

Távérzékelés BSc.

Lovas Tamás

Lézerszkennelés

Légi lézerszkennelés alkalmazási területei

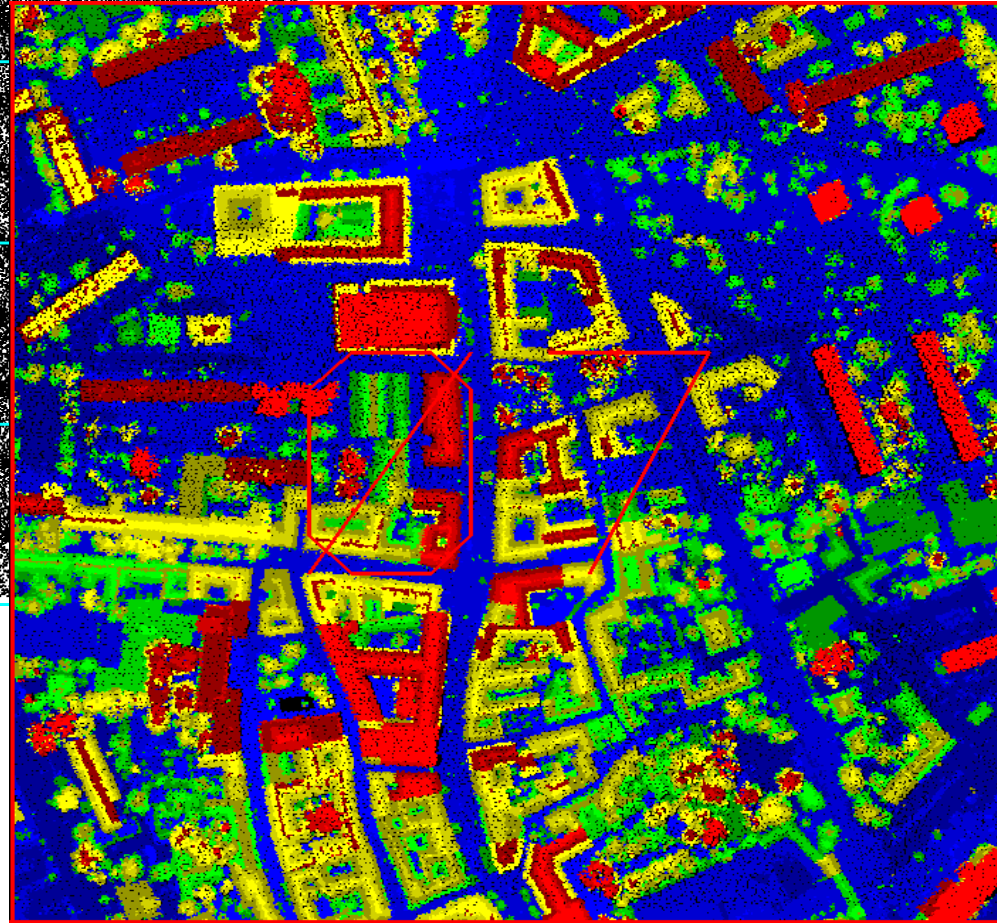
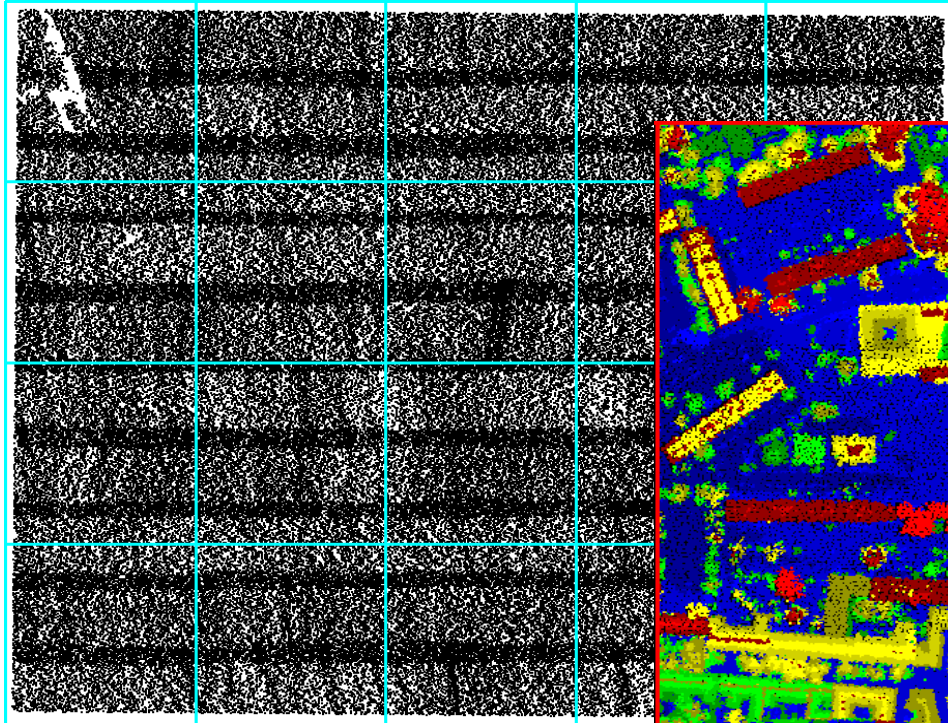
Elmélet vs. gyakorlat

- példa: a Fugro algériai felmérése
- Szenzor/platform a helyszínen
- Repülőtér
 - Karbantartás
 - Üzemanyag
- Földi állomások
- Hőmérséklet

A lézerszkennelés rövid története

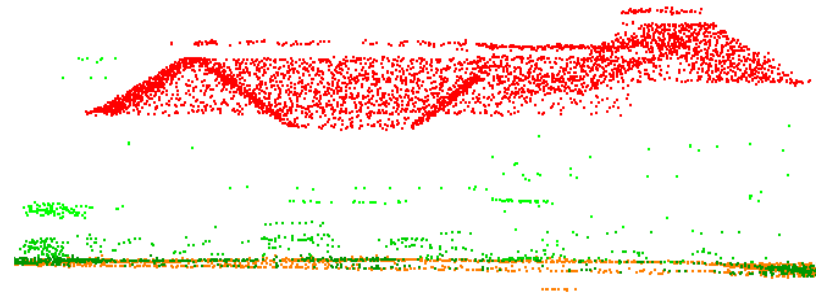
- 1972: Airborne Profile Recorder (APR) és kombinált blokk-kiegyenlítés
- 1980-88: megvalósíthatósági tanulmányok
- 1989-90: lézerprofilozás (Ackermann, Stuttgart)
- 1993: kereskedelmi termék (TopScan ALTM1020)
- 1999: 30-féle lézerszkenner a piacon
- 2004: első magyar légi kísérlet
- 2016-17: Geiger Lidar kereskedelmi szolgáltatásként

Lézerszkennelt adatok feldolgozása I.

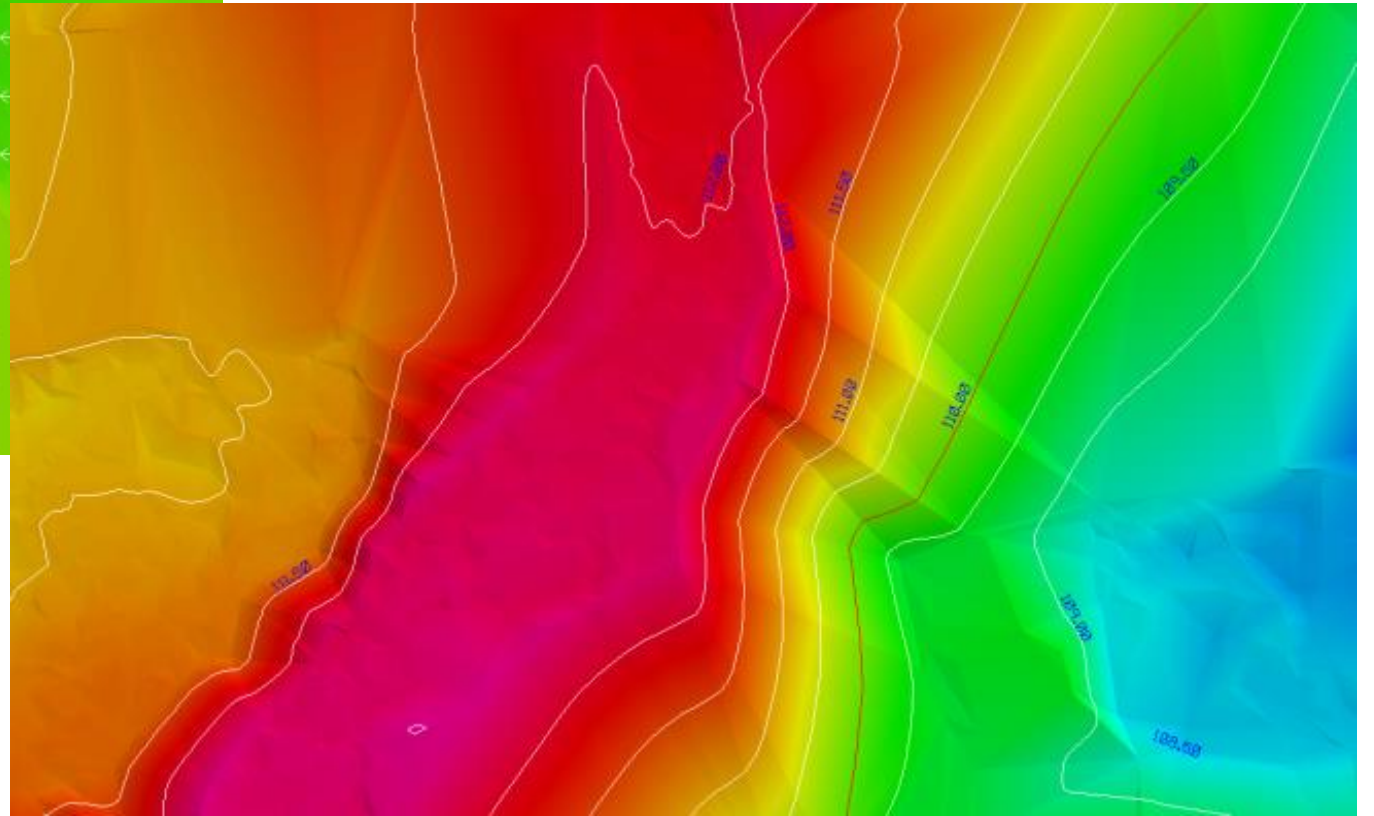
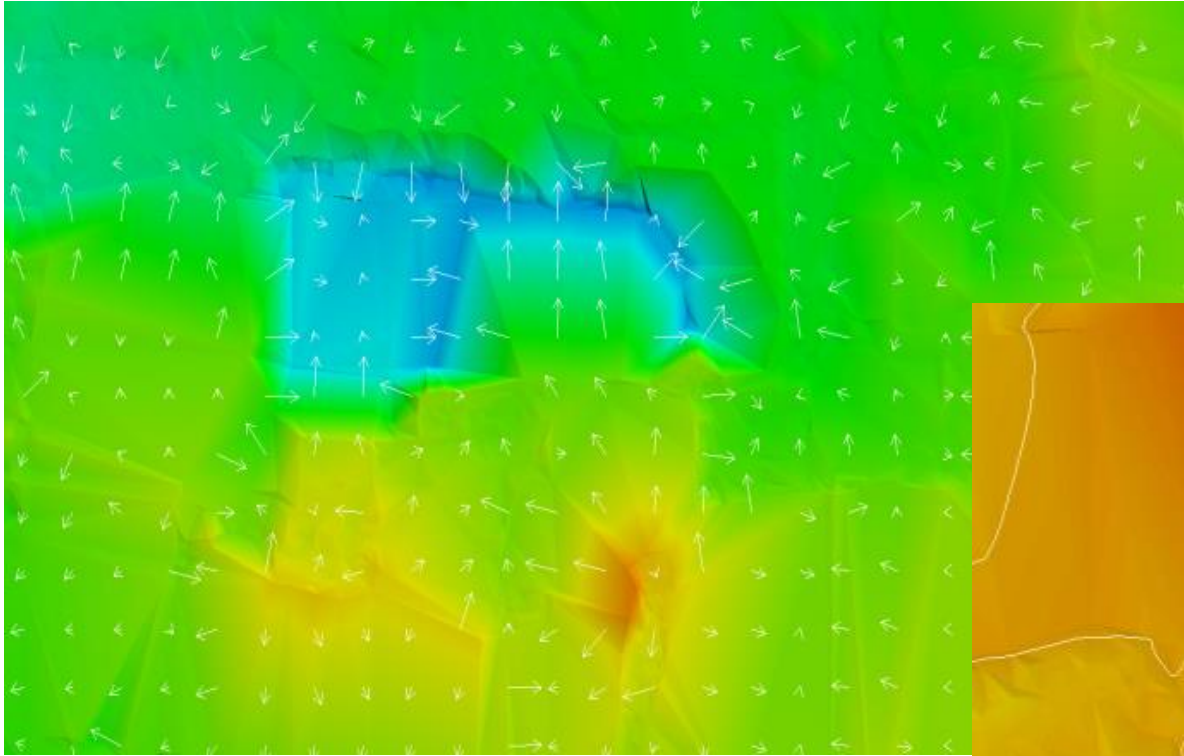


02	03	04	05
07	08	09	10
12	13	14	15
17	18	19	20

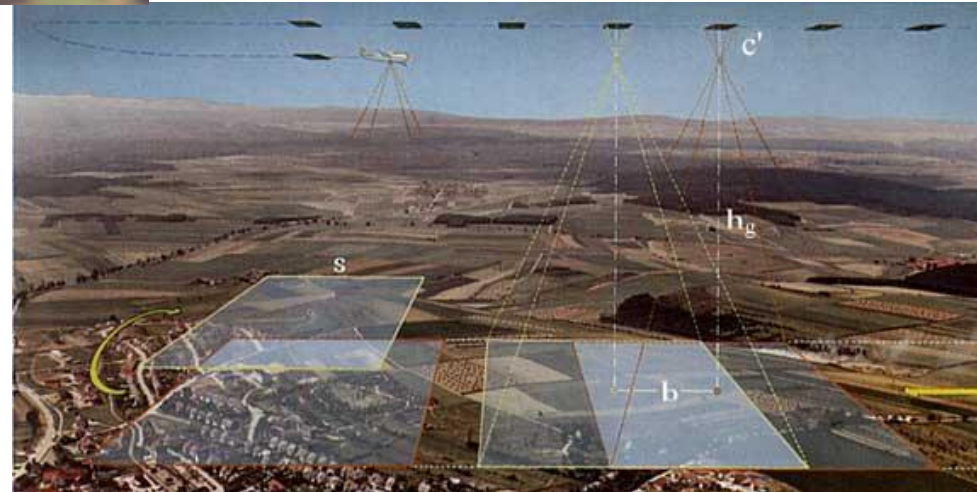
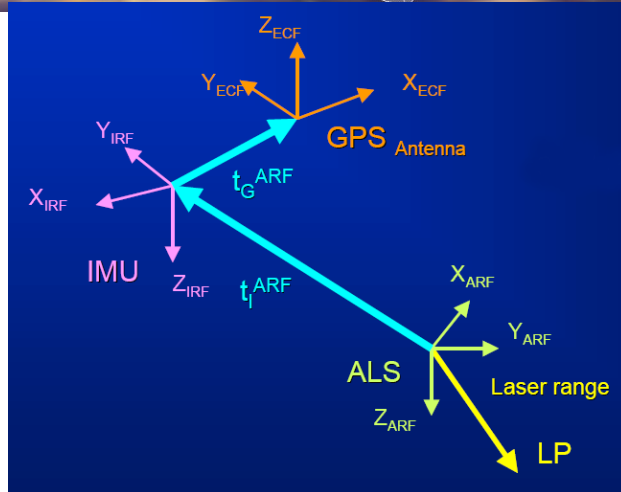
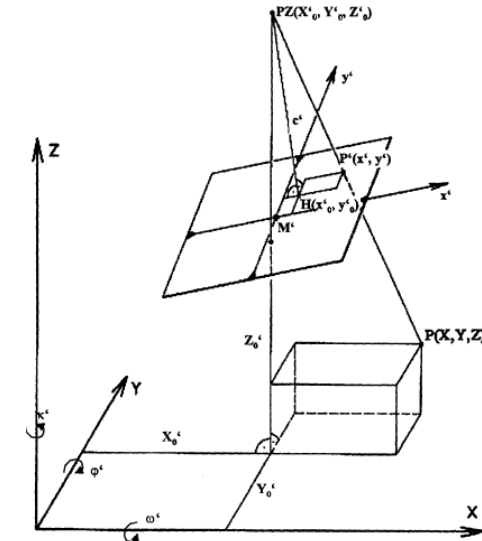
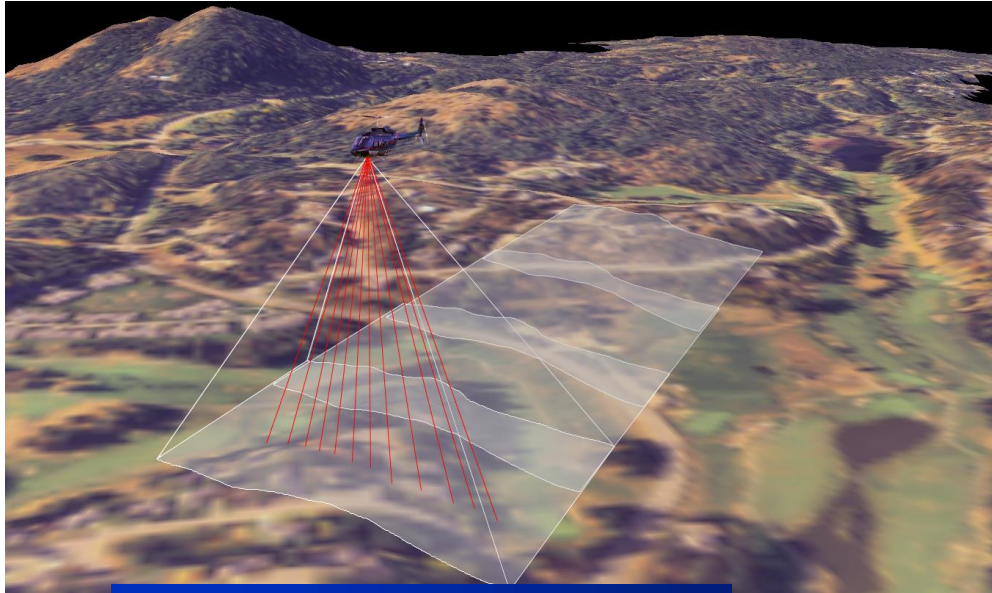
Lézerszkennelt adatok feldolgozása II.



Lézerszkennelt adatok feldolgozása III.



LiDAR vs. Fotogrammetria



Különbségek I.

- Passzív vs. aktív, nagy teljesítményű, kollimált, monokromatikus érzékelés
- Frame vagy soros szenzorok perspektív geometriával vs. pont-szenzorok poláris geometriával
- Teljes területi lefedettség vs. pont-mintavételezés

Különbségek II.

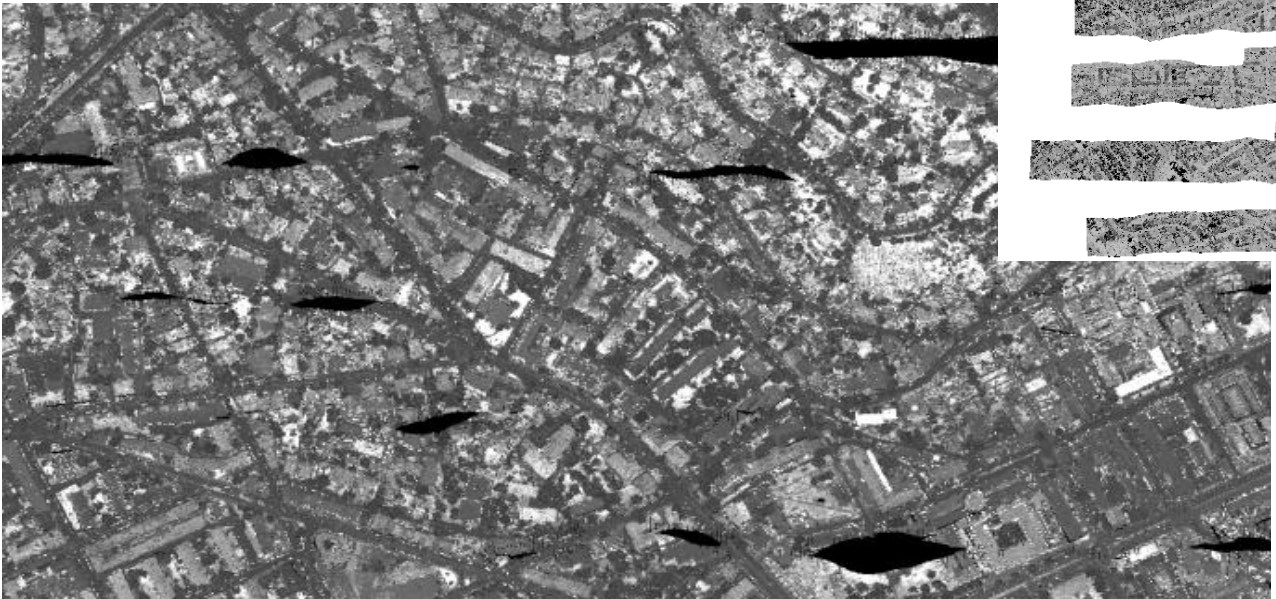
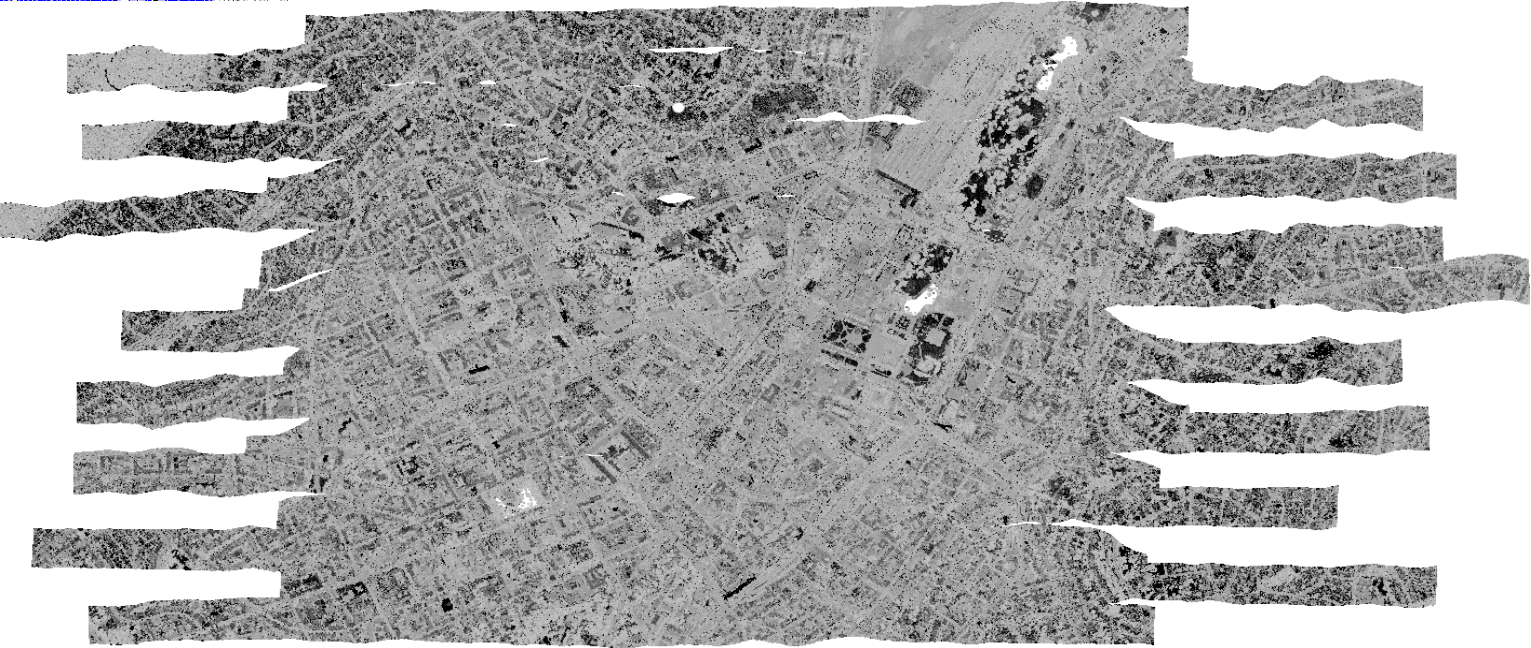
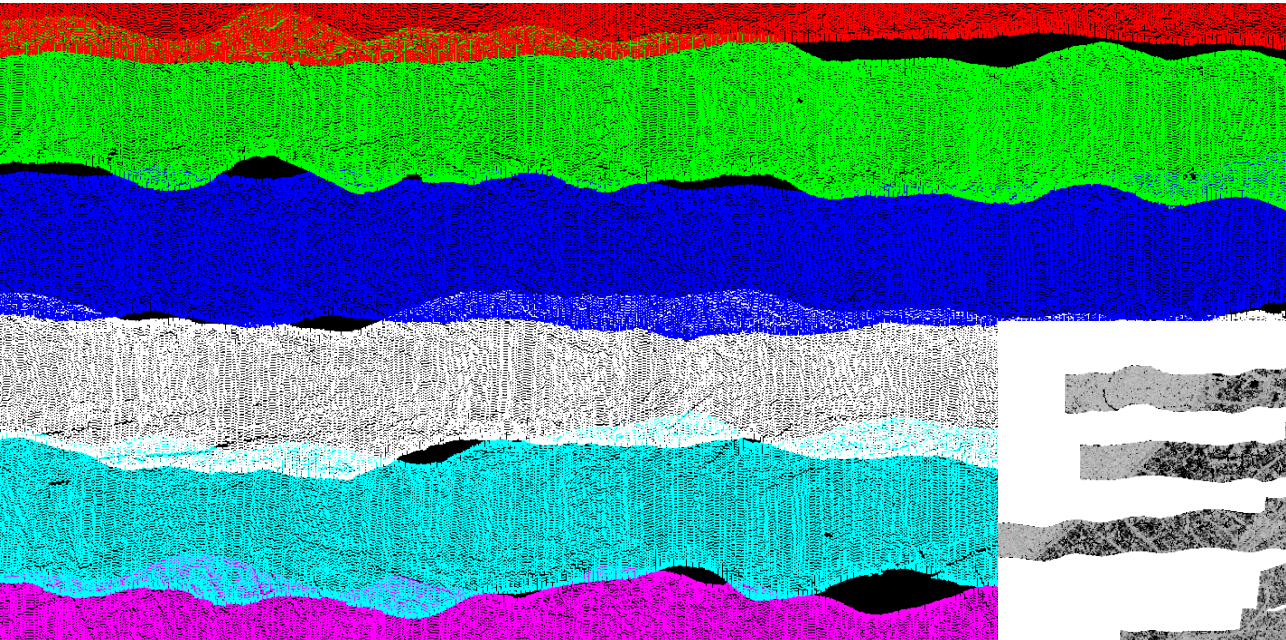
- Direkt vs. indirekt 3D koordináta számítás
- Geometriailag és radiometriailag jó minőségű (akár multispektrális) képek vs. képek nélküli vagy gyengébb minőségű monokróm képi információ
- LiDAR-nál: footprintnél kisebb objektumok (területek) érzékelése

Közös pontok

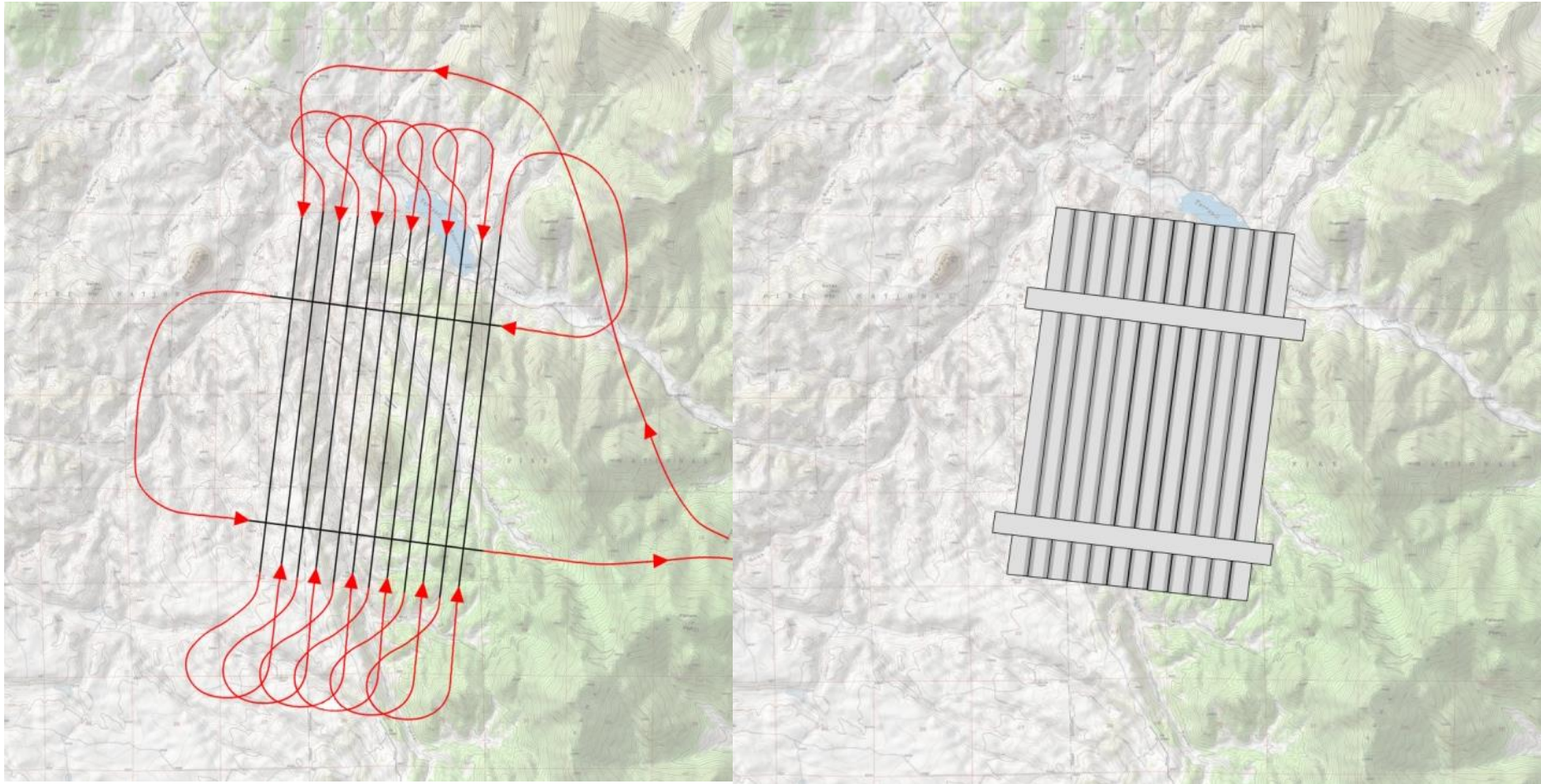
- Szenzorok egyesítése (sensor fusion)
 - GNSS használata. Digitális fotogrammetriánál (különösen soros érzékelőknél) GNSS/INS használata
- Kép ill. digitális jelfeldolgozás
 - adatfeldolgozás módszerei, pl. durva hibák szűrése, objektumok leválogatása, tömörítés, törésvonalak felmérése
 - szabályos szerkezetbe interpolált LiDAR adatsor akár képként kezelhető

Repülési terv készítése I.

- Fotogrammetria: jól megalapozott technológia
 - Két irányú átfedések miatt stabilabb
 - Redundancia segíthet az adatfeldolgozásnál
 - GPS/INS hibánál illesztőpontok segíthetnek
- LiDAR
 - Rések a sávok között (keskenyebb sávok)
 - Változatos domborzaton közelítő DTM, esetleg helikopter szükséges
 - DGPS elengedhetetlen (referencia-állomások)



Repülési terv készítése II.



Repülési magasság, lefedettség

- Légifotózásnál nagyobb magasság és sebesség
- Fotogrammetria: nagyobb lefedettség (pl. 75° FOV vs. LiDAR $20\text{-}30^\circ$)
 - azonos magasságnál és sebességnél a $75^\circ/30^\circ$ különbség 3-szor nagyobb lefedettséget biztosít

Repülés ideje, időjárás-függőség

- LiDAR aktív: nap 24 órájában használható
- Ahogy a fotogrammetriánál is, DEM-hez jobb levélhullás után repülni, akár vékony hóréteggel (ez hullámhossztól függően még jó is lehet)
- Időjárási jellemzők (felhők, köd, szmog, füst, por, pára) ugyanúgy befolyásolják mindkét technológiát
- Erős szél nagyobb hátrányt jelent a LiDAR-nak (navigáció, keskeny sávok)

Visszaverődés

- Lézer keskeny spektrális tartomány (0.1-5 nm)
 - adott anyagokról bizonyos tartományban rendkívül jó visszaverődés (pl. 900nm-nél hó, fa)
 - adott anyagokról gyenge visszaverődés (pl. frissen aszfalozott út)
- Légifényképezés: általában a teljes látható tartományt lefedi

Képi információ

- LiDAR-nál különböző felbontás két irányban: teljes területről lehetetlen homogén sűrűséget elérni
 - interpoláció szabályos rácsba
- LiDAR nem érzékeny az árnyékokra
- LiDAR-ral együtt képkészítés: színes pontfelhő

Automatizálhatóság

- Ideális esetben egy LiDAR rendszer automatikusan adja a koordinátákat
 - automatikus szűrés (pl. növényzet)
 - automatikus interpoláció
- Fotogrammetriában több manuális munka
 - képekből pontfelhő
 - DSM-ből DEM

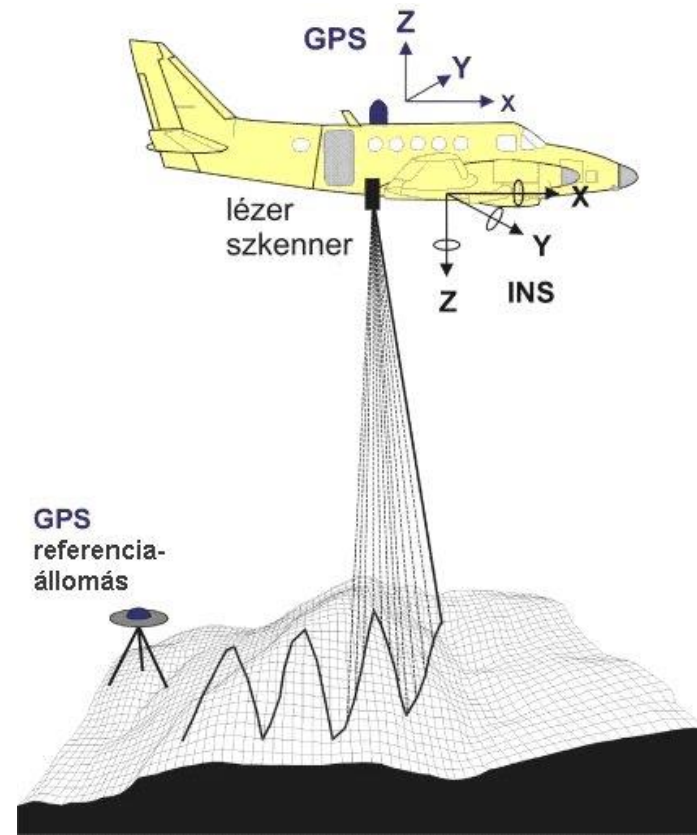
Technológiai megalapozottság

- Fotogrammetria: évtizedek tapasztalata
 - programcsomagok, eljárások stb.
- LiDAR többnyire szolgáltatóktól
 - egyre több szoftver
 - nincs egységesen elfogadott szabvány kalibrációra, ellenőrző pontokra, pontosság mérésére stb.

Digitális fotogrammetria és LiDAR összehasonlítás – egy típuspélda

LiDAR	Digital photogrammetry
170 scans per second (190 kHz), 30° FOV	GSD 25 cm
8 points/ m ²	16 points/ m ²
Flying height 750 meters	Flying height 4 188 meters
Aircraft speed 60 m/sec	Aircraft speed 141 m/sec
Strip width 403 m	Strip width 4 328 m
20% side-lap between flight lines	60% side-lap between flight lines
Effective strip width at 322 m	Effective strip width 1 731 m

LiDAR vs. IfSAR



LiDAR vs. IfSAR

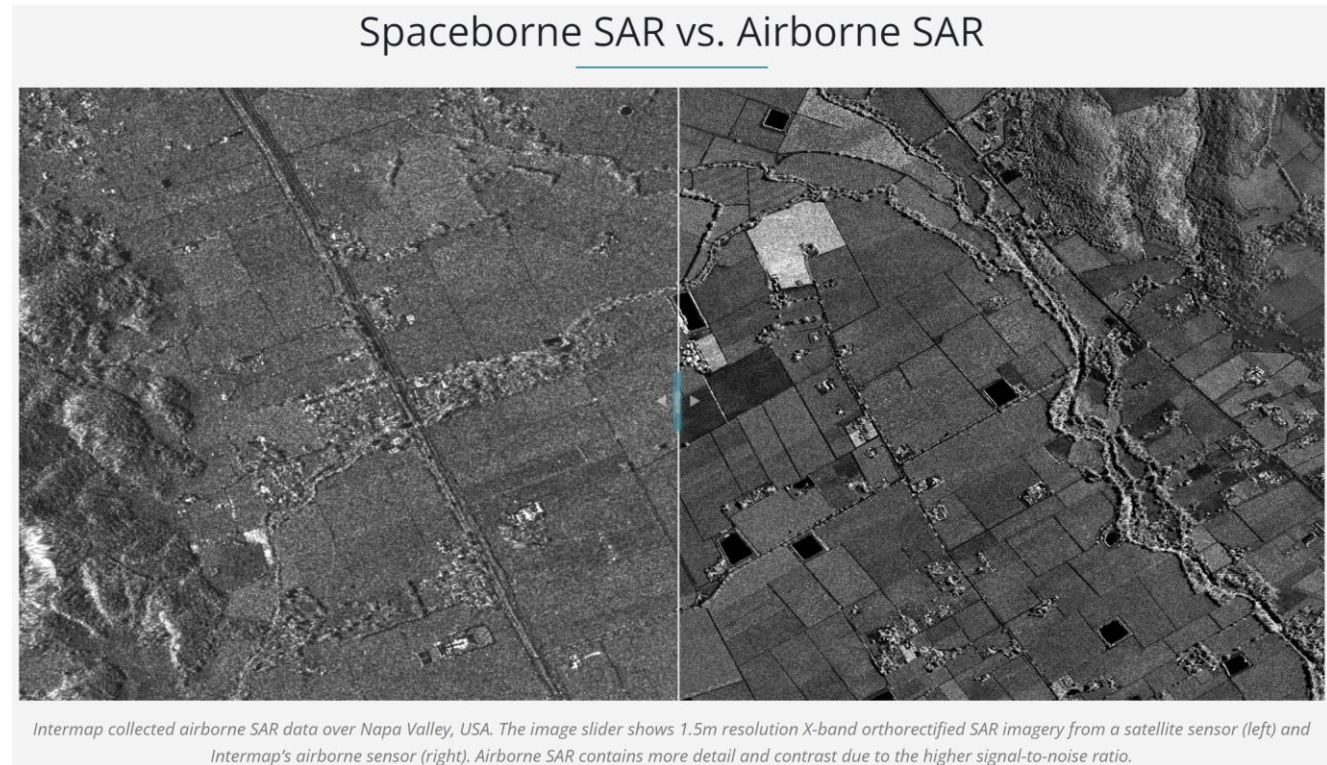
- *„In many applications, the ideal strategy is to combine the best of both.”*
- IfSAR költséghatékonyabb nagy területek felmérésénél
- LiDAR jobb az apróbb részletek pontos felmérésénél ill. erdészeti alkalmazásoknál
- Video: <https://www.intermap.com/collection>

Hasonlóságok I.

- Óriási fejlődés az utóbbi időben
 - SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)
 - légi IfSAR
- DSM/DEM
 - 1.5 – 5m felbontásban
 - 0.15 – 3m pontossággal
- Aktív rendszerek
 - időmérésből/fázismérésből távolság számítás
- IfSAR-nál fáziskülönbség mérése két antennával vett jeleknél

Hasonlóságok II.

- INS/GNSS
 - a hely/helyzetmeghatározás hibája az „error budget” fő tényezője
- Platform-függőség
 - alacsony/lassú ill. magas/gyors
 - pontosság, felbontás



Különbségek

- Repülési (szenzor) magasság
 - lefedettség
 - ellentétben LiDAR-ral IfSAR-nál magassággal a jel-zaj nő, így a távolságmeghatározás is.
 - ellentétben IfSAR-ral, a LiDAR footprint (ez is egyfajta felbontás!) magassággal nő

Hullámhossz

- IfSAR: 3cm (X) vagy hosszabb
 - áthatol felhőn, ködön stb.; a nap 24 órájában használható
- LiDAR: általában a közeli infrában ($1\mu\text{m}$)
 - nem hatol át felhőn
 - vízben elnyelődik, szóródik

Geometria

- IfSAR „oldalra néző”
 - $30^\circ - 60^\circ$
 - kitakarások
- LiDAR nadír központú
 - szimmetrikus pásztázás: ált. $\pm 20^\circ$
 - minimalizálja a kitakarásokat
 - adott repülési magasságnál korlátozott sáv szélesség

Pont méret és felbontás

- LiDAR
 - footprint: 10-100cm
 - pontok vízszintes távolsága: 0.2-5m
 - szabálytalan vagy közel-szabályos rács
 - Megjelenítésnél ált. interpolált állományok
- IfSAR „kapásból” szabályos rácsban adott magassági értékeket ad

Magassági pontosság

- Elméletileg akár 5-10cm-es középhiba is elérhető
 - ésszerű tervezés, alkalmazás(ok) figyelembe vétele
- LiDAR: 15-30cm
 - felső határ; terepi adottságok (pl. lejtők) ill. üzemelési tényezők (pl. magasság, szkennelési szög)
- IfSAR: 0.5, 1, 3m RMSE, 5m pontköz

Képi információ

- IfSAR: grayscale képek
 - szürkeségi értékek magasságnak megfelelően: ortorektifikált képek
 - pixelméret: dm-m
- LiDAR: nincs képi információ
 - egyre több rendszer kamerával
 - intenzitás

Erdészeti alkalmazások

- Radar hullámhossz, látószög és a lombkorona sűrűsége függvényében behatolhat a lombkorona alá
 - X-sávban inkább lombkorona
 - L és P sávban van esély pár tereppontra
- LiDAR: többszörös visszaverődés
 - lombkorona sűrűsége itt is döntő
 - aljnövényzet/tereppont problémája

Hozzáférhetőség

- >400 LiDAR rendszer világszerte
 - ASPRS szabványosítás
 - cégek/vállalatok bevonása
 - IfSAR-ral sokkal kevesebben foglalkoznak
 - fejlesztési és üzemelési költségek sokkal magasabbak
- intermap.com

Költségek

- Beszerzési ár
- Karbantartás
- Platform
- Repülési költségek
- Feldolgozási költségek
 - nyers adat, DEM, DSM
 - modellezés (pl. épületek, úthálózat)

IfSAR és LiDAR összehasonlítás

	IfSAR	LiDAR
rendszer	STAR-3i	tipikus
szenzor magasság	6.000 - 10.000 m	1.000 - 6.000 m
szenzor sebesség	750 km/h	200 km/h
pásztázási szög	30° - 60°	±20° (max. 35°)
pásztázási sáv szélesség	5 - 10km	0.5 - 1km
kép pixel-méret	1.25m	külön kamera
DEM felbontás	5m	0.5 -5m
DEM magassági pontosság	0.5, 1, 3m	10 - 30cm
DEM vízszintes pontosság	<1.25m	0.4 - 1m

Irodalomjegyzék

- Távérzékelés
 - Charles K. Toth (2004): Technológiaváltás a Térinformatikában: Modern Szenzorok, Geomatikai Közlemények, Sopron, pp. 75-82.
- Fény
 - <http://www.mozaik.info.hu/mozaweb/feny/>
- Hullámhosszok-színek
 - http://eosweb.larc.nasa.gov/EDDOCS/Wavelengths_for_Colors.html
- Bor Zsolt: A mindentudó fénysugár: a lézer
 - <http://www.mindentudas.hu/mindentudasegyeteme/bor/20030207borzsolt3.html>
- Áttekintés (Martin Flood)
 - <http://www.airbornelasermapping.com/>
- Áttekintés (Carter, Shrestha, Tuell, Sartori, Bloomquist)
 - www.ce.ufl.edu/nsf/Presentations/Bill%20Carter/Carter.ppt
- Áttekintés
 - http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Airborne_AltimetricLidar_Tutorial.htm
- Gyártók/szolgáltatók
 - Optech: <http://www.optech.ca/>
 - Toposys: <http://www.toposys.com/>
 - LH systems: <http://gis.leica-geosystems.com/>
 - Airborne1: <http://www.airborne1.com/>
- Technológiák összehasonlítása
 - <http://srtm.usgs.gov>
 - B. Mercer: LiDAR vs. IfSAR, Earth Imaging Journal, 2005
 - E. Baltsavias: A comparison between photogrammetry and laser scanning, ISPRS, 1999
 - http://www.eijournal.com/industry_directory-LiDAR.asp

Távérzékelés
Hely- és helyzetmeghatározás
LiDAR pontosság

GPS konkurenciák

- GLONASS
 - hasonló rendszer
 - $H=19100$ km
 - $i=64.8^\circ$
 - $T=11$ h 15m
 - 3×8 műhold
 - 2 jeltípus, műholdanként más frekvencia
- Galileo
 - 27+3 műhold
 - $H=23600$ km
 - $i=56^\circ$
 - $T=14$ h
 - 10 különböző jel 4 frekvencián

Mérési módok/módszerek

- kódmérés (pontosság: m-dm)
- fázismérés (pontosság: mm)
- cél: pszeudotávolság (műhold-vevő távolság + órahiba)

- abszolút - relatív (differenciális)
- statikus - kinematikus
- valós idejű – utólagos
- kombinációk!

Jellemző mérési módszerek

- Navigációs: absz., valós, kód, 10 m
- DGPS: diff., valós, kód, m
- Statikus: rel., utó, fázis, mm-cm
- Kinematikus: rel., utó, fázis, cm
- RTK: rel., valós, fázis, cm

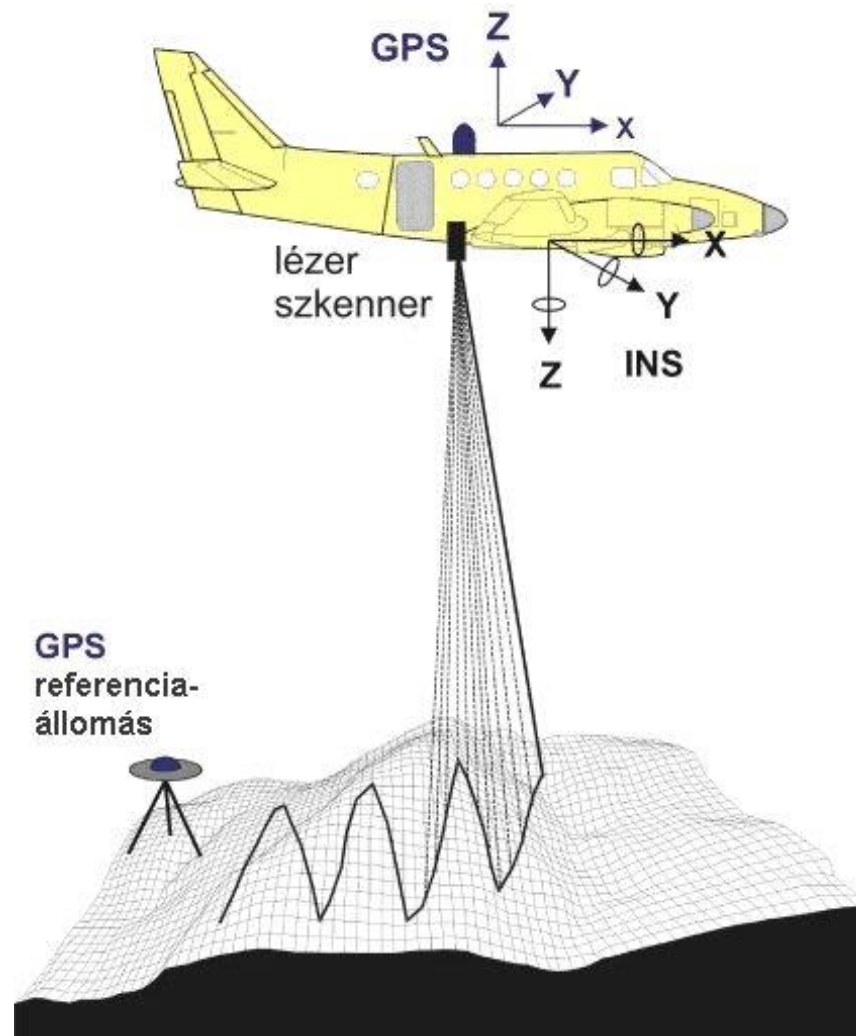
DGPS lehetőségei

- Wide Area Diff. GPS (WADGPS)
 - WAAS (USA)
 - EGNOS (Európa)
 - MSAS (Japán)
- Permanens állomások
 - internet
 - mobil
 - rádiójeladók, RDS

A pontosságot befolyásoló tényezők

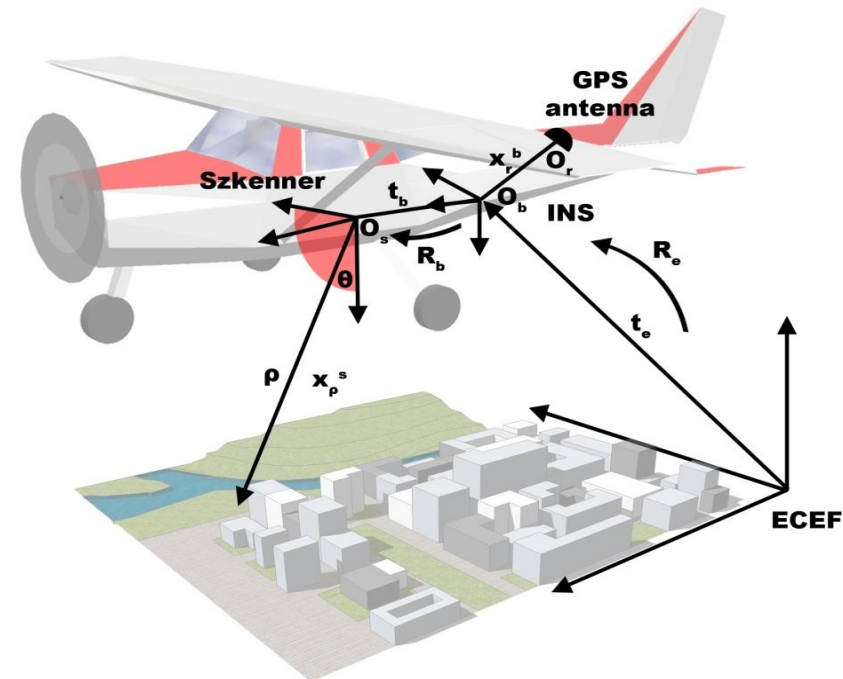
Az „error budget”

- 3D pontosság függ
 - lézerszenzor által mért távolság
 - lézersugár pozíciója
 - lézersugár helyzete
- Lézer-szenzor
- GNSS
- INS



Példák hibaforrásokra

- Lézer footprint
- Vevő időmérési hibája (0.05-2ns)
- Lézer szenzor és IMU közti külpontosság
- Lézer szenzor és GPS antenna közti külpontosság
- Szkennelési-szög mérése



Alrendszerek hibáinak súlyozott figyelembevétele

- Cél: kiegyensúlyozott ár/teljesítmény arány
- Elkerülendő:
 - lézertáv mérő cm alatti pontosság + átlagos GPS pontosság
 - high-end INS + 0.5° szögmérési pontosság
- Ma: gyári szenzor csomagok

Mi a „LiDAR-pontosság”?

- Alrendszerek pontossága
- Hibák, külpontosságok
- A kiszámított pontosság (alrendszerek összetevőiből) rosszabb, mint a gyakorlati
- ASPRS LiDAR subcommittee
 - szabványok

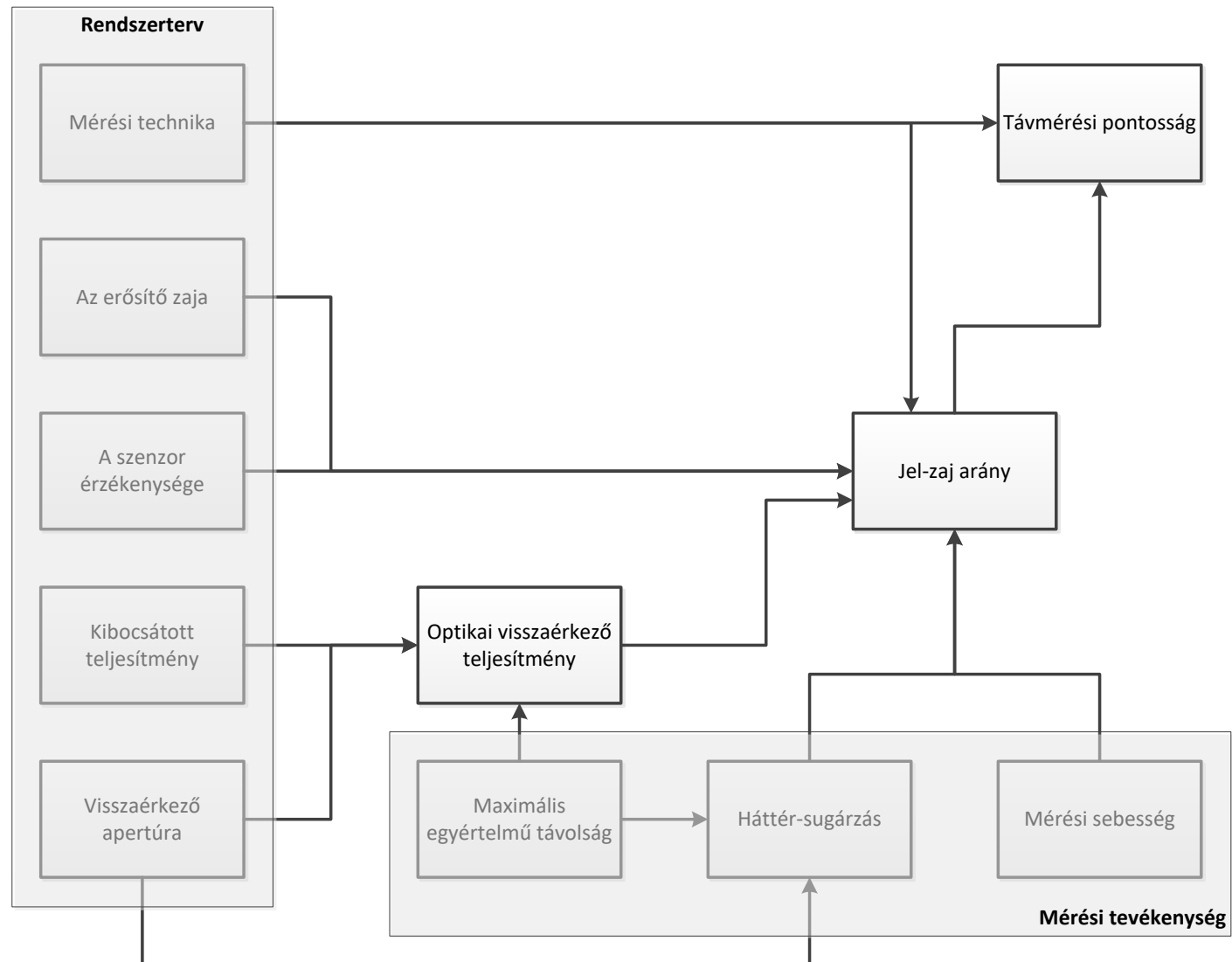
Gyártók/szolgáltatók által megadott pontosság

- Statisztikai módszerek
- Általában 1σ pontosságot adnak meg (~68%)
- Általában átlagos pontosságot adnak meg, sáv-szélesség nélkül (ált. a min. és max. átlaga)
- Geoid figyelmen kívül hagyása
- Terepi illesztőpontok figyelembe vétele
- Általában függőleges pontosságra helyezik a hangsúlyt

Lézertáv mérő pontossága

- Ismert technológia
- Légi lézerszkennerek
 - szilárd-fényerősítő vagy lézer-dióda
 - 5-10ns impulzushossz
 - 1 cm távmérési felbontás
 - 5-7cm távmérési pontosság (magasságtól függetlenül)
- Általában a legjobban definiált és legkisebb hiba-faktor

Távmérési pontosságot befolyásoló tényezők (Wehr 1999)



Lézertáv mérő kalibrálása

- Időmérő kalibrálása
- Kibocsátott és vett pulzusok pozícionálása
- Távolság-változás ferde felületről történt visszaverődésnél

Atmoszferikus korrekciók

- Hullámhossz-függő
- Refrakció
- Fénysebesség változása
- Hőmérséklet, légnyomás, páratartalom, tengerszint feletti magasság és szélesség
- Komplex atmoszféra-modell alkalmazása adatfeldolgozáskor

Lézersugár széttartása (divergencia) és a footprint mérete

- Footprint területe (példa): 1 mm-es sugár, 0.25 mrad széttartása: 25 cm-es footprint 1000 m-ről és 50 cm-es 2000 m-ről

$$A_I = \frac{\pi}{4} (D + R\gamma)^2$$

A - Footprint területe, D - lézer sugár mérete (kibocsátás), R – távolság,
 γ – lézersugár széttartása

- Széttartás lézersugárzó optikájának állításával befolyásolható
- Tipikus széttartás értékek: 0.25 – 5 mrad

$$IFOV_{diff} = 2.44 \frac{\lambda}{D}$$

GNSS hibák

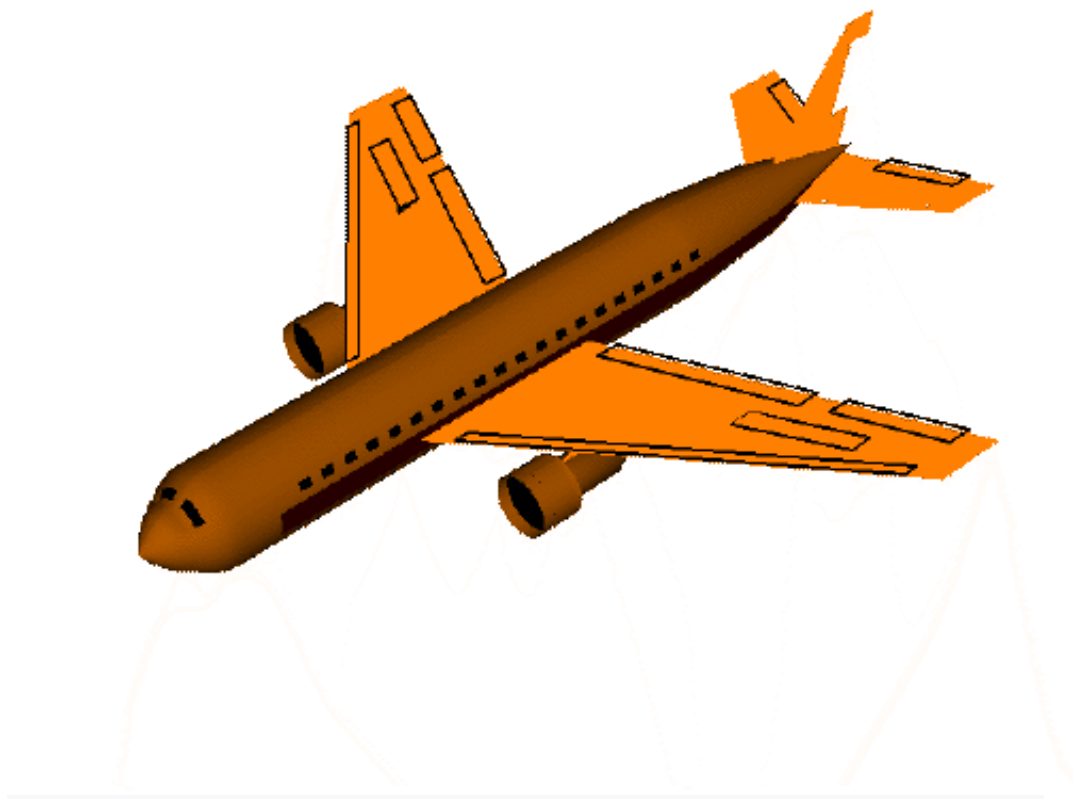
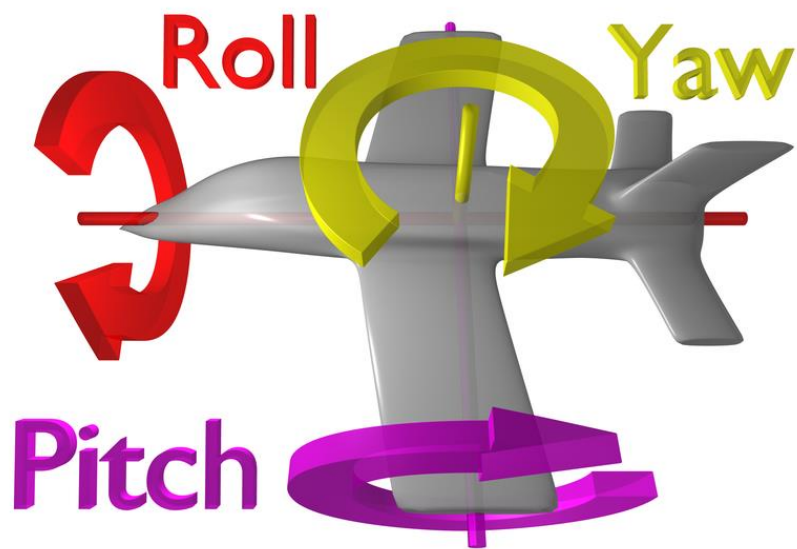
- Relatív helymeghatározás
 - fázismérés (pl. RTK: cm)
 - kód mérés (DGPS: m)
- Műhold-geometria: PDOP
- Többutas terjedés
- Antenna fázis-középpont modell
- Légköri hatások (troposzféra vagy ionoszféra)

Geoid

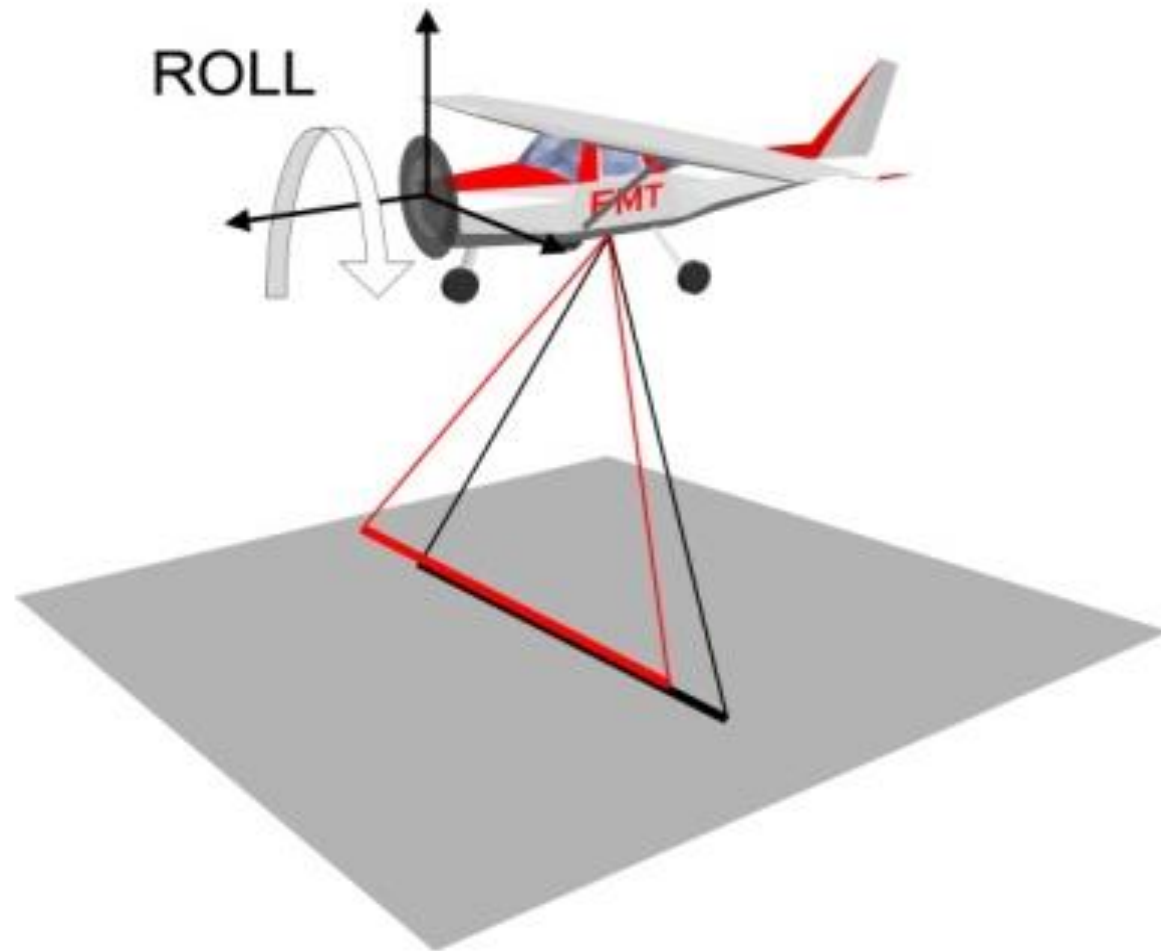
- GPS „magassági” hibája
- Modellek, pl. Geoid99 modell (USA)
 - ± 5.2 cm 5 km-es távon
 - ± 5.5 cm 10 km-en
 - ± 6 cm 100 km-en
- Teszt: LiDAR DEM és földi felmérés összehasonlítása

IMU hibája

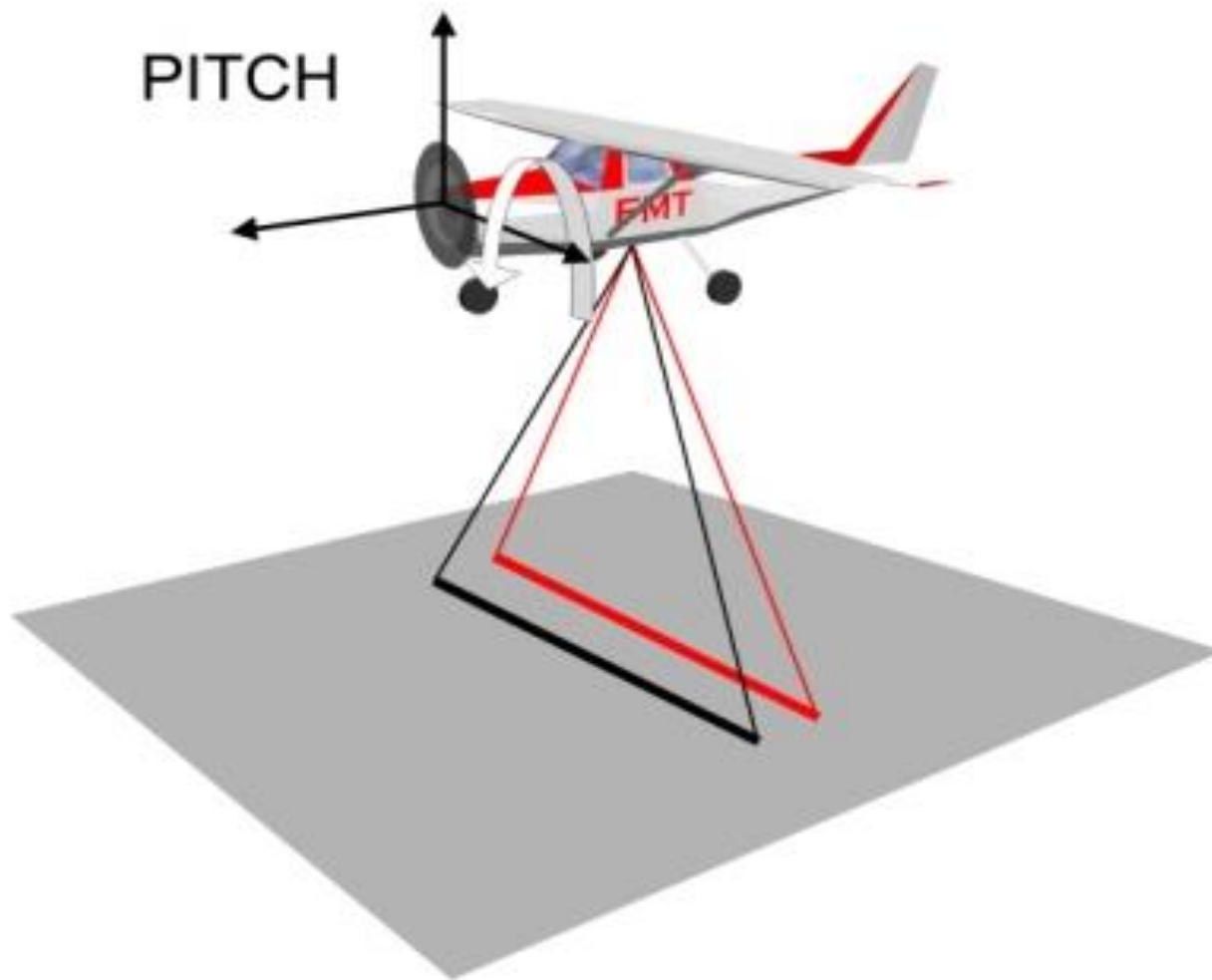
- IMU változatok: RLG, FOG, MEMS
- roll (ω), pitch (ϕ),
heading/yaw (κ)



Hibahatások; roll (ω)



Hibahatások; pitch (ϕ)



Hibahatások; yaw (κ)



IMU pontossága

- Kereskedelmi rendszereknél
0.008° (ϕ/ω), 0.015° (κ)
(Applanix POS/AV™ 410 (MEMS))
0.005° (ϕ/ω), 0.008° (κ)
(Applanix POS/AV™ 510 (FOG))
0.0025° (ϕ/ω), 0.005° (κ)
(Applanix POS/AV™ 610 (RLG))
- 0.005° 0.17 m-es terepi eltérést okoz 2000
– magassággal arányos



Irányzási hiba egyéb összetevői

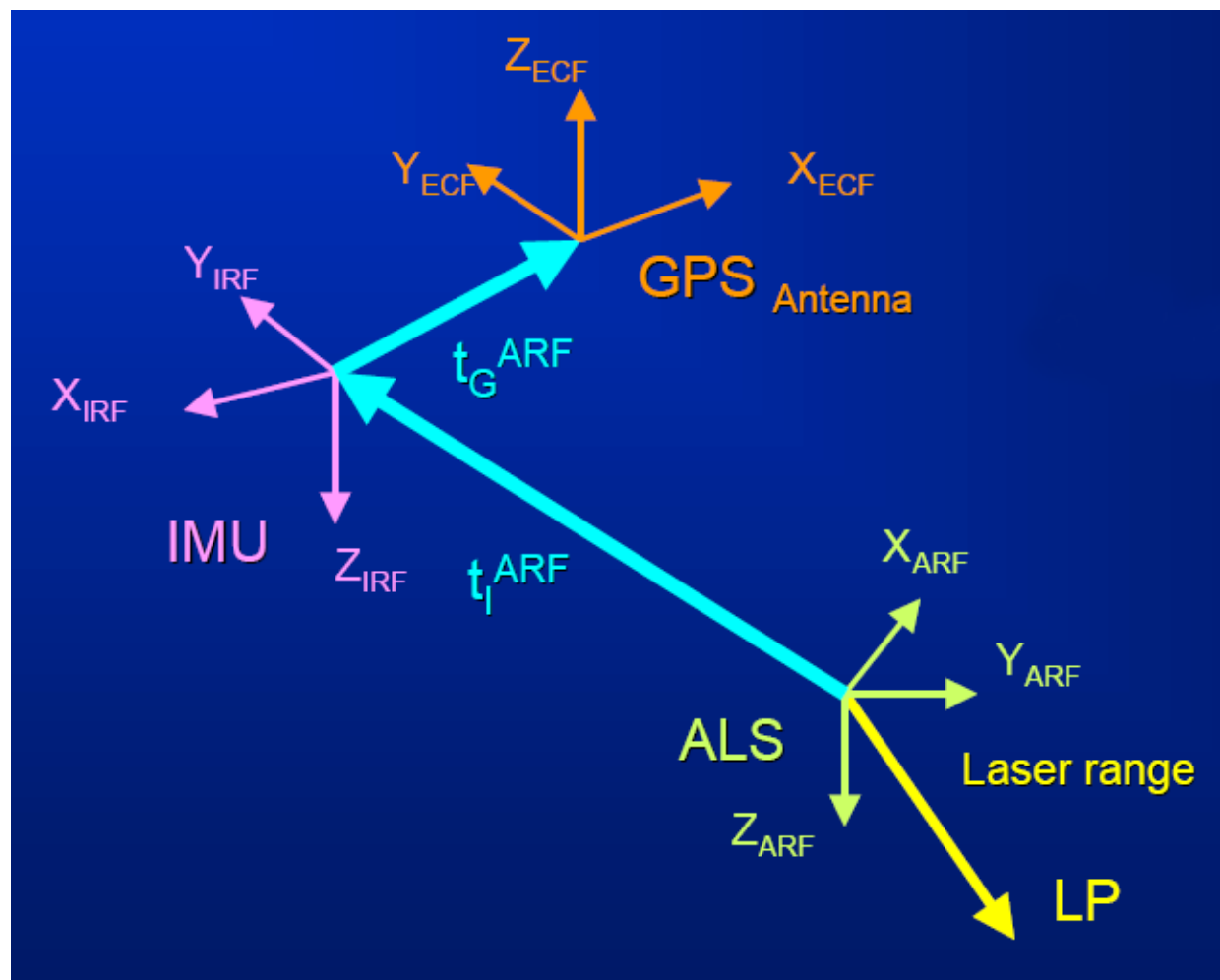
- Szkenner tükör szög-meghatározása
- Tükör mozgás nem lineáris összetevői
(különösen az oszcilláló tükrös rendszereknél)

Vízszintes vs. magassági pontosság

- Vízszintes pontosság
 - nagyban az irányzási pontosságtól függ, ezért a repülési magassággal arányosan romlik
 - jellemzően 2-3-szor rosszabb, mint a magassági pontosság
- Általános meghatározási mód: a repülési magasság arányában, pl. 1/1000, 1/2000 vízszintes pontosság
- „1/2000th the altitude”

Alrendszerek kapcsolata

- ECF
- IRF
- ARF



Általános „LiDAR-egyenlet”

$$\begin{aligned}
 \mathbf{X}_{LP}^{ECF} = & \mathbf{X}_G^{ECF} + \Delta \mathbf{X}_G^{ECF} + \mathbf{R}(0, \pi/2 + \Phi_G^{ECF}, -\lambda_G^{ECF}) \cdot \mathbf{R}(\Delta\eta, \Delta\zeta, 0) \cdot \mathbf{R}(r + \Delta r, p + \Delta p, h + \Delta h) \cdot \\
 & \mathbf{R}(m_r, m_p, m_h) \cdot (\mathbf{R}((a + \Delta a) \cdot s_a, (b + \Delta b) \cdot s_b, 0) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (l + \Delta l) \cdot s_l \end{bmatrix} - t_l^{ARF} - \Delta t_l^{ARF} - t_G^{ARF} - \Delta t_G^{ARF})
 \end{aligned}$$

Calibration Parameters:

$\Delta \mathbf{X}_G^{ECF}$	GPS offset
$\mathbf{R}(\Delta\eta, \Delta\zeta, 0)$	deflection of the geoid normal
$\Delta r, \Delta p, \Delta h$	IMU attitude offset
m_r, m_p, m_h	IMU-ALS mounting misalignment
$\Delta a, s_a$	cross-track scanner offset and scale
$\Delta b, s_b$	along track scanner offset and scale
$\Delta l, s_l$	laser range offset and scale
Δt_l^{ARF}	IMU eccentricity offset
Δt_G^{ARF}	GPS antenna eccentricity offset

„error budget”

lézerszenzor	lézertáv mérő	5 cm
	szkenner-szög	0.003°
IMU	φ	0.005°
	ω	0.005°
	K	0.008°
GPS	X, Y, Z	5 cm

Irodalomjegyzék

- Farrell, J.A. – Barth, M. (1999): The Global Positioning System and Inertial Navigation, McGraw-Hill, New York
- www.airborne1.com
- <http://www.grc.nasa.gov>
- A. Wehr, U. Lohr (1999): Airborne laser scanning – an introduction and overview, ISPRS
- E.P. Baltsavias (1999): Airborne laser scanning: basic relations and formulas, ISPRS
- P. Lohmann: Laserscanning Geometric Aspects, IPI presentation
- P. Lohmann: Laserscanning Introduction