

**TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT
(OTDK)**

**ORTOFOTÓ ELŐÁLLÍTÁSA ARCHÍV
LÉGIFELVÉTELEKBŐL, NYÍLT FORRÁSKÓDÚ
SZOFTVEREK SEGÍTSÉGÉVEL**

Szerző(k):	Lengyel Ágoston Óbudai Egyetem, Alba Regia Műszaki Kar Földmérő- és földrendező mérnök szak, BSc
Konzulens(ek):	Dr. habil. Molnár Gábor Péter egyetemi docens Óbudai Egyetem, Alba Regia Műszaki Kar

Tartalom

Tartalom	2
1. Bevezetés.....	1
1.1 A választott téma.....	1
1.2 Az ortofotó	1
1.3 Az archív légifotók ortorektifikálásának problémái.....	2
2. Felhasznált adatok	3
2.1 A légifelvétel	3
2.1.1 A fentrol.hu weboldalon elérhető archív légifelvételek tulajdonságai.....	3
2.1.2 Az általam használt felvétel	3
2.2 Kamera kalibrációs jegyzőkönyv	4
2.3 Törzslap	5
2.4 digitális magasságmodell	6
2.5 Alaptérképként használt ortofotók	7
3. Módszerek	8
3.1 A használt szoftverek	8
3.1.1 GNU octave.....	8
3.1.2 Geospatial Data Abstraction Library (GDAL).....	8
3.1.3 Quantum GIS (QGIS).....	8
3.2 Illesztőpontok	9
3.2.1 Az illesztőpontok rögzítése QGIS szoftverben	9
3.2.2 Az illesztőpontok geodéziai koordinátáinak meghatározása	9
3.2.3 A használt illesztőpontok	10
3.2. Transzformáció a pixel- és a képkordináta-rendszer közt.....	11
3.3. A sugárnyaláb-kiegyenlítés	12
3.4. Az RPC-szabvány	13

3.5.	Lokális koordináta-transzformáció EOVS- és WGS84 rendszer között	15
3.6.	A transzformációs paraméterek behelyettesítése az RPC-együtthatókba	16
3.7.	az RPC-kameramodell paramétereinek beillesztése a kép metaadatai közé	18
3.8.	Újramintavételezés WGS84 rendszerbe	19
3.9.	A légifelvétel ortorektifikálása	19
4.	Eredmények.....	20
4.1.	A módszer pontosságának vizsgálata	20
5.	Diszkusszió.....	23
5.1.	A kapott eredmények értékelése	23
6.	Köszönetnyilvánítás	24
7.	Idézett forrásmunkák	25
8.	Ábrajegyzék	26
1.	Melléklet.....	27

1. Bevezetés

1.1 A választott téma

Az elmúlt évtizedek különböző topográfiai, katonai, ipari célú légifényképes felmérése során hatalmas mennyiségű felvétel gyűlt össze, melyek titkosítását a rendszerváltás után feloldották. Szerencsére ma már ezek egyre nagyobb hányada érhető el digitalizált formában, ezzel nagy segítséget nyújtva kutatóknak, helytörténettel foglalkozóknak, vagy mindazoknak, akik szeretnének megismerkedni lakóhelyük múltjával. Mivel mindig is vonzott a történelem, így számomra is különleges élmény volt, amikor ezeknek a képeknek a segítségével először pillanthattam be saját szülővárosom ötven évvel ezelőtti világába. Így természetesen szívesen választottam dolgozatom témájának ezeknek a felvételeknek a fotogrammetriai feldolgozását.

1.2 Az ortofotó

Az előbb említett légifelvételek torzulásoktól terheltek, ezeket a következő csoportokba lehet osztani:

- perspektív torzulás, melynek oka, hogy a kameratengely nem pontosan függőleges helyzetű
- domborzat okozta torzulás: a fényképezett terület magasságkülönbségei azt eredményezik, hogy a kép méretaránya nem lesz minden pontban azonos.
- A kamera belső torzulásai: a kamera lencserendszere által okozott radiális, tangenciális, illetve a digitális szenzorok affin torzulása.

Mindezek együttesen azt eredményezik, hogy ezeket a felvételeket nem lehet közvetlenül beilleszteni valamely vetületi rendszerbe. A megoldás ortofotók előállítás, amelyek már mentesek ezektől a torzulásoktól.

Az ortofotók olyan raszteres légifelvételek, melyeket mentesek az előbb felsorolt torzulásoktól. Ezeket olyan módon állíthatjuk elő, hogy a merőleges vetítés szabályait alkalmazva valamely alapfelületre vetítjük a képet, és újrarmintavételezzük egy adott terepi koordinátarendszerbe. Az így átranzformált kép már alkalmas lesz arra, hogy méréseket végezzünk rajta. (Molnár & Timár, 2013)

1.3 Az archív légifotók ortorektifikálásának problémái

A fentrol.hu honlapon elérhető archív felvételek nincsenek szabatosan georeferálva, csupán a képközéppontok vannak a repülési terv alapján közelítőleg a helyükre illesztve. A képek pontosabb georeferálását az oldal felhasználói végezhetik el. A leképezési geometria pontos helyreállítására ekkor sincs lehetőség, a kép pozíciójának javítása affín transzformációval lehetséges, ehhez három referenciapontot kell megjelölni, illetve lehet a képet manuálisan eltolni és forgatni is. (Légifelvételek georeferálása, 2023) Azonban a fenti módszerek, amellet, hogy nem biztosítanak lehetőséget kellő számú fölös mérésre, csak a nyers kép helyreállítására alkalmasak, a felvételek ortokorrigálására nincs lehetőség. Ez azt jelenti, hogy a domborzatból eredő torzulást a legkörültekintőbb helyreigazítás esetén sem tudjuk kiküszöbölni. Ez az esetek nagy részében azt jelenti, hogy az illeszkedés a kép bizonyos részein csak több méteres hibával valósul meg.

Természetesen lehetséges lenne az ortofotó előállítására speciális fotogrammetriai szoftvereket is használni, ám ezek jelentős áruk miatt csak kevés felhasználó számára érhetőek el. Dolgozatomban azt vizsgálom, hogy milyen pontossággal végezhető el ortofotók előállítása a numerikus számítások elvégzésére alkalmas Octave, és a különböző térinformatikai műveletek számítására szolgáló GDAL-függvénykönyvtár parancsai segítségével.

2. Felhasznált adatok

2.1 A légifelvétel

2.1.1 A fentrol.hu weboldalon elérhető archív légifelvételek tulajdonságai

Magyarországon az 1959 óta készült légifelvételek digitalizálását a Lechner Tudásközpont végzi. Ehhez a jelenleg mintegy 160 ezer felvételhez a Digitális Légifelvétel Archívum nyújt hozzáférést a fentrol.hu weboldalon keresztül. (Légifelvételek georeferálása, 2023) Itt lehetőség van böngészni a képek között terület, készítési idő, és egyéb paraméterek alapján. A képeket regisztráció után ingyenesen lehet letölteni az oldalról.

A felvételek kalibrált mérőkamerával készültek, ez azt jelenti, hogy a külső és belső tájékozási paraméterek szabatosan meghatározhatók. A képek 14μ-os pixelmérettel (azaz 1814 dpi felbontással) lettek digitalizálva. (Felbontás, adattartalom, 2023) A képek *.tif formátumban elérhetők. Minden képhez tartozik egy *.tfw kiterjesztésű ún. worldfile, mely a georeferált kép helyzetét írja le az EOVS-koordinátarendszerben.

2.1.2 Az általam használt felvétel

A kutatáshoz felhasznált kép 1976. április 11-én készült Gyöngyös város belterületéről. A kép még a lombtalan időszakban készült, ez nagy segítséget jelentett az illesztőpontok azonosításakor. A kép szürkeárnyaltos volt, Wild RC-8 mérőkamerával, 230×230 mm-es filmre készült. A kép készítésekor az abszolút repülési magasság hozzávetőlegesen 990m volt. A kép közelítő méretaránya az alábbi képlettel számolható: (Jancsó, 2017)

$$M = \frac{h}{c_k} \approx 5317 \quad (2.1)$$

ahol h a relatív repülési magasság, c_k pedig a kameraállandó.

A kép terepi felbontása az

$$f = m \cdot M \quad (2.2)$$

képlettel számítható. Itt f a terepi felbontás, m a pixelméret, M pedig a méretarány. Ezek alapján

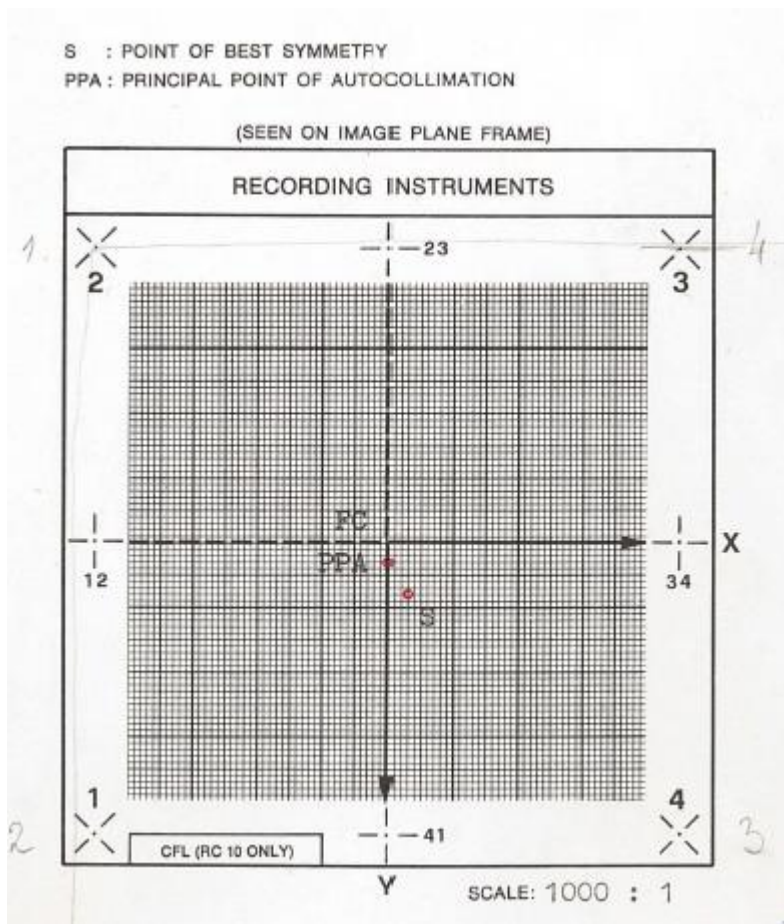
f értéke 7.4 cm-nek adódott.



1. ábra: A nyers légifelvétel

2.2 Kamera kalibrációs jegyzőkönyv

A fentol.hu honlapon a képekhez rendelve megtalálható az azokat készítő kamera kalibrációs jegyzőkönyve. Ebben szerepel az adott kamera típusa és belső tájékozási paraméterei. Számomra ezek közül a kameraállandó, a főpont és a keretjelek képkoordinátái voltak szükségesek.



2. ábra: A kamera különböző belső tájékozási elemeinek ábrázolása a kalibrálási jegyzőkönyvben. 1-4-ig számozva a keretjelek, X,Y-nal jelölve a kép-koordinátarendszer tengelyei. Figyelni kellett arra, hogy a jegyzőkönyvben Y tengely iránya a másol megszokottakhoz képest fordított. Az ábrán a PPA jelöli a képfőpontot (principal point of autocollimation), S a szimmetriafőpontot. Ezek koordinátái a jegyzőkönyvben numerikusan is meg voltak adva.

2.3 Törzslap

Az adott repülés során készült képek számos adatát tartalmazza, többek közt a képek egymáshoz képesti elfordulását, a hosszfedés mértékét, a film tulajdonságait és meteorológiai adatokat. Ebből a dokumentumból nekem a kamera abszolút magassága volt fontos (az általam feldolgozott képre vonatkozóan), melyet később a sugárnyaláb-kiegyenlítés során előzetes értéként használtam.

Nr.	Öf. m-ben	Magasság m-ben	Ellenőrzés (%)	Filmre- görvös ±0,1 mm m-ben	Magasság	Nr.	Öf. m-ben	Magasság m-ben	Ellenőrzés (%)	Filmre- görvös ±0,1 mm m-ben	Magasság
1.	9027	-	-	-	Habs. = 1000 ± 9	9113	-	-	-	-	-
	28	-60	58	+1	0		14	+160	58	-4	-40
	32	-100	57	0	0		17	+110	51	-6	-40
	34	-170	58	+2	-10		22	-60	66	-5	-40
					3'15"		26	-90	67	0	-30
2.	9035	-140	65	+1	-10						2'55"
	40	+10	67	+3	-10	10.	9127	+160	59	-3	-20
	45	+80	62	+3	0		32	+110	56	+9	-10
					3'20"		35	+450	58	+2	0
3.	9046	+110	56	-1	-10						
	51	-80	61	+2	0	10.	9136	+20	62	-2	-40
	55	-190	53	+2	-10		41	+190	52	-2	-40
					2'25"		46	+60	61	-4	-50
4.	9056	+70	59	-2	-10						3'55"
	61	0	64	-3	-10	11.	9147	-40	63	+2	-20
	66	+30	59	+2	+20		49	+40	56	0	-20
	69	+80	58	+1	+40						
					3'10"						

3. ábra: A légifényképnegatívanyag törzslap részlete, benne a repülés során készült képek egyes adataival. Ebből nyerhető a vetítési középpont előzetes magasságértéke.

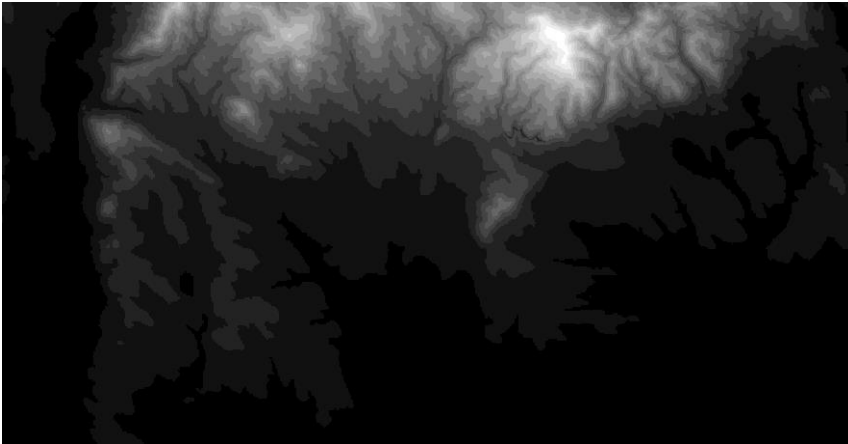
2.4 digitális magasságmodell

Az ortofotó előállításához szükségem volt a felvételen ábrázolt terület digitális magasságmodelljére. Ehhez konzulensemtől megkaptam a DDM-10 elnevezésű modellt. Ennek készítéséhez az 1:50 000 méretarányú Gauss-Krüger vetületű katonai topográfiai térképeket használták, a magasságértékeket a szintvonalainak digitalizálásával, és ezek közti interpolációval nyerték. Ennek következtében a topográfiai terepfelszint ábrázolja, tehát terepmodellnek tekinthető. A magassági adatok 10×10 m-es terepi felbontású, szabályos négyzethálós alakú rácsban helyezkednek el. A modell vetülete az EOV, a balti alapszintfelületet használja, a magassági értékeket méter élességgel tartalmazza. Pontosságára a terepfelszín jellegétől függően több hibahatár van megadva, számomra – a feldolgozott kép elhelyezkedése miatt – a dombvidékre megadott értékek voltak mérvadók:

- Átlagos hiba: $< \pm 2,5$ m
- Max. hiba a pontok 90%-nál: $< \pm 5,0$ m
- Max. megengedett hiba: $< \pm 7,5$ m

(Siristye & Zboray, 2004)

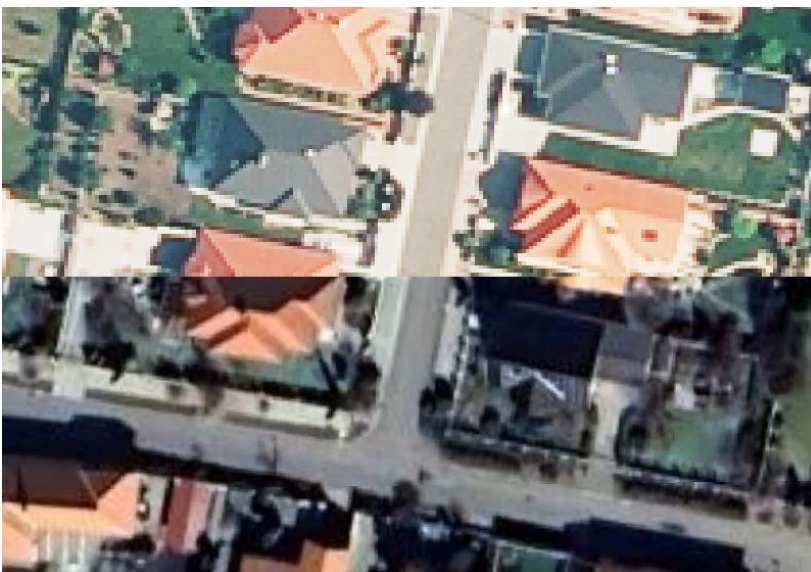
A modellt egy *.bil kiterjesztésű képfájl tartalmazza, melyhez egy, a georeferenciát és a metaadatokat tartalmazó *.hdr formátumú fájl tartozik. Egy magassági értéket a fájl 2 bájtján tárol.



4. ábra: A DDM-10 domborzatmodell általam használt kivágata szürkeárnyaltos képként ábrázolva

2.5 Alaptérképként használt ortofotók

Erre a célra két különböző adatforrást használtam: a Google Maps legfrisebb (2023-as) műholdképét, illetve a Lechner Tudásközpont által közzétett ortofotót. A Google űrfelvételei szabadon elérhetők, az állami megrendelésre készült ortofotók pedig elkészültük után 10 évvel válnak ingyenesen hozzáférhetővé. (Mivel az egyes országrészek légifényképezése három évente valósul meg, ezért az általam vizsgált területen a legfrisebb elérhető felvétel a 2010-es volt.) Ez utóbbi egy regisztráció után tölthető le a www.geoshop.hu weboldalról, *.tif formátumban, a georeferenciát tartalmazó world-fájllal együtt.



5. ábra: A kép tetején a 2010-es ortofotó, alján a 2023-as Google műholdkép részlete. A kivágaton jól megfigyelhető a két adatforrás közt helyenként fellépő gyenge minőségű illeszkedés.

3. Módszerek

3.1 A használt szoftverek

3.1.1 GNU octave

A GNU Octave egy elsősorban numerikus számításokra használható magas szintű programozási nyelv. A szoftver különösen is alkalmas mátrixműveletek elvégzésére, továbbá képes az eredményeket két- és háromdimenziós ábrák formájában megjeleníteni. Szabad szoftver, mely futtatható Microsoft Windows, Linux, MacOS és más operációs rendszerekkel. A használt parancsok nagy része kompatibilis a Matlab utasításokkal. (GNU Octave - about, 2023)

3.1.2 Geospatial Data Abstraction Library (GDAL)

Ez egy raszteres és vektoros adatok kezelésére szolgáló függvénykönyvtár, mely szintén nyílt forráskódú és szabadon hozzáférhető. Az egyes utasítások a parancssorból futtathatók. (a GDAL webhelye, 2023) Ezt használtam az ortofotó előállítására, valamint koordináta-transzformációra az EOVS és a WGS84 rendszer között.

3.1.3 Quantum GIS (QGIS)

A Quantum GIS egy ingyenes és nyílt forráskódú térinformatikai alkalmazás, melyet egy önkéntesekből álló közösség fejleszt. A szoftver alkalmas különböző formátumú raszteres és vektoros adat és adatbázis megjelenítésére, kezelésére, szerkesztésére és elemzések végzésére. Kutatásomban az alaptérképként használt ortofotó és a nyers légifelvétel megjelenítésére, az illesztőpontok és a keretjelek koordinátáinak mérésére, valamint az eredményül kapott ortofotó megjelenítésére és pontosságának vizsgálatára használtam. (a QGIS webhelye, 2023)

3.2 Illesztőpontok

3.2.1 Az illesztőpontok rögzítése QGIS szoftverben

A külső tájékozási paraméterek meghatározásához illesztőpontokra van szükségünk. Ezek olyan pontok, melynek azonosíthatók a képen, és terepi koordinátáik is ismertek.

Az illesztőpontok pixel- illetve terepi koordinátáinak rögzítésére a QGIS georeferáló funkcióját használtam. Ennek segítségével elvégezhető különböző vektoros és raszteres adatok georeferálása, melyhez különböző transzformációs típusok (lineáris, affín, magasabb fokú, vékonylevezes spline) közül lehet választani. (a QGIS webhelye, 2023) Sajnálatos módon a szabatos kollineár egyenletek alapján történő transzformációra nincs lehetőség, emiatt ezt a funkciót csak az illesztőpontok koordinátáinak rögzítésére használtam. A szoftver egyetlen *.points kiterjesztésű fájlba menti el a mért koordinátákat és a maradék hibák értékét. Ez utóbbiaknak ebben az esetben nem volt számunkra jelentősége, hiszen nem alkalmaztuk a beépített transzformációkat. A fájl a terepi koordináták vetületének PROJ-definíciójával kezdődik, ezután tartalmaz egy fejléct az egyes adattípusok megnevezésével, ezután következnek az illesztőpontok adatai, vesszővel tagolva.

A keretjelek koordinátáit is hasonló módon rögzítettem, csak itt terepi koordináták helyett az adott jel képkoordinátáit mentettem el, melyeket a kalibrálási jegyzőkönyvből ismertem.

3.2.2 Az illesztőpontok geodéziai koordinátáinak meghatározása

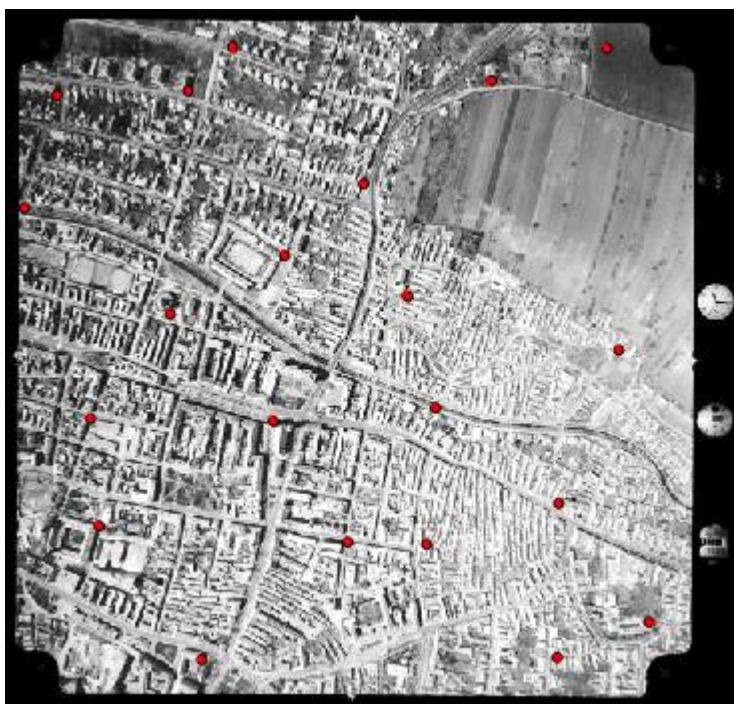
Mivel az adott területről nem rendelkezttem geodéziai pontossággal megmért illesztőpontokkal, ezért a terepi koordinátákat a 2.5. pontban ismertetett ortofotók alapján határoztam meg. A Google Maps műholdképet lehetséges a QGIS szoftverbe WMS-réteggént (Web Map Service) behívni, a Lechner Tudásközpont által biztosított ortofotók pedig rendelkeznek georeferencia-fájllal, így ha beolvassuk raszteres adatként, a képek rögtön a megfelelő helyre kerülnek. Az illesztőpontok azonosítását elvégeztem mindkét képen, majd az így létrejött fájlokat külön-külön elmentettem.

A két adatforrás illeszkedése helyenként nem volt pontos. Ennek oka lehet az ortorektifikálás eltérő módja, illetve eltérő domborzatmodell használata. A Google műholdkép felbontása

nagyobb, ám a magyar légifelvétel jelentősen kontrasztosabb, ami megkönnyítette a pontok azonosítását, valamint ezen a perspektív torzulás is kisebb, ezáltal az objektumok kevésbé takarták ki egymást. A terepi felbontásról csak az ortofotó kapcsán sikerült egyértelmű információt találni (Ortofotók, 2023), ennek értéke 0.4 m/pixel. A további transzformációs lépéseket elvégeztem mindkét illesztőpontfájl felhasználásával, a pontosságra vonatkozó adatokat a dolgozat 4. fejezetében ismertetem.

3.2.3 A használt illesztőpontok

A képen ugyan szerepeltek azok az illesztőpontok, melyeket a kép készítésének idejére helyeztek el a terepen, ám ezek geodéziai koordinátái nem elérhetőek. Emiatt szükséges volt más illesztőpontokat találni: erre elsősorban olyan épületek sarokpontjai alkalmasak, melyeket a felvétel készítése óta eltelt időszakban feltételezhetően nem építettek át. Elsősorban műemlék épületeket, illetve panelházakat használtam erre a célra.



6. ábra: A 21 darab illesztőpont elhelyezkedése a nyers képen. Törekedtem arra, hogy a kép minden részén arányosan helyezkedjenek el a pontok. Ezt csak a kép jobb felső részén volt nehéz megvalósítani, ahol egy azóta egy új lakónegyed épült föl, ezért itt nem sikerült használható illesztőpontot azonosítani.

Törekedtem arra, hogy a műholdkép, illetve az ortofotó használatakor ugyanazokat a pontokat

használjam illesztőpontként, ám ez nem volt minden esetben lehetséges. Ennek okai a következők:

- mindkét alaptérképként használt kép vegetációs időszakban és különböző évben készült, így más-más objektumok voltak takarásban.
- A két adatforrás esetén a képek vetítési központja nem egy helyen volt, így egy pontban más-más irányú volt a perspektív torzulás, így előfordult, hogy az egyik képen látható épületsarok a másik képen takarásban volt.

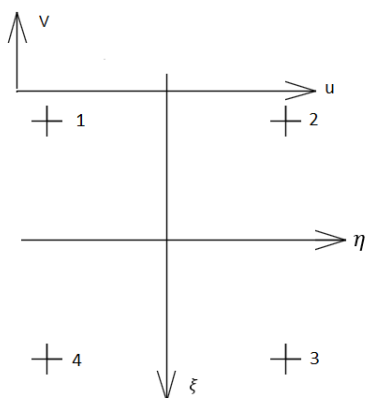
3.2. Transzformáció a pixel- és a képkordináta-rendszer közt

Mivel a felhasznált kép digitális, ezért ezen közvetlenül csak a pixel-koordinátarendszerben lehet mérni. Ez a koordinátarendszer a digitális kép pixeleinek soraihoz és oszlopaihoz kötődik. A rendszer kezdőpontja a kép bal felső sarka, a $+u$ tengely a kép jobb szélé, a $+v$ tengely a kép alja felé mutat.

Mivel a kollineár egyenletek a képkordináták és a terepi (geodéziai) koordináták közt teremtenek kapcsolatot, szükséges az illesztőpontok képen mért pixelkoordinátáit áttanszformálni a képkordináta-rendszerbe, ehhez affin transzformáció alkalmazása ajánlott:

$$\begin{aligned} u &= a_0 + a_1\xi + a_2\eta \\ v &= b_0 + b_1\xi + b_2\eta \end{aligned} \tag{3.1}$$

A transzformációhoz közös pontként használhatók a keretjelek, mivel ezek képkordinátái ismertek a kalibrálási jegyzőkönyvből. A transzformációt 6 paraméter írja le, és mivel négy keretjel (és ezek összesen 8 koordinátája) áll rendelkezésre, ezért a paraméterek a legkisebb négyzetek módszere szerinti kiegyenlítéssel számíthatók. (Jancsó, 2017)



7. ábra: A pixelkoordináta-rendszer (u, v tengelyekkel), a képkoordináta-rendszer (ξ, η tengelyekkel), valamint a keretjelek kölcsönös helyzete az általam használt képen. A két rendszer közti kapcsolatot egy affín transzformáció paramétereivel adhatjuk meg.

3.3. A sugárnyaláb-kiegyenlítés

Ahhoz, hogy ezt elvégezhessük, szükség van a kamera belső adataira a kalibrációs jegyzőkönyvből. A művelet a kép külső tájékozási paramétereinek (a vetítési középpont geodéziai koordinátái és az optikai tengely helyzetét leíró három elfordulási érték) számítására szolgál, ehhez a kollineár egyenleteket használjuk. Ezek az egyes illesztőpontok geodéziai- és képkoordinátái között teremtenek kapcsolatot.

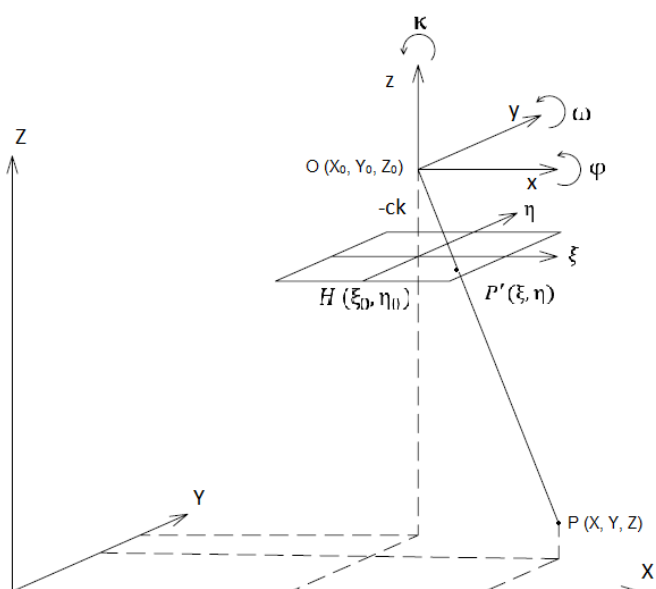
$$\begin{aligned}\xi &= -c_k \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \xi_0 \\ \eta &= -c_k \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \eta_0\end{aligned}\tag{3.2}$$

ahol ξ, η és X, Y, Z az egyes illesztőpontok kép- illetve terepi (geodéziai) koordinátái (lábjegyzetbe: Dolgozatomban terepi koordináták esetén mindig X jelöli a keleties, Y az északias koordinátákat, tehát az X felel meg az EOVS Y , és Y az EOVS X koordinátájának.), ξ_0, η_0 a képfőpont képkoordinátái, c_k a kameraállandó, X_0, Y_0, Z_0 a vetítési középpont geodéziai koordinátái, $\mathbf{R}$ pedig a kameratengely elfordulását leíró 3×3 -as forgatási mátrix, melynek elemeit (r_{11} - r_{33}) az alábbi módon kaphatjuk: $\mathbf{R}_\phi, \mathbf{R}_\omega, \mathbf{R}_\kappa$ a kamera-koordináta-rendszer x, y , és z

tengelyei körüli forgatást leíró forgatómátrixok és

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{R}_\omega \cdot \mathbf{R}_\kappa \quad (3.3)$$

A számításhoz közös pontként az illesztőpontok szolgáltak. Mivel rendelkezésre álltak fölő mérések, ezért a paraméterek meghatározása itt is kiegyenlítéssel történt. (Jancsó, 2017) A közvetítő egyenletek nem voltak lineárisak, így szükség volt ezeknek a paraméterek szerinti parciális deriváltjaira, melyeket numerikus deriválással határoztunk meg.



8. ábra: A kép külső és belső tájékozási paraméterei. A képen látható a kamera-koordináta-rendszer, melynek x, y tengelyei párhuzamosak a kép-koordináta-rendszer ξ, η tengelyeivel, z tengelye pedig a kameratengellyel. Az X, Y és Z tengelyek jelölik ki a geodéziai koordináta-rendszert. Egy tetszőleges P pont a képen P' helyre képződik le. A belső adatok közül a kameraállandót ck , a főtípust H jelöli. O a vetítési középpont, φ, ω, κ a kamera-koordináta-rendszer elfordulását leíró szögértékek.

3.4. Az RPC-szabvány

Az ortofotó előállításához használt GDAL-parancs a szabatos kameramodell helyett egy sokkal általánosabb modellt, a „rational polynomial coefficient”, azaz a polinomhányados függvényt alkalmazó kameramodellt képes kezelni. A módszert eredetileg műholdképek georeferálására fejlesztették ki, ugyanis az ezekhez használt kamerák szabatos modellje nehezen kezelhető. Az RPC-kameramodell elég magas szabadságfokú ahhoz, hogy ezeket a modelleket kellő

pontossággal közelíteni tudja. (Grodecki, 2001)

A módszer a normalizált pixelkoordináták és a normalizált WGS84 ellipszoidi koordináták között teremt kapcsolatot harmadfokú polinomokat tartalmazó hányadosokkal. A számítás pontosítása érdekében lehetőség van az egyes bemenő adattípusok átskálázására. A normalizált terepi- és pixelkoordináták az alábbi módon kaphatók meg:

$$\begin{aligned}
 l &= \frac{v - v_0}{v_{SCALE}} \\
 s &= \frac{u - u_0}{u_{SCALE}} \\
 P &= \frac{\varphi - \varphi_0}{\varphi_{SCALE}} \\
 L &= \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_{SCALE}} \\
 H &= \frac{Z - Z_0}{Z_{SCALE}}
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

ahol l és s a normalizált pixelkoordináták; P , L , H a normalizált ellipszoidi szélesség, hosszúság és magasság; „0” indexszel vannak jelölve az egyes adatokhoz tartozó eltolási értékek, „scale” indexszel pedig a skálatényezők. Az RPC-szabvány szerint a normalizált pixelkoordináták számítása az alábbi módon történik:

$$\begin{aligned}
 l &= \frac{N_l(L, P, H)}{D_l(L, P, H)} \\
 s &= \frac{N_s(L, P, H)}{D_s(L, P, H)}
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

ahol a számlálók és a nevezők egyaránt 20 tagú harmadfokú polinomok, az egyes tagok sorrendje az alábbi:

$$\begin{aligned}
& c_1 + c_2 \cdot L + c_3 \cdot P + c_4 \cdot H + c_5 \cdot L \cdot P + c_6 \cdot L \cdot H + c_7 \cdot P \cdot H + c_8 \cdot L^2 + \\
& + c_9 \cdot P^2 + c_{10} \cdot H^2 + c_{11} \cdot P \cdot L \cdot H + c_{12} \cdot L^3 + c_{13} \cdot L \cdot P^2 + c_{14} \cdot L \cdot H^2 + \\
& + c_{15} \cdot L^2 \cdot P + c_{16} \cdot P^3 + c_{17} \cdot P \cdot H^2 + c_{18} \cdot L^2 \cdot H + c_{19} \cdot P^2 \cdot H + c_{20} \cdot H^3
\end{aligned}
\tag{3.6}$$

Itt c_1 - c_{20} az egyes polinomokhoz tartozó együtthatókat jelöli, tehát az RPC kameramodell összesen 80 együttható írja le. (Zhang & Yuan, 2006)

3.5. Lokális koordináta-transzformáció EOVS- és WGS84 rendszer között

Az RPC-szabvány – mivel a kameramodellek legáltalánosabb formáját kívánja megvalósítani – terepi koordinátaként csak WGS84 ellipszoidi koordinátákat fogad el. Viszont a (3.2) számú kollineár egyenletek összefüggései az illesztőpontok terepi EOVS-koordinátáira vonatkoztak. Mivel a továbbiakban is a kollineár egyenletekből származó paraméterek használatára lesz szükség, ezért az EOVS koordinátákat (pontosabban ezeknek, és a vetítési középpont geodéziai koordinátáinak különbségét) a WGS84 ellipszoidi koordináták függvényeként kell meghatározni. Mivel a légifelvétel által lefedett terület mindössze néhány km^2 volt, így a számítást feleslegesen megnehezítette volna, ha a szabatos vetületi egyenleteket használjuk. A két rendszer közti kapcsolat meghatározása numerikus deriválással (differenciászámítással) történt, azaz megvizsgáltuk, hogy az ellipszoidi koordináták kismértékű $\partial\varphi$ és $\partial\lambda$ változtatása esetén milyen mértékben változnak az X és Y EOVS-vetületi koordináták. $\partial\varphi$ és $\partial\lambda$ értékét 0.001° -nak választottuk. A koordináta-transzformációkat a

```
gdaltransform -s_srs EPSG:4326 -t_srs EPSG:23700
```

GDAL-paranccsal végeztük el. Ebben az utasításban meg kellett adni a forrás- és célkoordinátarendszer EPSG-kódját, majd ezután lehet bevinni a transzformálandó koordinátákat. A módszer tovább pontosítható, ha a vizsgálatot elvégezzük $+\partial\varphi$, $-\partial\varphi$, és $+\partial\lambda$, $-\partial\lambda$ értékekkel, majd a kapott eredményeknek páronként vesszük a számtani középértékét.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial X}{\partial \varphi} &= \frac{\partial X_1 + \partial X_2}{2 \cdot \partial \varphi} \\
\frac{\partial X}{\partial \lambda} &= \frac{\partial X_1 + \partial X_2}{2 \cdot \partial \lambda} \\
\frac{\partial Y}{\partial \varphi} &= \frac{\partial Y_1 + \partial Y_2}{2 \cdot \partial \varphi} \\
\frac{\partial Y}{\partial \lambda} &= \frac{\partial Y_1 + \partial Y_2}{2 \cdot \partial \lambda}
\end{aligned}
\tag{3.7}$$

A vizsgálatot a vetítési középpont X és Y koordinátáira végeztük el, ugyanis ez közelítőleg a vizsgált terület középpontjában helyezkedik el, így érhető el, hogy a lokális transzformáció okozta maradék hibák minimálisak legyenek.

3.6. A transzformációs paraméterek behelyettesítése az RPC-együtthatókba

Az RPC-kameramodell paramétereinek számítása történhet olyan módon, hogy illesztőpontokat jelölünk ki a képen, majd ezekre a (3.5) egyenleteket felírjuk, ekkor az együtthatókat a legkisebb négyzetek módszere szerinti kiegyenlítéssel kaphatjuk meg. (Zhang & Yuan, 2006) A módszer hátránya, hogy teljesen figyelmen kívül hagyja a leképezési geometriát, így nem tekinthető szabatosnak. Így konzulensem javaslatára azt vizsgáltam, lehetséges-e felírni az egyes RPC együtthatókat az eddig meghatározott tájékozási paraméterek függvényeként?

Amennyiben az együtthatókat ilyen módon kívánjuk számítani, először is törekedni kell arra, hogy a pixelkoordinátákat csak azon tagok függvényeként határozzuk meg, melyek megfelelői a kollineár egyenletekben is előfordulnak. Ez azt jelenti, hogy a konstans, valamint a másod- és harmadfokú tagok együtthatóját mind nullának kell venni. Továbbá ügyelni kell arra – szintén a kollineár egyenletek felépítéséből kiindulva – hogy a nevezők együtthatóinak meg kell egyezniük.

Ezek alapján tehát az alábbi formájú egyenleteket kell megkapnunk:

$$\begin{aligned}
l &= \frac{n_{l_2} \cdot L + n_{l_3} \cdot P + n_{l_4} \cdot H}{d_2 \cdot L + d_3 \cdot P + d_4 \cdot H} \\
s &= \frac{n_{s_2} \cdot L + n_{s_3} \cdot P + n_{s_4} \cdot H}{d_2 \cdot L + d_3 \cdot P + d_4 \cdot H}
\end{aligned}
\tag{3.8}$$

Kiindulásként felírtuk az affín transzformációt meghatározó (3.1) egyenletet, ebbe behelyettesítettük a kollineár egyenleteket az alábbi módon:

$$\begin{aligned}
s &= a_0 + a_1 \left(\xi_0 - c_k \cdot \frac{R_{11}(X - X_0) + R_{12}(Y - Y_0) + R_{13}(Z - Z_0)}{R_{31}(X - X_0) + R_{32}(Y - Y_0) + R_{33}(Z - Z_0)} \right) + \\
&\quad + a_2 \left(\eta_0 - c_k \cdot \frac{R_{21}(X - X_0) + R_{22}(Y - Y_0) + R_{23}(Z - Z_0)}{R_{31}(X - X_0) + R_{32}(Y - Y_0) + R_{33}(Z - Z_0)} \right) \\
l &= b_0 + b_1 \left(\xi_0 - c_k \cdot \frac{R_{11}(X - X_0) + R_{12}(Y - Y_0) + R_{13}(Z - Z_0)}{R_{31}(X - X_0) + R_{32}(Y - Y_0) + R_{33}(Z - Z_0)} \right) + \\
&\quad + b_2 \left(\eta_0 - c_k \cdot \frac{R_{21}(X - X_0) + R_{22}(Y - Y_0) + R_{23}(Z - Z_0)}{R_{31}(X - X_0) + R_{32}(Y - Y_0) + R_{33}(Z - Z_0)} \right)
\end{aligned}
\tag{3.9}$$

a (3.7) egyenletben meghatároztuk azokat a paramétereket, melyek segítségével kifejezhetőek az EOVS vetületi koordináták az ellipszoidi koordináták függvényeként:

$$\begin{aligned}
X - X_0 &= \frac{\partial X}{\partial \varphi} \cdot (\varphi - \varphi_0) + \frac{\partial X}{\partial \lambda} \cdot (\lambda - \lambda_0) \\
Y - Y_0 &= \frac{\partial Y}{\partial \varphi} \cdot (\varphi - \varphi_0) + \frac{\partial Y}{\partial \lambda} \cdot (\lambda - \lambda_0)
\end{aligned}
\tag{3.10}$$

Ezeket a (3.9) egyenletbe visszaírva, és a polinomokat kiemeléssel $(\varphi - \varphi_0)$, $(\lambda - \lambda_0)$ és $(Z - Z_0)$ (azaz P, L és H) együtthatóivá rendezve kaphatjuk az RPC-együtthatókat (mivel ezek is P, L és H együtthatói).

3.7. az RPC-kameramodell paramétereinek beillesztése a kép metaadatai közé

A gdalwarp parancs akkor tud módosítani egy raszteres adatot, ha annak metaadatai egy *.vrt kiterjesztésű állományban vannak eltárolva. Ebben XML formátumban találhatók a kép adatai, többek közt statisztikai mutatók, georeferencia információk, a kép egyes sávjainak értelmezése, ún. „metadata domain”-ekbe csoportosítva. (VRT – GDAL Virtual Format, 2023) Az általam használt légifotóhoz tartozó vrt-fájlt a gdal_translate -of paranccsal tudtam előállítani. A további feldolgozás szempontjából fontos, hogy a képfájl és ennek vrt fájlja azonos néven legyen elmentve.

Ebbe a fájlba beleírhatók új metaadatok is, esetünkben a kép ortorektifikálásának RPC-szabvány szerinti paramétereit, „metadata domain=RPC” néven. Ezek nevét és jelentését, valamint az általam használt értékeket az 1. melléklet tartalmazza.

```
<VRTDataset rasterXSize="17754" rasterYSize="16938">
  <Metadata>
    <MDI key="TIFFTAG_DOCUMENTNAME">{9CFCD440-E83C-480F-B07A-A2F483D66B13}</MDI>
    <MDI key="TIFFTAG_MAXSAMPLEVALUE">255</MDI>
    <MDI key="TIFFTAG_MINSAMPLEVALUE">0</MDI>
    <MDI key="TIFFTAG_RESOLUTIONUNIT">3 (pixels/cm)</MDI>
    <MDI key="TIFFTAG_XRESOLUTION">713.91351</MDI>
    <MDI key="TIFFTAG_YRESOLUTION">713.91351</MDI>
  </Metadata>
  <Metadata domain="RPC">
    <MDI key="ERR_BIAS">0.000000</MDI>
    <MDI key="ERR_RAND">0.000000</MDI>
    <MDI key="LINE_OFF">8463.74805690372</MDI>
    <MDI key="SAMP_OFF">8470.13840696921</MDI>
    <MDI key="LAT_OFF">47.786458574544</MDI>
    <MDI key="LONG_OFF">19.9233218653308</MDI>
    <MDI key="HEIGHT_OFF">981.7891</MDI>
    <MDI key="LINE_SCALE">1</MDI>
    <MDI key="SAMP_SCALE">1</MDI>
    <MDI key="LAT_SCALE">1</MDI>
    <MDI key="LONG_SCALE">1</MDI>
    <MDI key="HEIGHT_SCALE">1</MDI>
    <MDI key="LINE_NUM_COEFF">0 -813743239.6681 -57296050.07082 -277.1224213423 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</MDI>
    <MDI key="LINE_DEN_COEFF">0 -1830.557 -2519.9936 0.99944461 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</MDI>
    <MDI key="SAMP_NUM_COEFF">0 39030220.108104 -1207385581.0707 -233.52115357846 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</MDI>
    <MDI key="SAMP_DEN_COEFF">0 -1830.557 -2519.9936 0.99944461 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</MDI>
  </Metadata>
  <Metadata domain="IMAGE_STRUCTURE">
    <MDI key="COMPRESSION">JPEG</MDI>
    <MDI key="INTERLEAVE">BAND</MDI>
  </Metadata>
  <VRTRasterBand dataType="Byte" band="1" blockSize="16">
    <Metadata>
      <MDI key="STATISTICS_APPROXIMATE">YES</MDI>
      <MDI key="STATISTICS_MAXIMUM">217</MDI>
      <MDI key="STATISTICS_MEAN">122.94712153518</MDI>
      <MDI key="STATISTICS_MINIMUM">0</MDI>
      <MDI key="STATISTICS_STDDEV">52.883302523049</MDI>
      <MDI key="STATISTICS_VALID_PERCENT">100</MDI>
    </Metadata>
    <ColorInterp>Gray</ColorInterp>
    <SimpleSource>
      <SourceFilename relativeToVRT="1">1976_0029_9063.tif</SourceFilename>
      <SourceBand>1</SourceBand>
      <SourceProperties RasterXSize="17754" RasterYSize="16938" DataType="Byte" BlockXSize="17754" BlockYSize="16" />
      <SrcRect xOff="0" yOff="0" xSize="17754" ySize="16938" />
      <DstRect xOff="0" yOff="0" xSize="17754" ySize="16938" />
    </SimpleSource>
  </VRTRasterBand>
</VRTDataset>
```

9. ábra: A kép metaadatait tartalmazó VRT-fájl, benne kiemelve az RPC-szabvány szerinti transzformációs paraméterek

3.8. Újramintavételezés WGS84 rendszerbe

Az EOV vetületben készült domborzatmodellt beolvastuk a QGIS szoftverbe, majd készítettünk egy kivágatot a minket érdeklő területről. Erre azért volt szükség, hogy a domborzatmodell nagy mérete a további feldolgozást feleslegesen ne lassítsa le. A kivágatot elmentettük *.tif formátumban, majd a

```
gdalwarp -s_srs EPSG:23700 -t_srs EPSG:4326
```

parancs segítségével újramintavételeztük WGS84 rendszerbe (azaz az EPSG:4326 kódú vetületbe). Erre azért volt szükség, mert az RPC-szabvány csak ellipszoidi koordinátákat képes kezelni.

3.9. A légifelvétel ortorektifikálása

Az ortofotó előállítását az alábbi GDAL-paranccsal végeztük el:

```
gdalwarp -rpc -to "RPC_DEM=dem.tif" -t_srs EPSG:23700 nyers.vrt ortofoto.tif
```

A -rpc opció jelenti azt, hogy a transzformációt RPC-együtthatók alapján kívánjuk elvégezni. Ezután megadtuk a használni kívánt magasságmodellt és a készítendő ortofotó koordinátarendszerét. Ezután bemenő adatként megadjuk a nyers felvétel vrt-fájlt és az eredmény fájl nevét és kiterjesztését (jelen esetben tif-ként, EOV vetületben készült az ortofotó). (a GDAL webhelye, 2023)

4. Eredmények

4.1. A módszer pontosságának vizsgálata

Az általam használt módszer pontosságának vizsgálatához összevettem a sugárnyaláb-kiegyenlítés és az RPC-paraméterek segítségével történő transzformáció maradék hibáit, illetve középhibáit. Az eredményeket a következő táblázat tartalmazza:

	műholdképről	ortofotóról
	levett koordináták alapján	
sugárnyaláb- kiegyenlítés középhibája	± 20.83 pixel	± 17.73 pixel
RPC-együtthatókkal végzett számítás középhibája	± 20.85 pixel	± 17.37 pixel

Az általam használt transzformáció pontossága nem mutat lényeges eltérést a kollineár egyenletekéhez képest. Így ebben a lépésben a legnagyobb hibaforrás az illesztőpontok terepi koordinátáinak bizonytalan meghatározása.

Az elkészült ortofotók megjelenítését a QGIS szoftverrel végeztem el. Itt az ortofotókon megjelöltem az eredetileg is használt illesztőpontokat, az ezek koordinátáit tartalmazó fájlt elmentettem, majd az Octave szoftver segítségével számítottam ezen pontok eredeti, valamint az ortofotón mért koordinátáinak különbségét. Ezekből szintén számítottam a transzformációk középhibáit, külön-külön mindkét ortofotóra vonatkozóan. A műholdkép alapján azonosított illesztőpontokat használva az ortofotó középhibája ± 3.83 m, a 2010-es ortofotó felhasználásával azonosított pontok esetén ± 2.78 m, tehát ez utóbbi tette lehetővé a pontosabb azonosítást. Ennek oka az lehetett, hogy ez rendelkezett jobb kontraszttal, valamint feltételezhető, hogy az ortokorrekciója is nagyobb pontossággal történt meg.

Mint ezekből látható, az ortofotó előállítása jóval nagyobb mértékben rontja a módszer pontosságát, mint az eddigi transzformációs lépések, ennek pontos oka még nem ismert. Fontos

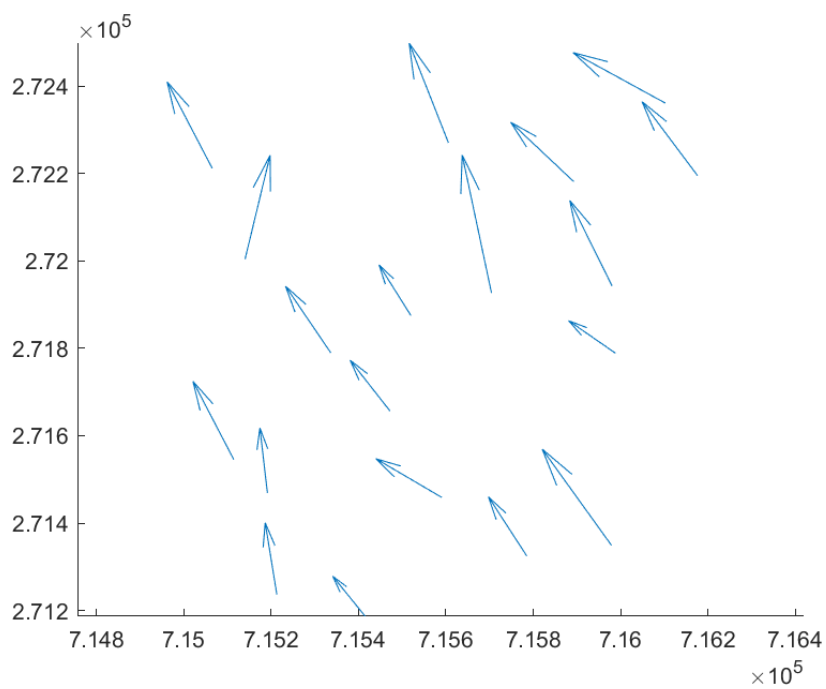
megállapítani, hogy a hibavektorok iránya egyértelmű trendszerűséget mutat, ennek egyik lehetséges oka az alaptérképként használt adatforrások pontatlan georeferálása. Továbbá okozhat még hibát a használt domborzatmodell korlátozott pontossága is.



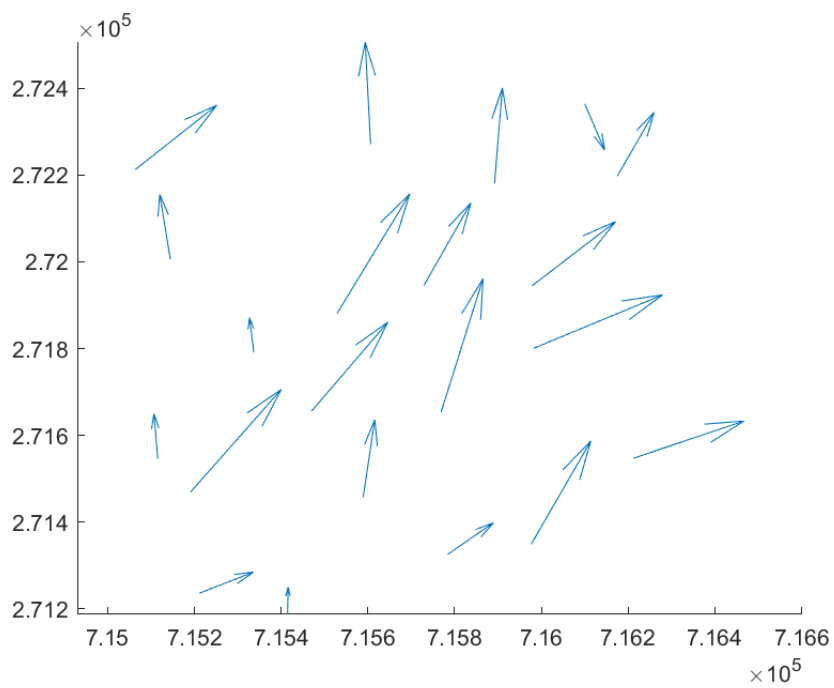
10. ábra: A végeredményként kapott ortofotó. A kép bal felső szélén jól megfigyelhető a domborzat hatása: itt egy domb található, emiatt láthatóan eltorzult a kép – eredetileg egyenes – széle.



11. ábra: Az áttanszformált archív felvétel és a napjainkban készült ortofotó illeszkedése nem hibátlan, ám az eltérés a kép bármely pontján 7 m alatt marad.



12. ábra: A hibavektorok elhelyezkedése, ha a műholdkép alapján azonosítjuk az illesztőpontokat



13. ábra: A hibavektorok elhelyezkedése, ha az ortofotó alapján azonosítjuk az illesztőpontokat

5. Diszkusszió

5.1. A kapott eredmények értékelése

Az általam használt matematikai módszerek lehetővé teszik a képeken mért pixel- és a terepi koordináták közti kapcsolat kellő pontosságú meghatározását, a módszer további pontosításához az szükséges, hogy a bemenő adatokat nagyobb pontossággal ismerjük. A terepi koordináták ortofotóról való levétele nagy bizonytalansággal terhelt, illetve az is valószínű, hogy ezek a felvételek eleve rendelkeznek belső torzulásokkal. (Ez különösen a két különböző adatforrás összehasonlításakor volt szembeötlő.) További vizsgálat szükséges abból a szempontból, hogy az ortorektifikáció során miért csökken jelentősen a pontosság. Mindezekkel együtt minden olyan alkalmazási terület számára jó kiinduló adat lehet az ezzel a módszerrel előállított ortofotó, ahol az átlagosan 3-4 méteres pontosság elégséges.

6. Köszönetnyilvánítás

Elsősorban szeretnék köszönetet mondani konzulensemnek, Dr. Molnár Gábornak mindazért a segítségért, amit a témaválasztástól kezdve a kutatás során egészen ennek a dolgozatnak a megírásáig kaptam tőle, valamint a sok szakmai tudásért, melyet ezalatt elsajátíthattam. Köszönet illeti szaktársaimat is értékes és hasznos javaslataikért. Végezetül szeretném megköszönni családtagjaimnak, hogy végig segítettek és támogattak engem.

7. Idézett forrásmunkák

(2023. 05 01). Forrás: a GDAL webhelye: <https://gdal.org/>

(2023. 05 01). Forrás: a QGIS webhelye: <https://www.qgis.org/hu/site/>

(2023. 05 01). Forrás: RPCs in GeoTIFF: http://geotiff.maptools.org/rpc_prop.html

(2023. 05 01). Forrás: A fentrol.hu webhelye: <https://www.fentrol.hu/hu/>

Felbontás, adattartalom. (2023. 05 01). Forrás: a fentrol.hu blogja: <https://lechnerkozpont.hu/oldal/legifelvelelek>

GNU Octave - about. (2023. 05 01). Forrás: a GNU Octave webhelye: <https://octave.org/about>

Grodecki, J. (2001). Ikonos stereo feature extracton - RPC approach.

Jancsó, T. (2017). *Digitális fotogrammetria*. Budapest: Óbudai Egyetem.

Légifelvelelek georeferálása. (2023. 05 01). Forrás: a fentrol.hu blogja: https://fentrol.blog.hu/2019/11/25/legifelvelelek_georeferalasa

Molnár, G., & Timár, G. (2013). *Térképi vetületek és alapfelületek*. Budapest: Eötvös Loránd Tudományegyetem.

Ortofotók. (2023. 05 01). Forrás: a Lechner Tudásközpont webhelye: <https://lechnerkozpont.hu/oldal/ortofotok>

Siristye, F., & Zboray, Z. (2004). Digitális domborzatmodellek készítése katonai térképészeti célokra., (old.: 1-11).

VRT – GDAL Virtual Format. (2023. 05 01). Forrás: a gdal webhelye: <https://gdal.org/drivers/raster/vrt.html>

Zhang, G., & Yuan, X. (2006). On RPC Model of Satellite Imagery. *Geo-spatial Information*, 285-292.

8. Ábrajegyzék

1. ábra: A nyers légifelvétel.....	4
2. ábra: A kamera különböző belső tájékozási elemeinek ábrázolása a kalibrálási jegyzőkönyvben.	5
3. ábra: A légifényképnegatívanyag törzslap részlete	6
4. ábra: A DDM-10 domborzatmodell általam használt kivágata szürkeárnyaltos képként ábrázolva	7
5. ábra: A 2010-es ortofotó, alján a 2023-as Google műholdkép részlete.....	7
6. ábra: A 21 darab illesztőpont elhelyezkedése a nyers képen..	10
7. ábra: A pixelkoordinátarendszer (u , v tengelyekkel), a képkordinátarendszer (ξ , η tengelyekkel), valamint a keretjelek kölcsönös helyzete az általam használt képen	12
8. ábra: A kép külső és belső tájékozási paraméterei	13
9. ábra: A kép metaadatait tartalmazó VRT-fájl	18
10. ábra: A végeredményként kapott ortofotó	21
11. ábra: Az áttranszformált archív felvétel és a napjainkban készült ortofotó illeszkedése	21
12. ábra: A hibavektorok elhelyezkedése, ha a műholdkép alapján azonosítjuk az illesztőpontokat	22
13. ábra: A hibavektorok elhelyezkedése, ha az ortofotó alapján azonosítjuk az illesztőpontokat.....	22

1. Melléklet

Az RPC-szabvány szerinti transzformációs paraméterek és az általam használt értékek

név	leírás	az általam használt érték	mértékegység
ERR_BIAS	szabályos hiba	0-t kell beírni, mivel pontos értékeket nem ismerjük.	méter
ERR_RAND	szabálytalan hiba		méter
LINE_OFF	v pixelkoordináta eltolás	a képfőpont v pixelkoordinátája	pixel
SAMP_OFF	u pixelkoordináta eltolás	a képfőpont u pixelkoordinátája	pixel
LAT_OFF	földrajzi szélesség eltolás	a vetítési középpont földrajzi szélessége	fok (decimális alakban)
LONG_OFF	földrajzi hosszúság eltolás	a vetítési középpont földrajzi hosszúsága	fok (decimális alakban)
HEIGHT_OFF	magasság eltolás	a vetítési középpont magassága	méter
LINE_SCALE	v pixelkoordináta skálatényező	1	pixel
SAMP_SCALE	u pixelkoordináta skálatényező	1	pixel
LAT_SCALE	földrajzi szélesség skálatényező	1	fok (decimális alakban)
LONG_SCALE	földrajzi hosszúság skálatényező	1	fok (decimális alakban)
HEIGHT_SCALE	magasság skálatényező	1	méter

név	leírás	az általam használt érték	mértékegység
LINE_NUM_COEFF	l pixelkoordináta egyenletének számlálójához tartozó 20 darab együttható	A (3.5) egyenletben kiszámolt paraméterek szerepelnek a 2-4. helyen, a többi együttható értéke mind 0.	mértékegység nélküliek
LINE_DEN_COEFF	l pixelkoordináta egyenletének nevezőjéhez tartozó 20 darab együttható		
SAMP_NUM_COEFF	s pixelkoordináta egyenletének számlálójához tartozó 20 darab együttható		
SAMP_DEN_COEFF	s pixelkoordináta egyenletének nevezőjéhez tartozó 20 darab együttható		

(RPCs in GeoTIFF, 2023)