaválasztásom egyben egy új kalibrációs pontmező kialakítása volt, amit korábban a Tudományos Diákköri Konferencián mutattam be.

Egyedi módszerrel való kalibrálásról lévén szó, ahhoz első lépésként egy pontmezőt kellett létrehoznom. Kialakítását gondos, átgondolt tervezés előzte meg. Készítése nagy odafigyeléssel és alapos, precíz szakszerszámokkal történt. A mező tényleges kialakítása, a „pálcikák” térbeli elhelyezését nem kapkodtam el. A megfelelő térhatást próba felvétel készítésével ellenőriztem. A kalibrációhoz elengedhetetlen része volt az általam már elkészített pontmező geodéziai bemérése, melyet referencia pontokként használtam fel. Ez volt a legidőigényesebb része a folyamatnak. Három álláspontból mértem be a 121 darab meghatározandó pontot, melynek álláspontjai egyben az elkészítendő fényképek felvételezési helye is volt. Erre azért volt szükség, hogy a hálózat kiegyenlíthető legyen és megbízható eredményt kapjunk. Ezt a GeoCalc nevű programmal végeztem el. A felvételeket mérő- és amatőr kamarával fényképeztem. Ezt követően már csak a kalibráció volt hátra. A kalibrációt térben és síkban is elvégeztem, hogy a kapott eredményeket jobban össze tudjam hasonlítani.

A kalibrációt az Agisoft Metashape programmal végeztem el. A belső tájékozási elemek meghatározásához méréseket végeztem a képeken, az összes pontra, így megkaptam a pontmező képkordinátáját. Ezt követően kiszámolhatóvá váltak az ismeretlenek. A program sugárnyaláb kiegyenlítéssel, fokozatos közelítéssel számol. A letisztult kezelőfelületnek köszönhetően egyszerű a szoftver használata.

Az eredmény egy kalibrációs jegyzőkönyv formájában kimenthető. A kapott értékeket ezt követően már össze tudtam egymással hasonlítani, és ebből következtetéseket vontam le.

A variációk tekintetében a két különböző kamerával végzett következtetéseim pár mondatban a sík és térbeli eljárás alapján. A Rollei kamera esetén bizonyítást nyert számomra, hogy a síkhoz képest térben kevesebb képpel jobb eredmények érhetőek el a belső tájékozási elemek meghatározásánál. Elegendő három darab felvétel a paraméterek számításához, a síkbeli öt felvételes kalibráláshoz képest. Sony kamera esetén a vizsgált felvételek alapján ez nem mondható el ilyen egyértelműen. Amatőr fényképezőgép esetén legalább hat képre van szükség. Ez a szám lehetséges, hogy csökkenthető, ha az illesztőpontmező illeszkedne a kamera szenzorjához.

9. SUMMARY

I have described the calibration process and the corresponding results in detail in my thesis so far. I would like to briefly summarise what I have written.

I have always been interested in photogrammetry, more specifically in the calibration possibilities. There have been several publications and studies on this topic [21], [22], [23].

My choice of topic was also the development of a new calibration point field, which I had previously presented at the Scientific Student Conference (Tudományos Diákköri Konferencia).

As a first step, I had to create a point field, because of the unique method of calibration. Careful and thoughtful planning preceded its construction (design). It was made with great care and careful, precise tools.

I created the actual design of the field, the spatial placement of the "sticks".

I verified the right field effect by making a series of test images.

An indispensable part of the calibration was the geodetic survey of the point field I had already made, which I used as a field of reference points. This was the most time-consuming process. I measured 121 points to be defined from three positions. The positions (corresponded to) were the same position as the location where the photographs were taken. This was necessary in order to balance the network and get a reliable result.

I did this using a program called "GeoCalc". The shots were taken with a precision measuring and amateur camera. After that, only calibration was left. The calibration was done in space and plane as well to enable a better comparison of results.

The calibration was made using the "Agisoft Metashape" program. To determine the internal orientation elements, I measured all the points on the images to obtain the image coordinates of the point field. After that, the unknowns were calculated.

The program calculated the unknowns with bundle adjustment.

Thanks to the clean UI interface, the software was not difficult to use. The results could be saved as a calibration report. I was therefore able to compare the values obtained and draw conclusions.

As far as variations are concerned, I summarized in a few sentences my conclusions with two different cameras based on the planar and spatial procedure.

In the case of the Rollei camera, it has been proven to me that fewer images in space yield better results in determining interior landmarks than the plane method. Three shots are sufficient to calculate the parameters, compared to a five-shot in-plane calibration. This is not so obvious with Sony cameras, based on the footage we examined/tested. We need at least six pictures with an amateur camera. If the control point field would matched the camera sensor, this shoot number could possibly be reduced by some amount.

JEGYZÉKEK

Ábrajegyzék

1. ábra: A fotogrammetria felosztása [2]	11
2. ábra: LSST kamera és a cikkben publikált képek [8]	14
3. ábra RolleiMetric 6008 tükörreflexes mérőkamera [10]	14
4. ábra: Sony Alpha tükörreflexes fényképezőgép [11]	15
5. ábra: Képi- és kamera koordináta rendszer [13]	16
6. ábra: Elrajzolás [14].....	18
7. ábra Az autokollimációs főpontra vonatkozó A-D négy félátló radiális optikai elrajzolása [16].....	19
8. ábra Vázlatos ábrázolása egy foto-goniméter működése [16]alapján	20
9. ábra: Kalibrációhoz használható ábrák [17], [18], [19]	25
10. ábra: Kalibráció csillagok alapján, kapcsolat a koordináta rendszerek között [20]..	26
11. ábra: Példa a kalibrált kamera paraméterek közötti korrelációra [6].....	32
12. ábra: A képpontok optimális (bal) és gyenge (jobb) eloszlása [6]	33
13. ábra: Az érzékelő formátuma és a fő távolság [6]	34
14. ábra: Kalibrációhoz készített tábla (Fotogrammetria labor)	36
15. ábra: Vízszintes hálózat kiegyenlítése (GeoCalc)	37
16. ábra: Képek relatív helyzete (Agisoft Metashape)	40
17. ábra: Referencia pontok betöltése (Agisoft Metashape).....	40
18. ábra: Kalibráció – a) paraméterek beállítása, b) eredmények megtekintése.....	41
19. ábra: Kameraállandó értékei (Rollei).....	44
20. ábra: Kameraállandó megbízhatósága mm-ben (Rollei)	45
21. ábra: Főpont (Cx) koordináta értékei (Rollei)	46
22. ábra: Főpont (Cx) koordináta értékeinek megbízhatósága (Rollei).....	47
23. ábra: Főpont (Cy) koordináta értékei (Rollei)	47
24. ábra: Főpont (Cy) koordináta értékeinek megbízhatósága (Rollei).....	48
25. ábra: Az Mx, My és Mz négyzetes középhiba értékek diagramos formában ábrázolva (Rollei)	48

26. ábra: A kiegyenlítés középhibája illesztőpontok alapján (Rollei)	49
27. ábra: Kameraállandó értékei (Sony)	51
28. ábra: Kameraállandó megbízhatósága mm-ben (Sony)	51
29. ábra: Főpont (Cx) koordináta értékei (Sony)	52
30. ábra: Főpont (Cx) koordináta értékeinek megbízhatósága (Sony)	53
31. ábra: Főpont (Cy) koordináta értékei (Sony)	53
32. ábra: Főpont (Cy) koordináta értékeinek megbízhatósága (Sony)	54
33. ábra: Az M_x , M_y és M_z négyzetes középhiba értékek diagramos formában ábrázolva (Sony)	55
34. ábra: A kiegyenlítés középhibája az illesztőpontok alapján (Sony)	55

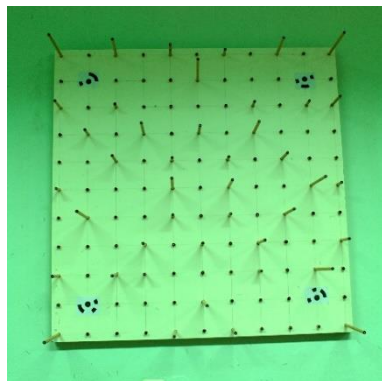
Felhasznált irodalom

1. V. Balázsik, „Fotogrammetria 15. (FOT-15) jegyzet, A fotogrammetria speciális alkalmazási lehetőségei,” Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar, Székesfehérvár, 2010.
2. V. Balázsik, „Fotogrammetria 1. (FOT-1) jegyzet, A távérzékelés fogalma, a fotogrammetria és a távérzékelés kapcsolata,” Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar, Székesfehérvár, 2010.
3. „Lechner Tudásközpont,” [Online]. Available: <https://lechnerkozpont.hu/oldal/fotogrammetria>. [Hozzáférés dátuma: 29. 06. 2022.].
4. P. Dr. Engler, „Fotogrammetria 6. (FOT-6) jegyzet, A földi fotogrammetria,” Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar, Székesfehérvár, 2010.
5. T. Dr. Habil Jancsó, „Digitális fotogrammetria,” Óbudai Egyetem, Budapest, 2017.
6. T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle és J. Boehm, Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging, Berlin: De Gruyter, 2014.
7. P. Dr. Engler, „Fotogrammetria 16. (FOT-16) jegyzet, Digitális kamerák,” Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar, Székesfehérvár, 2010.
8. M. GNIDA, „SLAC National Accelerator Laboratory,” 08. szeptember 2020.. [Online]. Available: <https://www6.slac.stanford.edu/news/2020-09-08-sensors-world-largest-digital-camera-snap-first-3200-megapixel-images-slac.aspx>. [Hozzáférés dátuma: 04. 08. 2022.].
9. M. Rollei, „Rolleiflex 6008digital metric,” [Online]. Available: http://www.semprebonlux.it/document/pdf/metric/RolleiMetric_digital_metric/. [Hozzáférés dátuma: 17. 06. 2022.].
10. P. Engler és T. Jancsó, „Megfelelni az új kifizásoknak *GISopen konferencia; A fotogrammetria fejlődési tendenciái,” in *Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar*, Székesfehérvár, 2011.
11. AZso, „Azso dot net, Sony Alpha,” 18. 11. 2011.. [Online]. Available: <https://azso.net/2011/11/18/elado-sony-alpha-200-fenykepezogetartozekok/>. [Hozzáférés dátuma: 12. 10. 2022.].

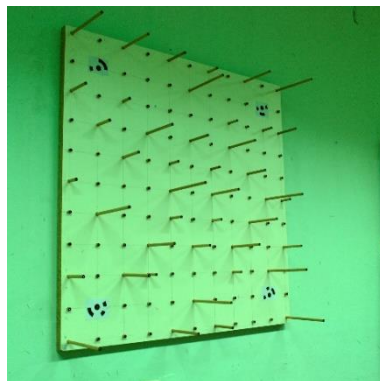
12. D. C. Brown, „Close-Range Camera Calibration,” 1971.
13. M. Agisoft, *Help, Camera models*.
14. V. Balázsik, „Fotogrammetriai 3. (FOT-3) jegyzet, A fotogrammetria optikai és topográfiai alapjai,” Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar, Székesfehérvár, 2010.
15. K. Kraus és P. WaldhÄusl, *Fotogrammetria, Alapok és általános módszerek*, Budapest: Tertia, 1998.
16. K. Kraus, *Photogrammetry, Geometry from Images and Laser Scans*, Berlin: De Gruyter, 2004.
17. M. Photo, „Online Help, Calibration Grid,” [Online]. Available: <https://www.photomodeler.com/downloads/OnlineHelp/index.html#!calibrationgrid.htm>. [Hozzáférés dátuma: 29. 06. 2022.].
18. W. Math, „Help Center,” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/calibration-patterns.html>. [Hozzáférés dátuma: 29. 06. 2022.].
19. D. Science, „Study the accuracy of digital close range photogrammetry technique software as a measuring tool,” [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016818301406>. [Hozzáférés dátuma: 29. 06. 2022.].
20. T. Dr. Habil Jancsó, „Kamera kalibrációs szoftver fejlesztése,” in *GISopen*, Székesfehérvár, 2021.
21. K. Bakula és A. Flasiński, „Capabilities of a smartphone for georeferenced 3D model creation: An evaluation,” 2014.
22. J. Sužiedelytė Visockienė, „Digital photo-camera calibration for photogrammetry requirement with Tcc and MatLab softwares,” 2012.
23. F. Remondino és C. Fraser, „Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons,” 2006.

MELLÉKLETEK

- 1. melléklet** – a RolleiMetric 6008D kamerával készített képek a kalibráláshoz térbeli és síkbeli:



CF005356



CF005357



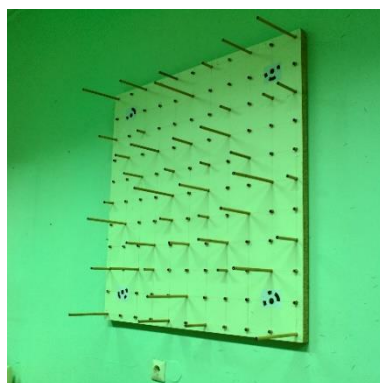
CF005358



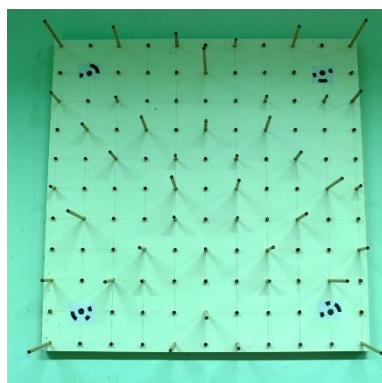
CF005360



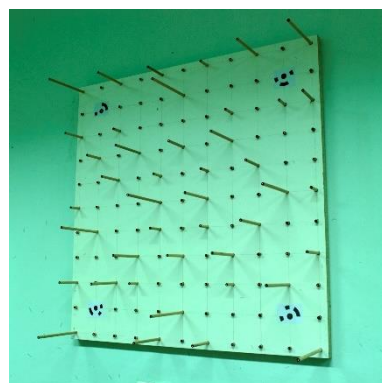
CF005361



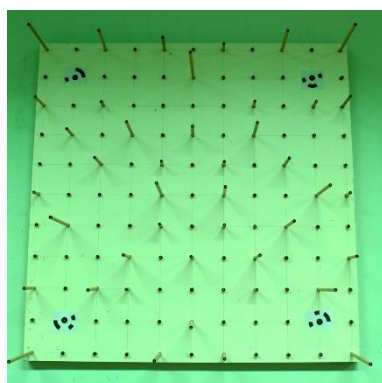
CF005362



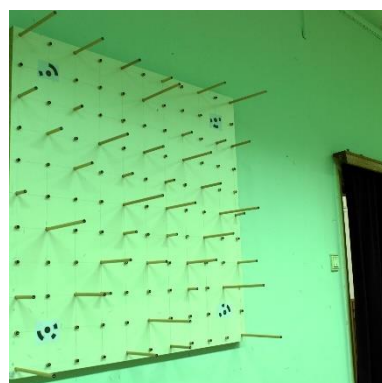
CF005334



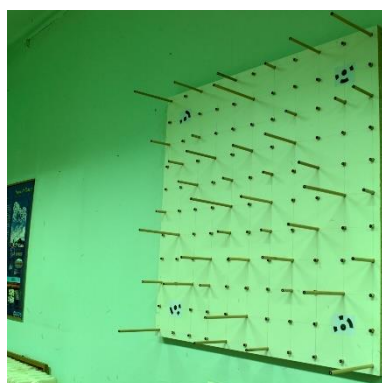
CF005340



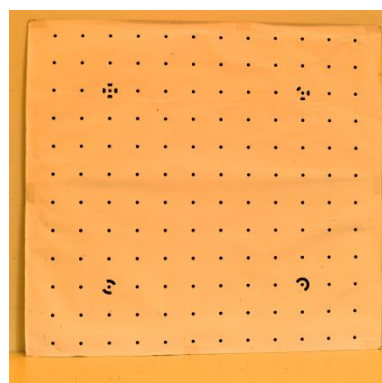
CF005397



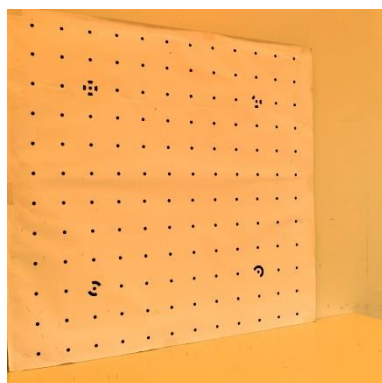
CF005408



CF005413



CF005388



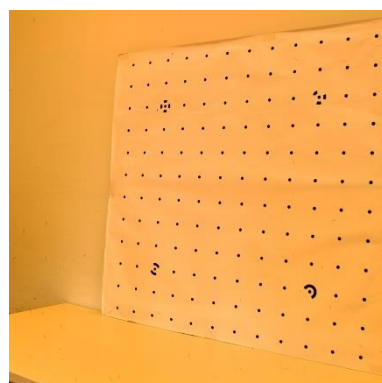
CF00005391



CF005394

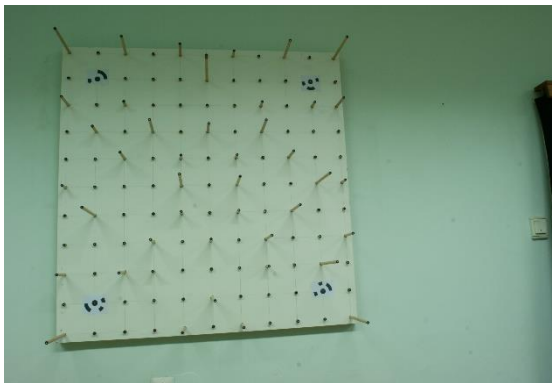


CF005395



CF005395

2. melléklet – a Sony Alpha kamerával készített képek a kalibráláshoz térbeli és síkbeli



DSC04315



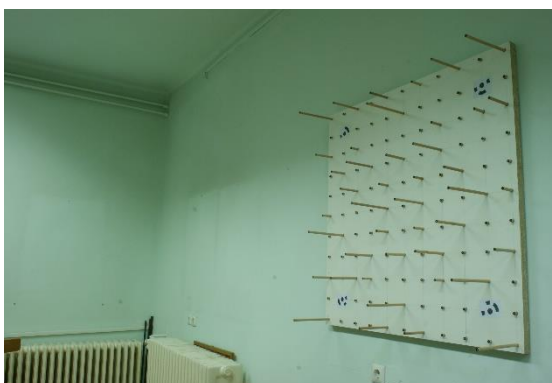
DSC04316



DSC04317



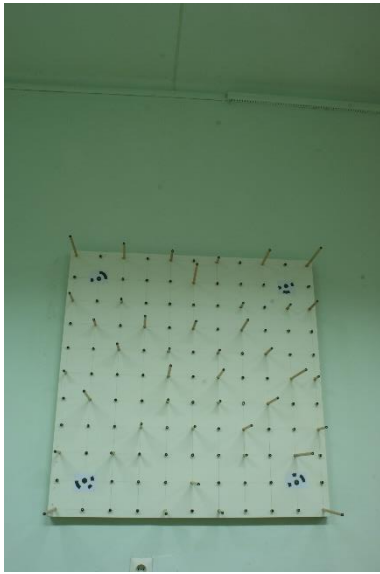
DSC04318



DSC04319



DSC04320



DSC04321



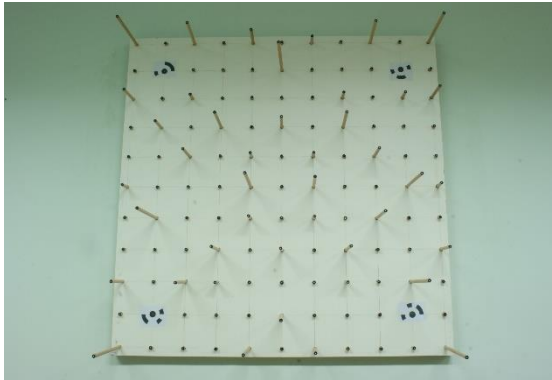
DSC04322



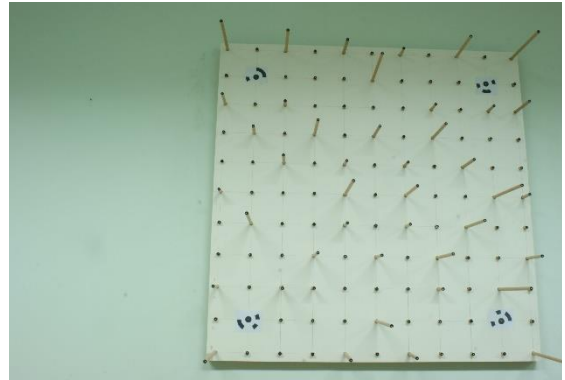
DSC04323



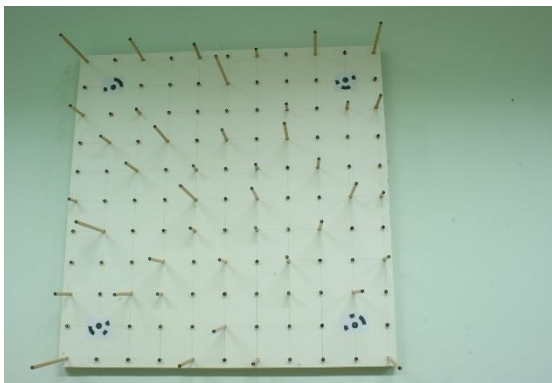
DSC04324



DSC04530



DSC04531



DSC04532



DSC04533



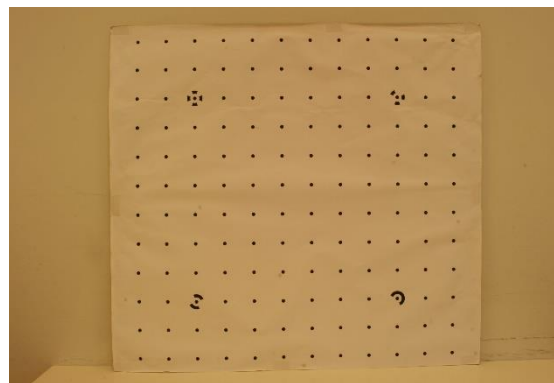
DSC04534



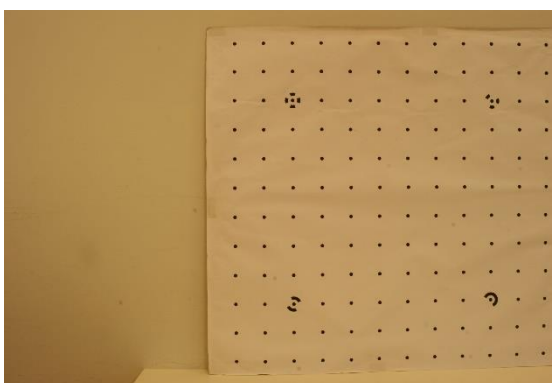
DSC04537



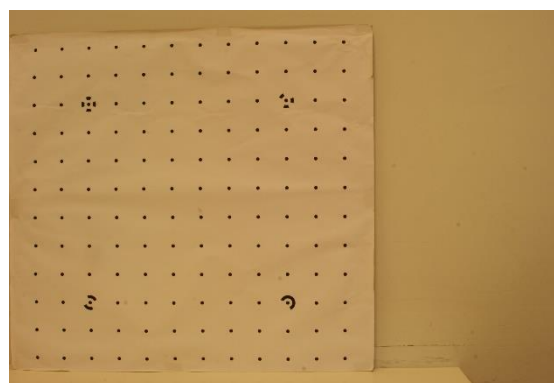
DSC04539



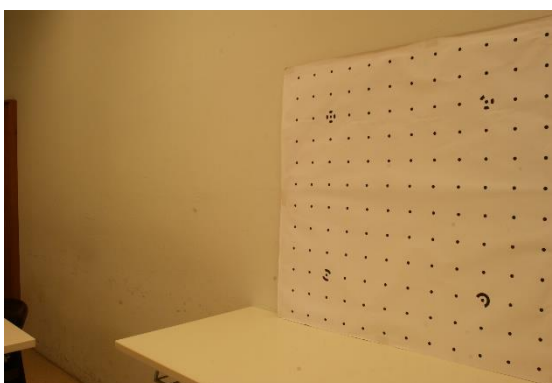
DSC04522



DSC04524



DSC04525



DSC04526



DSC04527



DSC04528



DSC0429

3. melléklet – az illesztőpontok koordinátái

Pontszám	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	297.3644	401.4036	100.5718
2	297.1692	401.5000	100.5786
3	297.3061	401.6081	100.5766
4	297.1615	401.7002	100.5771
5	297.2485	401.8039	100.5778
6	297.1547	401.8984	100.5760
7	297.1938	402.0014	100.5768
8	297.1490	402.0990	100.5762
9	297.2876	402.2010	100.5759
10	297.1454	402.3003	100.5754
11	297.3356	402.4010	100.5697
12	297.1433	402.3992	100.4759
13	297.1350	402.2989	100.4775
14	297.1494	402.1993	100.4764
15	297.1496	402.0998	100.4765
16	297.1528	401.9996	100.4758
17	297.3469	401.8987	100.4794
18	297.1596	401.7994	100.4771
19	297.1611	401.7003	100.4782
20	297.1670	401.5999	100.4786
21	297.1603	401.4994	100.4788
22	297.1735	401.3988	100.4797
23	297.2647	401.4024	100.3769
24	297.1706	401.4993	100.3784
25	297.1988	401.6009	100.3791
26	297.1603	401.7004	100.3778
27	297.1602	401.7993	100.3772
28	297.1558	401.8979	100.3764
29	297.1537	401.9995	100.3760

Pontszám	X [m]	Y [m]	Z [m]
30	297.1925	402.1008	100.3778
31	297.1494	402.1993	100.3763
32	297.1867	402.3005	100.3776
33	297.2335	402.4010	100.3792
34	297.1442	402.3967	100.2749
35	297.1463	402.2980	100.2756
36	297.1488	402.1988	100.2754
37	297.2919	402.1005	100.2772
38	297.1535	401.9986	100.2762
39	297.2499	401.9024	100.2793
40	297.1606	401.7989	100.2769
41	297.3046	401.7042	100.2788
42	297.1687	401.6001	100.2780
43	297.2394	401.5020	100.2775
44	297.1754	401.3991	100.2785
45	297.1749	401.3974	100.1790
46	297.1703	401.4978	100.1780
47	297.2585	401.5997	100.1789
48	297.1664	401.6994	100.1777
49	297.2021	401.8008	100.1786
50	297.1580	401.8974	100.1762
51	297.1937	402.0003	100.1782
52	297.1511	402.0980	100.1764
53	297.2413	402.2002	100.1777
54	297.1455	402.2983	100.1754
55	297.1452	402.3971	100.1752
56	297.1856	402.3982	100.0781
57	297.3384	402.3027	100.0764
58	297.1489	402.1978	100.0769
59	297.1516	402.0974	100.0773

Pontszám	X [m]	Y [m]	Z [m]
60	297.2979	402.0017	100.0796
61	297.1595	401.8973	100.0771
62	297.3521	401.8033	100.0809
63	297.1653	401.6993	100.0780
64	297.1680	401.5981	100.0776
65	297.1724	401.4976	100.0774
66	297.2167	401.3981	100.0778
67	297.1778	401.3972	99.9788
68	297.3639	401.5015	99.9817
69	297.1697	401.5971	99.9779
70	297.1673	401.6978	99.9776
71	297.2169	401.7990	99.9766
72	297.1615	401.8964	99.9765
73	297.1975	401.9992	99.9763
74	297.1516	402.0978	99.9762
75	297.2910	402.2028	99.9777
76	297.1478	402.2984	99.9751
77	297.1479	402.3972	99.9757
78	297.2374	402.3976	99.8755
79	297.1489	402.2967	99.8761
80	297.1522	402.1966	99.8761
81	297.2937	402.1018	99.8777
82	297.1578	401.9977	99.8750
83	297.2512	401.8991	99.8754
84	297.1624	401.7980	99.8772
85	297.3071	401.7041	99.8780
86	297.1705	401.5973	99.8785
87	297.1739	401.4975	99.8780
88	297.1777	401.3968	99.8788
89	297.2689	401.3989	99.7777

Pontszám	X [m]	Y [m]	Z [m]
90	297.1722	401.4975	99.7779
91	297.3093	401.6033	99.7758
92	297.2072	401.6980	99.7765
93	297.1633	401.7965	99.7773
94	297.1611	401.8970	99.7757
95	297.1579	401.9969	99.7763
96	297.1922	402.0976	99.7760
97	297.1521	402.1962	99.7767
98	297.3386	402.3082	99.7784
99	297.1478	402.3968	99.7751
100	297.1478	402.3969	99.6746
101	297.1388	402.2977	99.6759
102	297.1506	402.1967	99.6763
103	297.1532	402.0972	99.6756
104	297.1574	401.9965	99.6758
105	297.3512	401.9051	99.6764
106	297.1630	401.7959	99.6772
107	297.1669	401.6957	99.6777
108	297.1701	401.5974	99.6783
109	297.1650	401.4968	99.6788
110	297.1788	401.3965	99.6787
111	297.3697	401.4013	99.5795
112	297.1757	401.4960	99.5792
113	297.1714	401.5963	99.5782
114	297.1686	401.6959	99.5775
115	297.3043	401.7978	99.5780
116	297.1588	401.8967	99.5765
117	297.2484	401.9983	99.5760
118	297.1563	402.0975	99.5767
119	297.1525	402.1978	99.5759

Pontszám	X [m]	Y [m]	Z [m]
121	297.3366	402.4007	99.5747
1001	300.0000	400.0000	100.0000
1002	300.5995	401.7382	100.0155
1003	300.0000	404.7782	99.9641

4. melléklet – Kalibrációs jegyzőkönyv részlet (Rollei: 56_57_58)

Survey Data

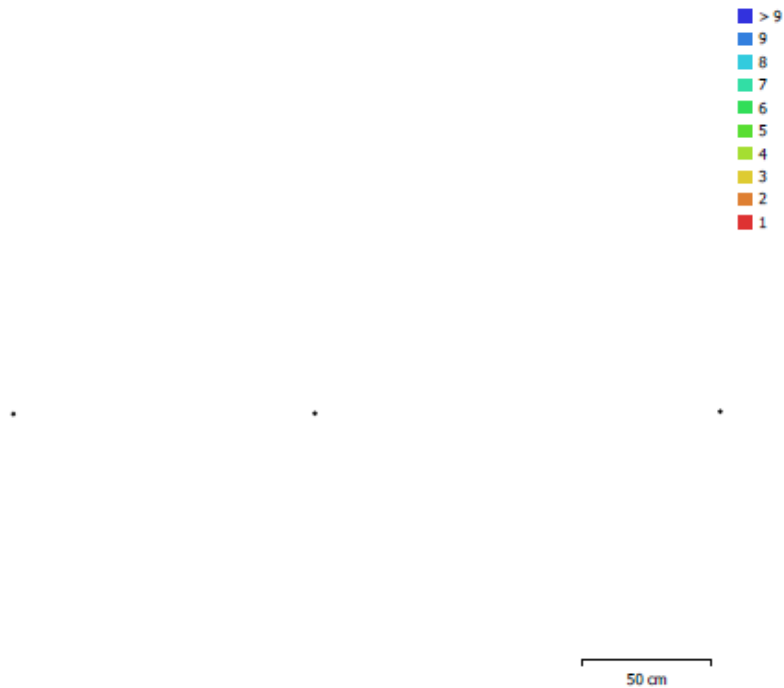


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	3	Camera stations:	3
Flying altitude:	0 m	Tie points:	0
Ground resolution:	0 m/pix	Projections:	0
Coverage area:	0 m ²	Reprojection error:	0 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
P 20	4080 x 4080	unknown	9 x 9 µm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

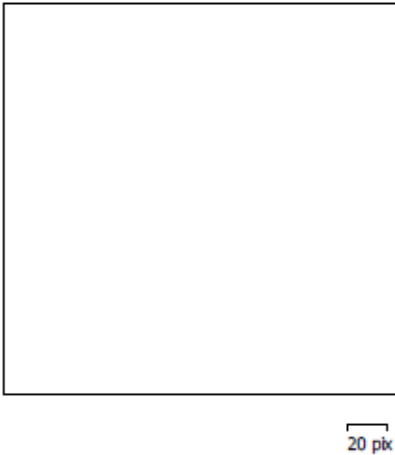


Fig. 2. Image residuals for P 20.

P 20
3 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	4080 x 4080	unknown	9 x 9 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	5751.57	1.2	1.00	0.13	0.14	-0.42	0.51	-0.51	0.07	-0.31
Cx	42.7434	5.2		1.00	-0.03	-0.17	0.10	-0.06	0.91	-0.05
Cy	-35.7259	6.1			1.00	0.06	-0.08	0.08	-0.07	0.46
K1	-0.106867	0.0037				1.00	-0.94	0.89	-0.11	0.10
K2	0.0932919	0.044					1.00	-0.99	0.05	-0.09
K3	-0.0444721	0.16						1.00	-0.02	0.07
P1	-0.000388621	0.00025							1.00	-0.04
P2	-0.000310428	0.00016								1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points

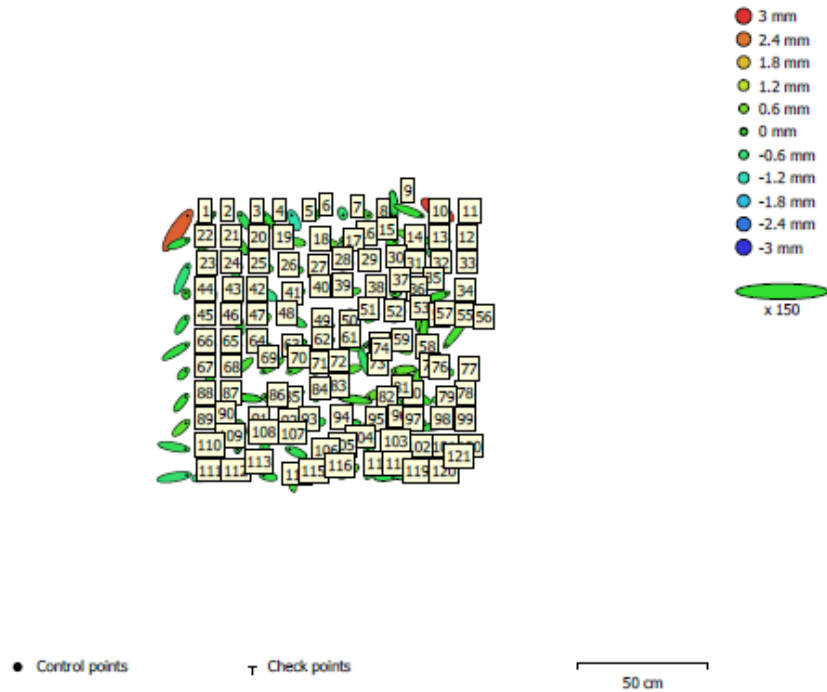


Fig. 3. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)
121	0.291099	0.226488	0.457457	0.36883	0.587625

Table 3. Control points RMSE.

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
1	0.502626	0.749084	2.61071	2.76217	0.117 (3)
2	0.34343	0.229803	-0.0853055	0.421937	0.085 (3)
3	-0.17428	0.277563	-0.285858	0.434891	0.241 (3)
4	-0.205171	0.267508	-0.00737983	0.33721	0.101 (3)
5	-0.121815	0.275427	-1.05873	1.10073	0.088 (3)
6	0.131989	-0.155827	0.0630239	0.213717	0.258 (3)
7	0.0272517	-0.0930575	-0.545852	0.554398	0.144 (3)
8	0.19622	-0.0586161	0.180878	0.273231	0.200 (3)
9	0.0621398	-0.532887	-0.269519	0.600392	0.191 (3)
10	0.592275	-0.223732	-0.0153483	0.63331	0.163 (3)
11	0.48792	-0.313765	2.8674	2.92549	0.158 (3)
12	0.620394	-0.0223148	0.0555273	0.623274	0.148 (3)
13	0.50897	-0.213484	0.421462	0.694446	0.170 (3)
14	0.109635	0.0287702	0.117904	0.163551	0.091 (3)
15	0.0434042	-0.211738	0.145833	0.260738	0.124 (3)
16	-0.129954	-0.0890275	0.120047	0.198054	0.068 (3)
17	-0.447816	0.0959331	0.386914	0.599537	0.229 (3)
18	-0.287686	0.049167	0.226409	0.36938	0.104 (3)
19	0.127914	0.301069	0.0740034	0.335382	0.250 (3)
20	-0.16146	0.270476	0.141943	0.345505	0.062 (3)
21	0.275562	0.152874	0.253237	0.40427	0.220 (3)
22	0.386295	0.155637	-0.151122	0.44304	0.133 (3)
23	0.260848	0.583599	-0.6309	0.898145	0.151 (3)
24	0.303382	0.205853	0.0803946	0.375339	0.131 (3)
25	0.0735853	0.189559	-0.31542	0.375283	0.188 (3)
26	-0.111384	0.0432617	0.21222	0.243548	0.233 (3)
27	-0.24106	0.071637	0.00144083	0.251484	0.191 (3)
28	-0.194515	-0.100946	0.194506	0.293017	0.226 (3)
29	-0.189482	-0.0833564	0.00355712	0.207037	0.151 (3)
30	-0.188065	-0.176585	-0.753052	0.796014	0.187 (3)
31	-0.0301968	-0.00836635	0.0675393	0.074454	0.081 (3)

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
32	0.48385	-0.307021	-0.414773	0.707396	0.189 (3)
33	0.42025	-0.353684	-0.690096	0.882006	0.204 (3)
34	0.470524	0.137994	0.0543662	0.493347	0.178 (3)
35	0.158068	-0.266232	0.0891021	0.322187	0.214 (3)
36	-0.0651241	-0.00999897	0.097177	0.117407	0.205 (3)
37	-0.304742	-0.242794	-0.196738	0.436489	0.074 (3)
38	-0.366984	-0.0625296	0.183276	0.414943	0.178 (3)
39	-0.147966	-0.0743004	-0.399488	0.432441	0.220 (3)
40	-0.277177	-0.0465247	0.196249	0.34279	0.128 (3)
41	-0.176736	0.112645	-0.772432	0.800359	0.243 (3)
42	-0.016939	0.243972	0.0171442	0.24516	0.199 (3)
43	0.0925629	0.378595	-0.395533	0.555292	0.113 (3)
44	0.00429461	0.0558616	0.0941668	0.109574	0.147 (3)
45	0.194749	0.296457	-0.224304	0.419674	0.365 (3)
46	0.233871	0.0937804	0.14736	0.2919	0.139 (3)
47	-0.0726289	0.298308	-0.125109	0.331534	0.260 (3)
48	-0.0596271	-0.0472387	0.238686	0.250516	0.218 (3)
49	-0.296061	0.140797	-0.280348	0.431359	0.250 (3)
50	-0.371549	0.147166	0.0773308	0.407046	0.091 (3)
51	-0.170669	-0.164934	-0.146475	0.278902	0.271 (3)
52	-0.198823	-0.109452	-0.0158722	0.227513	0.301 (3)
53	-0.183431	-0.177119	-0.281034	0.37947	0.186 (3)
54	0.0214714	0.215876	0.313109	0.380921	0.353 (3)
55	0.323573	-0.0495712	0.267695	0.422868	0.097 (3)
56	-0.477351	-0.616577	0.188816	0.802299	0.156 (3)
57	-0.101146	-0.701721	0.155998	0.725933	0.281 (3)
58	-0.344342	0.150913	0.298195	0.479861	0.274 (3)
59	-0.358241	-0.0254387	0.218106	0.420183	0.313 (3)
60	-0.432882	0.0940909	0.0251693	0.443704	0.212 (3)
61	-0.378412	-0.122136	0.183532	0.437946	0.186 (3)
62	-0.28702	-0.0470403	0.137065	0.321527	0.141 (3)
63	-0.206999	0.136434	0.175727	0.30388	0.361 (3)

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
64	0.0157201	-0.0132358	0.0845264	0.0869886	0.102 (3)
65	0.216536	-0.0211274	0.137182	0.257202	0.352 (3)
66	0.514804	0.312375	-0.145733	0.619548	0.125 (3)
67	0.125583	0.142264	0.0241602	0.191295	0.198 (3)
68	0.168572	0.479056	0.0518153	0.510486	0.301 (3)
69	-0.308114	-0.262369	0.189827	0.446997	0.118 (3)
70	-0.412684	-0.260752	0.127625	0.504567	0.154 (3)
71	-0.242617	-0.104139	0.1399	0.298798	0.190 (3)
72	-0.0699522	-0.165171	0.0420718	0.184241	0.290 (3)
73	-0.389657	-0.0893146	0.266446	0.480419	0.392 (3)
74	0.16784	-0.465612	-0.351248	0.606911	0.424 (3)
75	-0.409382	-0.050037	0.397916	0.573092	0.279 (3)
76	0.125462	0.21164	0.273224	0.367673	0.239 (3)
77	-0.0860963	0.02278	0.27963	0.29347	0.191 (3)
78	0.266369	0.0516953	0.184165	0.327935	0.226 (3)
79	-0.187464	0.102517	-0.0151768	0.214203	0.394 (3)
80	-0.13009	0.1851	0.188663	0.294583	0.563 (3)
81	-0.320007	-0.14851	0.385609	0.522641	0.179 (3)
82	-0.655153	0.0889542	0.15981	0.680204	0.281 (3)
83	-0.0590608	-0.193902	0.332737	0.389615	0.612 (3)
84	-0.262963	-0.118538	-0.104204	0.306691	0.251 (3)
85	-0.168175	0.116503	0.100353	0.227873	0.233 (3)
86	-0.519651	0.0574537	-0.00362309	0.52283	0.137 (2)
87	0.0102507	0.0340976	0.120615	0.12576	0.136 (3)
88	0.229205	0.294236	0.0670029	0.378945	0.105 (3)
89	0.256998	0.243506	0.385631	0.523502	0.148 (3)
90	0.131206	-0.154972	0.0114099	0.203375	0.087 (2)
91	-0.0948146	0.198411	0.349661	0.413062	0.273 (3)
92	-0.173584	0.0421769	0.0767251	0.194415	0.173 (3)
93	0.14781	-0.0776645	-0.250607	0.301136	0.162 (3)
94	-0.14859	-0.051831	-0.234767	0.282632	0.123 (3)
95	-0.384973	-0.00975644	-0.115515	0.402049	0.119 (3)

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
96	-0.298106	-0.0762748	-0.0163351	0.308143	0.201 (3)
97	0.019088	0.0443653	-0.306575	0.310356	0.018 (2)
98	0.282647	-0.200723	-0.227293	0.414537	0.174 (3)
99	0.534673	0.107181	-0.0827422	0.551552	0.150 (2)
100	0.437653	0.385991	-0.117386	0.595238	0.388 (3)
101	0.185208	0.105287	-0.612244	0.648252	0.204 (3)
102	-0.0211476	0.0178775	-0.15078	0.153302	0.182 (3)
103	-0.091568	-0.100414	-0.221578	0.259932	0.193 (3)
104	0.102718	-0.211775	-0.178711	0.295529	0.191 (3)
105	0.0297968	0.191824	-0.339862	0.391396	0.301 (3)
106	-0.340227	0.143507	-0.29549	0.47293	0.171 (3)
107	-0.135851	-0.304363	-0.293607	0.444182	0.133 (3)
108	-0.0474521	-0.320709	-0.319809	0.455394	0.428 (3)
109	0.12449	-0.245924	-0.252279	0.373659	0.206 (3)
110	0.593046	-0.10968	-0.34237	0.693506	0.283 (3)
111	0.647264	0.109141	-0.511802	0.832348	0.320 (3)
112	0.381969	0.078765	-0.719875	0.818734	0.182 (3)
113	0.0381156	-0.213283	-0.305349	0.374406	0.177 (3)
114	-0.25228	0.0523038	-0.256618	0.36364	0.101 (3)
115	-0.0859304	0.331555	0.162879	0.379265	0.223 (3)
116	-0.0149168	-0.141155	-0.201681	0.246622	0.125 (3)
117	-0.323043	-0.193084	0.540691	0.658776	0.333 (3)
118	-0.143636	-0.217783	-0.306145	0.402226	0.224 (3)
119	0.417442	0.0400707	-0.289627	0.509654	0.181 (3)
120	0.623111	0.000828508	-0.481701	0.787594	0.116 (3)
121	0.304286	-0.41146	-0.352079	0.621167	0.616 (3)
Total	0.291099	0.226488	0.457457	0.587625	0.232

Table 4. Control points.