# Rozbor řešení projektu a celkové shrnutí

#### Jméno řešitele: Doc. Ing. Vlastimil Hanzl,CSc. Registrační číslo projektu: 103/03/0102 Název projektu: Integrace orientačních systémů a kamer ve fotogrammetrii

#### Úvod

Orientace snímků je klíčovým prvkem jakéhokoliv fotogrammetrického projektu, protože určení prostorových souřadnic bodu ze snímkových souřadnic vyžaduje znalost orientace snímků. V letecké fotogrammetrii je tato úloha řešena pomocí aerotriangulace (AT). Koncem 90. let se začalo běžně používat pro určení souřadnic projekčních center kinematické metody GPS. Takto určená projekční centra můžeme považovat za vlícovací body, které se nachází mimo mapovací prostor. Použitím měření z globálních polohovacích systémů (GPS) v AT je ve vyrovnání geometricky stabilní blok snímků založen jen na spojovacích (navazovacích) bodech a pozemní vlícovací body (GCP) slouží hlavně pro kalibraci, detekci a eliminaci chyb v měření GPS (cycle slips).

Použití globálních polohovacích systémů (GPS) pro určení polohy projekčních center přineslo významné snížení počtu vlícovacích bodů v aerotriangulaci (AT). Použití inerciálních měřících jednotek (IMU) integrovaných s diferenciálními GPS (DGPS) a kamerou přineslo další snížení počtu vlícovacích bodů. V případě potřebné přesnosti orientačních prvků lze očekávat v budoucnu výrazně menší použití aerotriangulace z fotogrammetrického procesu mapování. Orientace snímků je tak nahrazována obecnějším termínem orientace snímačů. Orientace snímačů zahrnuje všechny parametry bez ohledu na to, jsou-li známé, či neznámé nebo jsou konstantní, nebo proměnné v čase. Orientace snímačů zahrnuje soubor kalibračních parametrů snímacího systému, tj. kalibrační parametry každého snímače. Rozlišujeme *přímou orientaci snímače* a *integrovanou orientaci snímače* (integrated sensor orientation). Přímá orientace snímače je určení orientace snímače bez snímkových souřadnic použitím GPS/IMU měření. Integrovaná orientace používá všechny dostupné údaje. Jsou to snímkové souřadnice navazovacích a vlícovacích bodů, souřadnice a výšky vlícovacích bodů a GPS/IMU měření, které ve společném vyrovnání slouží k určení všech podstatných parametrů orientace snímače.

OEEPE (Evropská organizace pro experimentální fotogrammetrický výzkum) prováděla v letech 1999-2001 výzkum zaměřený na řešení tohoto problému [1]. První výsledky byly presentovány na podzim roku 2001. Byly porovnány hodnoty prvků vnější orientace získané z aerotriangulace s hodnotami získanými DGPS a IMU. Současně byly provedeny výpočty AT, kde byly dány do vyrovnání rovněž prvky vnější orientace získané pomocí DGPS/IMU. Interpretace výsledků byla obtížná, neboť nebylo dostatek informací o IMU aparaturách a některé informace jsou drženy v tajnosti, zejména údaje o přesnosti IMU a časových změnách zbytkových systematických chyb. Přesnost určení rotačních prvků IMU je důležitá pro stanovení vah při společném vyrovnání snímkových dat a dat z DGPS a IMU. Pořízením aparatury Applanix POS AV 310 firmou Geodis Brno, s.r.o v létě 2002 se naskytla možnost testovat a implementovat systém do leteckého snímkování.

Pro použití integrovaného systému v praxi je nutné:

- stanovit přesnost měřených orientačních parametrů,
- stanovit optimální konfiguraci bloku a počtu vlícovacích bodů pro kalibraci integrovaného systému včetně četnosti kalibrace.

#### Řešení projektu v roce 2003

Při řešení grantového projektu byly provedeny v roce 2003 postupně následující práce. Na základě doporučení firmy Applanix (4 letové řady po 6 snímcích, 12 vlícovacích bodů-3řady po 4 bodech na horním a dolním okraji bloku a uprostřed bloku) a posouzení projektu OEEPE (za dostatečně spolehlivou konfiguraci se považuje i jedna řada nalétnutá dvakrát v opačných směrech, např. 2x7 snímků s pouze 6 vlícovacími body) byla vybudována kalibrační základna v prostoru Brno-Vinohrady pro snímkové lety v měřítku 1:5000 ve čtyřech řadách po sedmi snímcích s 18 vlícovacími

body, které byly určeny metodou GPS v souřadnicovém systému UTM. Přidání 6 vlícovacích bodů zabezpečuje vysoce spolehlivé řešení i v případě zničení několika vlícovacích bodů a umožňuje větší kontrolu kalibrace.

Následovala instalace Differential GPS NovAtell a IMU Applanix POS AV 310 do letadla Cessna TU 206 G a propojení s kamerou RMK TOP 15, byl proveden zálet aparatury. Byly provedeny dva kalibrační lety, hlavní v srpnu označený IMU1 a kontrolní v září 2003. Po vyvolání snímků a jejich naskenování skenerem PhotoScan TD1 byly provedeny měření snímkových souřadnic, výpočty aerotriangulací, postprocesingové výpočty parametrů vnější orientace z GPS/IMU a analýza letu. V software POSPac firmy Applanix je v modulu POS Proc vypočtena integrovaná inerciální orientace využívající Kalmanova filtru pro predikci dat a následné vyhlazení dat. V modulu POSEO jsou určeny prvky vnější orientace snímku prostřednictvím dat z aerotriangulace včetně boresight misalignment. Aerotriangulace byla provedena pomocí software ISAT 2002 v automatickém režimu vyhledávání navazovacích bodů. Kontrolní měření a analytické výpočty byly provedeny pomocí programového balíku ORPHEUS, který byl pořízen z grantových prostředků. Měření bodů je provedeno manuálním nastavením značky na bod. Kalibrace spočívá především ve stanovení boresight misalignment (BSMA) tj. úhlových diferencí mezi osami souřadnicových systémů GPS/IMU a kamery z porovnání výsledků aerotriangulace s přímo měřenými hodnotami prvků vnější orientace. Kalibrace byla nejžhavějším tématem workshopu OEEPE pořádaného v roce 2001 na TU v Hannoveru. Byla diskutována dosažená přesnost kalibrace a vhodná konfigurace bloku. Matematické modely pro kalibraci se lišily, mnoho účastníků použilo 6 prvků (3 GPS posuny a 3 úhly odchýlení). Někteří účastníci projektu použily i další parametry – korekce prvků vnitřní orientace a doplňkové parametry. Jelikož byla použita moderní kamera pořízená v roce 1997 s minimálním radiálním zkreslením, které je eliminováno v použitém software, byla použita standardní kalibrace 6 prvků vnější orientace. Její použití potvrzovaly i výsledky AT v předchozích komerčních projektech, kde dosažené střední chyby z vyrovnání nesignalizovaly výskyt znatelných systematických chyb. V tab. 1 jsou uvedeny varianty řešené v roce 2003 s uvedením charakteristik snímkového bloku. Uvedené varianty, které jsou vypočteny pomocí programu ORPHEUS, mají jen označení varianty, použití programu ISAT je vyznačeno. Apriorní střední chyby v programu ORPHEUS byly následující: snímkové souřadnice  $\sigma = 5 \mu m$ , vlícovací body  $\sigma = 0.03 m$  ve všech souřadnicích, měření polohy projekčních center  $\sigma = 0.10m$  ve všech souřadnicích, měření úhlů  $\sigma = 0.006 \text{ gon}$ . Referenční GPS stanice je umístěna 3km od středu kalibračního pole. V případě ISAT byla u vlícovacích bodů  $\sigma = 0.05m$ .

Varianta	Střední jednotková chyba $\sigma_0$ [ $\mu m$ ]	Počet řad*počet snímků v řadě	Počet vlícovacích bodů
IMU1-A1	5,3	4*7	18
IMU1-A1-4	5,3	4*7	4
IMU1-A1-AP	5,3	4*7	18
IMU1-A2	5,0	2*7	11
IMU1-A2-4	4,9	2*7	4
IMU1-B1	5,4	4*7	18
IMU1-B1-4	5,2	4*7	4
IMU1-B2	5,2	2*7	11
IMU1-B2-4	5,1	2*7	4
IMU1-ISAT-A1	3,8	4*7	18

Tab.1 Varianty řešené v roce 2003 (kamera RMK TOP 15)

Varianta IMU1-A1 a IMU1-ISAT-A1 je na celém testovacím území, AT s určení 6 prvků vnější orientace.

Varianta IMU1-A1-4 je na celém testovacím území, AT s určení 6 prvků vnější orientace jen s použitím 4 vlícovacích bodů v rozích bloku. Slouží ověření snížení kvality výsledků.

Varianta IMU1-A1-AP je na celém testovacím území, AT s určením 6 prvků vnější orientace a testováním upřesnění prvků vnitřní orientace a doplňkových parametrů.

Varianta IMU1-A2 je na polovině testovacího území, AT s určením 6 prvků vnější orientace.

Varianta IMU1-A2-4 je na polovině testovacího území, AT s určením 6 prvků vnější orientace s použitím 4 vlícovacích bodů v rozích bloku. Slouží k ověření snížení kvality výsledků.

Varianta IMU1-B1 je na celém testovacím území, integrovaná AT s určením 6 prvků vnější orientace a použitím GPS/IMU měření v AT.

Varianta IMU1-B1-4 je na celém testovacím území, integrovaná AT s určením 6 prvků vnější orientace a použitím GPS/IMU měření v AT, používá 4 vlícovací body v rozích bloku.

Varianta IMU1-B2 je na polovině testovacího území, integrovaná AT s určením 6 prvků vnější orientace a použitím GPS/IMU měření v AT.

Varianta IMU1-B2-4 je na polovině testovacího území, integrovaná AT s určením 6 prvků vnější orientace a použitím GPS/IMU měření v AT, používá 4 vlícovací body v rozích bloku.

Pomocí software firmy Applanix jsou z AT určeny BSMA parametry. Korigované měřené rotace jsou pak použity pro testy s integrovanou orientací.

V následujících tabulkách jsou uvedeny:

pod označením PRSCH-AT jsou průměrné střední chyba prvků vnější orientace určená v AT pod označením SCHDIF jsou střední chyby rozdílů prvků vnější orientace určené v AT a z GPS/IMU pod označením SC BSMA jsou střední chyby BSMA charakterizující přesnost rotací měřených IMU a přesnost určení projekčních center.

S ohledem na velikost středních chyb prvků vnější orientace u snímků na začátku a konci řady, která je podstatně vyšší než u ostatních snímků, nejsou pro analýzy tyto snímky použity. Znamená to, že v případě celého bloku je analyzováno 20 snímků, v případě poloviny bloku 10 snímků. Z tab. 2 a 3 vyplývá, že dosažená přesnost určení prvků vnější orientace je lepší než výrobcem deklarovaná přesnost aparatury, která je v poloze 0,05 - 0,30 m, v podélném a příčném náklonu 0,014 gon a v pootočení 0,039 gon.

IMU1-A1	$X_0$ [m]	$Y_0$ [m]	$Z_0$ [m]	ω [gon]	$\varphi$ [gon]	κ[gon]
PRSCH-AT	0.054	0.064	0.028	0.0042	0.0035	0.0013
SCHDIF	0.052	0.074	0.043	0.0060	0.0061	0.0045
SCH BSMA	0.075	0.098	0.051	0.0073	0.0070	0.0047

Tab.2 Přesnost určení BSMA z aerotriangulace v bloku IMU1-A1

1 a0.5 1 1051105	uteen bSMA	z acrotriangui	ace v bloku livi	101-A2		
IMU1-A2	$X_0$ [m]	$Y_0$ [m]	$Z_0$ [m]	ω [gon]	$\varphi$ [gon]	к [gon]
PRSCH-AT	0.056	0.068	0.028	0.0044	0.0036	0.0015
SCHDIF	0.046	0.077	0.027	0.0053	0.0052	0.0053
SCH BSMA	0.072	0.103	0.039	0.0069	0.0063	0.0055

Tab.3 Přesnost určení BSMA z aerotriangulace v bloku IMU1-A2

Tab.4 Přesnost určení BSMA v integrované orientaci v bloku IMU1-B1

IMU1-B1	$X_0$ [m]	$Y_0$ [m]	$Z_0$ [m]	ω [gon]	$\varphi$ [gon]	к [gon]
PRSCH-AT	0.033	0.025	0.034	0.0029	0.0040	0.0041
SCHDIF	0.038	0.040	0.020	0.0025	0.0024	0.0012
SCH BSMA	0.050	0.047	0.039	0.0039	0.0047	0.0043

Tab.5 Přesnost určení BSMA v integrované orientaci v bloku IMU1-B2

IMU1-B2	$X_0$ [m]	$Y_0$ [m]	$Z_0$ [m]	ω [gon]	$\varphi$ [gon]	к [gon]
PRSCH-AT	0.029	0.025	0.017	0.0025	0.0034	0.0042
SCHDIF	0.039	0.041	0.022	0.0026	0.0025	0.0014
SCH BSMA	0.049	0.048	0.028	0.0036	0.0042	0.0044

Při integrované orientaci (tab. 4 a 5) mají hlavní vliv měřené souřadnice projekčních center, protože geometrie bloku je držena navazovacími body. Dosažená přesnost v poloze projekčních center je srovnatelná s projektem OEEPE. Tab.6 potvrzuje teoretický předpoklad, že použití klasické AT jen na 4 vlícovací body způsobí podstatné snížení přesnosti.

Tab.6 Průměrná střední chyba prvků vnější orientace z aerotrigulace v bloku IMU1-A1-4

IMU1-A1/ IMU1-A1-4	$X_0$ [m]	<i>Y</i> <sub>0</sub> [m]	$Z_0$ [m]	<i>ω</i> [gon]	φ [gon]	<i>к</i> [gon]
PRSCH-AT	0.054	0.064	0.028	0.0042	0.0035	0.0013
PRSCH-AT	0.084	0.128	0.117	0.0090	0.0050	0.0018

Naopak při integrované orientaci je možné dosáhnout srovnatelných výsledků při použití jen poloviny snímků a 4 vlícovacích bodů viz tab. 7 a 8. Rozdíly s výsledky v tab. 4 a 5 jsou statisticky nevýznamné, což potvrzuje tab. 9 popisující rozdíly v prvcích vnější orientace porovnáním variant IMU1-B1 a IMU1-B1-4. Tabulka 10 porovnává rozdíly v prvcích vnější orientace porovnáním variant IMU1-B1 a IMU1-A1. Malé diference potvrzují velmi dobrou kvalitu v prvcích vnější orientace.

Tab.7 Přesnost určení BSMA v integrované orientaci v bloku IMU1-B1-4

IMU1-B1-4	$X_0$ [m]	$Y_0$ [m]	$Z_0$ [m]	ω [gon]	$\varphi$ [gon]	<i>K</i> [gon]
PRSCH-AT	0.039	0.041	0.025	0.0026	0.0025	0.0014
SCHDIF	0.038	0.027	0.032	0.0032	0.0039	0.0042
SCH BSMA	0.051	0.048	0.039	0.0042	0.0044	0.0043

Tab.8 Přesnost určení BSMA v integrované orientaci v bloku IMU1-B2-4

IMU1-B2-4	$X_0$ [m]	$Y_0$ [m]	$Z_0$ [m]	ω [gon]	$\varphi$ [gon]	<i>K</i> [gon]
PRSCH-AT	0.041	0.042	0.028	0.0027	0.0026	0.0015
SCH-DIF	0.038	0.027	0.032	0.0032	0.0039	0.0042
SCH BSMA	0.051	0.048	0.039	0.0042	0.0044	0.0043

Tab.9 Průměrné rozdíly v prvcích vnější orientace porovnáním variant IMU1-B1 a IMU1-B1-4

IMU1 DIF B1/B1-4	$X_0$ [m]	<i>Y</i> <sub>0</sub> [m]	$Z_0$ [m]	<i>ω</i> [gon]	$\varphi$ [gon]	к [gon]
PR-DIF	0.012	0.015	0.020	0.0010	0.0016	0.0006

T + 1 + 0 = 0 + 1 + 1 + 1 = 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1	/ 1	v·v/ · /	, ,	· (D/III D1	
1 ab. 10 Prumerne rozdil	v v prvcich	i vneisi orientac	e porovnanim va	ariant IMUI-BI	a IMUT-AT
	J . F	· · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		

IMU1 DIF B1/A1	$X_0$ [m]	<i>Y</i> <sub>0</sub> [m]	$Z_0$ [m]	<i>ω</i> [gon]	$\varphi$ [gon]	к [gon]
PR-DIF	0.036	0.055	0.062	0.0036	0.0025	0.0006

Srovnání v tab. 11 potvrzuje skutečnost, že velké množství automaticky vyhledaných a měřených navazovacích bodů přináší vyšší přesnost prvků vnější orientace (n je počet neznámých, m

je počet měření). Průměrné rozdíly v prvcích vnější orientace z programů Orpheus-ISAT v IMU21A1 jsou v tab. 12 a odpovídají středním chybám v tab. 11.

IMU1-A1	$X_0$ [m]	<i>Y</i> <sub>0</sub> [m]	$Z_0$ [m]	$\omega$ [gon]	$\varphi$ [gon]	к [gon]	n	т
AT-OR	0.054	0.064	0.028	0.0042	0.0035	0.0013	1752	870
AT-ISAT	0.030	0.035	0.022	0.0021	0.0018	0.0009	5984	2775

Tab. 11 Porovnání průměrů středních chyb programů Orpheus-ISAT v bloku IMU1-A1

Tab. 12 Průměrné rozdíly v prvcích vnější orientace z programů Orpheus-ISAT v IMU21A1

IMU1-A1	$X_0$ [m]	$Y_0$ [m]	$Z_0$ [m]	$\omega$ [gon]	$\varphi$ [gon]	к [gon]
PR- DIF Orpheus-ISAT	0.099	0.097	0.025	0.0045	0.0038	0.0013

V bloku IMU1 byl testován rovněž vliv doplňkových parametrů s upřesněním prvků vnitřní orientace. Dosažené výsledky z IMU1-A1-AP jsou velmi podobné výsledkům z IMU1-A1 (v rotacích je dosaženo stejných středních chyb, v poloze jsou střední chyby o 2mm větší). Prvky vnitřní orientace se nezměnily a vypočtené doplňkové parametry jsou statisticky nevýznamné. Byl proveden snímkový let ve vysokohorské lokalitě z důvodu ověření chodu aparatury v podmínkách velkých lokálních změn tíhového zrychlení, které by mohly mít vliv na měření inerciální jednotky, to se však nepotvrdilo. V následujících komerčních letech nebyly zjištěny skutečnosti, které by vyžadovaly změnit zkalibrované hodnoty BSMA.

# Řešení projektu v roce 2004

V roce 2003 byla pořízena nová kamera RMK TOP 30, která byla instalovaná do letadla Cessna 402. Kalibrační lety v srpnu 2004 jsou označené IMU2 a v září IMU3. IMU2 představuje identický blok s IMU1, v IMU3 jsou přidány 2 řady kolmé na 4 původní. Řešené varianty jsou uvedeny v tab.13. Varianta IMU-DC představuje test s digitální kamerou.

Varianta	Střední jednotková	Počet řad*počet	Počet vlícovacích
	chyba $\sigma_0$ [ $\mu m$ ]	snímků v řadě	bodů
IMU2-A1	4,8	4*7	18
IMU2-B1	5,3	4*7	18
IMU2-B1-AP	4,6	4*7	18
IMU2-B2	4,2	2*7	11
IMU2-ISAT-A1	2,7	4*7	18
IMU3-AX	6,7	2*3+2*3	7
IMU3-BX-AP	6,1	2*3+2*3	7
IMU3-ISAT-AK	4,0	4*7+2*7	18
IMU-DC-A2	0,9	2*7	14

Tab.13 Varianty řešené v roce 2004 (kamera RMK TOP 30 + DC)

Vzhledem k dvojnásobné velikosti konstanty kamery jsou v IMU2 úměrně střední chyby prvků vnější orientace viz tab.14. V případě integrované orientace jsou výsledky příznivější viz tab.15.

IMU2-A1	$X_0$ [m]	$Y_0$ [m]	$Z_0$ [m]	ω [gon]	$\varphi$ [gon]	κ[gon]				
PRSCH-AT	0.19	0.21	0.05	0.0078	0.0072	0.0014				
SCHDIF	0.32	0.27	0.05	0.0094	0.0094	0.0044				
SCH BSMA	0.37	0.34	0.08	0.0122	0.0118	0.0046				

Tab.14 Přesnost určení BSMA v bloku IMU2-A1

IMU2-B1	$X_0$ [m]	$Y_0$ [m]	$Z_0$ [m]	ω [gon]	$\varphi$ [gon]	к [gon]				
PRSCH-AT	0.092	0.094	0.038	0.0034	0.0033	0.0013				
SCHDIF	0.120	0.129	0.027	0.0034	0.00290	0.0034				
SCH BSMA	0.151	0.160	0.047	0.0048	0.0044	0.0036				

Tab.15 Přesnost určení BSMA v integrované orientaci v bloku IMU2-B1

Souřadnice v ose Z u projekčních center vykazovaly systematický posun od měřených souřadnic pomocí GPS o stejnou hodnotu u výpočtů z obou software. V integrované orientaci v IMU2-B1-AP byly připojeny 3 doplňkové parametry pro radiální zkreslení a 3 pro stanovení posunu v poloze projekčního centra. Tyto posuny mohou reprezentovat chybu v určení excentricity mezi souřadnicovým systémem kamery a anténou GPS přijímače nebo chybu v nastavení kalibračních parametrů v software POSPac firmy Applanix. Parametry pro zkreslení se ukázaly jako nevýznamné. Naopak byl potvrzen systematický posun ve směru osy Z o velikosti 0,35 m, což odpovídá průměrnému posunu 0,41 m určenému z rozdílů souřadnic ve variantách IMU2-A1 a IMU2-ISAT-A1.

Dosažená přesnost je v tab.16. Přesnosti uvedené v tab.14 a 15 jsou vypočtené po korekci systematického posunu v Z.

IMU2-B1- AP	$X_0$ [m]	<i>Y</i> <sub>0</sub> [m]	$Z_0$ [m]	<i>ω</i> [gon]	φ [gon]	к [gon]
PRSCH-AT	0.085	0.082	0.038	0.0034	0.0033	0.0013
SCHDIF	0.059	0.104	0.047	0.0034	0.00290	0.0034
SCH BSMA	0.103	0.132	0.060	0.0044	0.0041	0.0038

Tab.16 Přesnost určení BSMA v integrované orientaci v bloku IMU2-B1-AP

Srovnání v tab. 17 potvrzuje opět skutečnost, že velké množství automaticky vyhledaných a měřených navazovacích bodů přináší vyšší přesnost prvků vnější orientace. Průměrné rozdíly v prvcích vnější orientace z programů Orpheus-ISAT v IMU21A1 jsou v tab. 18, a odpovídají středním chybám v tab. 17.

100.11 101	e main pra			ogramma or		i orona m		
IMU2- A1	$X_0$ [m]	<i>Y</i> <sub>0</sub> [m]	$Z_0$ [m]	<i>ω</i> [gon]	φ [gon]	к [gon]	n	m
AT-OR	0.19	0.21	0.05	0.0078	0.0072	0.0014	1752	870
AT-ISAT	0.061	0.069	0.028	0.0024	0.0022	0.0007	7300	3276

Tab.17 Porovnání průměrů středních chyb programů Orpheus-ISAT v bloku IMU2-A1

Tab.18 Průměrné rozdíly Orpheus-ISAT v IMU2-A1

IMU2-A1	X <sub>0</sub> [m]	$Y_0$ [m]	$Z_0$ [m]	$\omega$ [gon]	$\varphi$ [gon]	к [gon]
PR- DIF	0.21	0.30	0.08	0.0109	0.0063	0.0014

V projektech [1], [3] jsou používány 1-2 příčné řady. Výrazné vylepšení nepřináší. Mírné zlepšení dosažené přesnosti jde spíše na vrub většího počtu nadbytečných měření. Prvky vnitřní orientace každé řady mají určitý malý nepravidelný systematický posun. Použití navzájem kolmých řad nebo řad létaných v obou směrech eliminuje z větší části působení zbytkových systematických chyb na výsledek kalibrace. V bloku IMU3 byla tato varianta testována, přes větší počet měření jsou dosažené přesnosti mírně horší právě v důsledku působení nepravidelných zbytkových systematických chyb.

Tab.19 Porovnání průměrných středních chyb z aerotriangulace bloků IMU2 a IMU3

ISAT	$X_0$ [m]	$Y_0$ [m]	$Z_0$ [m]	$\omega$ [gon]	$\varphi$ [gon]	к [gon]	n	m
IMU2	0.061	0.069	0.028	0.0024	0.0022	0.0007	7300	3276
IMU3	0.079	0.086	0.038	0.0036	0.0035	0.0011	10731	3462

V [1] je uváděna v jednom příspěvku i minimální konfigurace pro kalibraci 2\*2řady a 2\*2 řady napříč. Použitím snímků ze střední části bloku IMU3 bylo stejné konfigurace dosaženo. Dosažené výsledky jsou tab. 20. Tuto minimální variantu nelze příliš doporučit, střední chyby jsou nevyhovující a riziko působení systematické chyby značné. Navíc se u IMU3 projevila skutečnost typická pro IMU. Občas dojde z neznámých důvodů u série měření k systematickému skoku. Tato měření jsou nepoužitelná. Tab.21 ukazuje takové chování IMU v IMU3-AX u podélného náklonu. První dvě řady snímky201-212 mají výrazně posunuté hodnoty, poslední tři uvedené snímky jsou v pořádku.

Tab.20 Porovnání průměrných středních chyb z aerotriangulace bloků IMU3-AX a IMU3-BX

IMU3-A,B- X	$X_0$ [m]	$Y_0$ [m]	$Z_0$ [m]	<i>ω</i> [gon]	φ [gon]	к [gon]
PRSCH-AT- AX	0.35	0.35	0.08	0.013	0.013	0.0030
PRSCH-AT- BX	0.11	0.11	0.05	0.0047	0.0046	0.0023

Tab.21 Porovnání hodnot podélného náklonu

IMU3	GPS $\varphi$ [gon]	AT $\varphi$ [gon]
201	-1,0817	-0,8460
202	-0,8634	-0,6140
203	-0,5964	-0,3390
210	0,4999	0,2700
211	0,6546	0,4110
212	0,7604	0,5030
227	-0,8916	-0,9380
228	-0,4803	-0,5280
229	-0,3132	-0,3620
236	-0,7536	-0,7490
237	0,0373	-0,0490
238	0,1236	0,1360

Z hlediska stability kalibračních parametrů v čase má zásadní význam práce M. Cramera [2]. Počátkem roku 2001 byly testovány po dobu 6 týdnů snímací systémy společnosti Hansa Luftbild při snímkování v Saudské Arábii. Snímkovací letadlo bylo vybaveno aparaturou IGI AERO Control IId a kamerami RMK TOP 15 a RMK TOP 30. Pro kalibraci byla použita jedna řada se sedmi snímky nalétnutá z obou směru, většinou nalétnutá jednou ráno a podruhé večer po komerčním snímkování. V řadě bylo rovnoměrně rozmístěno 21 vlícovacích bodů. Zpracování dat bylo provedeno automatickou aerotriangulací pomocí MATCH-AT, střední jednotkové chyby z vyrovnání byly v průměru o velikosti 3µm. Výsledky prokazují problematičnost použití doplňkových parametrů. Bylo testováno použití doplňkových parametrů Ebnera a Browna. Brownův model se ukázal jako zcela nepoužitelný, protože výsledné snímkové deformace byly výrazně větší než je u měřických kamer možné. Ebnerovy parametry přinesly realističtější výsledky, avšak v projektu nejsou dva dny, kde by byly stejné skupiny přidaných parametrů, které jsou statisticky významné viz tab. 23. Dosažená přesnost měření IMU odpovídala použité aparatuře. Přesto 3 kalibrační lety vykázaly systematické skoky v datech podobné, jak jsou popsány v IMU3.

	0.000-2.000	<u> </u>											
Den	Let	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>B5</i>	<i>B6</i>	<i>B7</i>	<i>B8</i>	<i>B9</i>	<i>B10</i>	<i>B11</i>	<i>B12</i>
29.1.	1+2			Х		Х	Х	Х	Х				
31.1.	5+6			Х	Х	Х		Х				Х	
5.2.	8+9			Х		Х		Х	Х				
18.2.	10+11		Х	Х		Х	Х	Х	Х	Х	Х		
19.2.	12+13			Х				Х					
21.2.	14+15	Х		Х	Х		Х	Х	Х	Х			
24.2.	16+17		Х	Х	Х		Х	Х	Х		Х	Х	Х
12.3.	18+19			Х			Х	Х					Х

Tab.23 Statisticky významné Ebnerovy parametry

# Experimenty s digitální středoformátovou kamerou

Poslední úlohou projektu bylo ověření použití GPS/IMU s neměřickou digitální kamerou. Měřicí jednotka je pevně spojena s kamerou Hasselblad 555 ELD. IMU je připevněno na svařenec z duralu v němž je pevně upevněno tělo kamery. Při konstrukci duralového krytu kamery bylo dbáno na to, aby osy IMU a osy kamery byly co nejvíce paralelní. Na kameře jsou používány dva objektivy a to Zeiss Distagon CFE 40mm a Zeiss Distagon CFI 50mm. Na kameru Hasselblad je nasazena digitální stěna Phase One H 25 s 22 megapixely. Rozměr CCD je 48.9 x 36.7 mm, počet pixelů CCD je 5 488 x 4 145. Velikost jednoho pixelu je 9x9 mikronů. Výstupní formáty obrazu jsou 24 bit RGB, 48 bit RGB a 64 bit CMYK. Data jsou přenášena okamžitě do palubního PC. Kapacita disků palubního počítače je 300 Gb. Signál pro provedení expozice je generován navigačním počítačem na paralelní port. Odtud je přes elektronickou spoušť přiveden do kamery. Tento signál je přiveden na IO port aparatury Applanix, kde je zaznamenán čas příchodu signálu. Při postprocesingu je potom vyhodnocena poloha středu snímku a zaznamenány rotace ve všech třech osách. Testovací lety provázely různé technické potíže.

## Nálet z 1.10. 2004

První nálet s digitální kamerou byl uskutečněn v měřítku 1:32 000. Toto měřítko sice není zcela optimální ke kalibraci aparatury Applanix, bylo ale zvoleno s ohledem na využití existujícího pole vlícovacích bodů, používaného ke kalibraci aparatury Applanix ve spojení s kamerami RMK TOP 15 a RMK TOP 30. Při analýze zapojení kamery po předchozím náletu bylo zjištěno, že signál generovaný navigačním počítačem pro provedení expozice byl rozdělen do dvou paralelních vláken, jedno bylo připojeno k elektronické spoušti, druhé na IO port Applanixu, kde byl zaznamenáván okamžik expozice. Toto řešení se ukázalo jako nevhodné z důvodu zpoždění reakce centrální závěrky na elektronický impuls řídícího počítače.

## Nálet ze 4.11.2004

Pro nový nálet byla změněna technologie vyhodnocení momentu expozice. Následně bylo konstatováno, že zapojení kamery a registrace času expozice od závěrky jsou již pravděpodobně technicky v pořádku. Bylo vysloveno podezření na nepřesnou kalibraci kamery. S definitivním určením příčiny systematických odchylek bylo rozhodnuto vyčkat na zbudování nové kalibrační základny, umožňující provést nálet z menší výšky a získat tak snímky s měřítkem mnohem příznivějším pro výpočet AT ke kalibraci aparatury Applanix.

Nová základna pro kalibraci systému Applanix byla zbudována v druhé polovině listopadu 2004. Pro snímkování byly naplánovány čtyři řady po sedmi snímcích s 60-ti procentním podélným překrytem a 30-ti procentním příčným překrytem. Na kalibrační základně bylo zbudováno osmnáct nových geodetických bodů, tři body byly využity z kalibrační základy pro letecké kamery RMK TOP. Body byly zaměřeny metodou DGPS. Body jsou v terénu umístněny na komunikacích nebo chodnících a byly stabilizovány měřickými hřeby. Před náletem jsou opatřovány nátěrem bílou barvou (kruh o průměru 30 centimetrů a boční ramena).

Nálet 25.11.2004

Zcela nepovedený nálet v měřítku 1:10 000, první na nové kalibrační základně. V důsledku uvolněného uzemnění vyhodnocovací elektroniky aparatura na palubě letadla registrovala obrovské množství neexistujících expozic, ze kterých následně nešlo vytřídit ty skutečné a vypočítat přímo měřené středy projekcí. Snímky navíc byly pravděpodobně v důsledku extrémně nízkých teplot

barevnostně chybné a obsahovaly další vady, na základě kterých výrobce digitální stěny Phase One stanovil, že je nutné odeslat tuto součást systému do výrobního závodu k opravě. Vzhledem k nutnosti pokračovat v dalších testech byla nakoupena nová digitální stěna, která byla použita v dalších testech, přesto došlo tímto k značnému opoždění testů. Z výše popsaných důvodů byly snímky z náletu pro testy nepoužitelné.

Nálet 3.12.2004

Před tímto náletem bylo změněno zapojení kamery. Signál pro detekci je nyní získáván přímo z digitálních zad z výstupu na blesk, byla provedena i úprava vyhodnocovací elektroniky. Nálet uskutečněn opět v měřítku 1:10 000 na nové kalibrační základně. V průběhu náletu byla kamera z důvodu velkých náběhových úhlů nepřesně horizontálně urovnaná ve stabilizačním závěsu. Z tohoto faktu vyplynuly nestandardně velký podélný náklon. Po výpočtu AT byly srovnáním vnějších orientací získaných výpočtem AT a vstupních dat pořízených aparaturou Applanix zjištěny opět systematické rozdíly v poloze a ve výšce středů projekce o velikosti 2-3m. S ohledem na fakt, že systematické rozdíly odpovídaly velikostí i směrem systematickým rozdílům z náletů 1:30 000, přesněji jejich přibližné třetině, bylo potvrzeno podezření na chybnou kalibraci kamery bylo rozhodnuto o nutnosti nové kalibrace objektivu kamery. Protože podezření na nepřesnou kalibraci kamery existovalo už před náletem z 3.12.2004, byl v předstihu (25.11.2004) proveden nálet nové kalibrační základny klasickou kamerou RMK TOP s ohniskem 153 mm. Prvky vnitřní orientace byly určeny včetně radiálního a tangenciálního zkreslení pomocí standardních doplňkových parametrů (3 pro radiální a 2 pro tangenciální zkreslení). Tyto hodnoty sloužily jako vstupní data pro další AT. Pomocí integrované orientace s doplňkovými parametry včetně prvků vnitřní orientace byly upřesněny hodnoty parametrů (doplňkové parametry pro zkreslení prvky vnitřní orientace) na polovině kalibračního pole s třemi středovými snímky, kde bylo změřeno více jak 400 vlícovacích bodů určených z leteckých měřických snímků z předchozích kalibrací. Tyto body byly poté změřeny na snímcích z digitální kamery a použity jako vlícovací k výpočtu nové kalibrace objektivu. Kalibrace byla vypočtena ve výpočetním programu ORPHEUS a prvky vnitřní orientace byly definitivně určeny 21.12.2004. Srovnáním vnějších orientací získaných výpočtem AT a vstupních dat pořízených aparaturou Applanix bylo zjištěno, že se systematické rozdíly sice snížily, ale nebyly beze zbytku odstraněny. Aritmetické průměry absolutních hodnot odchylek : 1.544 0.848 0.723 m. Výsledky AT programu PhotoT a prvky vnějších orientací získané v programu ORPHEUS se lišily, ale existovala dobrá shoda GPS/IMU měření a parametry vnějších orientací získané v programu ORPHEUS výsledky jsou v tab.22.

IMU-DC	$X_0$ [m]	$Y_0$ [m]	$Z_0$ [m]	<i>ω</i> [gon]	$\varphi$ [gon]	κ[gon]
PRSCH-AT	0.069	0.063	0.024	0.008	0.009	0.002
SCHDIF	0.166	0.179	0.152	0.029	0.019	0.008

Pozn. U DC je orientace os snímkového systému otočena o 100 gon, omega znamená podélný náklon!

#### Závěr

Grantový projekt potvrdil některé závěry z projektu OEEPE. Při přímé orientaci snímače není možné stereovyhodnocení, protože přesnost rotací z IMU není vždy dostatečná. Pro účely tvorby ortofotomap, kde nejsou kladeny vždy vysoké nároky na přesnost prvků vnější orientace je možné ji použít. Integrovaná orientace snímače vylepší přesnost. Jeli použito v integrované orientaci 4-10 vlícovacích bodů, je přesnost téměř stejná jako u konvenční aerotriangulace. Pro správné zavedení měření GPS/IMU do vyrovnání je žádoucí získat reálnou přesnost tohoto měření.

Bylo zjištěno, že pro kalibraci letecké měřické kamery s GPS/IMU je postačující nálet dvou řad, které mají 7 snímků. Pro zvýšení nadbytečných měření se jeví vhodnější jedna řada nalétnutá z obou směrů nad lokalitou, kde je možno vygenerovat velké množství navazovacích (spojovacích) bodů. Deset vlícovacích bodů zabezpečí vysokou přesnost. V použité lokalitě této podmínce vyhovuje nejlépe druhá řada počítáno od severu. S ohledem na přesnost aparatury je nutné vždy provádět AT před vyhodnocením snímků, takže je stálý přehled o stavu BSMA. Kalibraci je žádoucí udělat na začátku snímkovacího období, pak na základě analýz AT z projektů. Použitá aparatura Differential GPS NovAtell a IMU Applanix POS AV 310 v kalibračních letech vykázala lepší přesnost než je deklarovaná výrobcem, což potvrzují hodnoty z tab. 2a (zkrácená tab.2). Tab.2a Přesnost určení BSMA z aerotriangulace v bloku IMU1-A1

IMU1-A1	$X_0$ [m]	<i>Y</i> <sub>0</sub> [m]	$Z_0$ [m]	ω [gon]	$\varphi$ [gon]	к [gon]
SCH BSMA	0.075	0.098	0.051	0.0073	0.0070	0.0047

Projekt byl realizován s moderními kamerami. Ukázalo se, že u těchto měřických leteckých kamer není nutné zahrnout prvky vnitřní orientace do systému kalibrace. Použití doplňkových parametrů nemá významný vliv na vylepšení přesnosti měření snímkových souřadnic. Při automatickém měření je dosahováno u použitých kamer přesnosti 2-3 mikrometry, a dosažená aposteriorní přesnost je velmi shodná s apriorní. Použití doplňkových parametrů má opodstatnění při výskytu evidentních systematických chyb, jak tomu bylo ve variantě IMU2, kde došlo k nalezení systematické chyby ve směru osy Z o velikosti 0,35 m. Ve fotogrammetrii je výhodné použít méně přesného a tím i levnějšího IMU, protože orientace snímků v bloku je podržena navazovacími body v AT. Při použití dat z GPS/IMU se snáze realizuje vyhledávání spojovacích bodů při automatické aerotriangulaci, což zkracuje výpočetní čas pro automatizované měření i výpočet AT.

Při použití neměřických digitálních kamer, které jsou vhodné pro drobné lokální práce, je nezbytně nutná precizní kalibrace kamery v laboratorních podmínkách, protože existuje silná korelace mezi prvky vnitřní orientace a vnější orientace. Menší formát snímku neumožní tak výrazně kvalitní geometrii bloku, jak je tomu při použití letecké měřické kamery. Vzhledem k obdélníkovému formátu kamery je žádoucí použít větší podélný překryt 70-80% a pak by mohl být podélný náklon určen s potřebnou přesností. Je žádoucí větší počet snímků i vlícovacích bodů. Pravděpodobně vhodné by byly dvě řady mající 7-10snímků s příčným překrytem 60-70%, podélný překryt 70-80% a dvě příčné řady s 5 snímky.

## Literatura

[1] Heipke Ch., Jacobsen K., Wegmann H.: Integrated Sensor Orientation: Test Report and Workshop Proceedings, publikace OEEPE No. 43, 2002, 302 str.

[2] Cramer M.: Investigations on long term stability of system calibration for direct georeferencing. Final report, Institute for Photogrammetry, University Stuttgart,2002, 35 str.

[3] Honkavaara E.: Calibration Field Structures for GPS/IMU Camera –System Calibration: The Photogrammetric Journal of Finland, Vol. 18, No. 2, 2003, pp. 3 -15.