



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Alba Regia Műszaki Kar
Geoinformatikai Intézet

SAKDOLOOZAT

Tesztmező tervezése és felhasználása kamerakalibrációhoz

OE-AMK

2023

Hallgató neve: Bucsek Nikolett Rita

Hallgató törzskönyvi száma: T000577/FI12904/A-G



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Alba Regia Műszaki Kar
Geoinformatikai Intézet

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Bucsek Nikolett Rita

Szaktervezési száma: [REDACTED]

Törzskönyvi száma: T000577/FI12904/A-G

Neptun kódja: [REDACTED]

Szak: földmérő és földrendező mérnök

Specializáció: Geoinformatika specializáció

A dolgozat címe: Tesztmező tervezése és felhasználása kamerakalibrációhoz

A dolgozat címe angolul: Design and use of a test field for camera calibration

A feladat részletezése:

1. Szakirodalom és Internetes források alapján ismertesse a kamera kalibráció lehetséges módszereit.
2. Tervezzen meg egy legfeljebb 11x11 pontból álló térbeli tesztmezőt többféle elrendezésben.
3. Készítse el többféle elrendezésben a tesztmezőről a felvételeket több különböző digitális kamerával.
4. Állítsa össze a rendelkezésre álló szoftver alapján a kamera kalibrációk technológiai folyamatát.
5. Végezze el a kalibrációt. Elemesse a kapott eredményeket. Tegyen javaslatot egy optimalizált tesztmező használatára.
6. Az elvégzett munkát műszaki leírásban összegezze.

Intézményi konzulens neve: Dr. Jancsó Tamás

A kiadott téma elévülési határideje: 2026. 02. 10.

Beadási határidő: 2023. 12. 15.

A szakdolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Székesfehérvár, 2023. 10. 24.



[Signature]
Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom: 2023. 12. 15.

[Signature]
belső konzulens

.....
külső konzulens



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Alba Regia Műszaki Kar
Geoinformatikai Intézet



HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott hallgató kijelentem, hogy a szakdolgozat saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült szakdolgozatban található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Kelt: 2023. 12. 08.


.....
hallgató aláírása

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani, mindenkinek, aki valamilyen formában támogatott abban, hogy eljuthassak idáig, különösen Édesanyámnak.

Továbbá szeretném külön megköszönni, Dr. habil. Jancsó Tamás Tanár Úrnak, hogy mindig türelemmel, és mérhetetlen szakmai tudásával segítségemre volt a szakdolgozatom elkészítésében.

Tartalomjegyzék

Köszönetnyilvánítás.....	4
1 Bevezetés	7
2 A fotogrammetria története.....	8
2.1 Koordináta-rendszerek a fotogrammetriában.....	9
2.2 Koordináta transzformációk.....	11
3 Kamerák tulajdonságai és a képalkotást befolyásoló tényezők.....	13
3.1 Optikai képalkotás.....	13
3.2 Képalkotást befolyásoló tényezők.....	14
3.3 Belső tájékozási elemek	16
3.4 A szakdolgozathoz használt amatőr kamerák	17
4 Kamerakalibráció lehetőségei.....	19
4.1 Kalibráció laborban	19
4.2 Kalibráció illesztőpont-mezővel	19
4.3 Kalibráció tesztábrákkal.....	21
4.4 Kalibráció csillagok alapján.....	22
5 Kamera kalibrációs kiegyenlítéssel	23
6 Tesztmező tervezése és felhasználása.....	26
6.1 Tesztmező elkészítése	26

6.2	Tesztmezők felvételeinek elkészítése	28
6.3	A felvételek feldolgozása és kiértékelése	29
6.4	Eredmények kiértékelése, feldolgozása	32
6.4.1	Pixel hibák elemzése	32
6.4.2	Fókusz távolság és fókuszpontok koordinátáinak összehasonlítása	39
7	Tapasztalatok	52
8	Lehetséges felhasználási területek	58
8	Összefoglaló.....	59
8.1	Magyar nyelvű összefoglaló	59
8.2	Summary.....	60
	Irodalomjegyzék	61
	Ábrajegyzék	63
	Mellékletek	65

1 BEVEZETÉS

A szakdolgozatomat az Óbudai Egyetem Alba Regia Műszaki Kar Geoinformatikai Intézetének, Földmérő és Földrendező mérnöki szak, Geoinformatikai szakirány záró feladataként készítettem el.

Szakdolgozatom második fejezetében a fotogrammetria, valamint a fényképezés rövid történetét mutatom be, amelyek szorosan összefüggenek egymással. Ezután bemutatom a fotogrammetriában alkalmazott koordináta-rendszereket és azok transzformációit. Ezt követően a kamerák tulajdonságait mutatom be, és a képalkotást befolyásoló tényezőket. Utolsó kettő szakirodalmi fejezetemben a kamerák kalibrációs lehetőségeit mutatom be, ahol a tesztábrákkal és kiegyenlítéssel történő kalibrálási módszerek nagyobb hangsúlyt kapnak a szakdolgozati témámhoz illeszkedve.

Szakdolgozatom második részében bemutatom a gyakorlati megvalósítását a témának. A tesztmezők elkészítését, a felvételek elkészítését, és kiértékelését. Több szempontból hasonlítom össze a kiértékelések során kapott eredményeket, amelyekből következtetéseket vonok le a kamera kalibrációhoz kapcsolódóan.

2 A FOTOGRAMMETRIA TÖRTÉNETE

A fotogrammetria jelentése: fényképmérés. Ezt az elnevezést 1864-ben Németországban kapta meg ez az akkor újnak számító tudomány- és művészeti ág, azonban Franciaországot tekinthetjük szülőhazájának. 1839. augusztus 19-én, François Arago (1786-1853) ismertette a Francia Tudományos Akadémia ülésén a Louis Daguerre (1787-1851) és Joseph Nicéphore Niépce (1765-1833) által kidolgozott eljárást: a képrögzítés kémiai módját. Az általuk kidolgozott eljárásban egy csiszolt, ezüstözött vörösréz lapra csak egy darab, pozitív képet lehetett rögzíteni, amelyről másolatokat nem lehetett készíteni. Ugyan ebben az évben William Talbot (1800-1877) angol fizikus is bejelentette a Brit Tudományos Akadémiának, hogy feltalálta a sötét kamrában látható kép rögzítését. Ezek a képek jódezüsttel átitatott papírra készültek, és ezekről a negatívokról már lehetett pozitív másolatokat készíteni. Ez tulajdonképpen a mai fényképezés őse. [1] [2] [3]

A fotogrammetriában a fényképezés feltalálásának döntő szerepe volt. Amié Laussedat (1819-1907) francia topográfustól származik az első felvevő készülék, ezért őt nevezik a 'fotogrammetria atyjának'. 1864-ben Jean Brunnerrel (1804-1862) egy fényképező-teodolitot készítettek együtt. Ekkor fotogrammetriai célokra, még csak földi felvételeket használtak. [2] [3]

Az igazi áttörés a légi fotogrammetria történetében az I. világháborúhoz köthető, a háború felgyorsította a légifényképezés jelentőségét, és 1915-ben Oskar Messter (1866-1943) feltalálta az első sorozatfelvételre alkalmas kamerát. Ezután megindult a fotogrammetria gyors fejlődése, és több ország egyetemén, főiskoláin fotogrammetriai tanszék jött létre. [3]

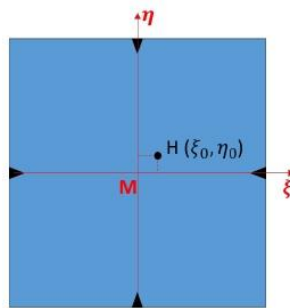
„A fotogrammetria az általánosan érvényes terminológia szerint olyan módszer, amely az objektum alakját, nagyságát és helyzetét határozza meg fényképekből” [2]

A fotogrammetria eljárásait, módszereit több szempontból csoportosíthatjuk: a felvétel készítésének helye szerint két fő csoportra oszthatjuk: földi fotogrammetria, és légi fotogrammetria. Oszályozzuk még úgy is, hogy elegendő-e a kidolgozáshoz egy darab kép, vagy két, egymást részben átfedő képre van szükségünk. A kétképes fotogrammetria elnevezése a sztereofotogrammetria. Legjellemzőbb csoportosítása a kiértékelési módszerek szerint történik: analóg, analitikus, és digitális fotogrammetria. [4]

2.1 Koordináta-rendszerek a fotogrammetriában

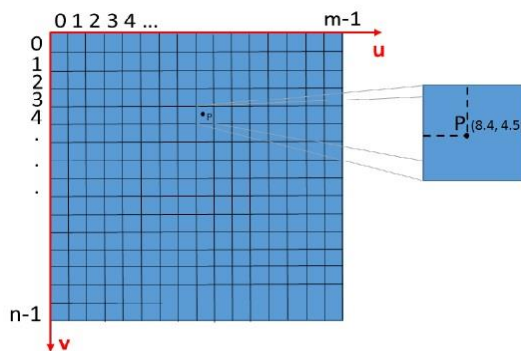
A digitális fotogrammetriában az öt koordináta-rendszer közül három a kamera körüli térben értelmezhető, míg kettő a kamera belső rendszeréhez kapcsolódik.[4]

Képkordináta-rendszer: Ebben a koordináta-rendszerben az 'M' a kezdőpont, ami a kép közepét jelenti, és a ξ, η koordinátatengelyek merőleges metszéspontja. A képsíkon a vetítési centrum merőleges vetülete az 'H' pont, amely nem egybeesik az 'M' középponttal. Ezt a módszert alkalmazzuk arra, hogy a filmen rögzített, mért képeket digitális képekké alakítsuk át szkenneléssel. [4] [5]



1. ábra: Képkordináta-rendszer [4]

Pixel koordináta-rendszer: A digitális kamera szenzorán értelmezett képmátrixot a pixelek összessége alkotja. A szenzor bal felső sarkában található a koordináta-rendszer kezdőpontja, és az u, v koordinátatengelyek mértékegység nélküliek. Az u, v koordináták kiszámításakor a pixelek belső törtrészeit is figyelembe tudjuk venni.[4]



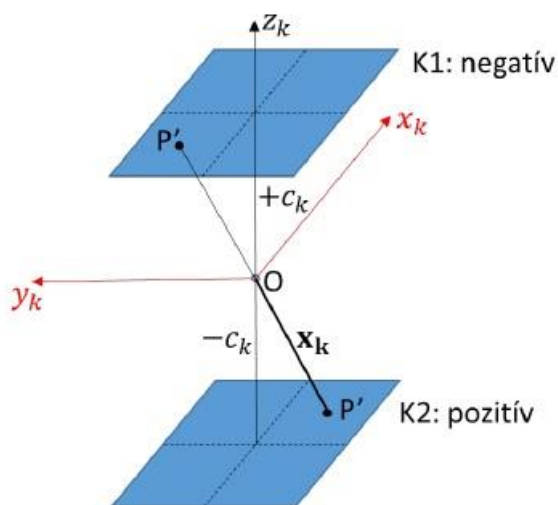
2. ábra: Pixel koordináta-rendszer [4]

Ha a pixel koordináta-rendszerből áttérnénk a 2. ábrán szereplő képkordináta-rendszerbe, szükségünk van egy pixel méterére Δx_{sz} és Δy_{sz} , valamint a szenzorok teljes méretére $l x_{sz}$ és $l y_{sz}$. Az átszámítást az alábbi (2-1) képlettel végezhetjük el: [4]

$$\xi = -\frac{l_{xsz}}{2} + \Delta x_{sz} \cdot u \quad ; \quad \eta = \frac{l_{ysz}}{2} - \Delta y_{sz} \cdot v \quad (2-1)$$

Kamera koordináta-rendszer: Egy térbeli koordináta-rendszer, amely a képpontok pozícióját határozza meg, minden egyes képpontot egy x_k térbeli vektorral reprezentál. Ebben a rendszerben a kezdőpont az O vetítési középpont, a z_k tengely merőleges a képsíkra, míg az x_k és y_k tengelyek párhuzamosak a ξ, η tengelyekkel. A H képfőpontra vonatkoznak az x_k és y_k koordináták. A 3. ábrán a K_1 képsík a valóság helyszínét ábrázolja, de matematikai számítások szempontjából előnyösebb a K_2 pozitív kép értelmezése, mivel ebben az esetben $-c_k$ érték lesz a z_k tengely mentén minden képpont koordinátája. Ebben a térbeli rendszerben az x_k képpontvektor elemei: [4]

$$x_k = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi - \xi_0 \\ \eta - \eta_0 \\ -c_k \end{bmatrix} \quad (2-2)$$



3. ábra: Kamera koordináta-rendszer [4]

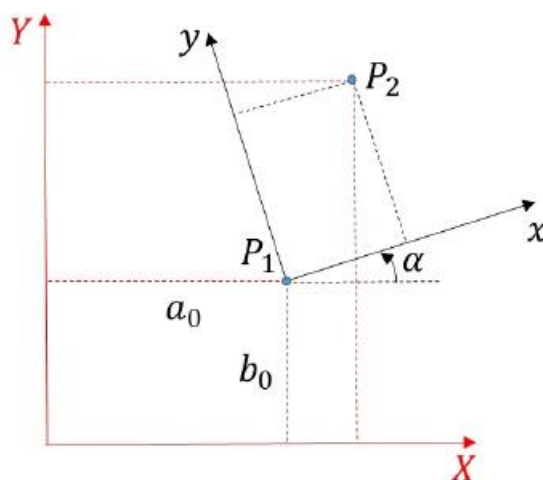
Modell koordináta-rendszer: Ebben a koordináta-rendszerben képesek vagyunk értelmezni két kép, azaz egy képpár, helyzetét egymáshoz viszonyítva.[4]

A tárgykoordináta rendszer: A koordináta-rendszerben meg vannak határozva az illesztőpontok koordinátái, ezeket felhasználva az ismeretlen térbeli koordinátákat is képesek vagyunk megállapítani. A koordináta-rendszer lehet geodéziai, illetve helyi rendszer is. [4]

2.2 Koordináta transzformációk

A fentiekben látható, hogy a fotogrammetriai feladatok megoldása során különböző koordináta-rendszereket alkalmazhatunk. Ez azt jelenti, hogy egyes pontok koordinátáit át kell tudnunk alakítani különböző koordináta-rendszerekbe. A koordinátatranszformáció képletek segítségével lehetőségünk van a pontok koordinátáinak átszámítására egyik rendszerből a másikba, azonban ehhez szükséges ismernünk a két koordináta-rendszer közötti kapcsolatot. A kapcsolat alapján megkülönböztethetünk hasonlósági, szögtartó és affín transzformációkat.[6]

A síkbeli transzformációk közül a leggyakrabban alkalmazott a síkbeli hasonlósági transzformáció, más néven Helmert-transzformáció. Ezt a transzformációt használjuk a pixel koordináta-rendszer és a képp koordináta-rendszer között, akkor, ha mindkét koordináta-rendszer derékszögű. A transzformációs paraméterek kiszámításához legalább két ismert közös pont szükséges.[4] [6]



4. ábra: Helmert transzformáció síkban [4]

Ebben a transzformációban eltolás (a_0 , b_0), elforgatás (α), és méretarány (m) változás történik. Ebben az esetben a transzformációs képletek a következőképpen alakulnak: [4] [6]

$$X = a_0 + m \cdot (x \cdot \cos \alpha - y \cdot \sin \alpha) \quad (2-3)$$

$$Y = b_0 + m \cdot (x \cdot \sin \alpha + y \cdot \cos \alpha) \quad (2-4)$$

A fenti (2-3), (2-4) egyenletek mátrix-alakban is felírhatók:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix} + m \cdot R \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

Az (2-3) és (2-4) képletek nem lineárisak az ismeretlenekre nézve. Ennek elkerülése érdekében a paraméterek szorzatait külön paraméterekbe rendezhetjük, és lineárisak lesznek az így kapott egyenletek: [4] [6]

$$X = a_0 + a_1 \cdot x - b_1 \cdot y \quad (2-6)$$

$$Y = b_0 + b_1 \cdot x + a_1 \cdot y \quad (2-7)$$

Az alábbi képletekkel a paraméterek közötti átszámítás lehetséges: [4] [6]

$$a_1 = m \cdot \cos \alpha ; b_1 = m \cdot \sin \alpha \quad (2-8)$$

$$m = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} ; \arctan \left(\frac{b_1}{a_1} \right) \quad (2-9)$$

A síkbeli affín transzformáció alkalmazásakor két koordináta-rendszer közötti transzformáció zajlik, ahol legalább az egyik rendszer nem derékszögű. Ebben a folyamatban az eltolás (a_0, b_0), méretarány beállítás (m_x, m_y), elforgatás (α), és a merőlegetől való eltérés szögének (β) kiszámítására van szükség. Három ismert közös pontra van szükség legalább a transzformációs paraméterek meghatározásához. [4] [6]

$$X = a_0 + m_x \cdot x \cdot \cos \alpha - m_y \cdot y \cdot \sin(\alpha + \beta) \quad (2-10)$$

$$Y = b_0 + m_x \cdot x \cdot \sin \alpha + m_y \cdot y \cdot \cos(\alpha + \beta) \quad (2-11)$$

Az (2-10) és (2-11) képletek nem lineárisak az ismeretlenekre nézve. Ennek elkerülése érdekében a paraméterek szorzatait külön paraméterekbe rendezhetjük, és lineárisak lesznek az így kapott egyenletek: [4] [6]

$$X = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y \quad (2-12)$$

$$Y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y \quad (2-13)$$

Az alábbi képletekkel a paraméterek közötti átszámítás lehetséges: [4] [6]

$$a_1 = m_x \cdot \cos \alpha; b_1 = m_x \cdot \sin \alpha; a_2 = -m_y \cdot \sin(\alpha + \beta); b_2 = m_y \cdot \cos(\alpha + \beta) \quad (2-14)$$

$$m_x = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}; m_y = \sqrt{a_2^2 + b_2^2}; \beta = \arctan \left(\frac{b_1}{a_1} \right); \alpha = -(\arctan \left(\frac{b_2}{a_2} \right) + \beta) \quad (2-15)$$

3 KAMERÁK TULAJDONSÁGAI ÉS A KÉPALKOTÁST BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK

Az 1970-es években fejlesztették ki a mai digitális kamerák alapelveit. Az analóg jelek tárolására ebben az időszakban használták a MOS (Metal Oxid Semiconductor, azaz fém-oxid félvezető) alapú kondenzátorokat. Ez a technológia volt az alapja a jelenleg elterjedt CCD (Charge Coupled Device, vagyis töltés csatolt eszköz) és CMOS (Complementary Metal Oxid Semiconductor = komplementer fém-oxid félvezető) szenzoroknak. A digitális kamerák, amelyek ezekkel a szenzorokkal vannak felszerelve, lehetővé teszik a fényképek készítését és alkalmazásukat fotogrammetriai munkákhoz is, mivel alkalmasak adatgyűjtésre és analízisre. [4] [7]

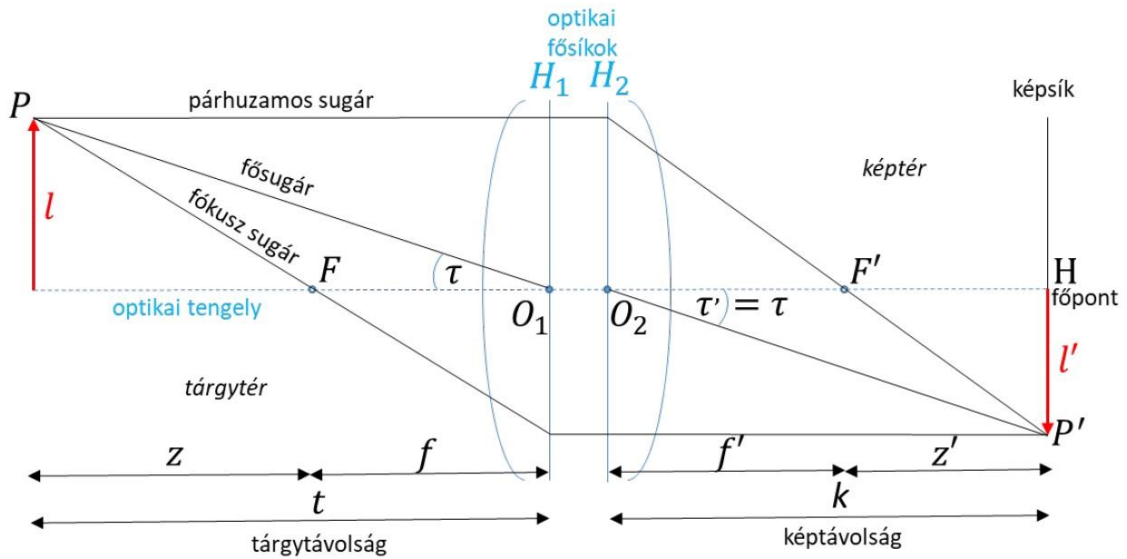
A szenzorokon számos fényérzékeny elem helyezkedik el, melyek lehetnek akár mátrixos, vagy vonalas elrendezésűek is. Amikor a fény beérkezik, a szenzorok elektromos töltést tárolnak, amelyeket később ki lehet olvasni, feldolgozni, majd digitális jelekké alakítani. A Q_K külső azt mutatja, milyen arányban állnak a beérkező fotonok (n_f) és a szenzorral kölcsönhatásba lépő fotonok (n_e) egymáshoz: [4]

$$Q_K = \frac{n_e}{n_f} \quad (3-1)$$

3.1 Optikai képalkotás

A fent említett szenzorokra és a hozzájuk csatlakozó objektívvel rendelkező kamerák optikai képalkotását szeretném bemutatni ebben az alfejezetben.

Az optikai lencsék általában üvegből vagy műanyagból készülnek az áttetszőség érdekében. Léteznek domború lencsék, amelynek vastagabbak a közepükön, és vannak homorú lencsék, amelyek a széleiken vastagabbak, én most a domború lencsék képalkotásával foglalkozom a továbbiakban. A fotogrammetriai kamerákban több lencséből álló lencserendszert használnak, a képalkotási hibák minimalizálása érdekében. Az alábbi ábra megmutatja az idealizált geometriai leképezést, amely eltér a valós leképezéstől, ezzel egy későbbi alfejezetben (3.2) foglalkozok bővebben. [8]



5. ábra: Ideális optikai leképezés [4]

A fenti ábrán (5. ábra) láthatjuk a tárgytér felőli oldalon a t távolságra található P pont ideális leképezését, amely a P' pont. Az optikai tengely. és az optikai fókuszok H_1 (tárgytér felőli), valamint H_2 (képtér felőli) metszéspontjai megadják az O_1 , O_2 optikai fókuszokat. A fókusz ezen a pontokon törés nélkül halad át, vagyis a kilépő-, valamint a belépő sugár ugyanakkora szöget zárnak be az optikai tengellyel ($\tau = \tau'$). A P pont leképezésében nem csak a fókusz vesz részt, de ezt a sugármentet mutatja be az 5. ábra. Ez az idealizált leképezés akkor valósulhatna meg, ha a lencsén áthaladva a vetítősugár nem változtatna irányt a fénytörés következtében. Ebben az esetben maradéktalanul teljesülne az optikai alapegyenlet (3-2) a fókusz távolságra, tárgytávolságra, valamint a képtávolságra. [4] [8]

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{k} + \frac{1}{t} \quad (3-2)$$

A képhez tartozó méretaránytényező megadható többféleképpen: [4]

$$1:m = \frac{k}{t} = \frac{l'}{l} = \frac{z'}{f'} \quad (3-3)$$

3.2 Képképzést befolyásoló tényezők

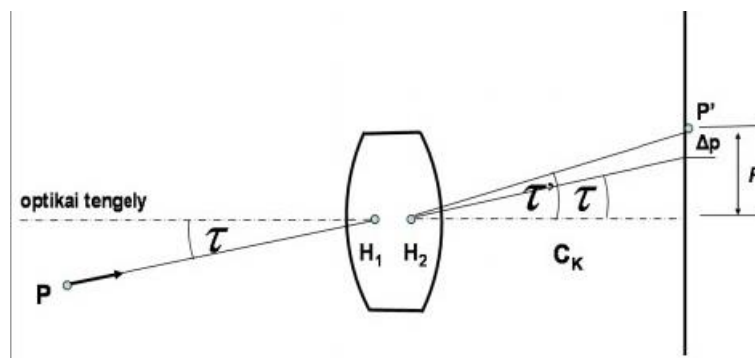
Az objektíveken elhelyezett lencsék sohasem lehetnek tökéletesek, azaz hibamentesek. A lencsehibák fajtájától és erősségétől függően a tárgypontból kiinduló fénysugarak nem az elméletileg meghatározott pontban képződik le. Annak érdekében, hogy minimalizálják

ezeket a hibákat, a lencserendszereket úgy tervezik, hogy a lencsehibák minimálisak legyenek, és az objektíven belül a különböző lencsék kiegyenlítsék egymás hibáit. Ennek ellenére, ha fotogrammetriai célokra kívánjuk használni a felvételt, valószínű, hogy számításokkal kell korrigálnunk. Két fő csoportba sorolhatók a lencsehibák: [4] [8]

- 1) Képeletlenség, valamint
- 2) Elrajzolás.

A képeletlenség geometriai torzulást nem okoz a képen, csak a kép minősége nem lesz megfelelő, így a továbbiakban nem foglalkozok ezzel a lencsehibával, azonban felsorolás szinten érdemes megemlíteni őket: kóma, szférikus abberáció (gömbi eltérés); színi eltérés vagy kromatikus abberáció; pontnélküliség vagy asztigmatizmus; képöblösség. A szakdolgozati témámhoz kapcsolódva a geometriai torzulásokat okozó hibák a lényegesebbek. Megkülönböztethetünk radiális, illetve tangenciális elrajzolást. A radiális elrajzolás olyan torzítási típus, amely a kép szélén lévő objektumokat a kép középpontja felé tolja. A tangenciális elrajzolás pedig az objektív optikai tengelyéhez képest való eltolódást írja le. [4] [8]

Elrajzolás: Ezek a hibák geometriai torzulást okoznak.



6. ábra: Elrajzolás [8]

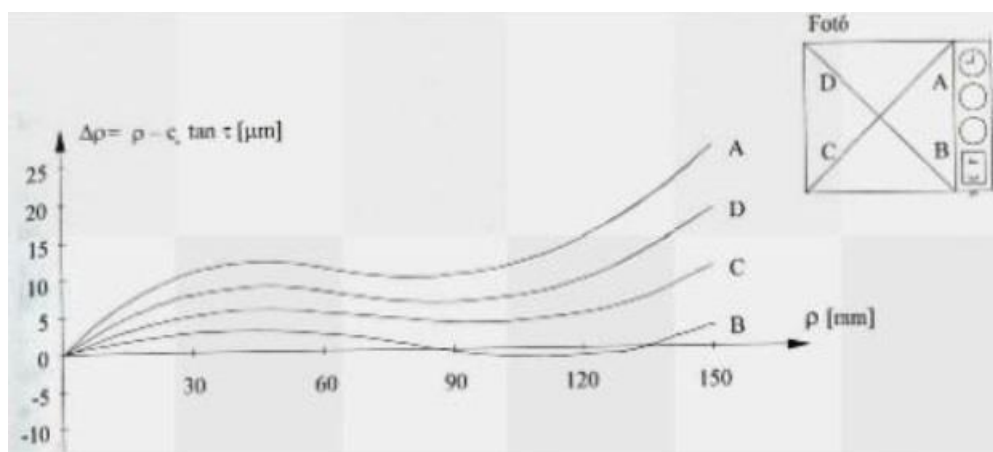
Az elrajzolás miatt a P pont helye a képsíkon P' -vel lesz jelölve, p távolságra az optikai tengelytől. Ez a leképezési hely geometriailag hibátlan helyétől Δp távolsággal tér el. Ennek oka, hogy a P pontból induló fősugár a tárgyfelőli oldalon τ szöget zár be az optikai tengellyel, azonban a képfelőli oldalon τ' szöget bezárva lép ki. A Δp elrajzolási hiba értékét a p (képpont radiális távolsága a főponttól), a kameraállandó: C_k , és τ szög segítségével lehet meghatározni. [8]

$$p = ck \cdot \operatorname{tg} \tau + \Delta p \quad (3-4)$$

ebből a Δp elrajzolási hiba értéke:

$$\Delta p = p - ck \cdot \operatorname{tg} \tau \quad (3-5)$$

Az elrajzolás értéke lehet pozitív, illetve negatív, attól függően, hogy melyik irányba történik az eltolódás. Az optikai tengely irányából érkező sugár nem törik meg a lencsén áthaladva, így az elrajzolás értéke 0 lesz. Az elrajzolás értéke nő a kép szélei felé haladva, ahogy a p távolság és a τ szög növekszik. Ez egyre nagyobb eltérést eredményez, mivel a fősugár lencsén belüli útja nő. Ennek következtében az elrajzolás értékei a teljes képet tekintve közel körszimmetrikusak. [8]



7. ábra: A négyfélátló radiális elrajzolása [8]

3.3 Belső tájékozási elemek

A belső tájékozási elemek olyan fizikailag is létező és matematikailag is értelmezhető elemeket foglalnak magukba, amelyek modellezik a kamerán belül keletkező képet. A belső tájékozási elemek közé tartozik az 1. ábrán jelölt **H** főpont ξ_0 , η_0 koordinátái a képsíkon, valamint a 3. ábrán jelölt ck , azaz a kameraállandó értéke, amint az látható a 8. ábrán. Ezek az elemek szükségesek a képalkotó sugárnyaláb helyreállításához. A belső tájékozási elemek szélesebb értelemben magukban foglalhatják az objektív által okozott Δx , Δy elrajzolási értékeket is, amelyek pontonként változnak. [4]

az érzékelőbbe jusson a fény. Azért, hogy ne fentről kellejen nézni a keresőbe, általában tartalmaznak ezek a kamerák egy pentaprizmát, ami a beérkező képet elfordítja 90°-kal. [9]

Az első kamera, amelyet használok, egy Sony Alpha DSLR-A350-es típus:



9. ábra: Sony Alpha DSLR-A350 fényképezőgép [11]

A második kamera, amelyet használtam, egy Canon EOS 4000D típus:



10. ábra: Canon EOS 4000D fényképezőgép [12]

A harmadik kamera, amelyet használtam, egy Nikon D3000 típus:



11. ábra: Nikon D3000 fényképezőgép [13]

4 KAMERAKALIBRÁCIÓ LEHETŐSÉGEI

A kalibráció célja a belső tájékozási elemek meghatározása, amellyel létrehozzuk a kamera modelljét, és ezzel helyreállítjuk a geometriailag helyes képalkotó sugárnyalábot. A meghatározni kívánt paraméterek: kameraállandó (c_k), főtérpont koordinátái (ξ_0, η_0) és az elrajzolás ($\Delta x, \Delta y$). Az elrajzolás az ideális centrális vetítéstől eltérő hibák, amelyek az objektív, radiális-, tangenciális-, aszimmetrikus elrajzolási hibáiból, valamint az képkoordináta rendszer affín torzulásából származnak. A kamera kalibráció négyféle módon történhet: laboratóriumi körülmények között, illesztőpontmező segítségével, tesztábrákkal vagy akár csillagok alapján is. [4] [9]

Bővebben az illesztőpont- mezővel és a tesztábrával fogok foglalkozni, a szakdolgozatom témájához igazodva, de a többi lehetőséget is fontos megemlíteni.

4.1 Kalibráció laborban

A kamera belső tájékozási elemeinek meghatározására gyakran használnak goniométert, kollimátort és más optikai eszközöket. Általában a mérőkameráknál használják ezt a kalibrációs módszert. Az ideális optikai leképezés és a valóság közötti számos okból adódhatnak, mint például: [4] [5]

- a képsík nem biztos, hogy merőleges az optikai tengelyre,
- központosítási hibákkal rendelkezhetnek az objektívet alkotó lencsék,
- O_1 és O_2 vetítési középpontoknál előfordulhat, hogy nem illeszkednek az optikai főtérpontokra.

Ennek következményeként a főtérponttal tartozó szögek nem egyeznek meg egymással, tehát a 3.1 alfejezetben említett egyenlőség ($\tau = \tau'$) nem teljesül, és a különbségük a H főtérponttól r távolságra Δr radiális elrajzolást okozhat. [4] [5]

4.2 Kalibráció illesztőpont-mezővel

A centrális vetítéshez tartozó kollineár egyenleteket ki kell bővíteni a képponthoz tartozó $\Delta x, \Delta y$ korrekciós értékekkel. Ezeket az értékeket a szenzor affín torzulása, valamint az optikai elrajzolás okozza. [4]

$$\xi = \xi_0 - c_k \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x \quad (4-1)$$

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

Példaként vegyük, hogy rendelkezésünkre áll kellő mennyiségű, n számú pontjelölt illesztőpont, vagyis olyan pontok, amelyeknek ismerjük a X, Y, Z terepi koordinátáit, és legalább kettő különböző felvételen lehetőségünk van mérni az illesztőpont ξ, η képpontkoordinátáját. A legmegfelelőbb az illesztőpontokat a tárgytérben úgy kijelölni, hogy a felvételeken azok egyenletesen eloszljanak, és mélységkülönbségek is legyenek a pontok között. [4] [10]

Ezután minden illesztőpontra fel tudjuk írni a 4-1 egyenletet, a külső tájékozási elemek pedig képenként ismeretlenek maradnak. Azonban a belső tájékozási elemek, vagyis a kamera kalibrációs adatai, kameraenként a $\Delta x, \Delta y$ korrekciós értékeket leíró függvények paraméterei. Három fő csoportba sorolhatjuk a korrekciókat leíró paramétereket: [4] [10]

- 1) Radiális elrajzolást leíró paraméterek: ezt az általam használt Agisoft Metashape program így jelöli: K1, K2, K3
- 2) Tangenciális elrajzolást leíró paraméterek: ezt az általam használt Agisoft Metashape program így jelöli: P1, P2
- 3) Valamint az affin torzulást leíró paraméterek: ezt az általam használt Agisoft Metashape program így jelöli: B1, B2- ezt a fajta torzulást a kamera kalibráció során figyelmen kívül hagytam.

Az ismeretlenek számának nagyobbnak kell lennie, mint a felírt egyenletek száma. A feladat sugárnyaláb- kiegyenlítéssel, a legkisebb négyzetek módszere szerint oldhatjuk meg, fokozatos közelítéssel. [4] [10]

A K1, K2, K3 radiális elrajzolást leíró paramétereknél feltételezzük, hogy a Δr_i elrajzolás értéke körszimmetrikus a szimmetria-főpontra, így egy függvénnyel felírható a Δr_{rad} radiális elrajzolás modellje. [4] [9] [10]

$$\Delta r_{rad} = K_1 \cdot r_3 + K_2 \cdot r_5 + K_3 \cdot r_7 \quad (4-2)$$

A 4-2 képletben az r a szimmetria-főponttól mért radiális távolságot jelöli, és a következő képlettel számolható ki: [4] [10]

$$\Gamma = \sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (\eta - \eta_0)^2} \quad (4-3)$$

Az alábbi képletekkel pedig a Δx_{rad} és a Δy_{rad} elrajzolási értékek számíthatók: [4]

$$\Delta x_{rad} = (\xi - \xi_0) \frac{\Delta r_{rad}}{r} \quad (4-4)$$

$$\Delta y_{rad} = (\eta - \eta_0) \frac{\Delta r_{rad}}{r} \quad (4-5)$$

A tangenciális elrajzolás (P1, P2) paraméterei egy központosítási hibát írnak le, és akkor vesszük számításba, ha számítunk rá, hogy az objektívet alkotó lencsék központilag el vannak csúszva, ezt a következő függvényekkel tudjuk modellezni: [4] [9]

$$\Delta x_{tan} = P_1(r^2 + 2(\xi - \xi_0)^2) + 2P_2(\xi - \xi_0)(\eta - \eta_0) \quad (4-6)$$

$$\Delta y_{tan} = P_2(r^2 + 2(\eta - \eta_0)^2) + 2P_1(\xi - \xi_0)(\eta - \eta_0) \quad (4-7)$$

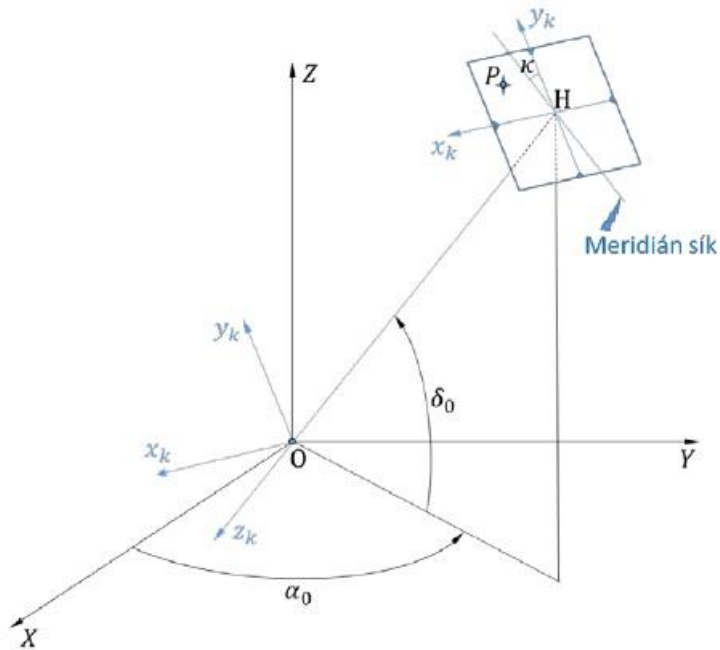
Mérőkameráknál a tangenciális elrajzolás mértéke elhanyagolható, azonban amatőr kameráknál lényeges lehet. [4]

4.3 Kalibráció tesztábrákkal

Itt egy tesztábra tölti be az illesztőpontok szerepét. Lehet alkalmazni síkbeli és térbeli tesztábrát is. A megbízhatóság, és a pontosság növelése érdekében a felvételeket a tesztmezőkről több irányból kell elkészíteni úgy, hogy a lehető legjobban töltse ki a képet. Általában a kiértékelő programok automatikusan megméri a tesztábrák pontjait. Miután a mérés megtörténik, a program kiszámolja a belső tájékozási elemeket és a torzulást leíró paramétereket. A program a kalibrációs paramétereket pixel értékben számítja ki, ha ezeket át szeretnénk váltani milliméterbe, akkor ismernünk kell a pixel méretét. Leggyakrabban ezt a módszert az amatőr kamerák kalibrációjánál használják, csökkenteni lehet a kalibrációs paraméterek között fellépő korrelációt. [4]

4.4 Kalibráció csillagok alapján

Ebben az esetben a terepi illesztőpontokat a csillagok helyettesítik a kalibráció során. Ahhoz, hogy ezt megtehesük egy égi koordináta-rendszerhez képest ismernünk kell a képek helyzetét, és meg kell mérnünk a felvételen szereplő csillagok képkoordinátáit (ξ, η) . Fel tudjuk írni a kapcsolatot a képkoordináta-rendszer, és az égi koordináta-rendszer között, a kamera belső adatai és a képkoordináta-korrekciókat felhasználva. [4]



12. ábra: Kalibráció csillagok alapján, a két koordináta-rendszer közötti kapcsolat [4]

Az égi-koordináta-rendszerben meghatározhatjuk a P ponttal ábrázolt csillag koordinátáit, ahol az α rektaszcenzió és a δ deklináció szögek, a csillag égi helyzetét jelölik. [4] [10]

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cdot & \cos \delta \\ \sin \alpha & \cdot & \cos \delta \\ & \sin \delta & \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

A K a képpontra mutató vektor hossza: [4]

$$K = \sqrt{(\xi - \xi_0 - \Delta x)^2 + (\eta - \eta_0 - \Delta y)^2 + c_k^2} \quad (4-9)$$

Térben elforgatva az égi koordináta-rendszerbe a képkoordináta-rendszert, a kapcsolatot felírhatjuk a két rendszer között: [4]

$$R \begin{bmatrix} \xi & - & \xi_0 & - & \Delta x \\ \eta & - & \eta_0 & - & \Delta y \\ & & -ck & & \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

Legalább 5 csillag megmérésére van szükség a kalibrációhoz, de több csillagot tudunk mérni a valóságban. Az atmoszférikus refrakció hatása kisebb a zenit irányában, ezért érdemes arra felé fotózni. [4]

5 KAMERA KALIBRÁCIÓS KIEGYENLÍTÉSEL

A képek és képpárok tájékozása során méréseket végzünk a térmodellen vagy a képeken található ismeretlen pontok koordinátáinak meghatározásához. Hibával terheltek a mérési eredmények, és meghaladja a számuk a minimálisan szükséges mennyiséget. Ekkor kiegyenlítésre van szükség. A cél az ismeretlen paraméterek legnagyobb valószínűséggel történő becslése. A kiegyenlítéshez alkalmazhatjuk a legkisebb négyzetek módszerét, ami lehet lineáris vagy nem-lineáris, attól függően, hogy a mérési eredmények alapján felírt egyenletek milyen típusúak. A lineárisakart egy lépésben megoldhatjuk, míg a nem-lineárisokat a Taylor-sorbafejtés és iteratív módszer segítségével. A megbízható eredmények érdekében fontos kiigazítani a durva hibákkal terhelt méréseket, amelyek az érzékenységi elemzés és kiegyenlítési diagnosztikai eszközök segítségével azonosíthatók. Mindehhez elengedhetetlen a várható pontosság ismerete. [9]

A legkisebb négyzetek módszere:

Megállapodunk abban, hogy valamely feladat megoldásához rendelkezünk n számú méréssel, amelyek hibával terheltek. Felírhatjuk a méréseket $\mathbf{l}$ vektorba $[l_1, l_2, l_3 \dots l_n]^T$. A kiegyenlítés során, az a célunk, hogy meghatározzuk az u darab ismeretlen paramétereket, amelyeket $\mathbf{x}$ vektorba rendezhetünk $[x_1, x_2, x_3 \dots x_n]^T$. Feltevésünk az, hogy a méréseink száma meghaladja az ismeretlenekét, és $\mathbf{f}$ függvénykapcsolatok állnak fent azok között. A kiegyenlítés során a $\mathbf{v}_i$ javítások egyenlítik ki a mérési eredményben lévő hibákat. Célunk a $\mathbf{v}^T \mathbf{v} \rightarrow \min$ feltétel teljesülése, vagyis a $\mathbf{v}_i$ négyzetösszege a lehető legkisebb legyen. A javítási egyenlet felírható mátrix alakban: [6] [9]

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (5-1)$$

A 5-1 képletben található lineáris $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ egyenletrendszer átírható $\mathbf{A}$ alakmátrixba, mivel minden ismeretlenhez tartozik egy a_{ik} együttható: [4]

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (5-2)$$

Az 5-1 egyenletet $\mathbf{x}$ -re úgy tudjuk rendezni, ha átalakítjuk négyzetes mátrixszá az $\mathbf{A}$ mátrixot, és a $\mathbf{P}$ súlymátrixot is bevezetjük, amelyek a méréshez tartoznak. Mind a két oldalt meg kell szorozni az egyenletet $\mathbf{A}^T\mathbf{P}$ -vel: [4]

$$\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{l} + \mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{v} = \mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A}\mathbf{x} \quad (5-3)$$

A $\mathbf{v}^T\mathbf{v} \rightarrow \min$ feltétel akkor teljesül, ha $\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{v}$ kifejezés nullává válik. Legyen $\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A} = \mathbf{N}$, valamint $\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{l} = \mathbf{n}$. Megkapjuk a normál egyenletrendszer, ha 5-3 képletet átrendezzük. Itt $\mathbf{N}$ négyzetes mátrix, és feltételezzük, hogy invertálható: [4]

$$\mathbf{N}\mathbf{x} - \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (5-4)$$

Az ismeretlenek kiegyenlített paramétereit megkapjuk $\mathbf{x}$ -re rendezve:

$$\mathbf{x} = \mathbf{N}^{-1}\mathbf{n} \quad (5-5)$$

A méréseket a fotogrammetriában általában függetlennek tekintjük és azonos a súlyuk, értéke 1-nek tekinthető. A $\mathbf{P}$ mátrix ebben az esetben egységmátrix lesz, és ezért az 5-3, 5-4 és 5-5 képletekben ezekkel nem kell számolni. Miután kiszámoltuk az $\mathbf{x}$ vektort, utána kiszámíthatjuk a javításokat is: [4]

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{l} \quad (5-6)$$

Ezután ki tudjuk számítani a súlyegység középphiját a javítások alapján:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{n-u}} \quad (5-7)$$

Súlykoefficiens mátrix az $\mathbf{N}^{-1}$ mátrix. $\mathbf{Q}$ a jelölése, ennek átlós elemeiből a q_{kk} súlykoefficiensekből számíthatók σ_{xk} ismeretlen paraméterek középphijai: [4]

$$\sigma_{xk} = \sigma_0 \cdot \sqrt{q_{kk}} \quad (5-8)$$

Fokozatos közelítéssel végzett kiegyenlítés:

Az 5-1 képletben szereplő $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ függvényt Taylor-sorrá alakítva, ha nem lineáris az egyenlet, az ismeretlenek közelítő értékeinél $\mathbf{x}^0$, csak az első deriváltakat vesszük figyelembe. Ez alapján létrehozhatjuk az $\mathbf{A}$ mátrixot: [4]

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_u} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_u} \end{bmatrix} \quad (5-9)$$

Az $\mathbf{x}$ vektort két részre bonthatjuk, egy kezdőértékre ($\mathbf{x}^0$) és a hozzá tartozó $d\mathbf{x}$ változó-
sokra:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}^0 + d\mathbf{x} \quad (5-10)$$

Az $\mathbf{l}$ vektort úgy képezzük, hogy az $\mathbf{l}_m$ mért értékekből kivonjuk a közelítő értékek alapján
számított $\mathbf{f}(\mathbf{x}^0)$ függvényértékeket: [4]

$$\mathbf{l} = \mathbf{l}_m - \mathbf{f}(\mathbf{x}^0) \quad (5-11)$$

A javítási egyenlet az alábbi lesz:

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A} d\mathbf{x} \quad (5-12)$$

A normál egyenletrendszer:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} d\mathbf{x} = \mathbf{N} d\mathbf{x} - \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (5-13)$$

A $d\mathbf{x}$ megoldásvektor:

$$d\mathbf{x} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{n} \quad (5-14)$$

Ezután pontosítjuk az előzetes értékeket úgy, hogy hozzá adjuk a $d\mathbf{x}$ értékeket az ismer-
etlenek közelítő értékeihez:

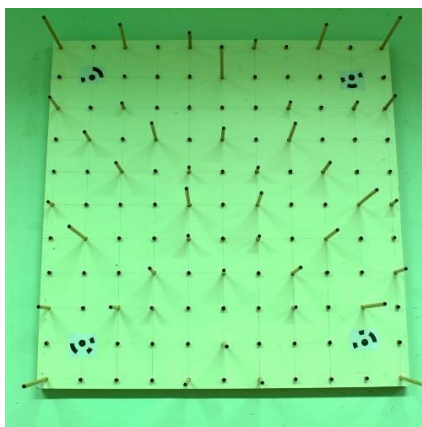
$$\mathbf{x}^1 = \mathbf{x}^0 + d\mathbf{x} \quad (5-14)$$

Ezzel lezárul az első iterációs folyamata, és a pontosított értékeket felhasználva ismétél-
jük az iterációs lépéseket, amíg a $d\mathbf{x}$ értékei el nem érnek egy előre meghatározott ε ér-
téket. A nem-lineáris fotogrammetriai feladatoknál alkalmazzuk ezt a kiegyenlítési mód-
szert, például: relatív tájékozás, sugárnyaláb kiegyenlítés és térbeli hátrametszés. [4]

6 TESZTMEZŐ TERVEZÉSE ÉS FELHASZNÁLÁSA

6.1 Tesztmező elkészítése

Rendelkezésemre állt az Óbudai Egyetem Alba Regia Műszaki Kar Geoinformatikai Intézet fotogrammetriai laborjában egy darab tesztmező, amelyet Nyitrai Zsombor készített el a saját szakdolgozatához, melynek címe Kamera kalibráció laborban (13. ábra). A szakdolgozata 6.1. alfejezetben részletesen leírja, hogy miként készült el a tesztmező. Ennek az alapja, egy fehér színű bútorlap volt, így a továbbiakban az egyszerűség kedvéért 'fehér táblaként' fogok rá hivatkozni. Ez egy 1,05x1,05 méteres bútorlapból készült tesztábra, amelyen 10-10 centiméterenként lett rácsháló felszerkesztve, majd a 11x11 darab metszéspontokban furatok létrehozva, amelybe bele mentek a 10 mm átmérőjű, különböző hosszúságú pálcikák. [10]



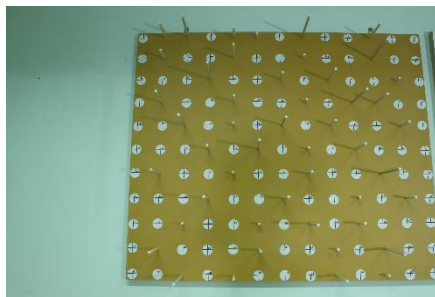
13. ábra: Tesztmező [10]

Ennek mintájára létre hoztam, én saját magam is egy térbeli tesztmezőt. Egy nagyobb, 18 mm vastagságú, sárga színű bútorlapból lesabtam, egy 1,05x1,25 méteres darabot, amelyre, a továbbiakban az egyszerűség kedvéért 'sárga táblaként' fogok hivatkozni. Fontos szempont volt, hogy ez a tesztmező, a fehér táblával ellentétben ne legyen szabályos négyzet alakú, hanem téglalap alakja legyen, amely jobban igazodik az általam használt amatőr kamerák CCD szenzorjainak alakjához, mivel mindegyikben téglalap alakú szenzor található. Továbbá az is fontos szempont volt a tesztmezőm megtervezésében, mivel a fehér tábla is 1,05 méter magas volt, így a két táblát egymás mellé helyezve egy nagyobb tesztábrát adjanak ki, amelynek egyforma a magassága (14. ábra).



14. ábra: 'Sárga' és 'fehér' tesztmezők együttesen

Ezután egy nagyobb fém vonalzóval felszerkesztettem egy 10x10 centiméteres rácshálót a bútorlapra, olyan formán, hogy mindegyik oldalánál 5 centimétert kihagytam. 11x13, azaz 143 darab metszéspontot kaptam. Ezeket a metszéspontokat asztalosok által használt felsőmaróval tudtam megfúrni 14mm mélyre. Miután végeztem ezzel a munkafolyamattal neki láttam a pálcikák legyártásához. 10 mm átmérőjű farudakból vágtam le 12-12 darab, 5 cm, 10 cm, 15 cm és 20 cm hosszúságú pálcikákat, így lett 48 darab fapálcám. Ez után a fapálcikák egyik végét fehérre lefestettem, majd a közepükbe fekete festékkel tettem egy fekete pontot. Mivel 143 darab furatom volt, és 48 darab fapálcám, ezért a maradék 95 furat helyére, öntapadós papírra nyomtatott kereszt alakú pontjeleket használtam, amelyek fel is vannak számozva (15.ábra). (Megjegyzés: az utolsó szám a 96 lett, ugyanis véletlen kimaradt a 62-es).



15. ábra: Sárga tábla

A fotogrammetriai laborban, fel lett szerelve a sárga tábla a fehér tábla mellé, olyan módon, hogy a két tábla szomszédos oldalain lévő furatok egymástól 10 cm távolságra helyezkedjenek el (14.ábra). Miután a táblák a helyükre kerültek, megkezdődött a pálcikák elhelyezése. Több elrendezést kipróbáltunk, amikről készültek felvételek, de nem találtuk

megfelelőnek azokat az elrendezéseket, így módosítottunk rajta. A kereszt alakú pontjelek ezt követően kerültek fel az üres furatok helyére. Továbbá a fehér táblán is módosítás történt a pálcák elhelyezését illetően. Ezután kezdődhetett a felvételek elkészítése.

6.2 Tesztmezők felvételeinek elkészítése

Először a Canon EOS 4000D kamerát (10. ábra) használtam a felvételek elkészítéséhez, amelyben Dr. habil. Jancsó Tamás Tanár Úr volt segítségemre. Ezzel a kamerával összesen 8 darab kép készült, 4 darab a sárga tábláról, valamint 4 darab a fehér és a sárga táblákról együtt. A sárga tábláról készült egy kép jobbról, egy darab balról, valamint a kép széleihez igazítva a tábla oldalait, frontális nézetből balról és jobbról, kettő darab fénykép készült (1. melléklet). A sárga és a fehér tábláról készült egy kép felülnézetben, egy darab alulnézetben. valamint egy jobbról és egy balról, amelyek a kép széleihez lettek igazítva (2. melléklet). A rekesznyílás (blende) értéke 22-re lett állítva, így az objektívben található fémszerkezeten kevés fény jutott be, ugyanis minél magasabbra van állítva a blende értéke, annál kisebb a rekesznyílás és ez által kevesebb fény jut be. Az expozíciós idő, más néven a záridő 2,5 másodpercre lett állítva, ez azt jelenti, hogy ennyi ideig éri a fény a kamera szenzorját. Ha túl sok időre van állítva a záridő, akkor túl világos lehet a kép, ha pedig túl kevés ideig éri a fény a szenzort, akkor sötét lehet a kép. Az érzékelő ISO érzékenységet 100-ra állítottuk be, minél magasabbra van állítva ez az ISO érték, annál érzékenyebben reagál a szenzor, az őt érő fényre, és általában alacsonyabb ISO értéknél jobb képminőséget kapunk. A fókusz távolságot, vagy más néven gyújtótávolságot 18 mm-re állítottuk. Minél nagyobb a gyújtótávolság, annál kisebb a látószög.

A második kamera a Nikon D3000 (11. ábra), amelyet használtam. Itt is összesen 8 darab kép készült. 4 darab a sárga tábláról (3. melléklet), ugyanolyan elrendezésben lettek elkészítve a felvételek, mint az első kameránál. A sárga és fehér tábláról egyben elkészült képek (4. melléklet) szintén ugyanolyan elrendezést kaptak, mint az első kameránál. A kamera beállításai kis mértékben eltérnek az előzőről. A blende 22-re, az érzékenység ISO100-ra, a gyújtótávolság 18mm-re, valamint az záridő 1,3 másodpercre lettek beállítva.

Végül a Sony Alpha DSLR-A350 kamerát (9. ábra) használtam. Összesen 9 darab felvétel készült. A sárga táblához, 5 darab fénykép készült el, ugyanolyan elrendezésben készült

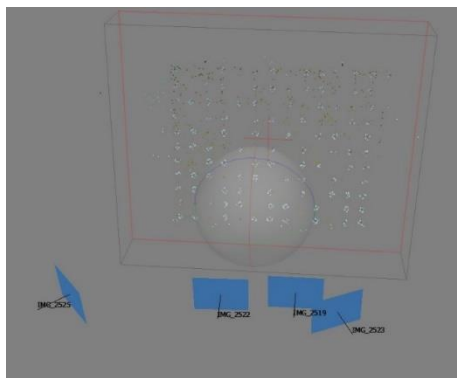
4 darab kép, amely az előző két kamerával is, azonban itt még egy felvétel készült a tábláról szemből (5. melléklet). A sárga és a fehér táblát egyben fényképezve készült 4 darab felvétel ugyanolyan elrendezésben, mint az előző két kamerával. (6. melléklet). A blende 22-re, az érzékenység ISO100-ra, a gyújtótávolság 18mm-re, valamint az záridő 2 másodpercre lett beállítva.

A három kamera beállításában csak a záridők térnek el egymástól. A felvételek minden kamera esetén JPG formátumban készültek el.

6.3 A felvételek feldolgozása és kiértékelése

A felvételek kiértékelésére, és feldolgozására a Agisoft Metashape Professional programot használtam, amely több különböző fotogrammetriai feladat végrehajtására alkalmas, én a kamera kalibráció funkcióját használtam a szakdolgozatomhoz. Mind a három kamerával készült felvételeket ugyan úgy dolgoztam fel, ezért most csak a Sony Alpha DSLR-A350 kamerával készült, sárga és fehér táblákhoz tartozó felvételek kiértékelését mutatom be, azonban a következő 6.4 alfejezetben és 7. fejezetben részletezem a többi kamerával készült felvételek kiértékelésének eredményét több szempontból.

Az Agisoft Metashape Professional programot megnyitva a Workflow menüpontban az Add Photos paranccsal behívtam a programba az elkészült felvételeket, amelyek a 6. mellékletben szerepelnek. Utána szintén a Workflow menüpontban az Align Photos (fényképek igazítása) parancsot választva a felugró ablakban, az Accuracy-hoz (pontossághoz) High-t, azaz magas pontosságot állítottam be, ez határozza meg, hogy mennyire legyen pontos a kamerák helyzetének meghatározása a 3 dimenziós modellezés alatt. Hátránya, hogy minél magasabb van állítva a pontosság értéke, a programnak annál több időbe telik a 3D modell megalkotása.



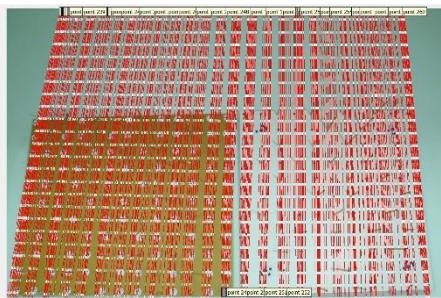
16. ábra: Képek relatív helyzete (Agisoft Metashape)

A 16. ábrán az elkészült 3D modell látható a képek relatív helyzetéről.

A program által létrehozott pontokat, amelyek láthatók a 16.ábrán, a Rectangle selection segítségével kijelöltem, majd kitöröltem azokat, hogy a kiegyenlítésbe ne vegyenek részt.

Azoknál a felvételek feldolgozásánál, ahol mind a kettő tesztmezőt fényképeztem, egy korábbi szakdolgozat nyomán (Nyitrai Zsombor – Kamera kalibráció laborban) történt geodéziai bemérése a pontoknak, így a fehér táblán lévő négy darab pontjel koordinátái ismertek voltak. Ezeket a koordinátákat megkaptam egy koordinata.txt fájlban, amelyeket a File Import, Import Reference paranccsal hozzá tudtam adni. Az Items- nál átállítottam Markers-re, és a felugró ablakban a Yes to all lehetőséget választottam, majd mindegyik felvételre manuálisan ráhelyeztem ezeket a pontokat. Csak a sárga tábláról készült felvételeknél ezt a folyamatot nem végeztem el.

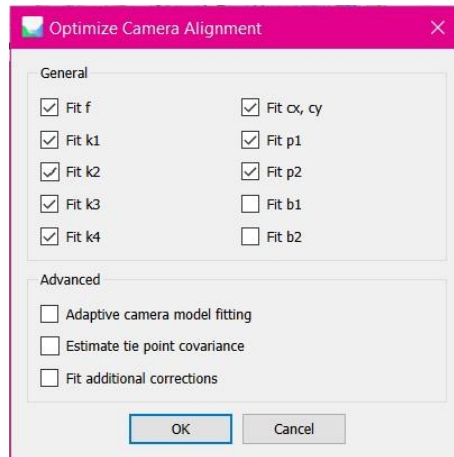
Az első képre kattintva, ráközelítettem a pálcikákra, és az azok közepén lévő fekete pontokra egyesével tettem rá a pontokat, a jobb egér gomb Add Marker segítségével. Itt összesen 264 darab pontot kellett elhelyeznem az első fényképen. A második fényképen (17.ábra) az első képen bemért pontok alapján a program vonalakkal segíti a felhasználót a pontok helyének közelítő meghatározásához.



17. ábra: A feldolgozás 2. képen látható vonalak (Agisoft Metashape)

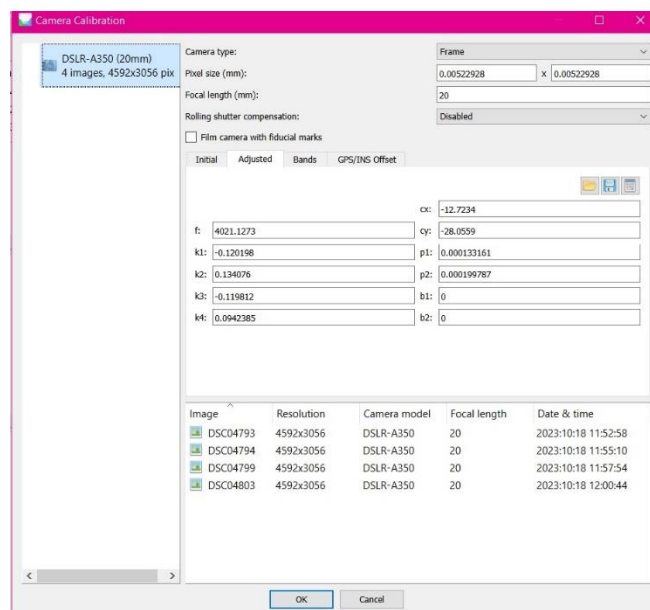
A második képen a jobb egér gombot megnyomva a legördülő menőben a Place Marker-ben ki kell választani a pontokat a számuk szerint sorrendben, és úgy elhelyezni őket. A harmadik, valamint a negyedik képen, már a pontok szürke zászlós jellel jelennek meg, közel az első és a második kép alapján kiszámított tényleges helyükhöz, itt már csak bal egér gombbal a helyére kell húzni a pontokat, amelyek ez után kék színű zászló jelet öltenek, hogy a programba látható legyen, hogy azokon a pontokon lett manuálisan módosítva. Mindegyik pontnál egyesével el kell végezni ezt a folyamatot. Amikor készen vagyunk ezzel a munkafázissal, A Reference panelban, a Settings-re rákattintva a felugró

ablakban a Camera Reference és a Marker Reference, Local Coordinates-re lettek beállítva. Ezt követően a Tools menüpontban, kiválasztottam az Optimize Camera parancsot (18.ábra), ahol a felugró ablakban kiválasztottam a paramétereket, amelyekkel a programnak számolnia kellett, a kamera kalibrálása során. Először a F, Cx, Cy, K1, K2, K3, K4, P1, P2 paramétereket jelöltem ki.



18. ábra: Kamera paraméterek beállításai (Agisoft Metashape)

Ezt követően további nyolc darab kombinációt használtam, a kamera optimalizálás menüpontban, és ezeknek az eredményinek az összehasonlítását a 6.4 alfejezetben, és a 7. fejezetben végeztem el. Szintén a Tools menüpontban kiválasztottam a Camera Calibration parancsot, ahol ismét egy felugró ablak jelent meg (19.ábra).



19. ábra: Kamera kalibrációs menü (Agisoft Metashape)

A felső jobb sarokban a program automatikusan megadja a pixelek méretét milliméterben, valamint a gyújtótávolságot, amely a felvételek elkészítése előtt be lett állítva (6.2 fejezet). Ezt követően a bal oldalon látható ikonra jobb egér gombbal rákattintva, a legördülő menüben kiválasztjuk a Distortion Plot parancsot, és a program a kamera kalibráció során alkalmazott torzítási paraméterek eredményit grafikusán szemlélteti. Itt található meg a korrelációs mátrix is. Végül a File Export-nál a Generate Report paranccsal exportáltam a kalibrációs jelentést (7. melléklet).

6.4 Eredmények kiértékelése, feldolgozása

Kétféleképpen elemeztem ki a kapott eredményeket. Az Agisoft Metashape programban megtalálható, a pontokra egyesével jobb egér gombbal rákattintva a Show Info parancs, és itt minden egyes képhez megadja, hogy milyen hibával lettek megmérve az egyes pontok pixel értékben, majd ezeket a pixel hibákat elemeztem ki.

A másik módszerem pedig az volt, hogy a Optimize Camera funkcióban, más-más paraméter kombinációk szerint generáltam a korrelációs mátrixot a Camera Calibration menüben, erre már utaltam a 6.3 fejezetben, azonban az 6.4.2 fejezetben részletesen kifejtem.

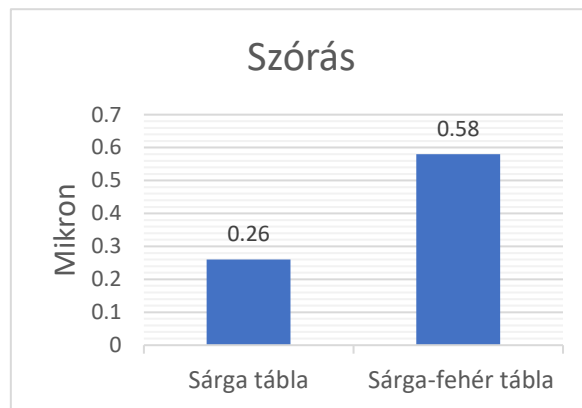
6.4.1 Pixel hibák elemzése

Miután végeztem a felvételek feldolgozásával, a 18. ábrán található Optimize Camera paraméter beállításokkal, a kamera kalibrációja után, minden ponthoz tartozó pixel hibát felsejtettem egy Excel táblázatba. Minden kamera kalibrációnál megtettem ezt, így lett hat darab táblázatom. Minden kamerához kettő darab Excel tábla készült el, a sárga táblához 143 darab pont tartozik, a sárga és fehér táblához együtt 264 darab pont tartozik. Az egyszerűség kedvéért a Sony Alpha DSLR-A350 kamerához tartozó, sárga táblás Excel táblázatot csatolom a 8. mellékeltbe a szemléltetés kedvéért.

Ezt követően az Agisoft Metashape program által megadott pixel méretet milliméterből átváltottam mikronba (μ). Ez után a pixel hiba értékeket is átszámítottam mikronba, és a szórást, megbízhatóságot, minimum és maximum értékeket Excel függvény segítségével kiszámítottam. A középhiba kiszámításához nem találtam Excel függvényt, ezért azt más módon számítottam ki. A „Total” mikronban megadott hibákból átlagot számítottam, majd létrehoztam egy oszlopot, ahol a „Total” mikronban megadott hibákból kivontam az átlagot minden értéknél, majd egy másik oszlopban ezek abszolút értékét is Excel

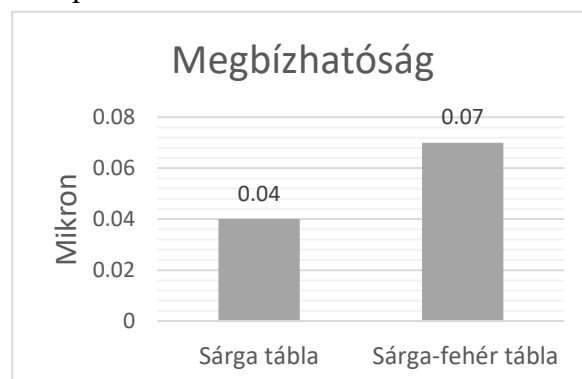
függvény segítségével kiszámítottam, majd ezek átlagát véve megkaptam a középhiba értékét. Ennél a folyamatnál a sárga táblákról készült méréseket, és a sárga-fehér táblákról készületeket külön kezeltem, mert ezeket szerettem volna összehasonlítani. Miután mindegyik méréshez kiszámítottam ezeket az értékeket, az egy kamerához tartozó kettő darab értékeket oszlopdiagrammon ábrázoltam, így lett összesen 3x5 darab diagrammom, amelyet az alábbiakban mutatok be.

Elsőnek a Sony Alpha DSLR-A350 kamerához tartozó diagrammokat szeretném bemutatni, és elemezni:



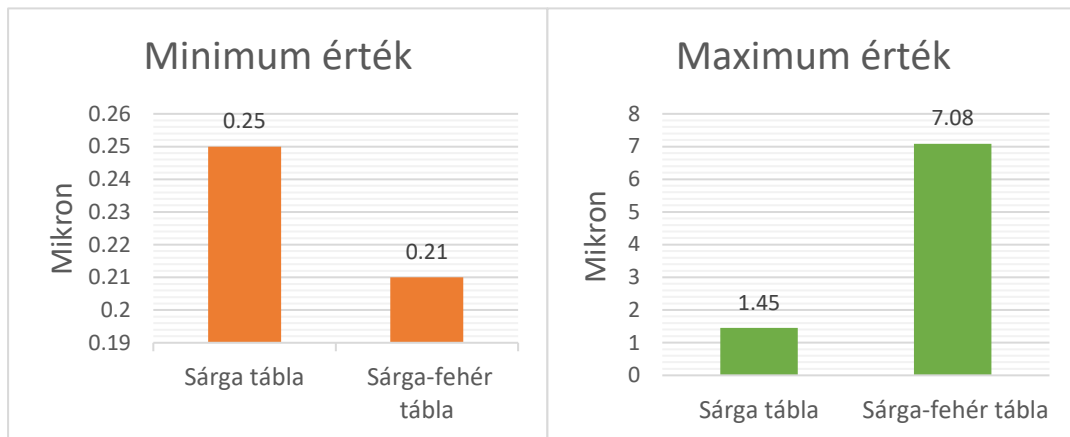
20. ábra: Sony szórás értékek

A 20. ábrán látható oszlopdiagramm megmutatja, hogy a sárga-fehér táblákkal történt kamera kalibráció során, a létrejött hiba értékek szélesebb tartományban helyezkednek el, és nagyobb szórás jellemzi őket. A csak sárga táblával történt kamera kalibráció esetében a hiba értékek kevésbé változók, és közelebb vannak egymáshoz. Ez stabilitásra utalhat, mert az adatok között kevésbé széles különbségek vannak. A kisebb szórásnál a kalibráció megbízhatóbb és pontosabb.



21. ábra: Sony megbízhatósági értékek

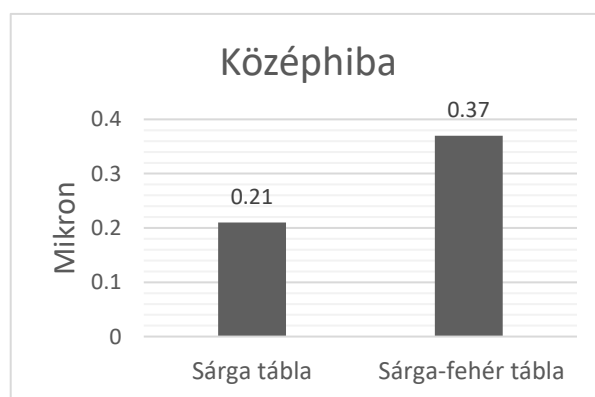
A 21. ábrán látható is, hogy a sárga táblával történt kamera kalibrációnak a megbízhatósági értéke 0.04 mikron. Minél kisebb a megbízhatósági érték, annál nagyobb a megbízhatóság. A sárga-fehér táblánál mivel magasabb a megbízhatósági érték, így a kalibráció kevésbé stabilnak mondható.



23. ábra: Sony minimum értékek

22. ábra: Sony maximum értékek

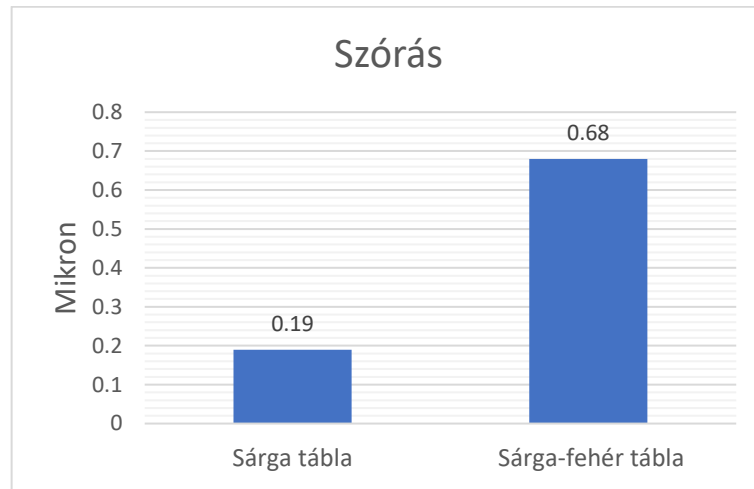
A 23. és 24. ábrán láthatóak a minimum és maximum értékek. A minimum érték oszlopdiagrammján a legkisebb értékek szerepelnek, amelyek a két kalibráció során előfordulnak, a maximum értéknél pedig a legmagasabb értékek. Ebből a két diagrammból is látható, hogy amit a szórás értékeknél kifejtettem, az igaz. A sárga-fehér táblák esetén nagyobb tartomány között mozognak az értékek, míg a csak sárga táblánál homogénebbek a mérések.



24. ábra: Sony középhiba értékek

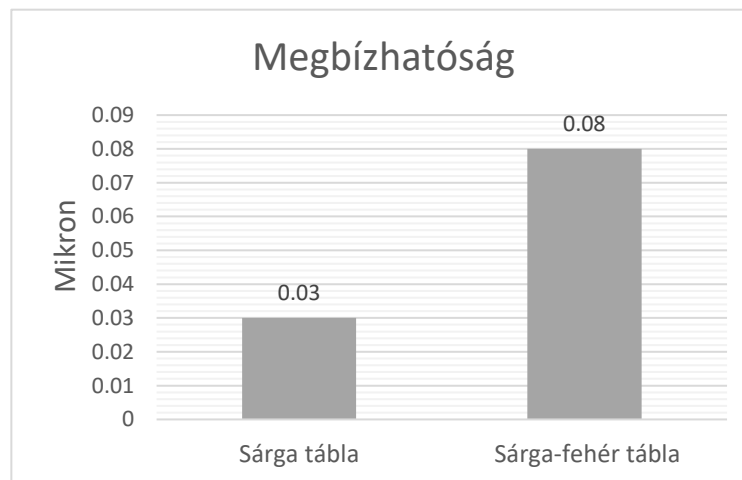
A 24. ábrán láthatóak a középhibák értékei. A sárga táblás kalibrációnál a 0.21 mikron érték arra utal, hogy a mérési eredmények közelebb vannak az átlaghoz, mint a sárga-fehér táblánál.

A második kamera, Canon EOS 4000D diagrammjai, és elemzéseik:



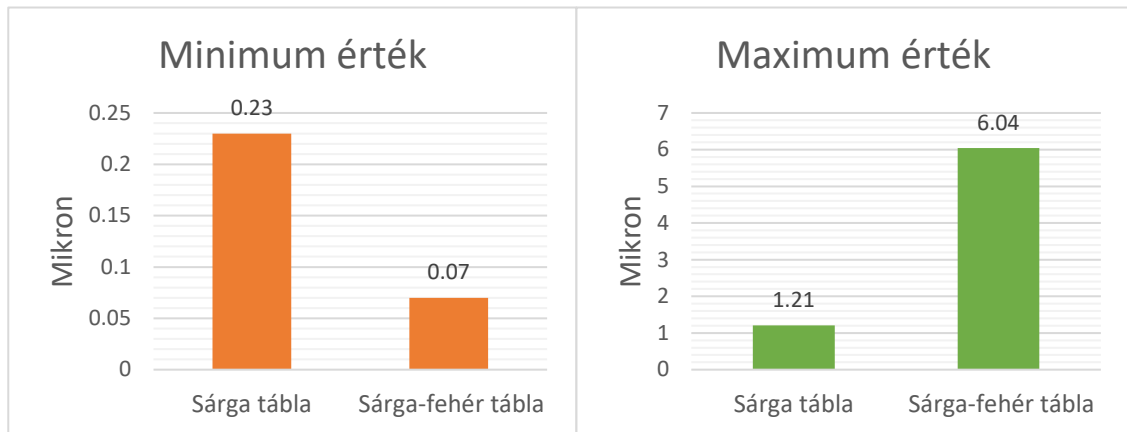
25. ábra: Canon szórás értékek

A sárga táblás kalibráció alacsonyabb szórást mutat, mint a 20. ábrán látható Sony kamerához tartozó, viszont a sárga-fehér táblánál, a Canonnál nagyobb a szórás. A két darab Canon kamerához tartozó szórás értékek között nagyobb a differencia, mint a Sony kameránál volt. Ebben az esetben is pontosabbnak ítéltető meg a sárga táblás kamera kalibráció.



26. ábra: Canon megbízhatósági értékek

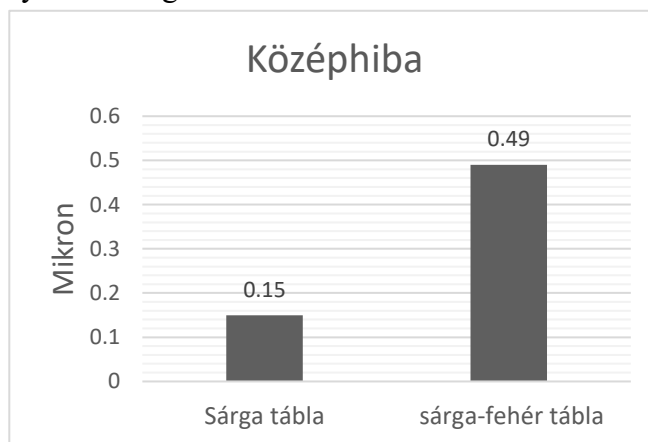
Megfigyelhető a 21. ábra és a 26. ábra segítségével, ahogy a szórás esetében is, a sárga táblás mérések megbízhatósága magasabb ennél a kameránál, mint a Sonynál, azonban a két kalibráció közötti megbízhatósági értékek különbsége nagyobb.



27. ábra: Canon minimum értékek

28. ábra: Canon maximum értékek

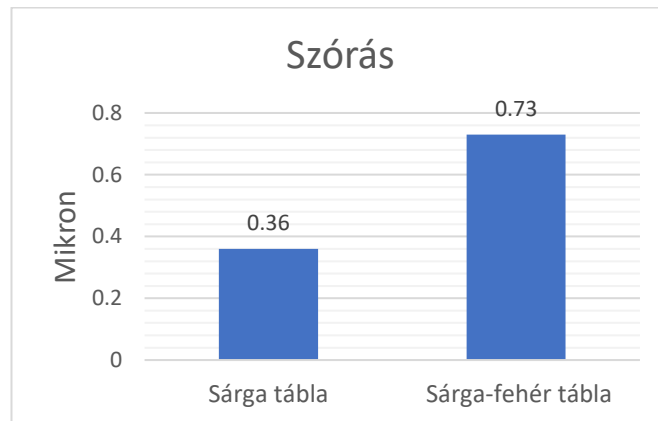
A minimum és maximum értékeknél is ugyan azt figyelhetjük meg, mint a Sony kamera esetében. A sárga táblánál a minimum érték magasabb, a maximum érték alacsonyabb, viszont kisebb tartományban mozognak az értékek.



29. ábra: Canon középhiba értékek

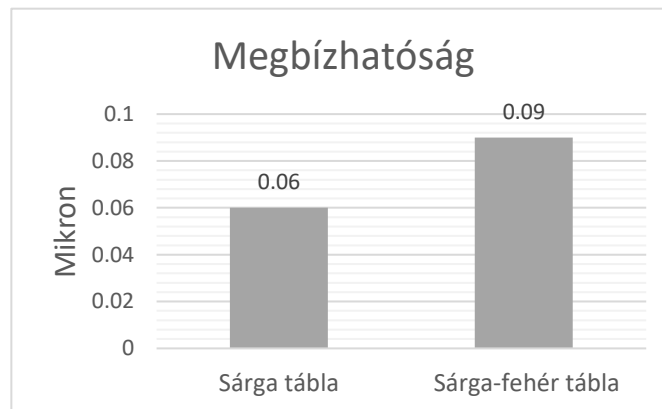
A szórás és megbízhatóság adataiból, már következtetni lehetett arra, hogy a sárga táblás mérésnek itt is kedvezőbb lesz a középhibája.

A harmadik kamera, a Nikon D3000 oszlopdiagrammjai és elemzéseik:



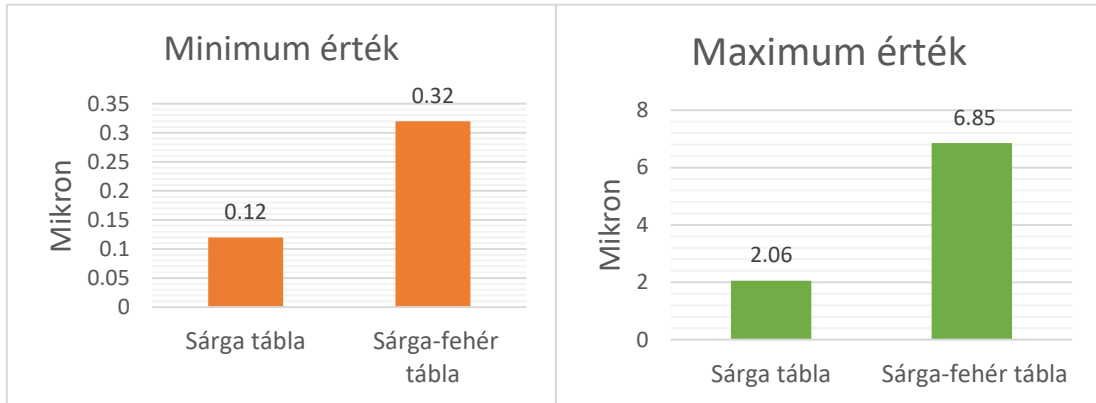
30. ábra: Nikon szórás értékek

A 30. ábrán látható, hogy mindkettő szórás érték magasabb lett, mint a másik két kameránál. A 31. ábrán található megbízhatósági értékek is hasonlóan alakultak, mint a 30. ábrán található szórás értékek. A sárga tábla kalibrációs mérései egyértelműen megbízhatóbbak a sárga-fehér táblával szemben.



31. ábra: Nikon megbízhatósági értékek

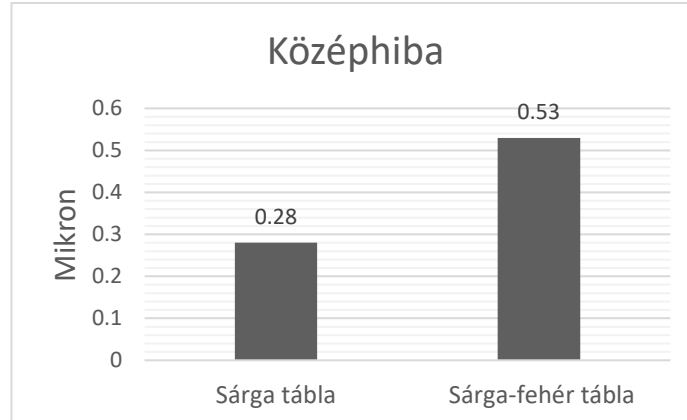
A megbízhatóságnál mind a két érték magasabb lett, mint a Canon és a Sony kamerákhoz tartozó megbízhatósági értékek.



33. ábra: Nikon minimum értékek

32. ábra: Nikon maximum értékek

A minimum és maximum értékek között a különbség, a sárga tábla esetében 1.94 mikron, és ez magasabb, mint a többi kamerához tartozó sárga táblás kalibrációnál, azonban a sárga-fehér táblánál 6.53 mikron az eltérés, amely a második legmagasabb érték a Sony kamerának a kalibrációja után.



34. ábra: Nikon középhiba értékek

A közép hiba értéke is a Nikon kamerával készült felvételek, sárga-fehér táblák felhasználásával végzett kalibrációjánál a legmagasabb.

Az eredmények összehasonlításával kapcsolatos tapasztalatokat a 7. Tapasztalatok című fejezetben részletezem.

6.4.2 Fókusz távolság és fókuszpontok koordinátáinak összehasonlítása

Az Agisoft Metashape programban a 18. ábrán látható Optimize Camera felugró ablakában különböző paramétereket jelöltem ki, majd ezt követően végeztem el a kamera kalibrációját, és az így kapott eredményeket exportáltam kalibrációs jegyzőkönyvekbe (7. melléklet). Minden kamerához, külön a sárga táblához, és külön a sárga-fehér táblákhoz elkészítettem ezeket a jegyzőkönyveket. Mindegyikhez 9 féle különböző elrendezést állítottam be az Optimize Camera funkcióban, az eredmények összehasonlíthatóságának érdekében törekedtem arra, hogy minden mérésnél azonosak legyenek a kijelölt paraméterek, és utána kimentettem a kalibrációs jegyzőkönyveket. Az alábbi variációkat használtam:

1. $F - C_x, C_y - K_1 - K_2 - K_3 - K_4 - P_1 - P_2$
2. $F - C_x, C_y - K_1 - K_2 - P_1 - P_2$
3. $F - C_x, C_y - K_3 - K_4 - P_1 - P_2$
4. $F - C_x, C_y - K_1 - K_2 - K_3 - K_4 - P_1$
5. $F - C_x, C_y - K_1 - K_2 - K_3 - K_4 - P_2$
6. $F - C_x, C_y - K_3 - K_4 - P_2$
7. $F - C_x, C_y - K_1 - K_2 - P_2$
8. $F - C_x, C_y - K_3 - K_4 - P_1$
9. $F - C_x, C_y - K_1 - K_2 - P_1$

Ezután egy Excel táblában rögzítettem a korrelációs mátrix F – fókusz távolságának értékét és hibáját; valamint a C_x , C_y fókuszpontkoordináták értékeit és hibáit. Ezek a mennyiségek pixelben vannak megadva a program által, így azokat milliméterbe váltottam át, a kamerához tartozó pixel méretek ismeretében. Az azonos kamerához tartozó kalibráció eredményit, egy táblázatban rögzítettem. A könnyebb azonosítás érdekében a kalibrációk azonosítóit úgy alakítottam ki, hogy az első karakter az 'S' - a sárga táblát jelöli, az 'E', az egyben a sárga-fehér táblát jelöli. A következő karakterek azt jelölik, hogy az Agisoft Metashape program, Optimize Camera funkcióban mely paramétereket állítottam be, hogy utána a kamera kalibrációkat azokkal a paraméterekkel végezzem el. Az F , C_x , és C_y értékeket azért nem írtam oda, mert azok minden kalibrációnál be voltak állítva. Az utolsó karakternél az 'S', a Sony kamerát jelöli, a 'C', a Canon-t, és az 'N' pedig a Nikon-t. Ezeket, az alábbi táblázatok mutatják be:

	Sony Alpha DSLR-A350	Fókusz				Cx				Cy			
		Érték		Hiba		Érték		Hiba		Érték		Hiba	
		pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm
Sárga tábla	0.00523												
	S-K1-K2-K3-K4-P1-P2-S	4 022.67	21.0386	0.5528	0.0029	-18.0888	-0.0946	1.3922	0.0073	-33.5174	-0.1753	2.3346	0.0122
	S-K1-K2-P1-P2-S	4 022.18	21.0360	0.5703	0.0030	-19.3050	-0.1010	1.3924	0.0073	-30.9838	-0.1620	2.3431	0.0123
	S-K3-K4-P1-P2-S	4 106.65	21.4778	5.9990	0.0314	-29.3464	-0.1535	5.6168	0.0294	33.3915	0.1746	9.9735	0.0522
	S-K1-K2-K3-K4-P1-S	4 022.74	21.0389	0.5341	0.0028	-18.0413	-0.0944	1.3544	0.0071	-35.2737	-0.1845	0.4135	0.0022
	S-K1-K2-K3-K4-P2-S	4 022.66	21.0385	0.5493	0.0029	-12.0006	-0.0628	0.4055	0.0021	-33.3043	-0.1742	2.2640	0.0118
	S-K3-K4-P2-S	4 106.49	21.4769	6.0123	0.0314	-18.1864	-0.0951	3.8003	0.0199	37.4070	0.1956	9.9239	0.0519
	S-K1-K2-P2-S	4 022.20	21.0361	0.5784	0.0030	-12.1827	-0.0637	0.4324	0.0023	-30.7606	-0.1609	2.3773	0.0124
	S-K3-K4-P1-S	4 108.53	21.4876	6.0804	0.0318	-34.8594	-0.1823	5.7774	0.0302	-14.0926	-0.0737	4.2543	0.0223
Egyben (sárga-fehér tábla)	S-K1-K2-P1-S	4 022.37	21.0370	0.5608	0.0029	-19.3910	-0.1014	1.3938	0.0073	-35.0261	-0.1832	0.4402	0.0023
	E-K1-K2-K3-K4-P1-P2-S	4 021.13	21.0305	0.4060	0.0021	-12.7234	-0.0665	2.2406	0.0117	-28.0559	-0.1467	1.4375	0.0075
	E-K1-K2-P1-P2-S	4 020.13	21.0253	0.3771	0.0020	-13.5586	-0.0709	2.2284	0.0117	-27.7195	-0.1450	1.4594	0.0076
	E-K1-K2-P1-P2-S	3 994.09	20.8891	2.4248	0.0127	-11.0554	-0.0578	5.1826	0.0271	-17.0755	-0.0893	6.6460	0.0348
	E-K1-K2-K3-K4-P1-S	4 021.32	21.0315	0.4058	0.0021	-12.3950	-0.0648	2.2508	0.0118	-31.5440	-0.1650	1.1443	0.0060
	E-K1-K2-K3-K4-P2-S	4 021.09	21.0303	0.4044	0.0021	-15.2726	-0.0799	0.6510	0.0034	-28.1357	-0.1471	1.4362	0.0075
	S-K3-K4-P2-S	3 993.81	20.8876	2.4175	0.0126	-16.9030	-0.0884	3.4059	0.0178	-17.7462	-0.0928	6.6385	0.0347
	E-K1-K2-P2-S	4 020.10	21.0251	0.3759	0.0020	-15.5027	-0.0811	0.6586	0.0034	-27.7872	-0.1453	1.4573	0.0076
	E-K3-K4-P1-S	3 995.09	20.8943	2.4301	0.0127	-11.7695	-0.0616	5.1383	0.0269	-32.9178	-0.1722	5.5819	0.0292
	E-K1-K2-P1-S	4 020.30	21.0262	0.3774	0.0020	-13.2539	-0.0693	2.2391	0.0117	-31.4745	-0.1646	1.1641	0.0061

1. táblázat: Kalibrációs adatok átszámítása (Sony)

	Canon EOS D4000	Fókusz				Cx				Cy			
		Érték		Hiba		Érték		Hiba		Érték		Hiba	
		pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm
Sárga tábla	0.0044												
	S-K1-K2-K3-K4-P1-P2-C	4 333.86	19.0690	0.6153	0.0027	64.8030	0.2851	0.8405	0.0037	82.1834	0.3616	1.2695	0.0056
	S-K1-K2-P1-P2-C	4 333.94	19.0693	0.6183	0.0027	64.1975	0.2825	0.8589	0.0038	83.7065	0.3683	1.3157	0.0058
	S-K3-K4-P1-P2-C	4 485.70	19.7371	11.2478	0.0495	43.1811	0.1900	7.1195	0.0313	114.3130	0.5030	11.5203	0.0507
	S-K1-K2-K3-K4-P1-C	4 335.96	19.0782	1.4744	0.0065	64.4064	0.2834	2.1277	0.0094	12.3820	0.0545	1.2619	0.0056
	S-K1-K2-K3-K4-P2-C	4 335.75	19.0773	0.7890	0.0035	49.8010	0.2191	0.5803	0.0026	81.3040	0.3577	1.6341	0.0072
	S-K3-K4-P2-C	4 485.51	19.7362	11.2391	0.0495	45.9569	0.2022	6.3117	0.0278	115.2720	0.5072	11.4757	0.0505
	S-K1-K2-P2-C	4 335.26	19.0751	0.7777	0.0034	49.8110	0.2192	0.5972	0.0026	82.7696	0.3642	1.6613	0.0073
	S-K3-K4-P1-C	4 485.10	19.7344	11.4986	0.0506	37.6767	0.1658	7.3235	0.0322	60.0066	0.2640	8.0159	0.0353
Egyben (sárga-fehér tábla)	S-K1-K2-P1-C	4 336.31	19.0798	1.4711	0.0065	62.4119	0.2746	2.0825	0.0092	13.8614	0.0610	1.3002	0.0057
	E-K1-K2-K3-K4-P1-P2-C	4 323.65	19.0241	0.4297	0.0019	79.6950	0.3507	1.7192	0.0076	72.7444	0.3201	1.4390	0.0063
	E-K1-K2-P1-P2-C	4 322.71	19.0199	0.4051	0.0018	77.2327	0.3398	1.6606	0.0073	72.5239	0.3191	1.4375	0.0063
	E-K3-K4-P1-P2-C	4 292.87	18.8886	0.4291	0.0177	-25.0249	-0.1101	5.7169	0.0252	4.8375	0.0213	8.4815	0.0373
	E-K1-K2-K3-K4-P1-C	4 326.84	19.0381	0.8085	0.0036	78.3264	0.3446	3.2378	0.0142	29.2799	0.1288	2.2342	0.0098
	E-K1-K2-K3-K4-P2-C	4 323.60	19.0238	0.4462	0.0020	64.4778	0.2837	0.7310	0.0032	71.9550	0.3166	1.4864	0.0065
	E-K3-K4-P2-C	4 293.28	18.8904	0.4163	0.0181	7.9640	0.0350	5.5676	0.0245	3.8666	0.0170	8.6904	0.0382
	E-K1-K2-P2-C	4 322.77	19.0202	0.4173	0.0018	64.0135	0.2817	0.7216	0.0032	72.0642	0.3171	1.4778	0.0065
	E-K3-K4-P1-C	4 295.75	18.9013	0.4048	0.0178	-24.5665	-0.1081	5.6924	0.0250	-16.6032	-0.0731	7.5462	0.0332
	E-K1-K2-P1-C	4 325.50	19.0322	0.7541	0.0033	75.4066	0.3318	3.0586	0.0135	29.3305	0.1291	2.2272	0.0098

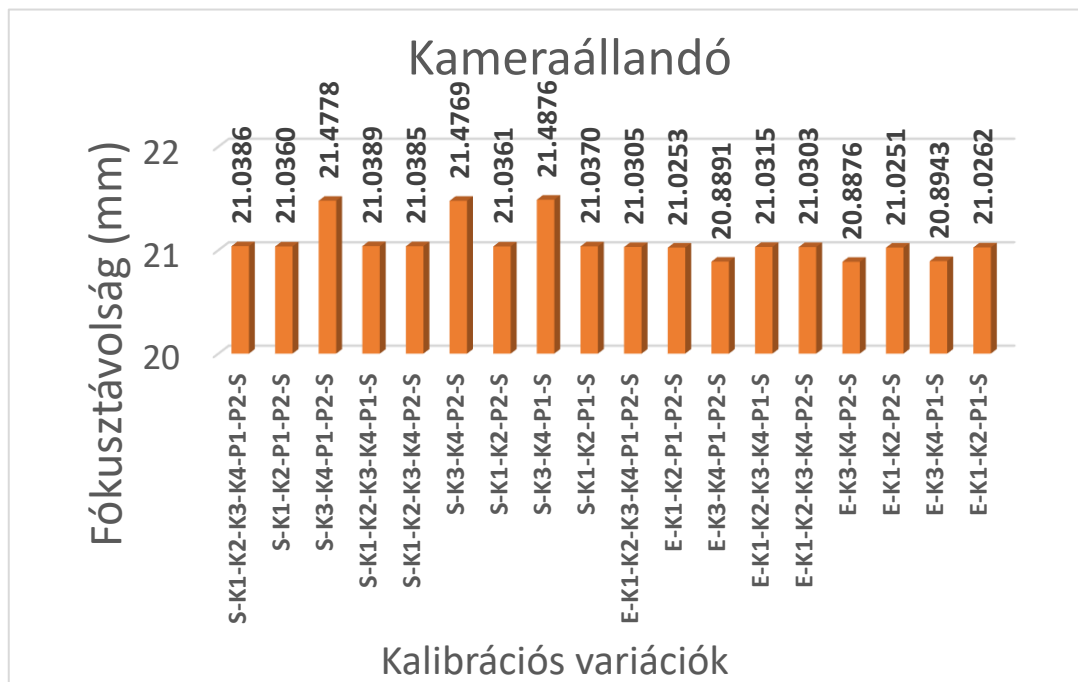
2. táblázat: Kalibrációs adatok átszámítása (Canon)

	Nikon D3000	Fókusz				Cx				Cy			
		Érték		Hiba		Érték		Hiba		Érték		Hiba	
		pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm	pixel	mm
Sárga tábla	0.00619												
	S-K1-K2-K3-K4-P1-P2-N	3 080.28	19.0669	0.4104	0.0025	31.9658	0.1979	1.2145	0.0075	39.0002	0.2414	1.8103	0.0112
	S-K1-K2-P1-P2-N	3 080.45	19.0680	0.4002	0.0025	32.3129	0.2000	1.2559	0.0078	39.2364	0.2429	1.8658	0.0115
	S-K3-K4-P1-P2-N	3 126.16	19.3509	3.3656	0.0208	15.7781	0.0977	5.1648	0.0320	33.6015	0.2080	8.3438	0.0516
	S-K1-K2-K3-K4-P1-N	3 080.93	19.0710	0.4406	0.0027	32.1678	0.1991	1.3089	0.0081	19.7506	0.1223	0.4408	0.0027
	S-K1-K2-K3-K4-P2-N	3 080.51	19.0684	0.4116	0.0025	36.7405	0.2274	0.4385	0.0027	38.6061	0.2390	1.8299	0.0113
	S-K3-K4-P2-N	3 126.48	19.3529	3.3351	0.0206	18.9260	0.1172	3.3587	0.0208	32.0576	0.1984	8.2485	0.0511
	S-K1-K2-P2-N	3 080.65	19.0692	0.4016	0.0025	37.0011	0.2290	0.4508	0.0028	38.8270	0.2403	1.8827	0.0117
	S-K3-K4-P1-N	3 126.23	19.3514	3.3626	0.0208	16.4514	0.1018	5.1219	0.0317	29.5243	0.1828	3.3340	0.0206
Egyben (sárga-fehér tábla)	S-K1-K2-P1-N	3 081.12	19.0721	0.4266	0.0026	32.5616	0.2016	1.3494	0.0084	19.7563	0.1223	0.4543	0.0028
	E-K1-K2-K3-K4-P1-P2-N	3 045.92	18.8542	0.3686	0.0023	46.4767	0.2877	2.5074	0.0155	32.5878	0.2017	1.3524	0.0084
	E-K1-K2-P1-P2-N	3 046.74	18.8593	0.3445	0.0021	46.9532	0.2906	2.5118	0.0155	32.2537	0.1997	1.3737	0.0085
	E-K3-K4-P1-P2-N	3 034.75	18.7851	1.7677	0.0109	33.2929	0.2061	5.0392	0.0312	14.6277	0.0905	5.1681	0.0320
	E-K1-K2-K3-K4-P1-N	3 046.06	18.8551	0.3791	0.0023	46.0583	0.2851	2.5737	0.0159	24.7602	0.1533	1.0043	0.0062
	E-K1-K2-K3-K4-P2-N	3 045.89	18.8541	0.3627	0.0022	45.4222	0.2812	0.6937	0.0043	32.5665	0.2016	1.3502	0.0084
	E-K3-K4-P2-N	3 034.88	18.7859	1.7614	0.0109	37.1410	0.2299	2.9967	0.0185	15.0089	0.0929	5.1366	0.0318
	E-K1-K2-P2-N	3 046.71	18.8591	0.3384	0.0021	45.8163	0.2836	0.7018	0.0043	32.2290	0.1995	1.3715	0.0085
	E-K3-K4-P1-N	3 035.04	18.7869	1.7699	0.0110	32.8501	0.2033	5.0135	0.0310	3.2957	0.0204	4.0001	0.0248
	E-K1-K2-P1-N	3 046.83	18.8599	0.3532	0.0022	46.5274	0.2880	2.5756	0.0159	24.7827	0.1534	1.0159	0.0063

3. táblázat: Kalibrációs adatok átszámítása (Nikon)

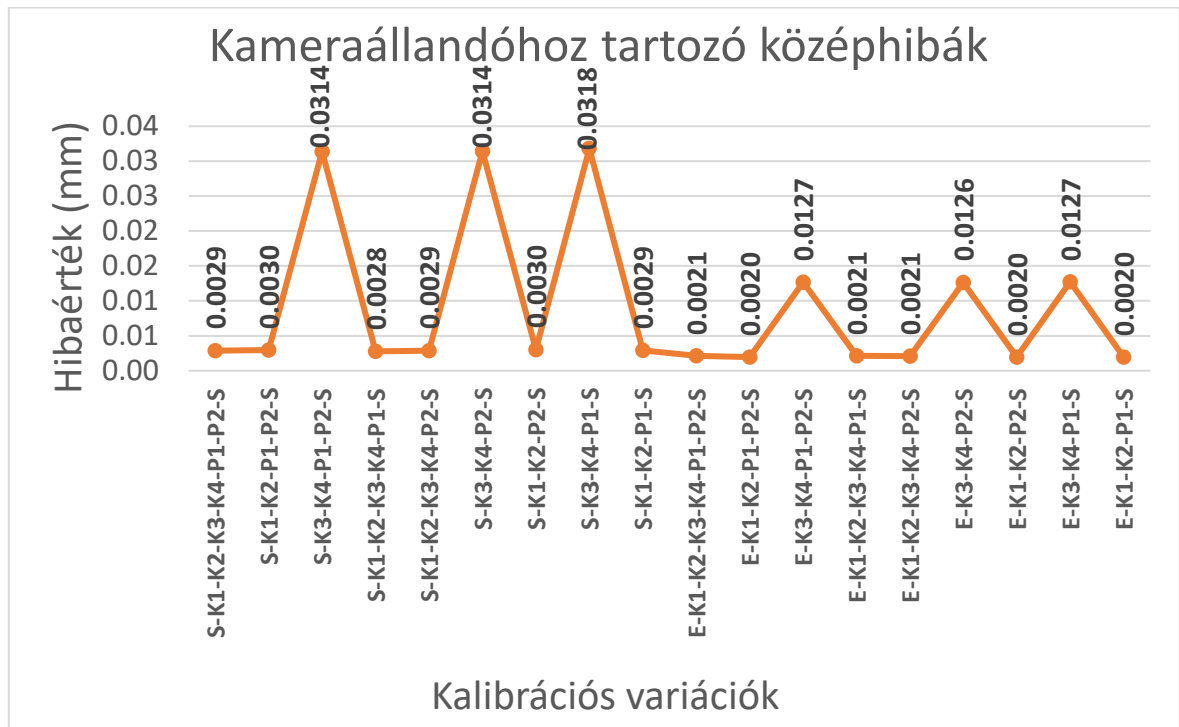
A táblázatok elkészítése után az eredményeket az 'Érték' oszlopokban oszlopdiagrammokon ábrázoltam, a 'Hiba' oszlop értékeit pedig vonaldiagrammon. Ezeknél a diagrammoknál a sárga tábla, és sárga-fehér táblák kalibrációs eredményeit egyben ábrázoltam egy diagrammon.

Elsőnek a Sony kamerához tartozó diagrammokat szeretném bemutatni, és elemezni:



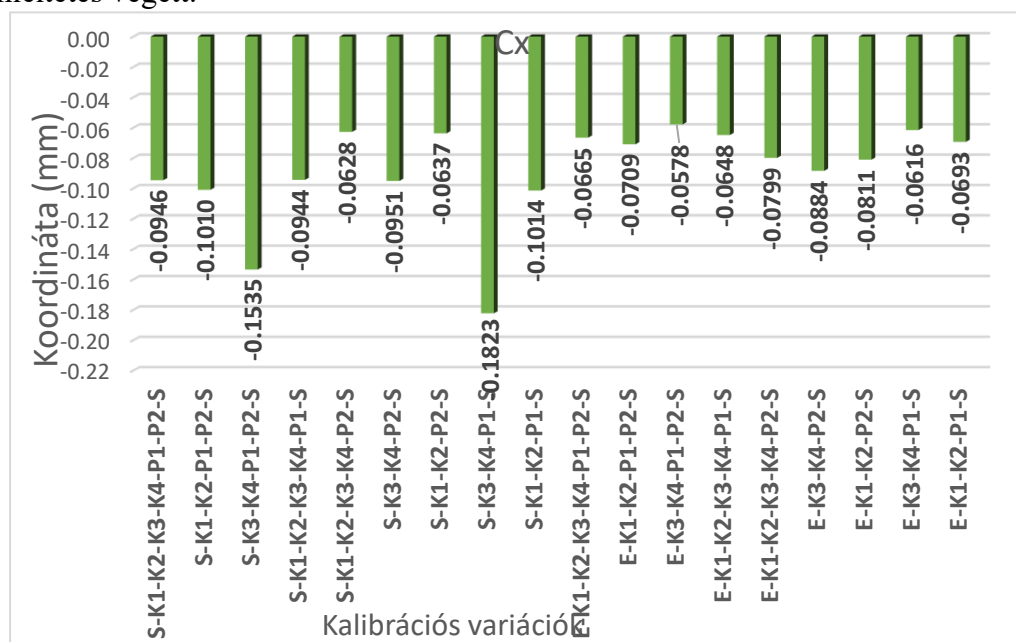
35. ábra: Sony kamerához tartozó kameraállandó értékek

A 35. ábrán jól kivehető, hogy a sárga táblánál 3 darab igen kiugróan magas értéket kaptam, a két táblánál együtt, pedig 3 helyen is alacsonyabb értéket kaptam. Mivel ugyan azokkal a felvételekkel dolgoztam a sárga táblák kalibrációjánál, és külön a sárga-fehér táblák kalibrációjánál is, csak a kalibrációs paramétereket változtattam meg, ezért néhány fajta hibát kizárhatunk. Például a rossz minőségű kalibrációs pontokat, a nem megfelelő képminőséget, valamint a túlzott kameramozgást. Több oka lehet annak, hogy a különböző paraméterekkel végzett kamara kalibráció során, a kameraállandó kiugró értékeket mutathat. Például, az optimalizációs algoritmusok érzékenyek lehetnek a paraméterek változásaira; vagy ha a különböző paraméterek között erős a korreláció, akkor a paraméterek változtatása hatással lehet a többi paraméterre.



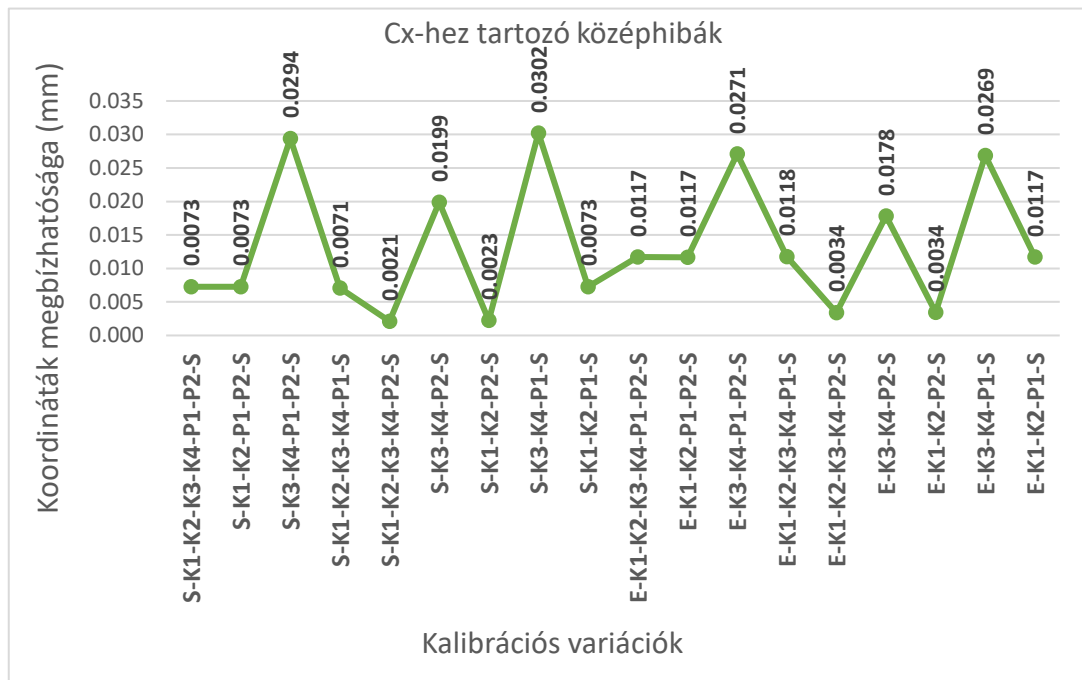
36. ábra: Sony kameraállandóhoz tartozó középhibák

A 36. ábrán a kameraállandóhoz tartozó középhibákat szemléltettem. Itt már le is vonhatunk egy következtetést. Jól látható, hogy a sárga táblánál, és a sárga-fehér táblánál ugyan azoknál a paraméter beállításoknál tapasztalhatunk nagyobb középhibákat, így ezeket a kalibrációkat nem tekinthetjük jónak, azonban ezeket benne hagytam a táblázatba a szemléltetés végett.



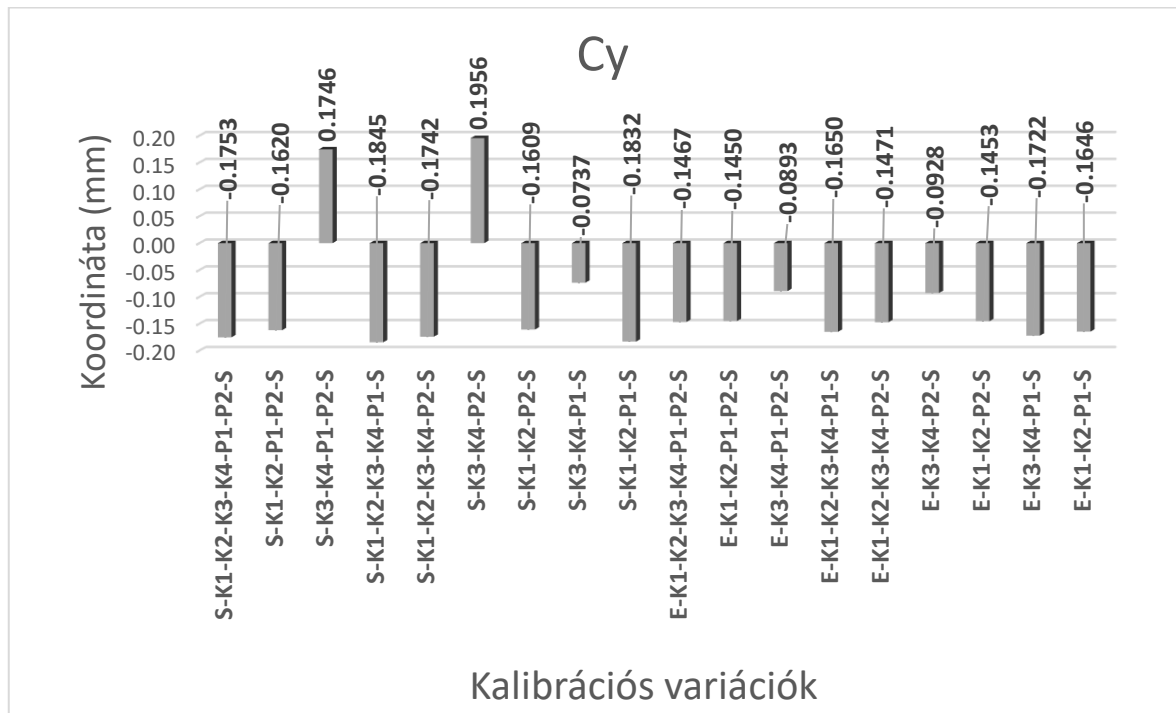
37. ábra: Sony kamerához tartozó Cx értékek

A C_x a fókuszpont x-koordinátáját jelenti, a C_y , pedig az y-koordinátát, amely értékek a kamera kalibráció során kerülnek meghatározásra. Az Agisoft Metashape program megpróbálja megbecsülni ezeket az értékeket, hogy minél jobban illeszkedjenek a valósághoz. A 37. ábrán láthatók kiugró értékek, azonban ezekkel önmagukban még nem lehet semmilyen következtetést levonni, a hibák nagyságát is figyelembe kell venni.



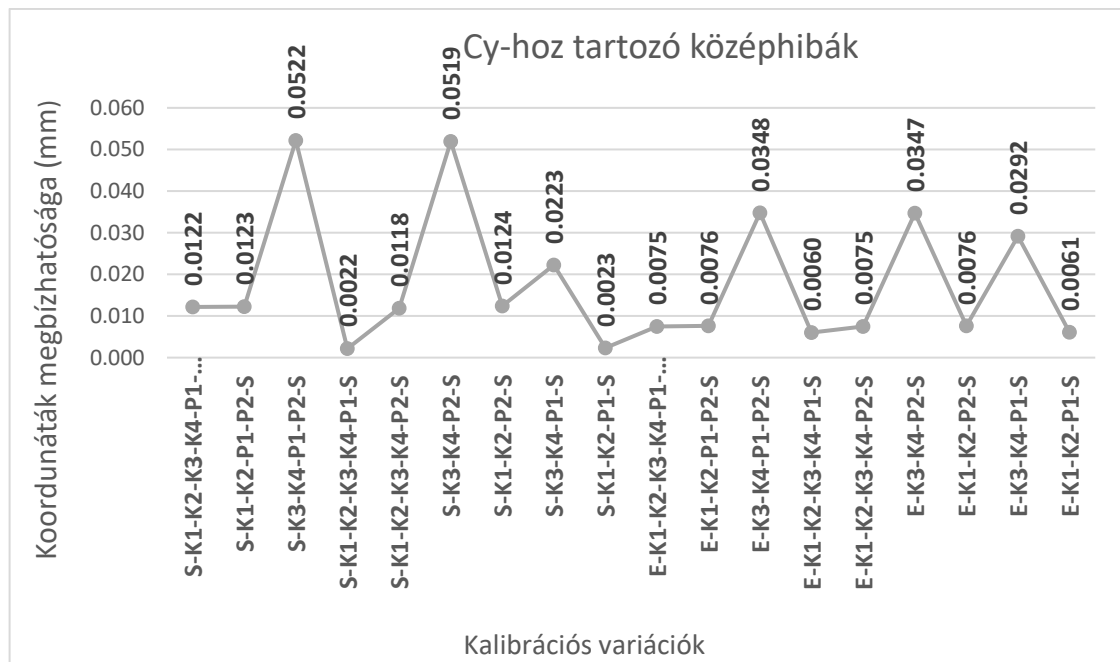
38. ábra: Sony kamerához tartozó C_x értékek középhibái

38. ábrán látható, hogy ugyan azoknál a paraméter beállításoknál látható kiugró középhibaérték, mint a 36. ábrán látható kameraállandó középhibájánál. A 37. ábrán a C_x értékeknél pedig az mutatkozik, hogy az 'S-K3-K4-P1-P2-S' és az 'S-K3-K4-P1-S' kalibrációs variációknál találhatók kiugró értékek, amelyeknél magasak a középhiba értékek is.



39. ábra: Sony kamerához tartozó Cy értékek

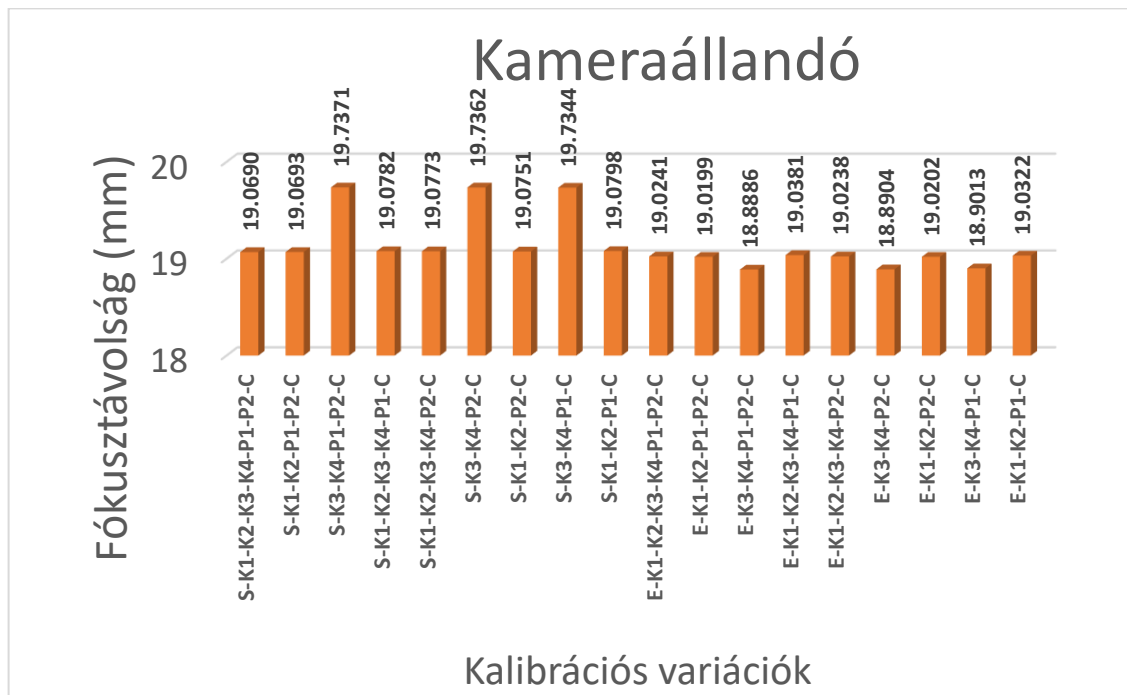
A Cy értékeket sem lehet önmagában elemezni, csak ha ismerjük a hozzájuk tartozó középhiba értékeket.



40. ábra: Sony kamerához tartozó Cy értékek középhibája

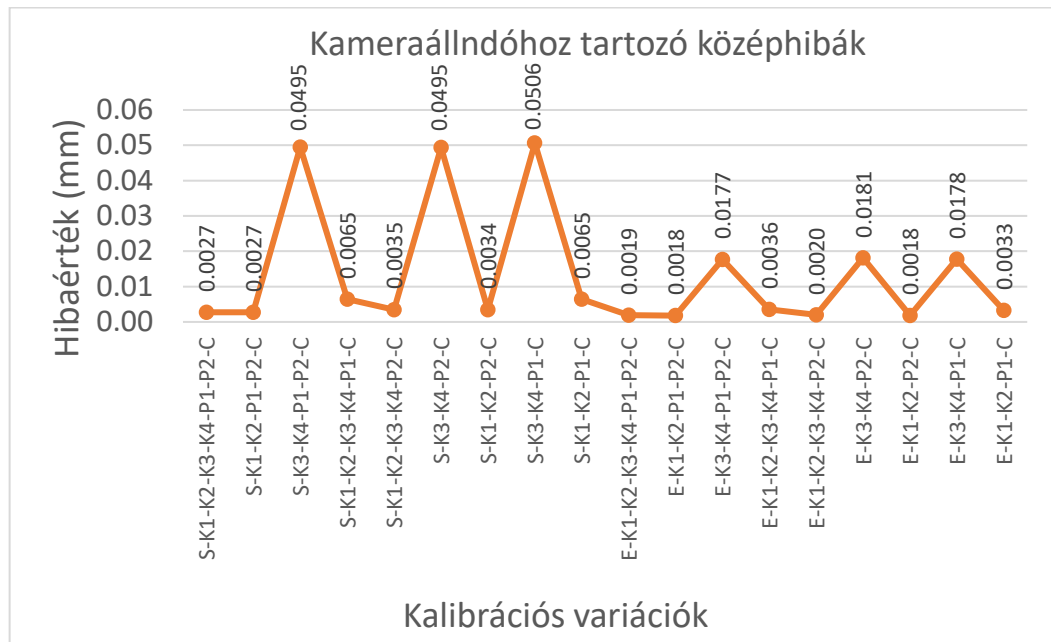
A Cy középhibaértékeknél is ugyan azoknál a kalibrációs variációknál figyelhetők meg a kiugró értékek, mint az előző adatok esetén, és a 38. ábrán látható, hogy itt is az 'S-K3-K4-P1-P2-S' és az 'S-K3-K4-P1-S' értéke tér el nagyban a többihez képest.

A második, a Canon kamera diagrammjai:



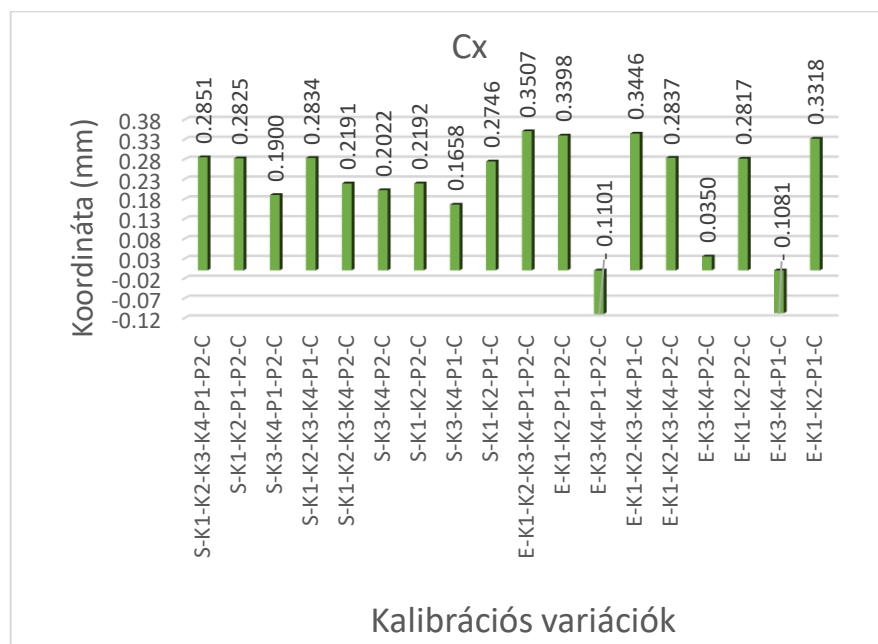
41. ábra: Canon kamerához tartozó kameraállandó értékek

A 41. ábrán látható, hogy akárcsak a Sony kameránál, ennél is a sárga táblánál az 'S-K3-K4-P1-P2', 'S-K3-K4-P1-P2', és 'S-K3-K4-P1' kalibrációs variációknál vannak kiugró értékek, valamint a sárga-fehér táblánál az 'E-K3-K4-P1-P2', 'E-K3-K4-P2' és 'E-K3-K4-P1' variációknál alacsonyabb értékek vannak, a többihez képest.



42. ábra: Canon kameraállndóhoz tartozó középhibák

A kameraállndóhoz tartozó középhiba értékek a Canonnál magasabbak lettek egy kicsit a Sony kamerához képest, azonban a sárga tábla esetében hasonló értékek körül mozog a fent említett három darab kalibrációs variációnál, és a sárga-fehér táblák esetében is hasonló az értékek.



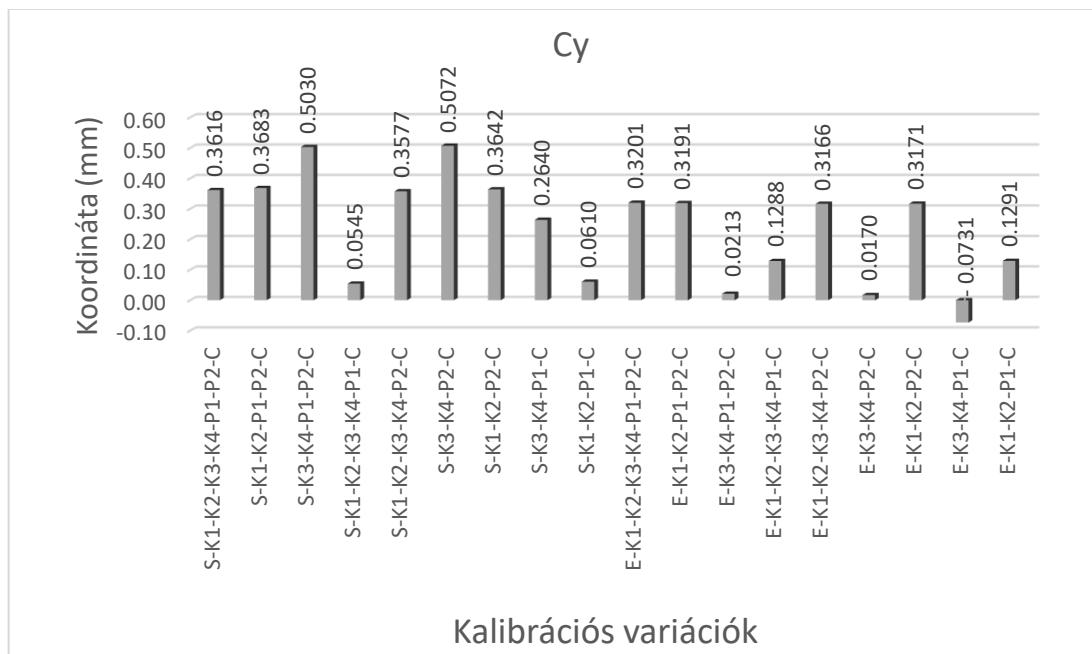
43. ábra: Canon kamerához tartozó Cx értékek

A Cx értékeknél nagy mozgás látható.

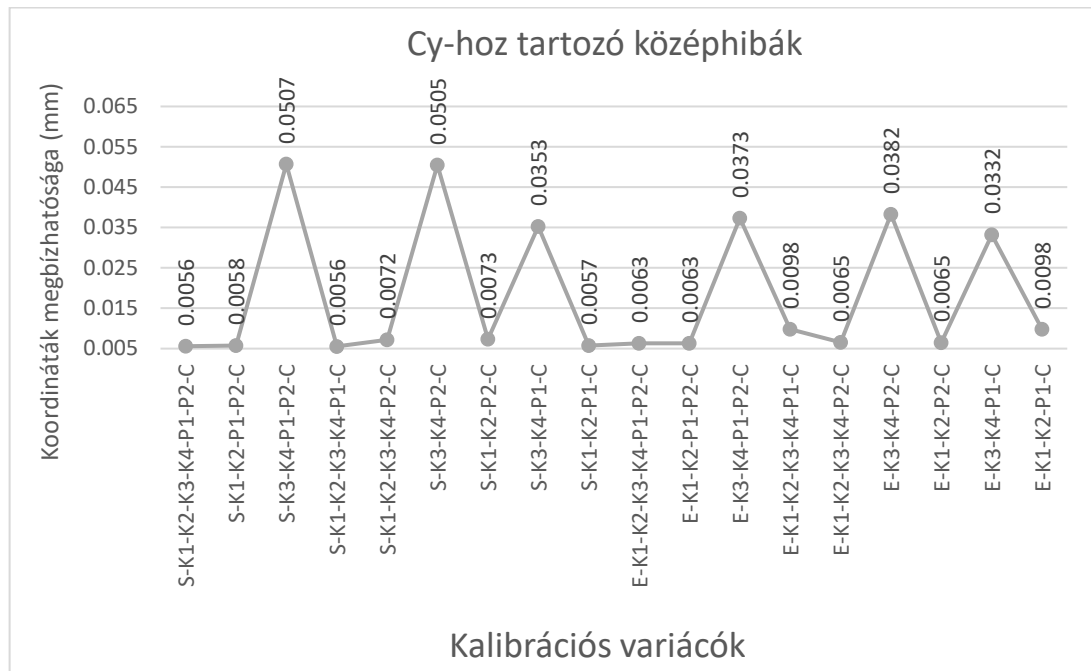


44. ábra: Canon kamerához tartozó Cx értékek középhibája

A Cx-hez tartozó középhibáknál is hat variációhoz tartozó értékek a kiugróak, ezek nagyjából hasonlóak a Sony kamerához.



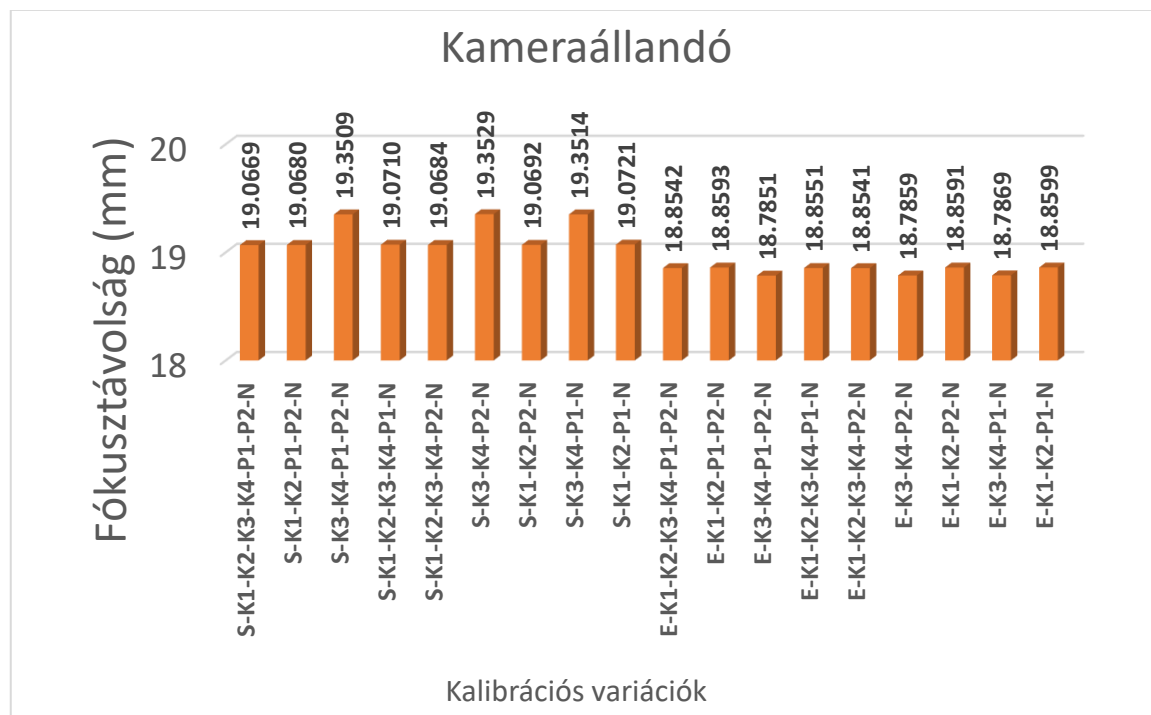
45. ábra: Canon kamerához tartozó Cy értékek



46. ábra: Canon kamerához tartozó Cy értékek középhibái

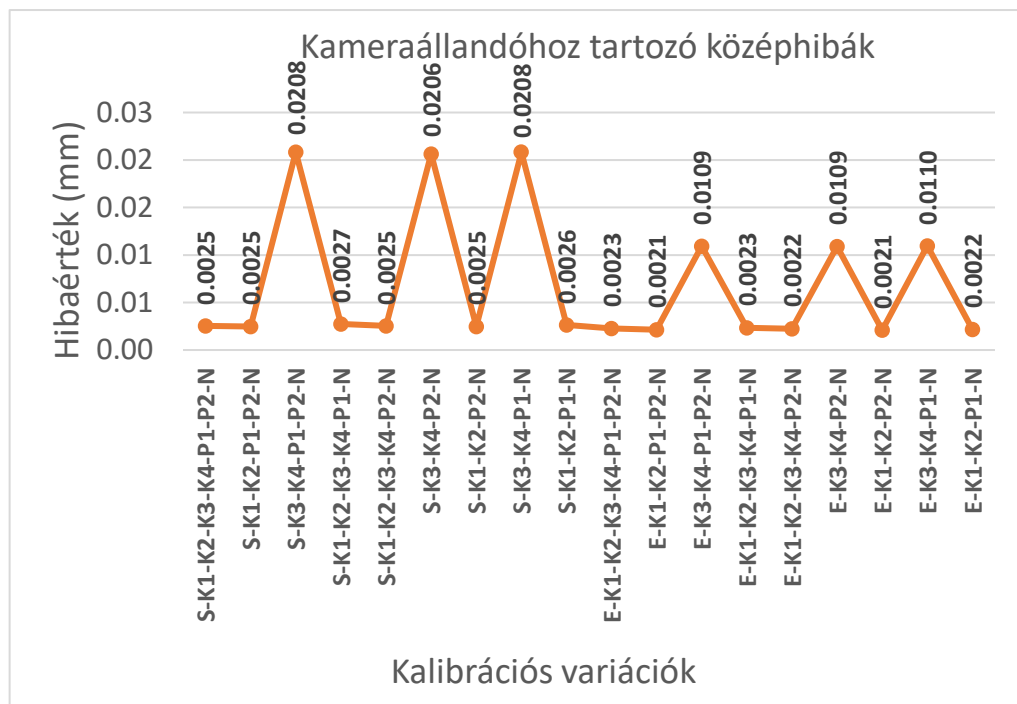
A Cy-hoz tartozó középhibák értéke is hasonló, mint a Sony-hoz tartozóak.

Az utolsó kamera, a Nikon diagrammjai:



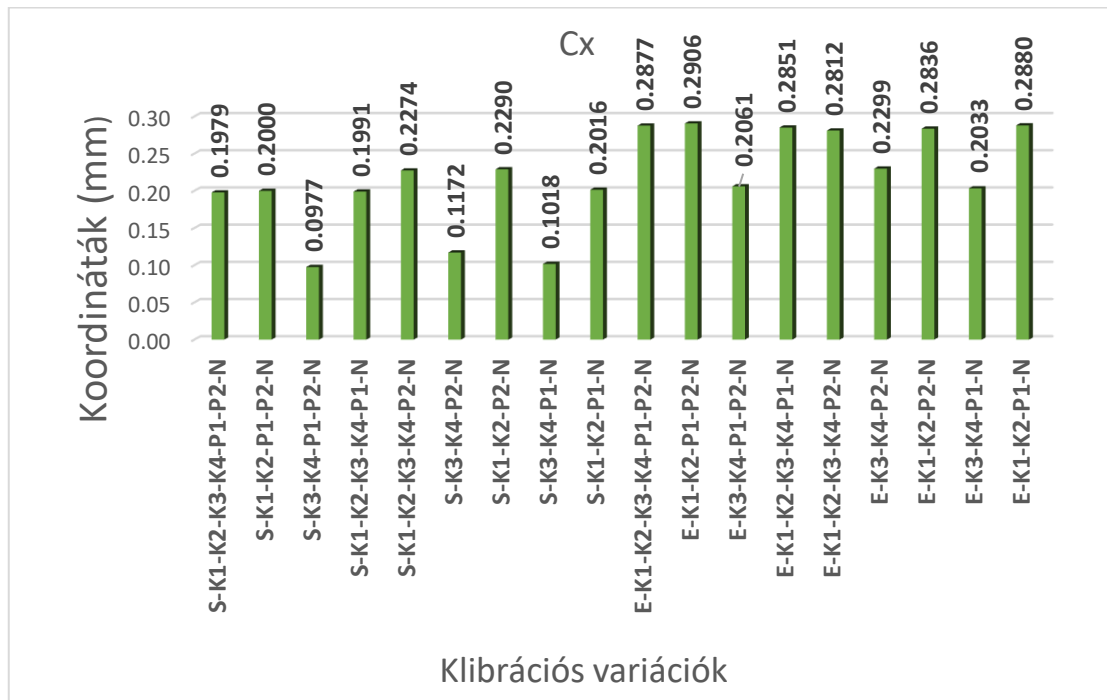
47. ábra: Nikon kamerához tartozó kameraállandó értékek

A 47. ábrán látható Nikon-hoz tartozó kameraállandó értékeknél a sárga táblánál, ugyan azok a kalibrációs variációk mutatnak kiugró értéket, amelyek a Sonynál és a Canonnál is. 'S-K3-K4-P1-P2', 'S-K3-K4-P2' és 'S-K3-K4-P1'. A sárga táblánál az átlagos kameraállandó értéke 19.1634 milliméter lett. A sárga-fehér tábláknál átlagosan alacsonyabb kameraállandó értékeket kaptam, ez 18.8333 millimétert. Ez a másik két kamera esetében nem így volt, azonban ennél a kalibrációnál is a 'E-K3-K4-P1-P2', 'E-K3-K4-P2' és 'E-K3-K4-P1' kalibrációs variációk mutatnak nagyobb eltérést az átlaghoz képest.

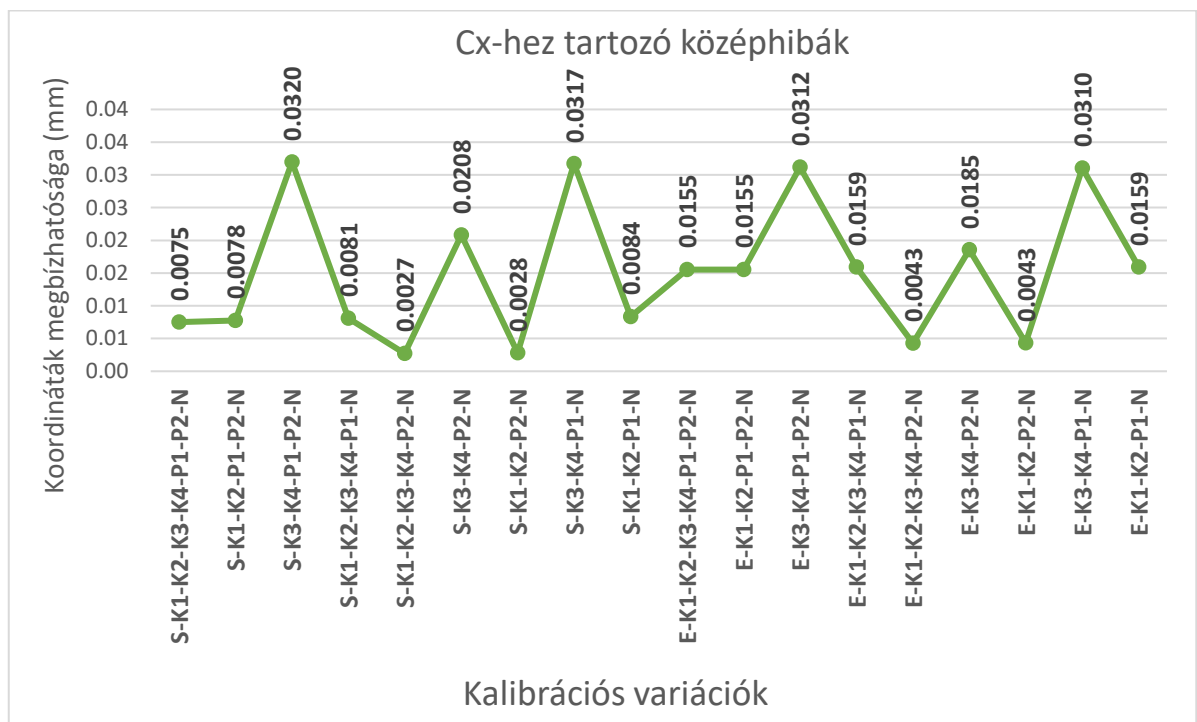


48. ábra: Nikon kameraállandóhoz tartozó középhibák

A 48. ábrán, a sárga táblához kapcsolódó, kiemelkedő középhibák értéke alacsonyabb, mint a Sony, és a Canon kameráknál ugyan azon kalibrációs variációkhoz. A sárga-fehér táblánál kameraállandó átlagos értékének eltérése ellenére a fentebb kiemelt kalibrációs variációknál alacsonyabb középhiba értéket kaptam.

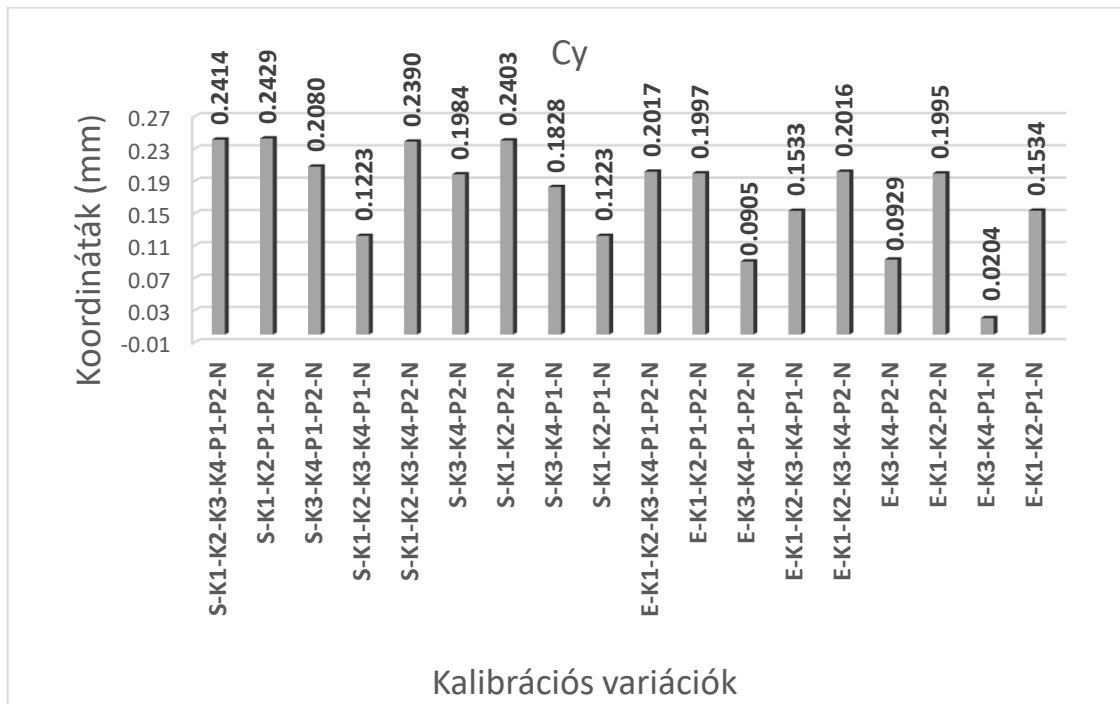


49. ábra: Nikon kamerához tartozó Cx értékek

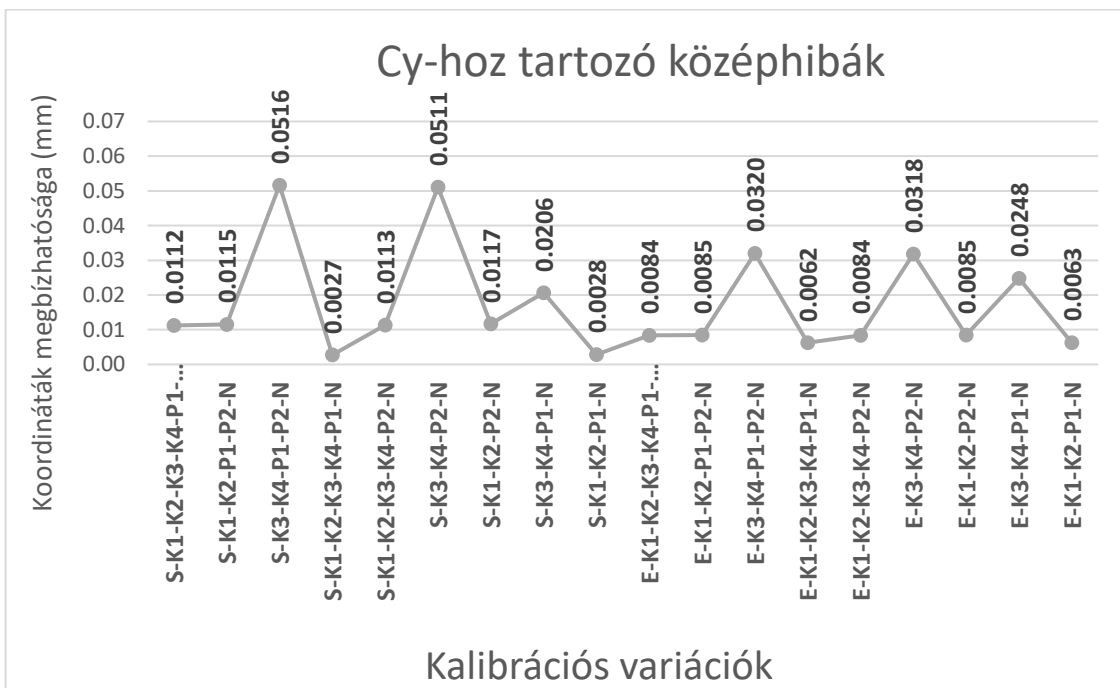


50. ábra: Nikon kamerához tartozó Cx értékek középhibái

A fent említett kalibrációs variációkhoz kapcsolódó Cx-hez tartozó középhibák értéke alacsonyabb, mint a Sony és a Canon kamerákhoz tartozóak.



51. ábra: Nikon kamerához tartozó Cy értékek



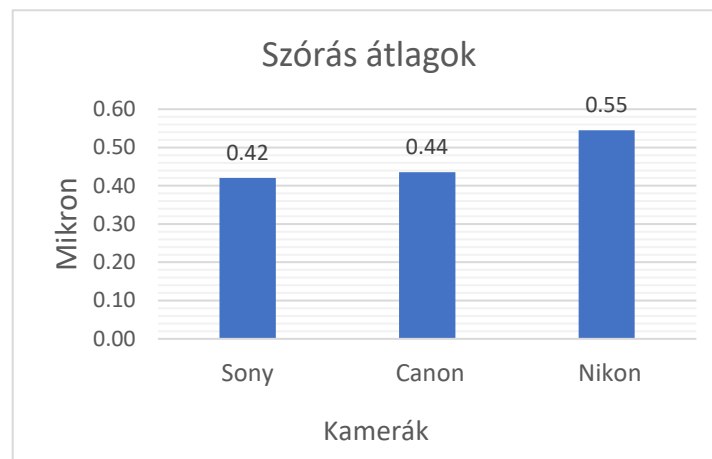
52. ábra: Nikon táblához tartozó Cy értékek középhibái

A fent említett kalibrációs variációkhoz kapcsolódó Cy-hoz tartozó középhibák értéke nagyjából hasonlóak, mint a Sony és a Canon kamerákhoz tartozóak.

7 TAPASZTALATOK

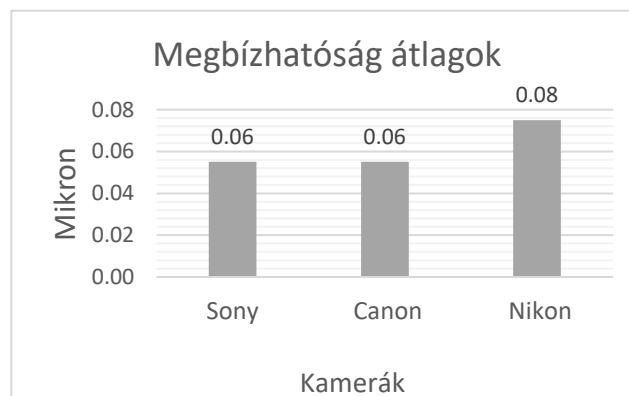
Ebben a fejezetben szeretném összehasonlítani a három darab kamerához kapcsolódó kalibrációs kiértékelésének az eredményeit, és a tapasztalatokat leírni.

Az 6.4.1 alfejezetben bemutattam minden kamera esetében a sárga táblás, és a sárga-fehér táblás kamera kalibrációk összehasonlítását a szórásra, megbízhatóságra és a középhibák értékeire. Most a szórásokból átlag értéket számoltam minden kamerához és az alábbiakban bemutatom ezeknek az oszlopdiagrammját.



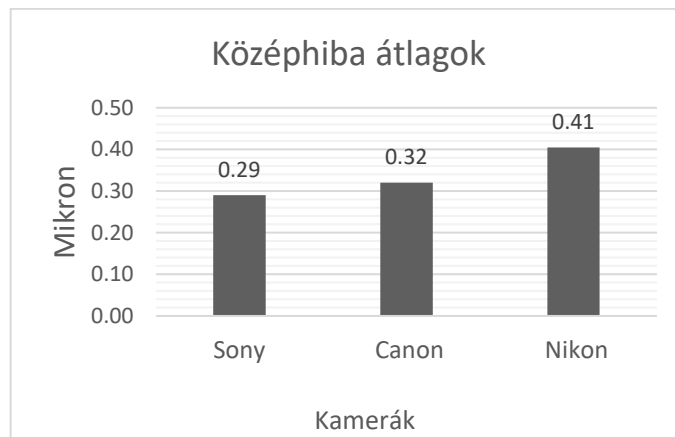
54. ábra: Szórás érték átlagainak összehasonlítása

Ebben az esetben a Sony és a Canon szórását jónak tekinthetjük, a kettő értéke igen közel áll egymáshoz, mindössze 0.02 mikron eltérést mutatnak egymáshoz képest. Minél kisebb a szórás értéke, annál jobb a kamera pontossága és megbízhatósága. A Nikon kameránál magasabb átlagos szórás értéket kaptam eredményül, így kevésbé megbízhatónak és pontosnak tekinthető ez a kamera.



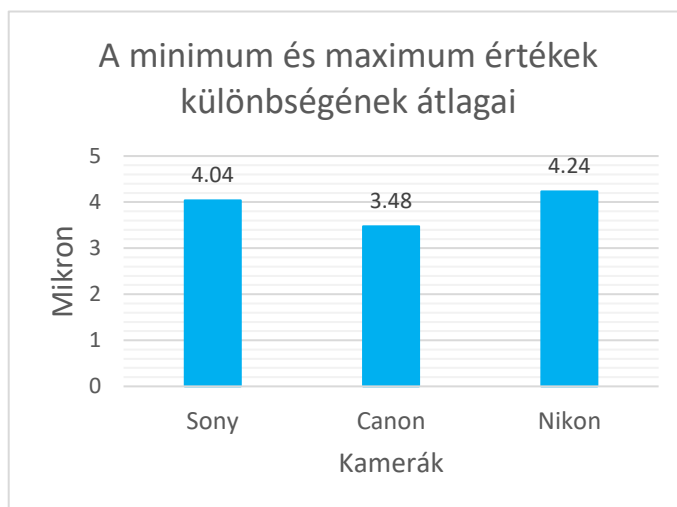
53. ábra: Megbízhatósági értékek átlagainak összehasonlítása

A megbízhatóságnál a Sony és a Canon esetében ugyanannyi lett az érték, az átlag számítást követően, így ezeket a megbízhatósági értékeket megfelelőnek tekinthetjük. Itt a Nikonnál a 0.06 mikron és a 0.09 mikron megbízhatósági értékek átlagából kaptam meg a 0.08 mikron értéket. A 0.06 mikront, amelyet a sárga táblás kalibrációnál kaptam itt is megfelelőnek tekinthetjük, azonban a sárga-fehér táblánál magasabb lett az érték, mint bármelyik másik kalibráció során.



55. ábra: Középhiba átlagok összehasonlítása

A Sony kamera esetében 0.29 mikron átlagos középhibát kaptam eredményül, azaz a sárga táblás, és a sárga-fehér táblás kamera kalibrációk esetében az egyes pontokhoz tartozó teljes hibák abszolút értékben átlagosan 0.29 mikronnak térnek el, a képekhez tartozó teljes hibák átlagától. A Canonnál ez 0.03 mikronnal magasabb érték, de ezt is megfelelőnek tekinthetjük, mivel nagyon kicsi az eltérés közöttük. A Nikon kamerához tartozó 0.41 mikron középhiba átlag viszont már 0.13 mikron értékkel tér el a Sonyétól, ami tekintve, hogy a Sony és a Canon kamerák között milyen alacsony volt az érték, igen magasnak tekinthető, ugyanis 6.5x nagyobb az érték.



56. ábra: A minimum és maximum értékek különbségének átlagai

Az 56. ábrán látható oszlopdiagrammot úgy hoztam létre, hogy mindegyik kameránál a sárga táblához, és a sárga-fehér táblához kiszámítottam külön-külön a minimum és maximum értékek különbségét, majd a kameránként létrejött két darab érték átlagát kiszámítottam és ábrázoltam. A fenti ábrán azt láthatjuk, hogy a Canon kamerához tartozóan kaptam a legkisebb eredményt, ami a gyakorlatban azt kellene, hogy jelentse, hogy ennek a kamerának lett a legkisebb szórás értéke, azonban mégis a Sony kameráé lett a kisebb érték. Ennek oka abban rejlik, hogy bár a Canon sárga táblás kalibráció szórás- és megbízhatóság értéke alacsonyabb lett a Sonyével szemben, a sárga-fehér táblás kalibrációnál mégis sokkal magasabb lett a Canon kamera szórás-, és megbízhatósági értéke, amint azok az 53. és 54. ábrán láthatóak is.

Összességében a szórás, megbízhatóság, és középhibák értékéből azt a következtetést vonhatom le, hogy a 3 kamerával készül, összesen 6 darab kamera kalibrációból mindegyike sikeresnek tekinthető. A Canon és a Sony kamerák megbízhatósága és pontossága, azonban sokkal jobb eredményeket mutattak, mint a Nikon kameráé.

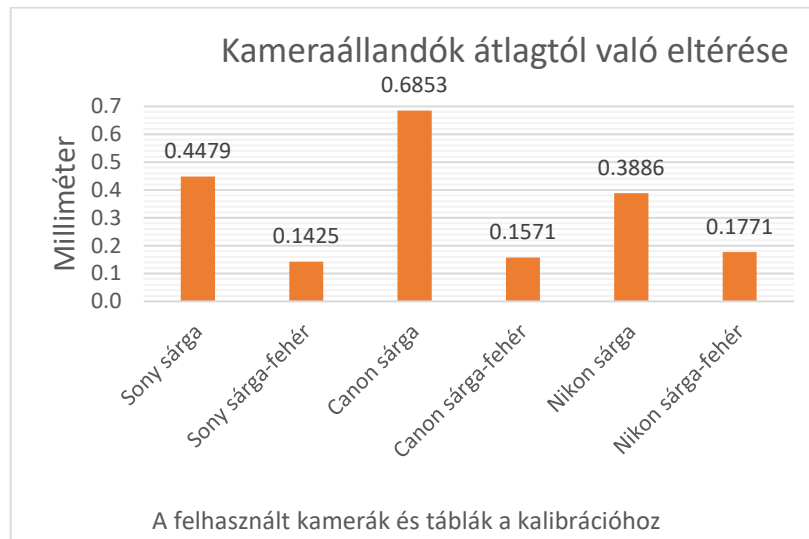
Az 6.2 fejezetben részleteztem a kamerák beállításait a felvételek elkészítéséhez, minden kép ugyanolyan beállítással készült el az adott kamerákhoz kapcsolódóan. A sárga táblás kalibrációknak azonban kedvezőbbek lettek a szórás, megbízhatóság, és középhiba értékei. Ez fakadhat abból, hogy kisebb terület kerül lefotózásra, így ezáltal javulhatnak a mérési teljesítmény mutatói (szórás, megbízhatóság, középhiba). Kisebb területen kevesebb lehet az optikai torzulás mértéke, amely kedvezően hat a mérési pontosságra, és a kevesebb adatkészlet csökkenti a feldolgozási- és számítási hibák valószínűségét.

Az is tényként kezelhető, hogy a felvételek elkészítése során azonos környezeti tényezők voltak, mivel közel egy időben készültek el a felvételek. Ugyanolyan volt a megvilágítás, azonos volt a hőmérséklet és a páratartalom.

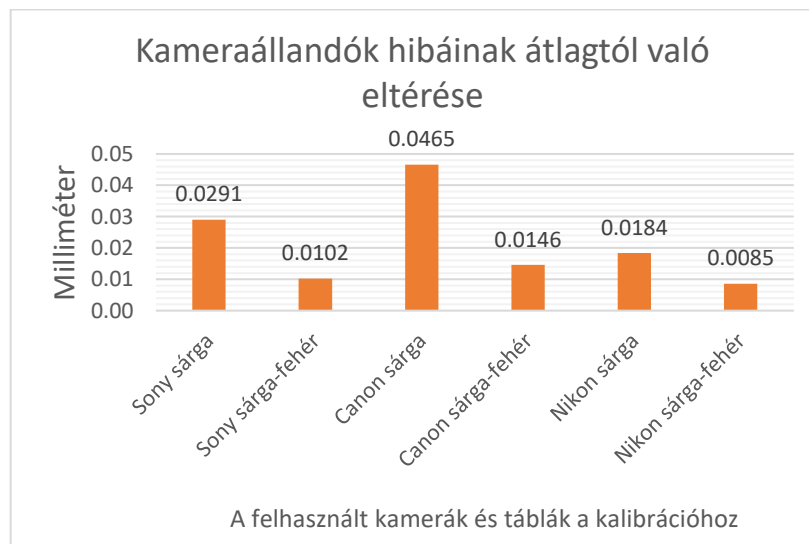
Az 6.4.2 fejezetben arra a következtetésre jutottam, hogy van 3 darab olyan paraméter elrendezés a kamera kalibrációhoz, amelyek mindenhol eltérést mutatnak. Ezek a következők:

- K3-K4-P1-P2: A kalibráció során a harmadik és negyedik rendű radiális torzítási együtthatók (K3-K4), valamint az első és második rendű tangenciális torzítási együtthatók (P1-P2) lettek figyelembe véve.
- K3-K4-P2: A kalibráció során a harmadik és negyedik rendű radiális torzítási együtthatók (K3-K4), valamint a második rendű tangenciális torzítási együttható (P2) lettek figyelembe véve.
- K3-K4-P1: A kalibráció során a harmadik és negyedik rendű radiális torzítási együtthatók (K3-K4), valamint az első rendű tangenciális torzítási együtthatók (P1) lettek figyelembe véve.

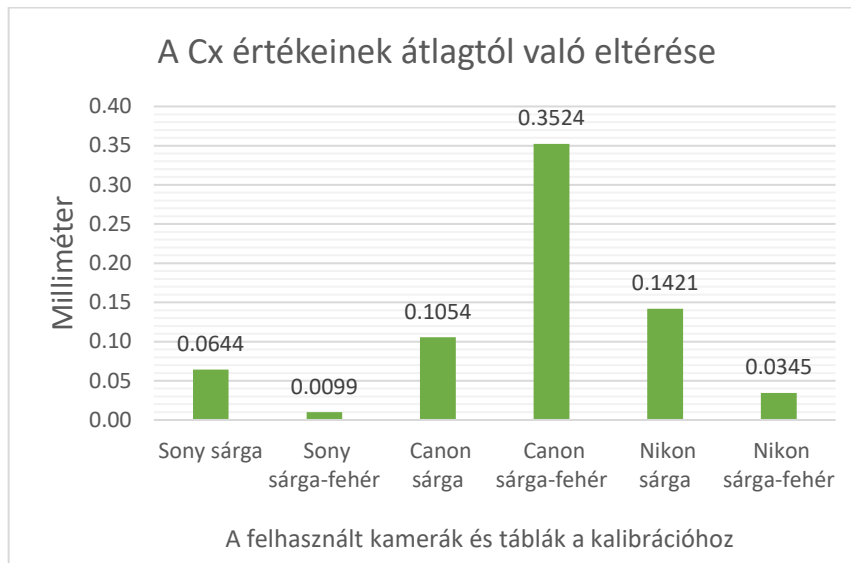
A többi paraméter elrendezést megfelelőnek értékeltem, ott az értékek között kisebb eltérések vannak. Kiszámítottam a megfelelőnek minősített kalibrációs variációk átlagát a kameraállandó értékére és hibájára, a Cx és Cy hibájára. Ezután a fentebb felsorolt, nem megfelelőnek minősített kalibrációs variációk átlagát is kiszámítottam külön a sárga táblára, külön a sárga-fehér táblára. Ez után az átlagtól való eltérésüket is kiszámoltam abszolút értékben és ábrázoltam őket oszlopdiagrammon.



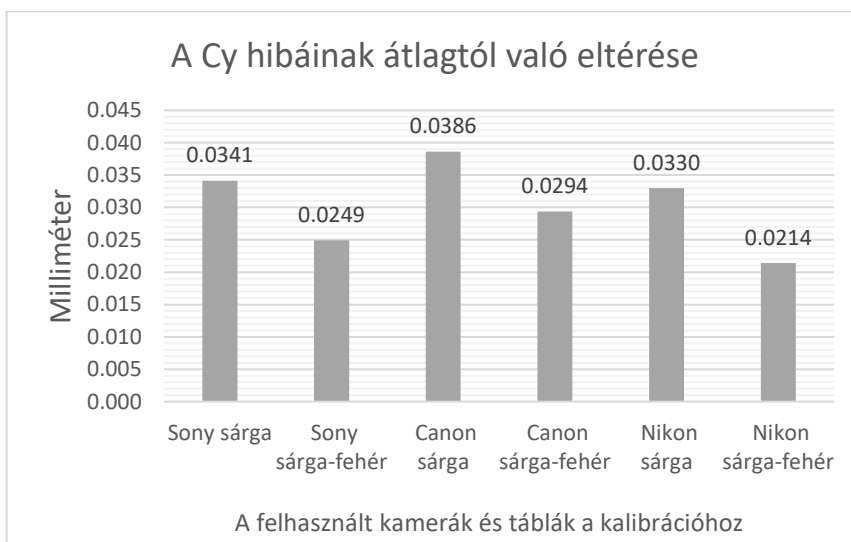
57. ábra: A nem megfelelőnek minősített kalibrációs variációk kameraállandóinak az átlagtól való eltérése



578. ábra: A nem megfelelőnek minősített kalibrációs variációk kameraállandók hibáinak az átlagtól való eltérése



59. ábra: A nem megfelelőnek minősített kalibrációs variációk Cx hibáinak az átlagtól való eltérése



580. ábra: A nem megfelelőnek minősített kalibrációs variációk Cy hibáinak az átlagtól való eltérése

Amint láthatjuk az 57-58-59-60. ábrákon, a kameraállandó értékek hibáinak eltérése, és a többi paraméter hibáinak átlagtól való eltérései ugyanolyan elrendezést mutatnak minden esetben, ezért szabályos hibának tekinthetjük ezeket. Ebben az esetben kizárhatjuk a műszer- és a személyi eredetű hibákat is. A probléma a kalibrációs paraméterekkel van. Megvizsgáltam a korrelációs mátrixokat, és azt tapasztaltam, hogy az alábbi változó mennyiségek között, közel 0 a korrelációs együtthatók értéke: P1-K3, P1-K4, P2-K3, P2-K4. Ez azt jelenti, hogy a két paraméter között nincs korrelációs kapcsolat, ezért ezeket a kalibrációs variációkat hibásnak tekinthetjük.

Összességében a rendelkezésemre álló adatok alapján azt a következtetést tudtam levonni, hogy a Sony kamera a legmegbízhatóbb és legpontosabb, nem messze marad el tőle a Canon kamera sem, a legrosszabb értékeket a Nikon kameránál kaptam eredményül. A Sony kamerát kezdték el a legrégebben gyártani, utána következett a Nikon, és csupán 5 éve van a piacon az általam használt Canon kamera, így kijelenthetjük azt, hogy nem feltétlen függ attól a kamera pontossága, hogy mikor került piacra. Sok tényezőtől függhet egy kamera pontossága és megbízhatósága, például az objektívek- és a szenzorok minőségétől, a képfeldolgozási algoritmusoktól, valamint a szoftveres és hardveres funkcióktól. Mivel három különböző gyártó kameráját használtam fel a kalibrációkhoz, így a fentebb felsorolt tényezők eltérnek egymástól, és fontos az a tény is, hogy a kalibrációk során amatőr kamerákat használtam, nem pedig erre a célra kifejlesztett mérőkamerákat.

8 LEHETSÉGES FELHASZNÁLÁSI TERÜLETEK

Hozok néhány konkrét példát a kamera kalibráció felhasználási területeire. Széles körben alkalmazzák kutatási, szórakoztatóipari, és ipari területeken. Az általam bemutatott kalibráció felhasználható amatőr kamerák, valamint fotogrammetriai mérőkamerák kalibrálására is. Egyre nagyobb teret hódítanak a VR (virtuális valóság) szemüvegek, ahol szintén fontos a térbeli meghatározás céljából a kamera kalibráció. Az orvosi képalkotók, CT, MRI gépek is rendelkeznek kamerákkal a képek rögzítéséhez, a kamera kalibráció segíthet a képek összehangolásában. Természetesen geodéziai és térképészeti felhasználása is lehetséges a kamera kalibrációnak, a távérzékelésben, a földi- és légifotogrammetriában egyaránt. A kamera kalibráció szükséges a 3D szkennelő eszközökön is. A kamera kalibrációt továbbá használható a filmiparban is, a különböző kamerákból származó felvételek összehangolása érdekében.

8 ÖSSZEFOGLALÓ

Az alábbiakban összefoglalom a szakdolgozatom tartalmát magyarul és angol nyelven,

8.1 Magyar nyelvű összefoglaló

Egyetemi tanulmányaim során sok érdekes témával találkoztam, de a fotogrammetria tárgy különösen megragadta az érdeklődésem. A kamera kalibráció a fotogrammetria egy fontos témája, a felvételek elkészítéséhez elengedhetetlen a megfelelően kalibrált kamerák használata, hogy a felvételek kiértékelése során minél pontosabb és megbízhatóbb eredményeket kapjunk, ezért szerettem volna ezt a szakdolgozat témát választani.

Az amatőr kamerákkal is egyre jobb képminőséget lehet produkálni, ezért 3 amatőr kamerát használtam fel a felvételek elkészítéséhez. A mérőkamerák természetesen pontosabbak és megbízhatóbbak, de egy jó amatőr kamera költséghatékonyabb lehet.

Első lépésként, már a fotogrammetriai laborban rendelkezésemre álló tesztmező mellett terveztem egy újat, amelynek más paraméterei lettek, mégis illeszkedett a már meglévőhöz. Ezután elkészítettem a tesztmezőmet, majd a fotogrammetriai laborban a felvételek is elkészültek. Mind a 3 kamerával készültek felvételek, a csak általam készült tesztmezőről, valamint az általam készítetttről és a már rendelkezésemre állóról egyben.

A kamerák kalibrálásához az Agisoft Metashape Professional programot használtam. Pontokat helyeztem el a felvételeken a szoftver segítségével, hogy meg tudja határozni a kamera belső tájékozási elemeit. Ezután lehetővé vált, hogy a különböző kalibrációs variációkból kiexportáljam a kalibrációs jegyzőkönyveket.

Az eredmények feldolgozása és kiértékelése két szempontból történt. Elsőként a képekhez tartozó pixel hibákat rögzítettem Excel fájlokban és kiszámítottam a hozzájuk tartozó szórás, megbízhatóság, minimum, maximum és középhiba értékeket. Minden kamerához 2 eredmény született, és ezeket először kameránként összehasonlítottam, majd kiszámítottam a kamerákhoz tartozó átlag értékeket, és utána mind a 3 kamerát összehasonlítottam egymással.

A második kiértékelési módszerem az volt, hogy az Agisoftban különböző kalibrációs variációban létrehozott korrelációs mátrixokból kigyűjtöttem az F-fókusz távolság, és a

főpont koordinátáinak - C_x , C_y értékeit és a hibáit, és ezeket hasonlítottam össze diagrammok által. A hibás kalibrációs variációknál levezettem, hogy milyen hiba állhatott fent, amiért kiugró eredményeket kaptam.

A kalibrációkat jónak tekinthetjük, azonban a csak általam tervezett tesztmező felhasználásával jobb eredményeket kaptam. Összességében az eredmények alapján levonható az a következtetés, hogy a legpontosabb és legmegbízhatóbb kamerának a Sony Alpha DSLR-A350 bizonyult.

8.2 Summary

During my university studies, I encountered many interesting topics, but photogrammetry, in particular, captured my interest. Camera calibration is a crucial aspect of photogrammetry, and using properly calibrated cameras is essential for capturing images. This ensures that during the evaluation of the captured images, we obtain results that are as accurate and reliable as possible. Therefore, I chose this topic for my thesis.

Amateur cameras are increasingly capable of producing higher-quality images, which is why I utilized three amateur cameras for capturing the footage. While professional-grade cameras are, of course, more precise and reliable, a good amateur camera can be more cost-effective.

As a first step, alongside the test field available in the photogrammetry laboratory, I designed a new one with different parameters that still aligned with the existing setup. Subsequently, I created the test field, and the recordings were made in the photogrammetry laboratory. Images were captured with all three cameras, including shots of the test field I personally created, as well as those of the one I designed and the pre-existing one.

For calibrating the cameras, I utilized the Agisoft Metashape Professional program. I placed points on the images with the help of the software to allow it to determine the internal orientation elements of the cameras. Subsequently, it became possible to export calibration reports from various calibration variations.

The processing and evaluation of the results occurred from two perspectives. Firstly, I recorded pixel errors associated with the images in Excel files and calculated their corresponding standard deviation, reliability, minimum, maximum, and mean error values.

Two results were obtained for each camera, and initially, I compared them on a per-camera basis. Subsequently, I calculated average values for each camera and then compared all three cameras with each other.

My second method of evaluation involved extracting the F-focal length, main point coordinates (C_x , C_y), and their errors from correlation matrices created in various calibration variations within Agisoft. I compared these values using diagrams. In cases of erroneous calibration variations, I deduced the potential errors that might have led to the outliers in the results.

The calibrations can be considered good; however, by using only the test field designed by me, I obtained better results. Overall, based on the results, the conclusion can be drawn that the most accurate and reliable camera proved to be the Sony Alpha DSLR-A350.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] V. Balázsik, „Fotogrammetria 1. (FOT-1) jegyzet, A távérzékelés fogalma, a fotogrammetria és a távérzékelés kapcsolata", Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar, Székesfehérvár, 2010.
- [2] L. Dr. Kis Papp, „Építészeti fotogrammetria", Budapest: Műszaki könyvkiadó, 1981.
- [3] I. Gábor és Á. Dr. Horváth, „A haditérképek históriája", Budapest: Zrínyi Katonai Kiadó, 1979.
- [4] T. Dr. habil Jancsó, „Digitális fotogrammetria", Budapest: Óbudai Egyetem, 2017.
- [5] K. Kraus, Photogrammetry, Geometry from Images and Laser Scans, Berlin: Walter de Gruyter, 2004.
- [6] Á. Detrekői, „Kiegyenlítő számítások", Budapest: Tankönyvkiadó, 1991.
- [7] P. Dr. Engler, „Fotogrammetria 16. (FOT-16) jegyzet, Digitális kamerák", Székesfehérvár: Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar, 2010.

- [8] V. Balázsik, „Fotogrammetria 3. (FOT-3) jegyzet, A fotogrammetria optikai és topográfiai alapjai", Székesfehérvár: Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar, 2010.
- [9] T. Luhman, S. Robson , S. Kyle és J. Boehm, Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging, Berlin: De Gruyter, 2014.
- [10] Z. Nyitrai, *Kamera kalibráció laborban - Szakdolgozat*, Székesfehérvár, 2022.
- [11] „Digital Photography Review,” 06 06 2008. [Online]. Available: <https://www.dpreview.com/reviews/sonydslr350>. [Hozzáférés dátuma: 22 11 2023].
- [12] „Digital Photography Review,” 26 02 2018. [Online]. Available: https://www.dpreview.com/products/canon/slrs/canon_eos4000d. [Hozzáférés dátuma: 22 11 2023].
- [13] „Digital Photography Review,” 11 12 2009. [Online]. Available: <https://www.dpreview.com/reviews/nikond3000>. [Hozzáférés dátuma: 22 11 2023].

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: Képkoordináta-rendszer	9
2. ábra: Pixel koordináta-rendszer	9
3. ábra: Kamera koordináta-rendszer	10
4. ábra: Helmert transzformáció síkban	11
5. ábra: Ideális optikai leképezés	14
6. ábra: Elrajzolás	15
7. ábra: A négy félátló radiális elrajzolása.....	16
8. ábra: Belső tájékozási elemek.....	17
9. ábra: Sony Alpha DSLR-A350 fényképezőgép.....	18
10. ábra: Canon EOS 4000D fényképezőgép	18
11. ábra: Nikon D3000 fényképezőgép	18
12. ábra: Kalibráció csillagok alapján, a két koordináta-rendszer közötti kapcsolat.....	22
13. ábra: Tesztmező	26
14. ábra: 'Sárga' és 'fehér' tesztmezők együttesen	27
15. ábra: Sárga tábla.....	27
16. ábra: Képek relatív helyzete	29
17. ábra: A feldolgozás 2. képén látható vonalak	30
18. ábra: Kamera paraméterek beállításai.....	31
19. ábra: Kamera kalibrációs menü	31
20. ábra: Sony szórás értékek	33
21. ábra: Sony megbízhatósági értékek	33
22. ábra: Sony maximum értékek	34
23. ábra: Sony minimum értékek	34
24. ábra: Sony középhiba értékek	34
25. ábra: Canon szórás értékek	35
26. ábra: Canon megbízhatósági értékek	35
27. ábra: Canon minimum értékek.....	36
28. ábra: Canon maximum értékek	36
29. ábra: Canon középhiba értékek.....	36
30. ábra: Nikon szórás értékek.....	37

31. ábra: Nikon megbízhatósági értékek.....	37
32. ábra: Nikon maximum értékek	38
33. ábra: Nikon minimum értékek	38
34. ábra: Nikon középhiba értékek	38
35. ábra: Sony kamerához tartozó kameraállandó értékek	41
36. ábra: Sony kameraállandóhoz tartozó középhibák	42
37. ábra: Sony kamerához tartozó Cx értékek	42
38. ábra: Sony kamerához tartozó Cx értékek középhibái.....	43
39. ábra: Sony kamerához tartozó Cy értékek	44
40. ábra: Sony kamerához tartozó Cy értékek középhibája.....	44
41. ábra: Canon kamerához tartozó kameraállandó értékek	45
42. ábra: Canon kameraállandóhoz tartozó középhibák	46
43. ábra: Canon kamerához tartozó Cx értékek	46
44. ábra: Canon kamerához tartozó Cx értékek középhibája.....	47
45. ábra: Canon kamerához tartozó Cy értékek	47
46. ábra: Canon kamerához tartozó Cy értékek középhibái	48
47. ábra: Nikon kamerához tartozó kameraállandó értékek	48
48. ábra: Nikon kameraállandóhoz tartozó középhibák.....	49
49. ábra: Nikon kamerához tartozó Cx értékek	50
50. ábra: Nikon kamerához tartozó Cx értékek középhibái.....	50
51. ábra: Nikon kamerához tartozó Cy értékek	51
52. ábra: Nikon táblához tartozó Cy értékek középhibái.....	51
54. ábra: Megbízhatósági értékek átlagainak összehasonlítása	52
53. ábra: Szórás érték átlagainak összehasonlítása	52
55. ábra: Középhiba átlagok összehasonlítása	53
56. ábra: A minimum és maximum értékek különbségének átlagai	54
58. ábra: A nem megfelelőnek minősített kalibrációs variációk kameraállandók hibáinak az átlagtól való eltérése.....	56
60. ábra: A nem megfelelőnek minősített kalibrációs variációk Cy hibáinak az átlagtól való eltérése	57

MELLÉKLETEK

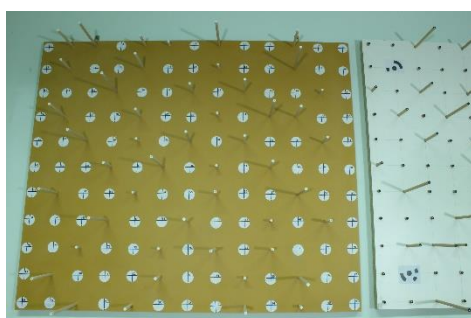
1. melléklet: A Canon EOS 4000D kamerával készült felvételek a sárga tábláról:



IMG_2523



IMG_2525



IMG_2519



IMG_2522

2.melléklet: A Canon EOS 4000D kamerával készült felvételek, a sárga és a fehér tábláról együtt:



IMG_2512



IMG_2513

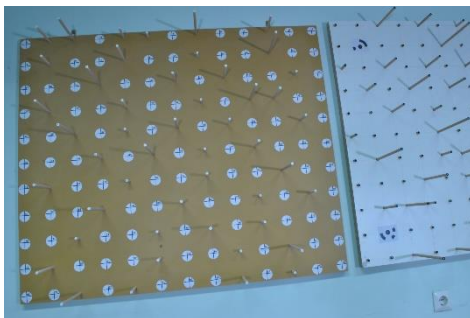


IMG_2518

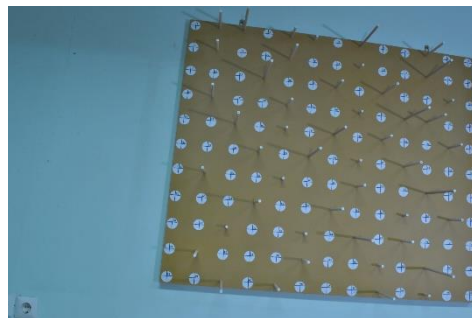


IMG_2516

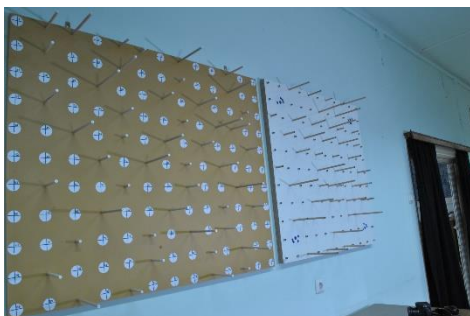
3.melléklet: A Nikon D3000 kamerával készült felvételek a sárga tábláról:



DSC_0034



DSC_0038



DSC_0041



DSC_0042

4. melléklet: A Nikon D3000 kamerával készült felvételek, a sárga és a fehér táblákról együtt:



DSC_0033



DSC_0030



DSC_0031



DSC_0032

5.melléklet: A Sony Alpha DSLR-A350 kamerával készült felvételek a sárga tábláról:



DSC04812



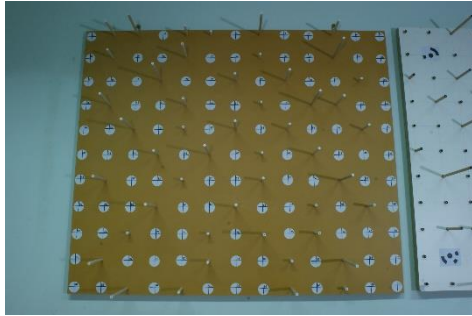
DSC04814



DSC04809



DSC04810



DSC04805

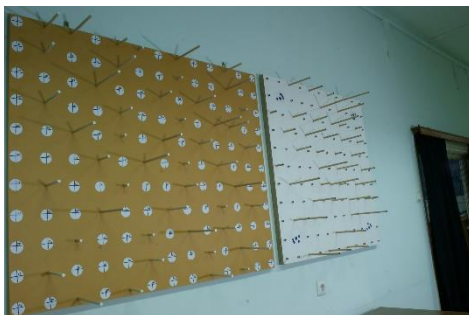
6. melléklet: A Sony Alpha DSLR-A350 kamerával készült felvételek, a sárga és a fehér tábláról együtt:



DSC04793



DSC04794



DSC04803



DSC04799

7. melléklet: A Sony Alpha DSLR-A350 kamerával készült sárga és fehér tábláról együtt készült felvételek alapján végzett kamera kalibrációs jegyzőkönyv:

Agisoft Metashape

Processing Report

21 November 2023

Survey Data



Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	4	Camera stations:	4
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
DSLR-A350 (20mm)	4592 x 3056	20 mm	5.23 x 5.23 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

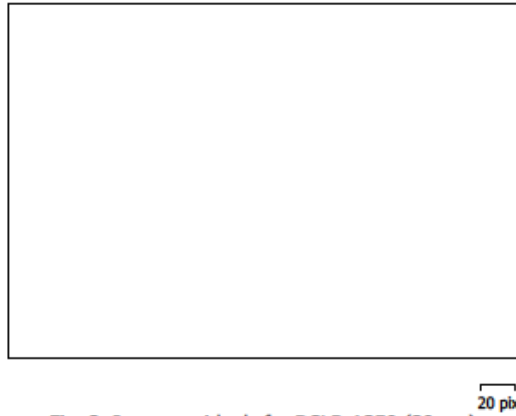


Fig. 2. Image residuals for DSLR-A350 (20mm).

DSLR-A350 (20mm)

4 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	4592 x 3056	20 mm	5.23 x 5.23 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	4021.13	0.41	1.00	0.08	0.15	-0.47	0.40	-0.36	0.33	0.08	-0.12
Cx	-12.7234	2.2		1.00	0.06	-0.02	0.01	-0.00	-0.01	0.96	-0.04
Cy	-28.0559	1.4			1.00	0.05	-0.03	0.03	-0.02	0.05	0.61
K1	-0.120198	0.0014				1.00	-0.96	0.89	-0.84	-0.02	0.07
K2	0.134076	0.012					1.00	-0.98	0.95	0.01	-0.03
K3	-0.119812	0.04						1.00	-0.99	-0.01	0.02
K4	0.0942385	0.045							1.00	0.00	-0.01
P1	0.000133161	0.00011								1.00	-0.03
P2	0.000199787	5e-05									1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points

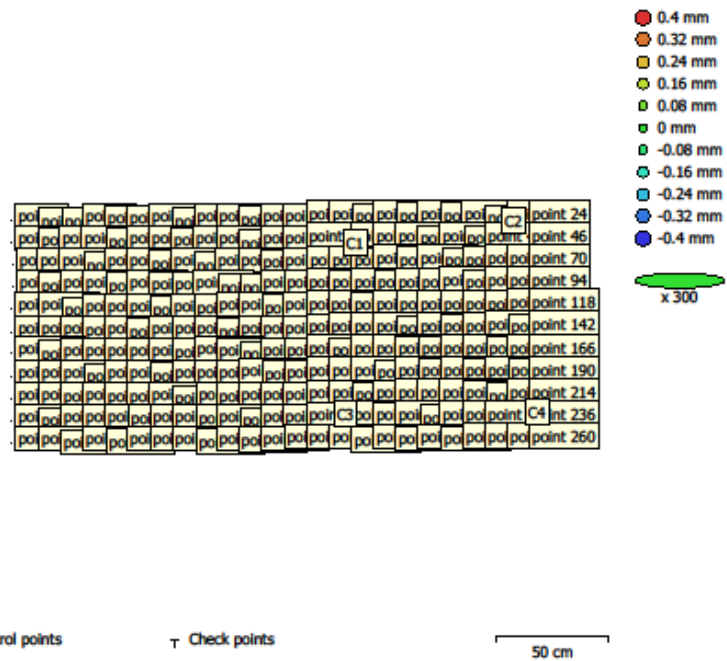


Fig. 3. GCP locations and error estimates.
 Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)
4	0.162228	0.135121	0.215241	0.21113	0.301504

Table 3. Control points RMSE.

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
C1	-0.16531	0.104222	-0.00242502	0.195437	0.125 (4)
C2	0.16739	-0.21106	0.236277	0.358319	0.236 (4)
C3	0.156953	0.130604	0.109061	0.231486	0.090 (4)
C4	-0.159032	-0.0237659	-0.342912	0.378741	0.140 (4)
Total	0.162228	0.135121	0.215241	0.301504	0.158

Table 4. Control points.

8. melléklet: A Sony Alpha DSLR-A350 kamera sárga táblára vonatkozó pixel hibái:

Sony Alpha DSLR-A350 Sárga táblához tartozó pixel hibák													Pixel méret							
Pixel hiba													Pixel hiba µ				Átlagtól való eltérés			
Pontszám	DSC04805	DSC04809	DSC04810	DSC04812	DSC04814	Total	DSC04805	DSC04809	DSC04810	DSC04812	DSC04814	Total	Átlagtól való eltérés	Átlagtól való eltérés abszolút értéke	0.00523	mm =	5.23	µ		
1	0.124	0.091	0.243	0.234	0.089	0.171	0.64852	0.47593	1.27089	1.22382	0.46547	0.89	0.10	0.10	szórás megbízhat min max átlag középpont			0.26		
2	0.185	0.123	0.144	0.267	0.192	0.189	0.96755	0.64329	0.75312	1.39641	1.00416	0.99	0.19	0.19		0.04				
3	0.133	0.116	0.191	0.110	0.023	0.127	0.69559	0.60668	0.99893	0.5753	0.12029	0.66	-0.13	0.13		0.25				
4	0.170	0.128	0.126	0.156	0.063	0.141	0.8891	0.66944	0.65898	0.81588	0.32949	0.74	-0.06	0.06		1.45				
5	0.158	0.236	0.217	0.194	0.059	0.184	0.82634	1.23428	1.13491	1.01462	0.30857	0.96	0.17	0.17		0.80				
6	0.167	0.127	0.166	0.116	0.094	0.137	0.87341	0.66421	0.86818	0.60668	0.49162	0.72	-0.08	0.08						
7	0.059	0.307	0.287	0.202	0.112	0.216	0.30857	1.60561	1.50101	1.05646	0.58576	1.13	0.33	0.33						
8	0.206	0.101	0.078	0.215	0.064	0.148	1.07738	0.52823	0.40794	1.12445	0.33472	0.77	-0.02	0.02						
9	0.278	0.356	0.235	0.271	0.125	0.264	1.45394	1.86188	1.22905	1.41733	0.65375	1.38	0.58	0.58						
10	0.145	0.189	0.123	0.068	0.085	0.130	0.75835	0.98847	0.64329	0.35564	0.44455	0.68	-0.12	0.12						
11	0.095	0.285	0.109	0.377	0.209	0.240	0.49685	1.49055	0.57007	1.97171	1.09307	1.26	0.46	0.46						
12	0.035	0.028	0.073	0.108	0.072	0.069	0.18305	0.14644	0.38179	0.56484	0.37656	0.36	-0.44	0.44						
13	0.183	0.128	0.209	0.048	0.304	0.194	0.95709	0.66944	1.09307	0.25104	1.58992	1.01	0.22	0.22						
14	0.248	0.104	0.311	0.164	0.321	0.245	1.29704	0.54392	1.62653	0.85772	1.67883	1.28	0.48	0.48						
15	0.083	0.078	0.108	0.021	0.129	0.091	0.43409	0.40794	0.56484	0.10983	0.67467	0.48	-0.32	0.32						
16	0.093	0.071	0.213	0.117	0.188	0.147	0.48639	0.37133	1.11399	0.61191	0.98324	0.77	-0.03	0.03						
17	0.084	0.132	0.157	0.084	0.209	0.141	0.43932	0.69036	0.82111	0.43932	1.09307	0.74	-0.06	0.06						
18	0.065	0.093	0.094	0.078	0.155	0.102	0.33995	0.48639	0.49162	0.40794	0.81065	0.53	-0.26	0.26						
19	0.409	0.183	0.302	0.152	0.103	0.255	2.13907	0.95709	1.57946	0.79496	0.53869	1.33	0.54	0.54						
20	0.191	0.050	0.047	0.078	0.136	0.115	0.99893	0.2615	0.24581	0.40794	0.71128	0.60	-0.20	0.20						
21	0.180	0.286	0.304	0.160	0.086	0.219	0.9414	1.49578	1.58992	0.8368	0.44978	1.17	0.35	0.35						
22	0.183	0.057	0.235	0.183	0.020	0.159	0.95709	0.29811	1.22905	0.95709	0.1046	0.83	0.03	0.03						
23	0.045	0.159	0.091	0.121	0.203	0.135	0.23535	0.83157	0.47593	0.63283	1.06169	0.71	-0.09	0.09						
24	0.246	0.241	0.211	0.052	0.236	0.211	1.28658	1.26043	1.10353	0.27196	1.23428	1.10	0.31	0.31						
25	0.154	0.141	0.172	0.021	0.090	0.128	0.80542	0.73743	0.89956	0.10983	0.4707	0.67	-0.13	0.13						
26	0.123	0.285	0.132	0.086	0.123	0.165	0.64329	1.49055	0.69036	0.44978	0.64329	0.86	0.07	0.07						
27	0.097	0.316	0.234	0.144	0.097	0.197	0.50731	1.65268	1.22382	0.75312	0.50731	1.03	0.23	0.23						
28	0.200	0.192	0.062	0.115	0.046	0.138	1.046	1.00416	0.32426	0.60145	0.24058	0.72	-0.08	0.08						
29	0.159	0.064	0.153	0.234	0.091	0.152	0.83157	0.33472	0.80019	1.22382	0.47593	0.79	0.00	0.00						
30	0.145	0.123	0.284	0.080	0.063	0.160	0.75835	0.64329	1.48532	0.4184	0.32949	0.84	0.04	0.04						
31	0.048	0.321	0.135	0.222	0.090	0.190	0.25104	1.67883	0.70605	1.16106	0.4707	0.99	0.20	0.20						
32	0.131	0.090	0.048	0.060	0.082	0.087	0.68513	0.4707	0.25104	0.3138	0.42886	0.46	-0.34	0.34						
33	0.117	0.282	0.208	0.155	0.108	0.186	0.61191	1.47486	1.08784	0.81065	0.56484	0.97	0.18	0.18						
34	0.106	0.052	0.226	0.193	0.192	0.167	0.55438	0.27196	1.18198	1.00939	1.00416	0.87	0.08	0.08						
35	0.166	0.102	0.123	0.029	0.012	0.104	0.86818	0.53346	0.64329	0.15167	0.06276	0.54	-0.25	0.25						
36	0.078	0.110	0.270	0.195	0.105	0.167	0.40794	0.5753	1.4121	1.01985	0.54915	0.87	0.08	0.08						
37	0.032	0.145	0.146	0.263	0.002	0.150	0.16736	0.75835	0.76358	1.37549	0.01046	0.78	-0.01	0.01						
38	0.190	0.141	0.116	0.066	0.127	0.134	0.9937	0.73743	0.60668	0.34518	0.66421	0.70	-0.10	0.10						
39	0.170	0.166	0.150	0.193	0.138	0.164	0.8891	0.86818	0.7845	1.00939	0.72174	0.86	0.06	0.06						
40	0.050	0.346	0.193	0.215	0.208	0.223	0.2615	1.80958	1.00939	1.12445	1.08784	1.17	0.37	0.37						
41	0.205	0.225	0.350	0.131	0.207	0.235	1.07215	1.17675	1.8305	0.68513	1.08261	1.23	0.43	0.43						
42	0.163	0.175	0.301	0.107	0.086	0.183	0.85249	0.91525	1.57423	0.55961	0.44978	0.96	0.16	0.16						
43	0.143	0.090	0.206	0.101	0.080	0.132	0.74789	0.4707	1.07738	0.52823	0.4184	0.69	-0.11	0.11						
44	0.064	0.092	0.076	0.129	0.096	0.094	0.33472	0.48116	0.39748	0.67467	0.50208	0.49	-0.31	0.31						
45	0.416	0.117	0.135	0.247	0.057	0.233	2.17568	0.61191	1.22382	1.39181	0.39813	1.22	0.42	0.42						
46	0.218	0.256	0.146	0.080	0.056	0.170	1.14014	1.33885	0.76358	0.4184	0.29288	0.89	0.09	0.09						
47	0.151	0.119	0.060	0.073	0.078	0.102	0.78973	0.62237	0.3138	0.38179	0.40794	0.53	-0.26	0.26						
48	0.086	0.151	0.035	0.058	0.058	0.087	0.44978	0.78973	0.18305	0.30334	0.30334	0.46	-0.34	0.34						
49	0.019	0.151	0.014	0.141	0.060	0.097	0.09937	0.78973	0.07322	0.73743	0.3138	0.51	-0.29	0.29						
50	0.134	0.171	0.224	0.123	0.107	0.157	0.70082	0.89433	1.17152	0.64329	0.55961	0.82	0.02	0.02						
51	0.210	0.088	0.149	0.267	0.165	0.186	1.0983	0.46024	0.77927	1.39641	0.86295	0.97	0.18	0.18						
52	0.281	0.120	0.157	0.053	0.219	0.184	1.46963	0.6276	0.82111	0.27719	1.14537	0.96	0.17	0.17						
53	0.160	0.067	0.074	0.238	0.096	0.143	0.8368	0.35041	0.38702	1.24474	0.50208	0.75	-0.05	0.05						
54	0.179	0.078	0.168	0.281	0.104	0.177	0.93617	0.40794	0.87864	1.46963	0.54392	0.93	0.13	0.13						
55	0.140	0.060	0.277	0.247	0.033	0.180	0.7322	0.3138	1.44871	1.29181	0.17259	0.94	0.14	0.14						
56	0.075	0.086	0.364	0.157	0.063	0.187	0.39225	0.44978	1.90372	0.82111	0.32949	0.98	0.18	0.18						
57	0.130	0.077	0.059	0.074	0.171	0.110	0.6799	0.40721	0.30857	0.38702	0.89433	0.58	-0.22	0.22						
58	0.245	0.118	0.076	0.195	0.032	0.154	1.28135	0.61714	0.39748	1.01985	0.16736	0.81	0.01	0.01						
59	0.104	0.085	0.146	0.082	0.070	0.101	0.54392	0.44455	0.76358	0.42886	0.3661	0.53	-0.27	0.27						
60	0.086	0.350	0.334	0.049	0.131	0.229	0.44978	1.8305	1.74682	0.25627	0.68513	1.20	0.40	0.40						
61	0.242	0.210	0.015	0.287	0.179	0.208	1.26566	1.0983	0.07845	1.50101	0.93617	1.09	0.29	0.29						
62	0.229	0.355	0.274	0.111	0.151	0.214	1.19767	1.33365	1.43302	0.58053	0.78973	1.12	0.32	0.32						
63	0.038	0.025	0.206	0.168	0.091	0.127	0.19874	0.13075	1.07738	0.87864	0.47593	0.66	-0.13	0.13						
64	0.267	0.196	0.166	0.123	0.231	0.203	1.39641	1.02508	0.86818	0.64329	1.20813	1.06	0.26	0.26						
65	0.139	0.088	0.016	0.070																

90	0.111	0.020	0.120	0.064	0.057	0.083	0.58053	0.1046	0.6276	0.33472	0.29811	0.43	-0.36	0.36
91	0.225	0.070	0.165	0.058	0.066	0.134	1.17675	0.3661	0.86295	0.30334	0.34518	0.70	-0.10	0.10
92	0.328	0.203	0.037	0.066	0.333	0.230	1.71544	1.06169	0.19351	0.34518	1.74159	1.20	0.41	0.41
93	0.188	0.157	0.131	0.185	0.235	0.183	0.98324	0.82111	0.68513	0.96755	1.22905	0.96	0.16	0.16
94	0.094	0.098	-	0.035	0.057	0.076	0.49162	0.51254	-	0.18305	0.29811	0.40	-0.40	0.40
95	0.056	0.062	0.119	0.136	0.123	0.105	0.29288	0.32426	0.62237	0.71128	0.64329	0.55	-0.25	0.25
96	0.115	0.082	0.031	0.020	0.228	0.121	0.60145	0.42886	0.16213	0.1046	1.19244	0.63	-0.16	0.16
97	0.134	0.126	0.152	0.127	0.069	0.125	0.70082	0.65898	0.79496	0.66421	0.36087	0.65	-0.14	0.14
98	0.125	0.081	0.046	0.234	0.090	0.132	0.65375	0.42363	0.24058	1.22382	0.4707	0.69	-0.11	0.11
99	0.141	0.238	0.083	0.124	0.197	0.166	0.73743	1.24474	0.43409	0.64852	1.03031	0.87	0.07	0.07
100	0.191	0.103	0.006	0.045	0.329	0.178	0.99893	0.53869	0.03138	0.23535	1.72067	0.93	0.13	0.13
101	0.156	0.179	0.090	0.148	0.057	0.134	0.81588	0.93617	0.4707	0.77404	0.29811	0.70	-0.10	0.10
102	0.228	0.193	0.127	0.058	0.074	0.151	1.19244	1.00939	0.66421	0.30334	0.38702	0.79	-0.01	0.01
103	0.074	0.077	0.064	0.125	0.174	0.111	0.38702	0.40271	0.33472	0.65375	0.91002	0.58	-0.22	0.22
104	0.032	0.043	0.041	0.100	0.066	0.062	0.16736	0.23489	0.21443	0.523	0.34518	0.32	-0.47	0.47
105	0.176	0.243	0.067	0.110	0.017	0.146	0.92048	1.27089	0.35041	0.5753	0.08891	0.76	-0.03	0.03
106	0.147	0.128	0.114	0.138	0.089	0.125	0.76881	0.66944	0.59622	0.72174	0.46547	0.65	-0.14	0.14
107	0.175	0.077	0.125	0.064	0.036	0.107	0.91525	0.40271	0.65375	0.33472	0.18828	0.56	-0.24	0.24
108	0.146	0.188	0.092	0.041	0.161	0.136	0.76358	0.98324	0.48116	0.21443	0.84203	0.71	-0.09	0.09
109	0.418	0.220	0.195	0.095	0.026	0.233	2.18614	1.1506	1.01985	0.49685	0.13598	1.22	0.42	0.42
110	0.090	0.072	0.170	0.140	0.135	0.127	0.4707	0.37656	0.8891	0.7322	0.70605	0.66	-0.13	0.13
111	0.081	0.071	-	0.025	0.037	0.058	0.42363	0.37133	-	0.13075	0.19351	0.30	-0.49	0.49
112	0.360	0.199	0.234	0.123	0.249	0.245	1.8828	1.04077	1.22382	0.64329	1.30227	1.28	0.48	0.48
113	0.028	-	0.058	0.031	0.082	0.054	0.14644	-	0.30334	0.16213	0.42886	0.28	-0.51	0.51
114	0.092	0.037	0.129	0.102	0.102	0.097	0.48116	0.19351	0.67467	0.53346	0.53346	0.51	-0.29	0.29
115	0.045	0.097	0.149	0.271	0.161	0.163	0.23535	0.50731	0.77927	1.41733	0.84203	0.85	0.06	0.06
116	0.188	0.115	0.060	0.054	0.073	0.110	0.98324	0.60145	0.3138	0.28242	0.38179	0.58	-0.22	0.22
117	0.223	0.199	0.089	0.090	0.088	0.150	1.16629	1.04077	0.46547	0.4707	0.46024	0.78	-0.01	0.01
118	0.159	0.267	0.077	0.030	0.220	0.174	0.83157	1.39641	0.40271	0.1569	1.1506	0.91	0.11	0.11
119	0.078	0.021	0.261	0.360	0.127	0.210	0.40794	0.10983	1.36503	1.8828	0.66421	1.10	0.30	0.30
120	0.028	0.142	0.236	0.284	0.252	0.210	0.14644	0.74266	1.23428	1.48532	1.31796	1.10	0.30	0.30
121	0.073	0.212	0.200	0.016	0.038	0.136	0.38179	1.10876	1.046	0.08368	0.19874	0.71	-0.09	0.09
122	0.321	0.320	0.185	0.015	0.045	0.220	1.67882	1.6736	0.96755	0.07845	0.23535	1.15	0.35	0.35
123	0.077	0.043	0.083	0.077	0.125	0.085	0.40271	0.22489	0.43409	0.40271	0.65375	0.44	-0.35	0.35
124	0.199	0.084	0.111	0.199	0.043	0.142	1.04077	0.43932	0.58053	1.04077	0.22489	0.74	-0.05	0.05
125	0.083	0.201	0.076	0.061	0.038	0.108	0.43409	1.05123	0.39748	0.31903	0.19874	0.56	-0.23	0.23
126	0.190	0.076	0.471	0.337	0.094	0.278	0.9937	0.39748	2.46333	1.76251	0.49162	1.45	0.66	0.66
127	0.124	0.064	0.046	0.043	0.050	0.072	0.64852	0.33472	0.24058	0.22489	0.2615	0.38	-0.42	0.42
128	0.171	0.091	0.219	0.111	0.165	0.158	0.89433	0.47593	1.14537	0.58053	0.86295	0.83	0.03	0.03
129	0.168	0.144	0.044	0.055	0.080	0.110	0.87864	0.75312	0.23012	0.28765	0.4184	0.58	-0.22	0.22
130	0.176	0.031	0.126	0.089	0.108	0.116	0.92048	0.16213	0.65898	0.46547	0.56484	0.61	-0.19	0.19
131	0.041	0.072	0.056	0.051	0.052	0.056	0.21443	0.37656	0.29288	0.26673	0.27196	0.29	-0.50	0.50
132	0.165	0.212	0.350	0.133	0.048	0.207	0.86295	1.10876	1.8305	0.69559	0.25104	1.08	0.29	0.29
133	0.098	0.159	0.147	0.095	0.218	0.150	0.51254	0.83157	0.76881	0.49685	1.14014	0.78	-0.01	0.01
134	0.153	0.227	0.279	0.284	0.039	0.217	0.80019	1.18721	1.45917	1.48532	0.20397	1.13	0.34	0.34
135	0.103	0.135	0.451	0.203	0.070	0.236	0.53869	0.70605	2.35873	1.06169	0.3661	1.23	0.44	0.44
136	0.181	0.143	0.180	0.027	0.043	0.133	0.94662	0.74789	0.9414	0.14121	0.22489	0.70	-0.10	0.10

137	0.120	0.107	0.265	0.034	0.047	0.141	0.6276	0.55961	1.38595	0.17782	0.24581	0.74	-0.06	0.06
138	0.037	0.099	0.037	0.096	0.049	0.070	0.19351	0.51777	0.19351	0.50208	0.25627	0.37	-0.43	0.43
139	0.163	0.081	0.394	0.108	0.120	0.207	0.85249	0.42363	2.06062	0.56484	0.6276	1.08	0.29	0.29
140	0.141	0.203	0.132	0.235	0.063	0.166	0.73743	1.06169	0.69036	1.22905	0.32949	0.87	0.07	0.07
141	0.266	0.164	0.193	0.033	0.276	0.206	1.39118	0.85772	1.00939	0.17259	1.44348	1.08	0.28	0.28
142	0.208	0.281	0.091	0.159	0.098	0.182	1.08784	1.46963	0.47593	0.83157	0.51254	0.95	0.15	0.15
143	0.244	0.219	0.163	0.091	0.115	0.177	1.27612	1.14537	0.85249	0.47593	0.60145	0.93	0.13	0.13