



GISopen 30

Székesfehérvár, 2026. április 22 - 24.

UAV felmérés pontosságát befolyásoló tényezők

Prof. Dr. Jancsó Tamás



Bevezetés

🎯 Miért fontos a pontosság?

A drónos fotogrammetria ma már sok mérnöki és térinformatikai alkalmazás alapja.

A végső X, Y, Z koordináták pontosságát azonban nem egyetlen tényező, hanem egy teljes mérési lánc határozza meg.







📌 Tipikus alkalmazások, ahol kritikus a pontosság:

- ◇ térképezés
- ◇ építkezési monitoring
- ◇ bányászati felmérések
- ◇ térfogat-számítás
- ◇ deformációvizsgálat



Mi határozza meg a drónos fotogrammetria pontosságát?

A pontosságot meghatározó fő tényezők

-  képminőség és felbontás
-  kamera kalibráció
-  repülési geometria és átfedések
-  illesztőpontok pontossága és elrendezése
-  GNSS / RTK / INS adatok
-  sugárnyaláb kiegyenlítés

Fontos alapelv

A fotogrammetriai pontosság nem egyetlen paramétertől függ, hanem:

-  a teljes mérési lánc minőségétől
-  a geometriai konfigurációtól
-  a kiegyenlítéstől

A fotogrammetriai pontosság alapmodellje (1)

A drónos fotogrammetria során a térbeli pontok koordinátái képi mérésekből és geometriai modellekből származnak.

A fő hibaforrások a fotogrammetriai láncban

Képi mérési hiba

- képélesség
- zaj
- kontraszt
- pixelméret

Kamera modell hibái

- fókusztávolság
- főpont helyzete
- radiális torzítás
- tangenciális torzítás

Felvételi geometria

- repülési magasság
- bázisviszony
- képek átfedése

Geodéziai kontroll

- GCP pontosság
- GCP elrendezés

Külső tájékozás

- GNSS pozíció
- IMU tájékozási szögek

Kiegyenlítés és modellillesztés

- sugárnyaláb kiegyenlítés
- statisztikai modell

A fotogrammetriai pontosság alapmodellje (2)

A pontosság két típusa

A fotogrammetriai eredményeknél két különböző pontosságot kell megkülönböztetni:

Relatív pontosság

- a pontok egymáshoz viszonyított pontossága

Abszolút pontosság

- a pontok helyzete a valós koordinátarendszerben

Fontos következtetés

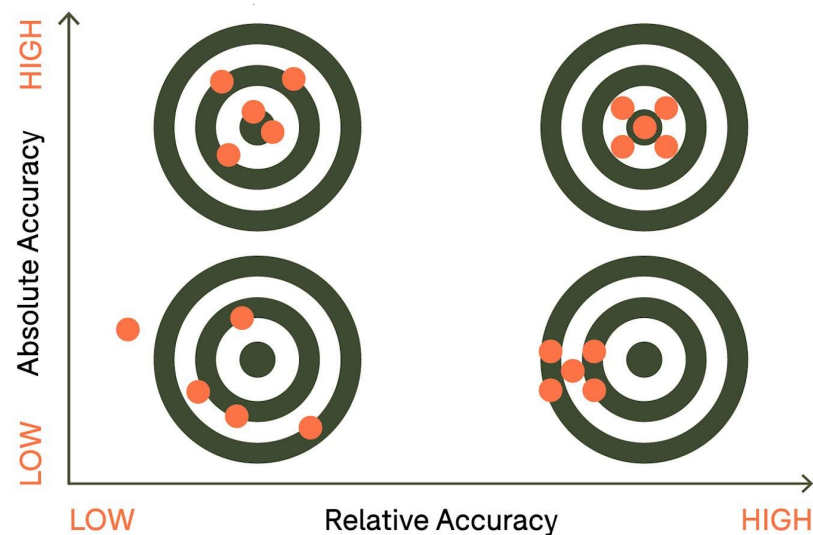
A gyakorlatban gyakran előfordul:

 nagyon jó relatív pontosság, de

 gyenge abszolút pontosság

Ez különösen igaz, ha:

- ◇ kevés GCP van
- ◇ vagy a GNSS/INS adatok pontatlanok



Képmínőség és felbontás (GSD)

🎯 Miért kulcsfontosságú a képmínőség?

A fotogrammetria alapja a képi pontmérés.
A térbeli koordináták pontossága ezért közvetlenül függ attól, hogy a képeken milyen pontossággal lehet azonosítani és mérni a pontokat.

📏 A képmínőség határozza meg a képi mérési pontosság alsó korlátját.

📷 A képmínőséget befolyásoló tényezők

🔍 Felbontás (pixelméret)

- minél kisebb pixel → annál részletesebb kép

🌀 Élesség és mozgáselmosódás

- drón mozgása
- záridő
- stabilizáció

🧠 Kontraszt és textúra

- homogén felszínek (pl. hó, víz, mező) nehezen mérhetők

🔊 Szenzor zaj

- rossz fényviszonyoknál nő

GSD	várható XY pontosság
2 cm	~1 cm
5 cm	~2-3 cm
10 cm	~3-5 cm

📏 GSD - Ground Sampling Distance

A GSD a terepen egy pixelnek megfelelő távolság.

A GSD függ:

📷 kamera felbontásától

📐 fókusztávolságtól

✈ repülési magasságtól

📐 Képi mérési pontosság

A fotogrammetriai gyakorlatban a képi pontmérés pontossága tipikusan:

$m_{\text{kép}} \approx 0.3 - 0.5 \text{ pixel}$

📊 Ennek terepi megfelelője

A terepi síkban a pontosság közelítőleg:

$m_{XY} \approx (0.3 - 0.5) \cdot \text{GSD}$

⚠ Fontos megjegyzés

A GSD nem egyenlő a pontossággal.

📏 A valós pontosság mindig függ még:





- ◇ tömbgeometriától
- ◇ kalibrációtól
- ◇ GCP pontosságtól
- ◇ kiegyenlítéstől

Környezeti feltételek hatása a fotogrammetriai pontosságra

A drónos fotogrammetria során a képek minőségét és a platform stabilitását **külső környezeti tényezők** is befolyásolják.




Szél és platform stabilitás

Erős szél esetén:




-  nagyobb platformmozgás
-  mozgáselmosódás
-  változó orientáció
-  Ez növeli a képi mérési hibát.

Megvilágítás

A képminőséget erősen befolyásolja:





-  napszög
-  felhőzet
-  árnyékok

Problémák:

-  alacsony kontraszt
-  árnyéktorzulás
-  textúrahiány



Felszín textúrája

Homogén felszínek esetén:

-  hó
-  víz
-  mezőgazdasági területek
-  kevés kapcsolópont keletkezik.




Vibráció

A drón propellerei vibrációt okoznak:

-  IMU zaj
-  képélesség romlása

Következtetés

A környezeti feltételek befolyásolják:

-  képminőséget,
-  képi mérési pontosságot,
-  tömb stabilitását.



A terepkövető repülés hatása a fotogrammetriai pontosságra

 **Mi a különbség a terepkövető és a konstans magasságú repülés között?**

A drón repülhet:


 állandó repülési magasságon (AGL/AMSL)

 terepkövető módban

A két esetben a kamera és a terep közötti távolság különbözőképpen alakul.

 **A GSD változása**

A GSD arányos a repülési magassággal. $GSD \propto h$

 Ha a repülés nem terepkövető, akkor dombos területen a GSD jelentősen változhat.

 **Következmény dombos terepen**

Konstans repülési magasság esetén:

 magasabb terepen → kisebb GSD

 alacsonyabb terepen → nagyobb GSD

Ez azt jelenti, hogy a pontosság nem lesz homogén a teljes területen.

 **Hatás a blokkgeometriára**

A repülési magasság változása befolyásolja:

 a képek átfedését

 a felvételi bázist

 a bázis-magasság arányt

Ez hatással lehet a magassági pontosságra.

 **Következtetés**

Dombos vagy hegyvidéki területen célszerű:

 **terepkövető repülést alkalmazni,**

mert ez biztosítja:

 közel állandó GSD

 egyenletes átfedéseket

 stabil blokkgeometriát.

A kamera kalibráció szerepe (1)

A fotogrammetriában a térbeli pontok meghatározása a képsugarak metszésén alapul. Ha a kamera belső geometriája pontatlan, akkor a képsugarak iránya is hibás lesz.

📌 A kalibráció hibái ezért **szisztematikus torzulásokat okoznak a teljes modellben.**

⚠️ A kalibráció hibájának hatása

Ha a torzítás nincs jól modellezve:

- 📌 a kép szélein nagyobb hibák jelennek meg
- 📌 a modell kupola (doming) torzulást mutathat
- 📌 a magassági koordináták romlanak

📐 A belső tájékozási paraméterek

A kamera matematikai modellje több paraméterből áll:

📷 Fókusz távolság (f)

- a kamera vetítési geometriáját határozza meg

📍 Főpont koordináták (x_0, y_0)

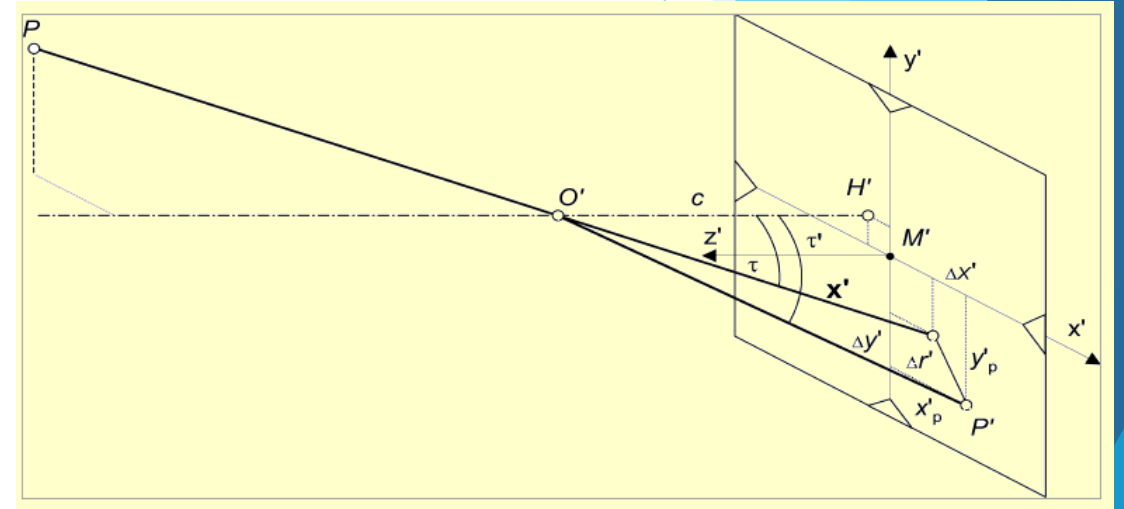
- az optikai tengely metszéspontja a képsíkon

📐 Radiális torzítás (k_1, k_2, k_3)

- a kép szélén jelentkező torzulás

📏 Tangenciális torzítás (p_1, p_2)

- a lencserendszer aszimmetriájából eredő torzulás



A kamera kalibráció szerepe (2)

Kalibrációs módszerek

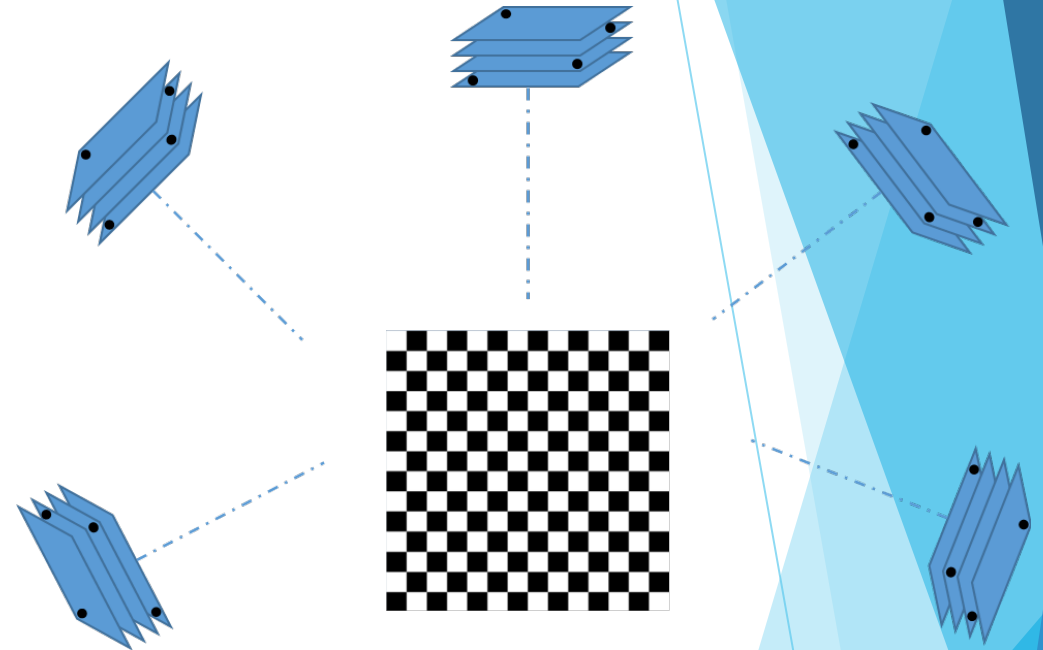
Két fő módszer használatos:

Laboratóriumi kalibráció

- kontrollált környezet
- stabil geometria

In-situ önkalibráció

- a felmérési képekből történik
- jobban reprezentálja a valós körülményeket



Fontos megállapítás

A legjobb eredményt gyakran az adja, ha:

 labor kalibráció +

 sugárnyaláb kiegyenlítés során finomított önkalibráció kombinációját használjuk.

A tesztmező geometriai kialakítása és a kalibráció stabilitása

🎯 Miért fontos a tesztmező térbeli geometriája?

A kamera kalibráció során a cél, hogy a belső tájékozási paraméterek (f , x_0 , y_0 , torzítások) megbízhatóan becsülhetők legyenek.

Ehhez azonban a kalibrációs pontok geometriai elrendezése döntő jelentőségű.

🔗 Ha a tesztmező geometria gyenge, akkor a paraméterek között erős korreláció alakul ki.

⚠️ Mi a probléma a síkbeli tesztmezővel?

Ha a pontok egy síkban vannak:

📍 minden pontnak azonos Z koordinátája van
Ez azt eredményezi, hogy bizonyos paraméterek nem választhatók szét egyértelműen.

Tipikus korrelációk:

📏 fókusztávolság ↔ radiális torzítás

📏 tangenciális torzítás ↔ kamera orientáció

Ez a kalibráció instabilitásához vezethet.

📐 A perspektív geometria szerepe

A kalibráció stabilitását javítja, ha a pontok különböző mélységben helyezkednek el.

A geometriai információ mértéke közelítőleg arányos: D / R

ahol

D - a tesztmező mélysége

R - a kamera távolsága

📊 Tapasztalati szabály

A kalibráció stabilitásához célszerű:

$$D / R \geq 0.1 - 0.2$$

Vagyis a tesztmező mélysége érje el a kamera-tesztmező távolság 10-20%-át.

A kalibrációs felvételek száma és geometriai elrendezése

🔗 Miért nem elég néhány kép a kalibrációhoz?

A kamera kalibráció során a belső paraméterek becslése a **bundle adjustment** segítségével történik.

A stabil megoldáshoz elegendő **redundancia** és **geometriai változatosság** szükséges.

📌 Kevés felvétel esetén a paraméterek **erősen korrelálhatnak**, és a kalibráció instabil lehet.

⚠️ Miért nem elég 3 kép?

Még akkor sem, ha:

- 📍 a pontok száma 100+
- 📍 a felvételek konvergensek

Problémák:

- 🔄 kevés redundancia
- 🔄 gyenge képmező lefedés
- 🔄 erős paraméterkorreláció

Például:

- ◇ fókusztávolság ↔ radiális torzítás
- ◇ főpont ↔ tangenciális torzítás

📊 A képszám hatása

A képek számának növelése növeli:

- 📈 a redundanciát
- 📈 a geometriai információt
- 📈 a paraméterbecslés stabilitását

De egy pont után a javulás már kicsi.

📐 A fontos geometriai változatosság

A kalibráció stabilitását növeli:

- 🔄 konvergens felvételek
- 📏 különböző kamera-tesztmező távolságok
- 🔄 kameraforgatás (0,90,180,270 fok)
- 📷 különböző nézőszögek

📷 Tapasztalati képszám tartomány

kategória	képszám
minimum	10-12
stabil kalibráció	20-30
ritkán szükséges	>40

📌 A geometriai változatosság fontosabb, mint a puszta képszám.

A repülési geometria szerepe a fotogrammetriai pontosságban

📍 **Miért kulcsfontosságú a repülési geometria?**

A fotogrammetriában a térbeli pontok meghatározása képsugarak metszésével történik.

A sugarak metszési pontossága közvetlenül függ a felvételek geometriai elrendezésétől.

📌 A repülési geometria határozza meg a térbeli metszés stabilitását.

✈️ **A repülési geometria fő paraméterei**

📏 **Repülési magasság (h)**

- meghatározza a GSD értékét

↔️ **Felvételi bázis (B)**

- a két exponálási hely közötti távolság

📷 **Átfedés (overlap)**

- a képek közös területe

📐 **A bázisviszony szerepe**

A magassági pontosság közelítő összefüggése:

$$m_Z \approx m_{XY} \cdot h / B$$

📊 **A bázis hatása**

📈 nagyobb bázis → jobb magassági pontosság

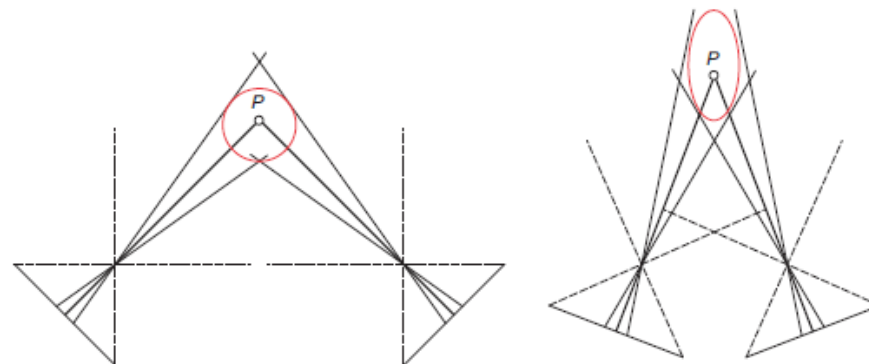
📉 kisebb bázis → romló Z pontosság

⚠️ **Gyakorlati következmény**

Ha a képek közötti átfedés túl nagy, akkor:

📷 a bázis kisebb lesz

📉 a magassági pontosság romolhat



A képek közötti átfedések szerepe

Miért fontos az átfedés?

A fotogrammetriai feldolgozás során a pontok meghatározása **több képen azonosított kapcsolópontokból** történik. Az átfedés biztosítja, hogy ugyanaz a terepi pont **több felvételen is megjelenjen**.


 Az átfedés növeli a redundanciát és a **tömb stabilitását**.

Tipikus fotogrammetriai értékek

Átfedés	jellemző érték
Soron belül	75-85 %
Sorok között	60-80 %

 **A nagy átfedés előnyei**

 több kapcsolópont

 nagyobb redundancia

 stabilabb sugárnyaláb kiegyenlítés

 jobb modellrekonstrukció

 **A túl nagy átfedés hátrányai**

Ha az átfedés túl nagy:

 a felvételi bázis csökken

Ez rontja a térbeli metszést.

 **További gyakorlati következmények**

 több kép → nagyobb adatmennyiség


 hosszabb feldolgozási idő


 hosszabb repülési idő

 **Következtetés**

A túl nagy átfedés **nem mindig javítja a pontosságot**.

Optimális kompromisszum szükséges:

 elegendő redundancia

 megfelelő bázisviszony

Az illesztőpontok (GCP-k) szerepe a fotogrammetriai pontosságban

🎯 Mi a GCP-k fő szerepe?

A földi illesztőpontok (Ground Control Points - GCP) a fotogrammetriai tömböt a valós koordináta-rendszerhez kapcsolják.

📌 A GCP-k biztosítják az abszolút georeferenciát.

🔧 A GCP pontosságának követelménye

Tapasztalati szabály: $\sigma_{GCP} \leq GSD / 10$

📊 Példa

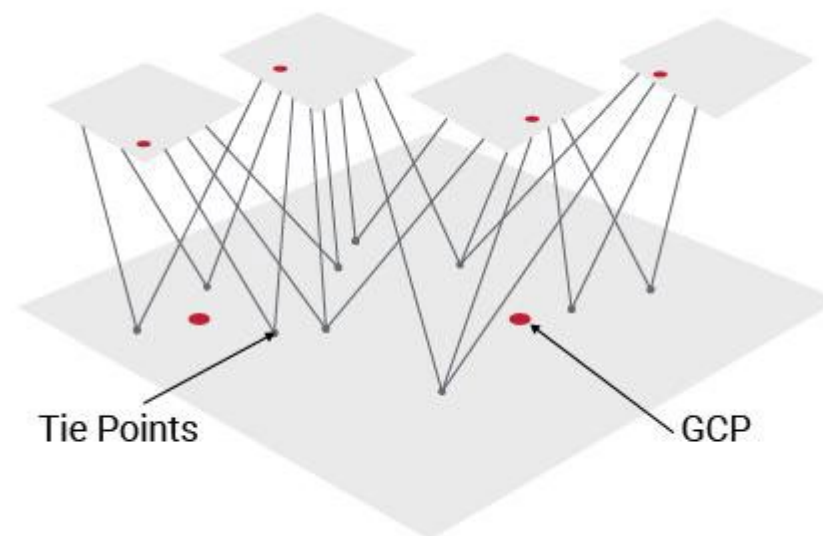
GSD	ajánlott GCP pontosság
2 cm	≤ 2 mm
5 cm	≤ 5 mm
10 cm	≤ 1 cm

📌 A GCP pontossága legyen **legalább egy nagyságrenddel jobb**, mint a GSD.

⚠️ Mi történik, ha a GCP pontatlan?

Ha a GCP hibája nagy:

- 📏 a blokk torzulhat
- 📷 a kamera paraméterek torzulhatnak
- 📏 a végső pontosság romlik



A GCP jelek alakja, mérete és színe

📍 Miért fontos a GCP jel kialakítása?

A földi illesztőpont koordinátája végső soron attól függ, hogy a jel milyen pontossággal azonosítható a képen.

📌 Ha a jel túl kicsi vagy rosszul látható, akkor nő a képi mérési hiba, ami közvetlenül rontja a fotogrammetriai pontosságot.

📏 A GCP jel ideális mérete

A jel mérete függjön a GSD-től.

jel mérete $\approx 8 - 12 \times \text{GSD}$

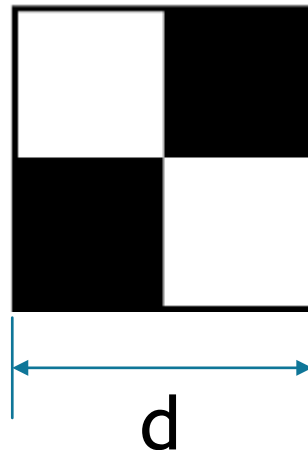
Ez biztosítja, hogy a jel a képen legalább 8-12 pixel méretű legyen.

GSD	ajánlott jelméret
1 cm	10-15 cm
3 cm	25-35 cm
5 cm	40-60 cm
10 cm	80-120 cm

■ Ideális forma

A legjobb jelalakok azok, amelyeknek egyértelmű geometriai középpontjuk van.

- ✓ kereszt (+)
- ✓ X jel
- ✓ sakktábla jel
- 📌 Ezeknél a középpont pontosan meghatározható.



⦿ Ideális szín

A cél a nagy kontraszt.

Legjobb kombinációk:

- fekete-fehér
- ⦿ sárga-fekete

Illesztőpontok száma és elhelyezése (1)

📌 Általános szabályok:

- ◇ Minimum konfiguráció: 5 GCP
- ◇ pontokat a terület sarkaiba
- ◇ egy pontot a terület közepére

Ez a konfiguráció biztosítja:

🌀 a blokk helyzetének és orientációjának meghatározását.

📊 Pontosabb felmérések esetén

Nagyobb pontossági igény esetén további GCP-eket célszerű telepíteni:

- 📍 a blokk szélein
- 📍 a blokk belső területén

Ajánlott távolság: $4 - 6 \times$ felvételi bázis

📌 Ez csökkenti a blokk lokális torzulásait.

🏠 Jelentős magasságkülönbség esetén

Ha a terep reliefje nagy: 📐 célszerű a területet magassági zónákra osztani

például:

- ◇ sík
- ◇ dombos
- ◇ hegyvidéki

📌 Minden zónában legyen elegendő GCP.




<https://civiltracker.xyz/all-about-ground-control-points/>


Illesztőpontok száma és elhelyezése (2)


 **Miért nem csak a GCP-k száma fontos?**

A fotogrammetriai blokk stabilitását nemcsak a GCP-k száma, hanem azok **térbeli elrendezése** is meghatározza.

 Rossz elrendezés esetén a blokk **lokálisan jól illeszkedhet**, de globálisan torzulhat.


 **A jó GCP elrendezés alapelvei**

 A terület szélein is legyenek pontok
- segít stabilizálni a blokkot

 Legyenek pontok a blokk belsejében is

- csökkenti a torzulást

 Homogén eloszlás a teljes területen

 A GCP-k ne csak egy vonal mentén helyezkedjenek el.

 **Képi mérési pontosság**

Jól kialakított jel esetén:
képi mérési pontosság $\approx 0.2 - 0.3$ pixel

Rossz jel esetén:
 $\approx 0.5 - 1$ pixel

 Ez akár kétszeres terepi hibát is okozhat.

 **Ellenőrzőpontok (checkpoints)**

A pontosság ellenőrzéséhez szükséges:

 független ellenőrzőpontok

Ezek:

 nem vesznek részt a kiegyenlítésben

 a modell pontosságát mérik.

 **Elhelyezési szabályok**

A GCP jel legyen:

 vízszintes felületen


 árnyékmentes helyen

 jól látható a képeken

Kerülni kell:

 növényzetet





 fényes felületeket

 erős árnyékot

A klasszikus kiegyenlítési modell korlátja

A sugárnyaláb kiegyenlítés a fotogrammetria egyik alapvető számítási lépése.

Feladata, hogy a képi mérések alapján egyszerre becsülje:

-  a kamera külső tájékozását
-  a belső tájékozási paramétereket
-  a kapcsolópontok térbeli koordinátáit
-  A cél a képsugarak közötti eltérések globális minimalizálása.

A legtöbb fotogrammetriai feldolgozás során:

 a GCP koordinátákat **hibátlanak tekintjük**

Vagyis:

$X_{GCP} = \text{const}$

Ez statisztikailag nem teljesen helyes.

Teljes kiegyenlítés

Ha a GCP-k koordinátái is megfigyelések:


 azok hibája is szerepel a modellben

Ennek előnye:

-  reálisabb kovariancia
-  stabilabb statisztikai modell

Gyakorlati következmény

A teljes kiegyenlítés:

 általában csak **kis mértékben változtatja a σ_0 értéket**

de:

 reálisabb hibabecslést ad.

A belső tájékozási hibák hatása a fotogrammetriai modellekre

📍 Mi történik, ha a kamera modell pontatlan?

A fotogrammetriában a térbeli pontok meghatározása képsugarak metszésével történik. Ha a belső tájékozási paraméterek hibásak, akkor a képsugarak iránya is hibás lesz.

📌 Ez a teljes modellben szisztematikus torzulásként jelenik meg.

📐 A képi hiba hatása a térben

A képi koordinátahiba szögeltérést okoz:

$$\delta\theta \approx \delta x / f$$

ahol

δx - képi koordinátahiba

f - fókusztávolság



📊 A terepi hiba közelítése

A szögeltérésből adódó terepi hiba:

$$\delta X \approx h \cdot (\delta x / f)$$

ahol

h - repülési magasság.

📍 Hol a legnagyobb a torzulás?

A torzítás általában:

📊 a kép közepén kicsi

📊 a kép szélei felé nő

Ennek oka a radiális torzítás növekedése.

Az RTK drónok szerepe a fotogrammetriai pontosságban

📍 Mit jelent az RTK a drónos fotogrammetriában?

Az RTK (Real Time Kinematic) GNSS technológia lehetővé teszi, hogy a drón kamerájának vetítési centruma centiméteres pontossággal ismert legyen a felvétel pillanatában.

📍 Ez javítja a fotogrammetriai blokk abszolút georeferenciáját.

📍 RTK pozíció pontossága

Tipikus RTK GNSS pontosság:

komponens	pontosság
vízszintes	1-2 cm
magasság	2-3 cm

Ez azt jelenti, hogy a kamera pozíciója már a repülés során nagyon jó közelítéssel ismert.

📊 Az RTK hatása a fotogrammetriai blokkra

- 📊 pontosabb kezdeti külső tájékozás
- 📊 stabilabb blokkgeometria
- 📊 kevesebb GCP szükséges

📍 GCP szükséglet összehasonlítása

rendszer	tipikus GCP szám
sima GPS drón	8-15
RTK drón	3-5

⚠️ Fontos korlát

Az RTK csak a **kamera pozícióját** határozza meg pontosan.

A kamera orientációja továbbra is:

- 📊 IMU mérésből
- 📊 fotogrammetriai kiegyenlítésből származik.

📍 Következtetés

Az RTK:

- 📍 csökkenti a szükséges GCP számát
- 📍 stabilabb blokkot ad de **nem mindig helyettesíti teljesen a GCP-eket.**

Az RTK drónok szerepe a fotogrammetriai pontosságban

📍 Mit jelent az RTK a drónos fotogrammetriában?

Az RTK (Real Time Kinematic) GNSS technológia lehetővé teszi, hogy a drón kamerájának vetítési centruma centiméteres pontossággal ismert legyen a felvétel pillanatában.

📍 Ez javítja a fotogrammetriai blokk abszolút georeferenciáját.

📍 RTK pozíció pontossága

Tipikus RTK GNSS pontosság:

komponens	pontosság
vízszintes	1-2 cm
magasság	2-3 cm

Ez azt jelenti, hogy a kamera pozíciója már a repülés során nagyon jó közelítéssel ismert.

📊 Az RTK hatása a fotogrammetriai blokkra

- 📊 pontosabb kezdeti külső tájékozás
- 📊 stabilabb blokkgeometria
- 📊 kevesebb GCP szükséges

📍 GCP szükséglet összehasonlítása

rendszer	tipikus GCP szám
sima GPS drón	8-15
RTK drón	3-5

⚠️ Fontos korlát

Az RTK csak a **kamera pozícióját** határozza meg pontosan.

A kamera orientációja továbbra is:

- 📊 IMU mérésből
- 📊 fotogrammetriai kiegyenlítésből származik.

📍 Következtetés

Az RTK:

- 📍 csökkenti a szükséges GCP számát
- 📍 stabilabb blokkot ad de **nem mindig helyettesíti teljesen a GCP-eket.**

A tájékozási szög pontosságának hatása a terepi koordinátákra

📍 Miért kritikus a tájékozási szög pontossága?

A fotogrammetriában a térbeli pontok meghatározása a képsugarak irányától függ. A tájékozási szög hibája ezért közvetlenül a képsugar irányhibáját okozza.

📌 Kis szögeltérés is jelentős terepi helyzethibát eredményezhet.

📐 A hiba terjedése

A terepi hiba közelítő összefüggése:

$$e \approx h \cdot \sigma\theta$$

ahol

e - terepi pozícióhiba

h - repülési magasság

$\sigma\theta$ - orientáció hiba (radiánban)

📏 Példa 100 m repülési magasság esetén

szöghiba	terepi hiba
0.01°	~1.7 cm
0.02°	~3.5 cm
0.05°	~8.7 cm
0.10°	~17 cm

📌 Már század fokos orientációs hiba is centiméteres pozícióhibát okoz.

⚠️ Következmény

Ha a cél a **2-3 cm pontosság**, akkor az orientáció pontossága kb.:

$$\sigma\theta \approx 0.01^\circ - 0.02^\circ$$

nagyságrendű kell legyen.

📌 Gyakorlati következtetés

Ez az oka annak, hogy a direkt georeferencia pontosságát gyakran:

📐 az IMU orientáció pontossága korlátozza.

23

UAV rendszerekben használt IMU-k pontosságát és stabilitása

📍 **Mi az IMU szerepe a drónos fotogrammetriában?**

Az **IMU (Inertial Measurement Unit)** méri a drón orientációját és mozgását.

A szenzorok:

📐 gyorsulásmérők

🌀 giroszkópok

segítségével határozza meg a platform **roll**, **pitch**, **yaw** szögeit.

📌 Ezek az adatok alapvetőek a **direkt georeferenciában**.

⚠️ Gyakorlati következmény

A MEMS IMU pontossága gyakran nem elegendő a centiméteres direkt georeferenciához.

Ezért a direkt georeferencia pontossága általában:

📊 **5-15 cm nagyságrendű.**

📊 **Tipikus IMU pontosság UAV rendszerekben**

A drónokban általában MEMS IMU-k találhatóak.

Tipikus orientáció pontosság:

paraméter	pontosság
roll	0.02 - 0.05°
pitch	0.02 - 0.05°
yaw	0.05 - 0.15°

📐 **Az IMU stabilitása repülés közben**

Az orientáció mérését több tényező befolyásolja:

🌡️ hőmérséklet

🌀 vibráció

📡 GNSS korrekciók

📊 **Rövid távú stabilitás**

időtartam	orientáció drift
1 s	< 0.01°
10 s	0.02 - 0.05°
60 s	0.05 - 0.1°

RTK drón + kevés GCP: az optimális kompromisszum

📍 Miért nem elegendő önmagában az RTK?

Az RTK GNSS lehetővé teszi a kamera vetítési centrumának **centiméteres meghatározását**, de a kamera orientációja továbbra is korlátozott pontosságú.

📍 A direkt georeferencia pontosságát gyakran az **IMU orientáció pontossága** korlátozza.

📍 Következtetés

A gyakorlatban a legjobb kompromisszum:

📍 RTK drón + néhány GCP

Ez biztosítja:

- 📍 gyors adatgyűjtés
- 📍 stabil blokk
- 📍 centiméteres pontosság.

📍 Kevés GCP szerepe

Ha a tömbben néhány GCP is szerepel:

- 📍 korrigálhatók a maradék szögtájékozási hibák
- 📍 csökkenthetők a tömb torzulásai
- 📍 javul az abszolút pontosság

🌟 Gazdasági előny

A GCP-k telepítése gyakran a terepi munka **legidőigényesebb része**.






RTK használatával:






- 📍 kevesebb pont
- 📍 rövidebb terepi munka
- 📍 gyorsabb projekt.

Gyakorlati következtetések és ajánlások

Mit tanulhatunk a drónos fotogrammetria pontosságáról?

A fotogrammetriai pontosság nem egyetlen paramétertől függ. A végső eredményt a **teljes mérési rendszer és geometria** határozza meg.

 **Kamera és képminőség**
 biztosítsunk jó képélességet
 válasszunk megfelelő GSD értéket
 használjunk megbízható kamerakalibrációt
 A képi mérési pontosság tipikusan: 0.3 - 0.5 pixel




 **Repülési geometria**
 megfelelő repülési magasság
 elegendő felvételi bázis
 optimális átfedés
 a túl nagy átfedés csökkentheti a magassági pontosságot.

Optimális gyakorlati megoldás

A legtöbb felmérésnél a legjobb kompromisszum:





RTK drón + kevés GCP

Ez biztosítja:

-  gyors terepi munka
-  stabil blokk
-  centiméteres pontosság.



Végső üzenet

A drónos fotogrammetria pontossága akkor optimalizálható, ha:

-  a szenzor
-  a felvételi geometria
-  a geodéziai kontroll
-  a feldolgozás

egymással összhangban van megtervezve.




Illesztőpontok

-  megfelelő számú GCP
-  homogén eloszlás

Ajánlott pontosság:

$$\sigma_{\text{GCP}} \leq \text{GSD} / 10$$

RTK és direkt georeferencia

-  RTK javítja a blokk stabilitását
-  csökkenti a szükséges GCP számot
-  azonban az IMU orientáció pontossága gyakran korlátozza a direkt georeferenciát.

Irodalom

- ▶ Agisoft LLC. (2023). *Agisoft Metashape Professional Edition User Manual (Version 2.0)*. https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_0_en.pdf
- ▶ Pix4D. (n.d.). *Best practices for image acquisition and photogrammetry*. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557459>
- ▶ Pix4D. (n.d.). *How to verify that there is enough overlap between the images*. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/203756125>
- ▶ Roncella, R., & Forlani, G. (2021). *UAV block geometry design and camera calibration: A simulation study*. *Sensors*, 21(18), 6090. <https://doi.org/10.3390/s21186090>
- ▶ Li, Z., et al. (2024). *A robust camera self-calibration method based on circular oblique images*. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-1-2024, 131-138. <https://isprs-annals.copernicus.org/articles/X-1-2024/131/2024/>
- ▶ LaForest, L. M., et al. (2021). *System calibration including time delay estimation for GNSS/INS-assisted pushbroom scanners onboard UAV platforms*. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1980993>
- ▶ Sadeq, H. A., et al. (2019). *Accuracy assessment using different UAV image overlaps*. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 7(2), 75-87. <https://doi.org/10.1139/juvs-2018-0014>

KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!

PROF. DR. JANCsó TAMÁS

E-MAIL: JANCso.TAMAS@AMK.UNI-OBUDA.HU



Óbudai
Egyetem
OBUDA UNIVERSITY