

Aerotriangulace v afinní souřadnicové soustavě

Ing. Zdeněk Švec,
Fakulta stavební, ČVUT v Praze

Abstrakt

Při fotogrammetrických aplikacích se pro popis objektového prostoru standardně uvažuje používání kartézského souřadnicového systému se stejným měřítkem ve všech osách. Zpracování leteckých měřických snímků však většinou probíhá v prostoru vzniklém kombinací národního polohového a výškového souřadnicového systému. Takto vzniklý prostor ale obvykle nesplňuje podmínku jednotného měřítka ve všech osách. Typickým příkladem je použití polohového systému S-JTSK v kombinaci s výškovým systémem Baltským - po vyrovnání, ve kterém probíhá zpracování leteckých měřických snímků pořízených v rámci periodického snímkování ČR. Příspěvek se zabývá změnou měřítka výškového systému za účelem odstranění systematických chyb výšek projekčních center, které jsou způsobeny nejednotným měřítkem výškového a polohového souřadnicového systému.

Úvod

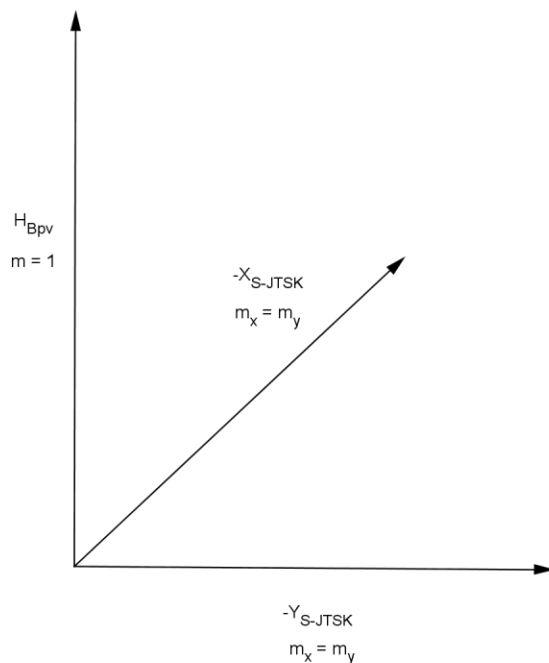
Klasickou metodou určení prvků vnější orientace (PVO) leteckých měřických snímků (LMS) je analytická aerotriangulace založená na vyrovnání paprskových svazků spojovacích a vlíčovacích bodů (VB). Jedná se vlastně o matematický model, jehož měřítko určují vlíčovací body. Jelikož vlíčovací body leží na úrovni reliéfu a jejich rozmístění je přibližně rovinné, měřítko celého modelu odpovídá měřítku použitého polohového souřadnicového systému. Z toho důvodu výška středů projekčních center určených AAT neodpovídá skutečnosti. Tento fakt ale neznehodnocuje výsledky AAT, protože stejný model posléze slouží k určování prostorové polohy objektů na úrovni reliéfu (stereo vyhodnocení, ortogonalizace LMS atd.). Z toho důvodu lze naopak konstatovat, že pokud bychom získaly správnou výšku projekčních center LMS (tzn. kdyby měřítko výškového souřadnicového systému zůstalo nezměněno), byly by výsledky vyhodnocení LMS zatížené systematickou chybou ve výšce.

S nástupem používání palubních aparatur GNSS/IMU přibýly možnosti georeferencování LMS. Přibližné PVO lze určit přímo z měření GNSS/IMU. Přesnější je pak tzv. integrovaná orientace snímače tzn. AAT s přidáním PVO z GNSS/IMU jako observací do vyrovnání. GNSS souřadnice projekčních center jsou určovány v geocentrickém souřadnicovém systému a následně transformovány do národního polohového a výškového souřadnicového systému. Měřítka výškového systému tedy nepodléhá žádnému zkreslení (Obr. 1.), a proto nastávají nesrovnalosti mezi výsledky AAT s použitím VB a středy projekčních center získaných pomocí GNSS. Pro přesné fotogrammetrické vyhodnocení je třeba získat výšky odpovídající výpočtu AAT. Situace může být ilustrována pomocí změny vzdušné základny. Obr. 2 ukazuje nezakreslenou základnu b' (situace pro $m=1$), obr. 3 reálnou situaci pro PVO získané GNSS. Díky zkreslení základny b bychom při vyhodnocení bodu P_i získaly jeho souřadnice zatížené systematickou chybou ΔH_{P_i} . Situaci po změně měřítka zachycuje obr. 4.

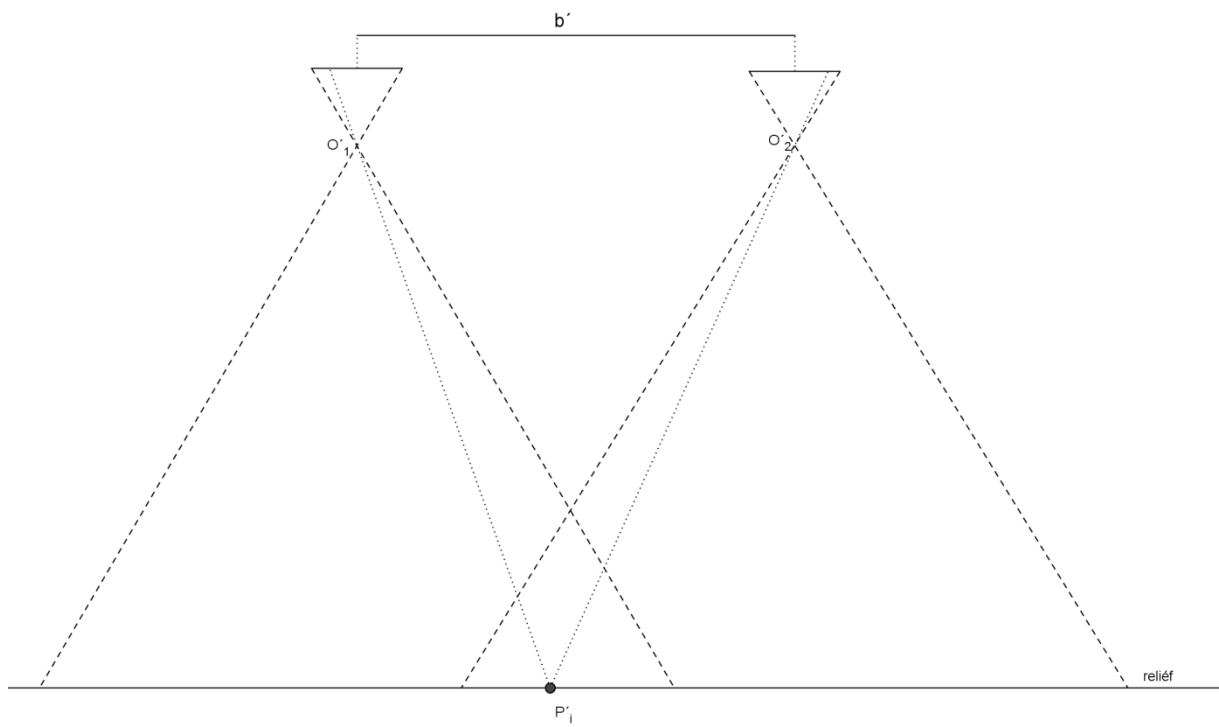
Dosavadní řešení

Nesrovnalostem mezi přímým (GNSS/IMU) a nepřímým (AAT) určením PVO se můžeme exaktně vyhnout pouze za použití místního pravoúhlého souřadnicového systému (Jacobsen, 2003). Tento postup vyžaduje následnou transformaci výsledků fotogrammetrických činností do národního souřadnicového systému. Transformace přidává další výpočetní krok, její řešení navíc nemusí být triviální. Metodický návod pro výpočet integrované orientace snímače (Ackerman, 1992) doporučuje

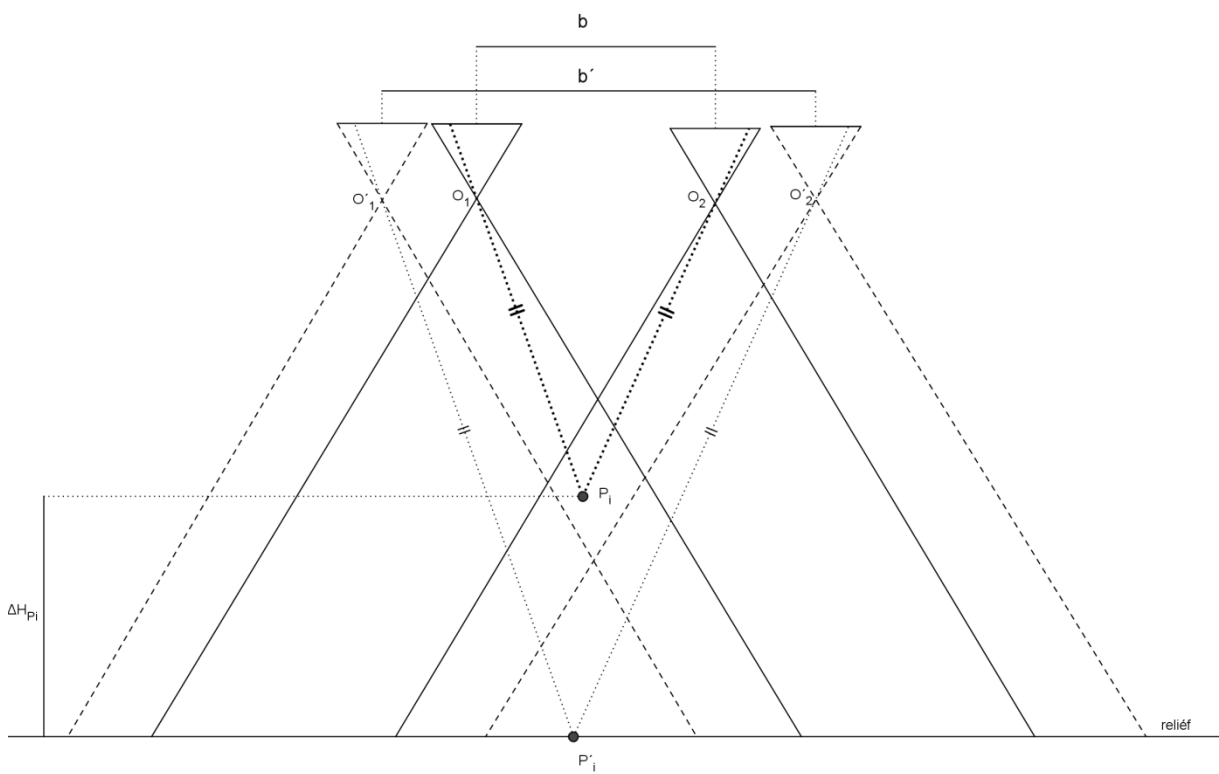
pro řešení problému spojených s národními souřadnicovými systémy použití přidaných neznámých při výpočtu AAT (především shift Z). Tento postup přináší dobré výsledky při dostatečném množství a vhodném rozložení VB. Korekcí existuje několik druhů (konstantní nebo lineárně závislá na čase, lze volit 1 neznámou pro celý blok, nebo pro každou snímkovou řadu zvlášť). Především u rozsáhlých výpočetních bloků je třeba vhodně zvolit vhodný druh korekce.



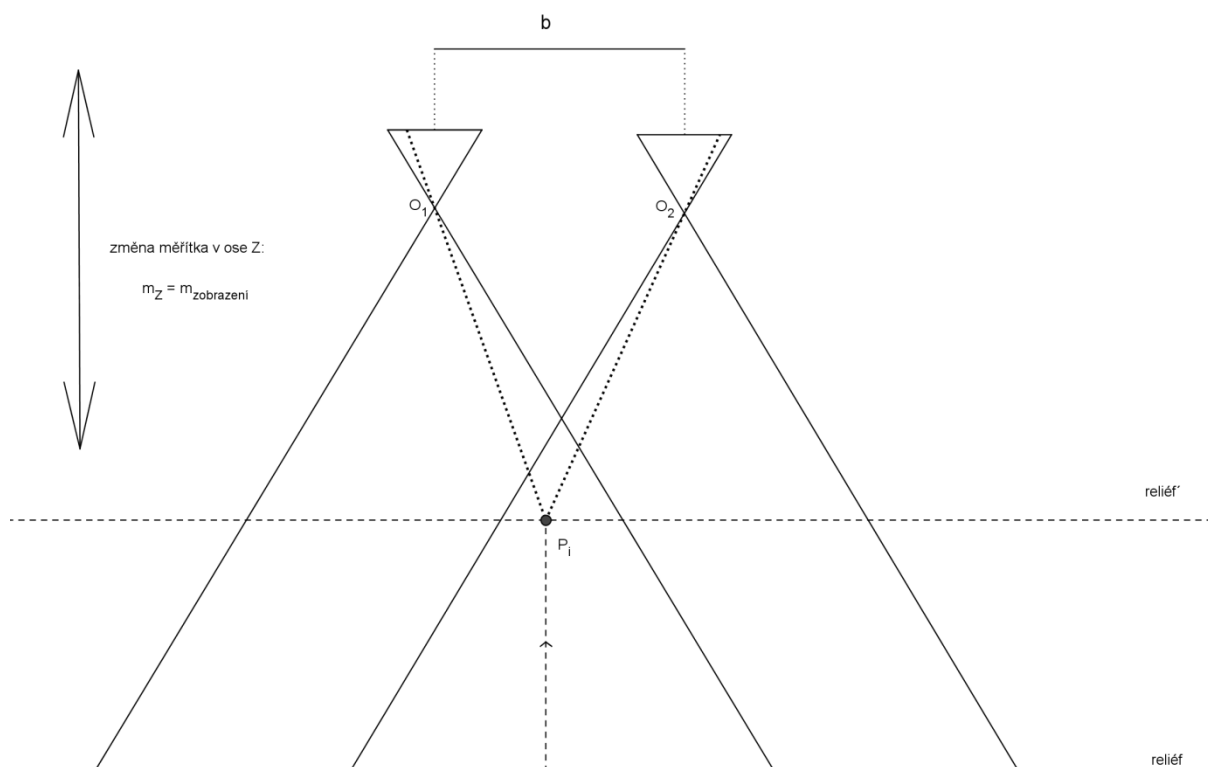
Obr.1 Souřadnicový systém, ve kterém jsou dodány přibližné PVO z měření GNSS/IMU při periodickém snímkování ČR



Obr.2 Nezkreslená vzdušná základna



Obr.3 Situace u PVO z GNSS/IMU - zkreslená vzdušná základna, $m_Z=m_H=1$



Obr.4 Situace u PVO z GNSS/IMU po úpravě měřítka v ose Z

Další publikované řešení (Jacobsen, 2002) předpokládá, že pro přibližně svislé snímky lze změnu měřítka v ose Z s dostatečnou přesností provést úpravou ohniskové vzdálenosti $f_m = f/m$, kde f_m značí modifikovanou ohniskovou vzdálenost a m délkové zkreslení polohového souřadnicového systému. Toto řešení může být nepraktické z několika důvodů: u velkých projektů je třeba z důvodů přehlednosti zachovávat u každé kamery unikátní ohniskovou vzdálenost, při transformaci do jiného souřadnicového systému je třeba mimo PVO transformovat i ohniskovou vzdálenost, u rozsáhlých výpočetních bloků se může výrazně lišit délkové zkreslení v závislosti na poloze - v tom případě je nevhodné použít 1 f_m pro celý výpočetní blok.

V laboratoři fotogrammetrie ČVUT v současné době probíhá výzkum metody, která vychází ze stejného předpokladu, tedy, že pro model obsahující svislé snímky lze měnit měřítko v ose Z pomocí změny měřítka snímků. Měřítko snímku je dáno rovnicí $m = f/h_r$, kde h_r značí relativní výšku letu. Změna je provedena úpravou h_r pro každé projekční centrum pomocí vztahu $h_{rm} = h_r * m$, kde h_{rm} značí modifikovanou relativní výšku letu. Pro modifikovanou absolutní výšku projekčního centra pak platí vztah:

$$H_m = H + \Delta h = H + h_{rm} - h_r = H + h_r(m - 1)$$

Použitá data a dosavadní výsledky

Všechny výpočty probíhaly v souvislosti s řešením dlouhodobého problému, který nastává během georeferencování LMS při periodickém leteckém snímkování ČR. Výšky projekčních center určené GNSS vykazují velké zbytkové chyby, které jsou v praxi odstraňovány přidáváním neznámých do AAT. Firmy zajišťující snímkování dodávají přibližné PVO ve 2 variantách: v S-JTSK s výškami v Bpv a v systému UTM 33 (na části území i UTM 34) s elipsoidickými výškami (vztaženými k elipsoidu GRS 80). PVO v systému UTM 33 s elipsoidickou výškou byly vypočítány přímo z měření GNSS/IMU, data v S-JTSK/Bpv pak pomocí závazného transformačního klíče (Kostecký et al., 2010). Obě

varianty vykazují významné zbytkové chyby různé velikosti. Z toho důvodu byly provedeny výpočty AAT s oběma variantami přibližných PVO, Ostatní vstupní data a parametry vyrovnání (LMS, rozložení vlíčovacích bodů, váhy měření atd.) byly shodné. Do obou výpočtů byl zadán posun výšek měřených GNSS pro celý výpočetní blok ($shift_Z$). Lze předpokládat, že hodnota posunu je funkcí více parametrů:

$$shift_Z^{UTM} = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

$$shift_Z^{S-JTSK} = f(x_1, x_2, \dots, x_n) - \Delta_{datum},$$

kde $shift_Z^{UTM}$ značí posun získaný výpočtem AAT v systému UTM s elipsoidickými výškami, $shift_Z^{S-JTSK}$ posun z výpočtu AAT v S-JTSK s výškami Bpv, $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ souhrnné působení vlivů způsobujících systematickou chybu určení přibližné výšky projekčních center LMS (špatné zavedení excentricity GNSS, chyba korekcí CZEPOS atd.) a Δ_{datum} vliv rozdílného měřítka souřadnicových systémů na výšky projekčních center. Vzhledem k tomu, že výpočet probíhal stejným způsobem se stejnými parametry, lze předpokládat, že člen $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ je pro oba výpočty stejný a Δ_{datum} pak můžeme vypočítat jako:

$$\Delta_{datum} = shift_Z^{S-JTSK} - shift_Z^{UTM}.$$

Pro potvrzení souvislosti mezi délkovým zkreslením a Δ_{datum} byla vypočítána zjištěná hodnota zkreslení pro každý výpočetní blok (hodnoty byly odečteny v těžištích jednotlivých bloků). Rozdíl Δ mezi teoretickou hodnotou vlivu rozdílného měřítka souřadnicových systémů na výšky projekčních center a Δ_{datum} byl vypočítán ze vztahu:

$$\Delta = h_r(m^{S-JTSK} - m^{UTM}) - \Delta_{datum} = h_r \Delta_s - \Delta_{datum}.$$

Výsledky zachycuje Tab. 1. Dále byla potvrzena časová stálost Δ_{datum} výpočtem na snímcích ze stejné lokality z různých let (Tab. 2) a lineární závislost Δ_{datum} na h_r (Tab. 3)

Blok	Subblok	Δ_{datum} [m]	Δ_s	Δ_s [cm/km]	$\Delta_s \cdot h_r$	Δ [m]
1231	-----	0,598	0,000145	14,5	0,508	-0,090
1232	-----	0,491	0,000137	13,7	0,480	-0,011
1311	1	0,963	0,000256	25,6	0,896	-0,067
1311	2	0,883	0,000254	25,4	0,889	0,006
1312	1	0,966	0,000276	27,6	0,966	0,000
1312	2	1,027	0,000263	26,3	0,921	-0,106
1314	1	1,152	0,000343	34,3	1,201	0,049
1314	2	1,378	0,000377	37,7	1,320	-0,058
1314	3	1,259	0,000347	34,7	1,214	-0,045
1320	1	1,014	0,000325	32,5	1,138	0,124
1320	2	1,079	0,000309	30,9	1,082	0,003
1306	-----	0,628	0,000172	17,2	0,602	-0,026
1305	1	0,332	0,000114	11,4	0,399	0,067
1305	2	0,269	0,000134	13,4	0,469	0,200
1318	-----	1,141	0,000310	31	1,085	-0,056
1319	1	1,073	0,000299	29,9	1,047	-0,026
1319	2	1,082	0,000296	29,6	1,036	-0,046

Tab. 1. Závislost Δ_{datum} na délkovém zkreslení UTM 33 a S-JTSK

Lokalita	Blok	Rok snímkování	subblok	shift Z [m]		Δ_{datum} [m]
				UTM	S-JTSK	
1	1710	2010	----	0,384	-0,515	0,899
	1227	2012	1	0,364	-0,592	0,956
		2012	2	0,647	-0,333	0,980
2	911	2011	1	0,828	0,172	0,656
		2011	2	0,788	0,168	0,62
	1306	2013	----	0,304	-0,324	0,628

Tab. 2 Potvrzení časové stability Δ_{datum}

Lokalita	Blok	Δ_{datum} [m]	h_r [m]	změna měřítka [ppm]
1	1710	0,899	3300	272
	1227	0,956	3500	273
2	1233	0,395	3500	113
	Dyje	0,222	2000	111

Tab. 3 Potvrzení lineární závislosti Δ_{datum} na h_r . Změna měřítka je vypočítaná ze vztahu Δ_{datum}/h_r

Závěr

Průběžné výsledky naznačují účinnost navrženého postupu. Veličina Δ popisující rozdíl mezi teoretickou a experimentálně zjištěnou hodnotou vlivu rozdílného měřítka souřadnicových systémů na výšky projekčních center vykazuje střední kvadratickou chybu m_Δ 0,076. To přibližně odpovídá přesnosti určení posunů výšek projekčních center, ze kterých byla vypočítána. Zavedení korekce má zásadní význam pro přesnost přímého georeferencování, transformace PVO do jiných souřadnicových systémů a pro AAT s malým množstvím VB (tzn. výpočty bez možnosti výpočtu *shift* Z). Do budoucna je třeba prozkoumat vhodnost zavedení korekce do výpočtů AAT pomocí kontrolních výpočtů s korigovanými daty.

Literatura

ACKERMANN. F.,: Operational Rules and Accuracy Models for GPS-Aerotriangulation. ISPRS (Commission III), Washington DC. VOI XXIX, Part B3, pp 691-700

JACOBSEN K.: System Calibration for Direct and Integrated Sensor Orientation, Theory, Technology and Realities of Inertial/GPS Sensor Orientation, ISPRS WG I/5, Barcelona 2003, on CD ROM, 6 p.

Jacobsen, K.: Calibration Aspects in Direct Georeferencing of Frame Imagery, Proceedings of Pecora 15/Land Satellite Information, ISPRS Commission I/IV, Spain (2002).

Kostecký, J., Kostecký, J., Pešek, I.: Metodika převodu mezi ETRF2000 a S-JTSK varianta 2. Pecný, červen 2010.