

Výsledky vývoje autonomní mapovací vzducholodě

Ing. B. Koska, Ph.D., Ing. J. Jon

Katedra speciální geodézie, Fakulta stavební, České vysoké učení v Praze, Thákurova 7, Praha 6,

ABSTRAKT

V příspěvku je představen postup a výsledky určení vnější kalibrace liniového laserového skeneru s využitím exteriérového kalibračního pole velkého rozsahu. Problematika je součástí projektu Autonomní mapovací vzducholodě (Autonomous Mapping Airship – AMA), jehož cílem je vytvoření mapovacího systému se specifickými vlastnostmi vhodnými pro efektivní mapování středně rozsáhlých oblastí (jednotky až desítky čtverečných kilometrů za den). Jako nosič byla použita vzducholodě, která má specifické vlastnosti ve srovnání s jinými nosiči. Nejvýznamnější vlastnosti jsou vysoká užitečná nosnost (15 kg), dlouhá doba letu (3 hodiny), vysoká provozní bezpečnost a specifické letové charakteristiky jako stabilita letu z hlediska vibrací a možnost letu nízkými rychlostmi. Vysoká užitečná nosnost umožňuje použití kvalitních senzorů, jako je profesionální infračervená kamera Flir SC645, kvalitní digitální kamera ve viditelném spektru, INS/GPS senzor iMAR iTracerRT-F200 taktické kategorie a liniový laserový skener Sick LD-LRS1000.

Kalibrace je založena na přímém laboratorním měření délkových odsazení (lever-arm) a polním určení zbytkových úhlových odsazení (bore-sights). Výpočet úhlového odsazení je založen na minimalizaci čtverců vzdáleností jednotlivých zaměřených bodů mračna od rovinných povrchů.

1. ÚVOD

Bezpilotní letecké mapování nabývá v posledních letech prudce na popularitě zejména z důvodu poklesu cen bezpilotních leteckých prostředků a pokrokům ve 3D rekonstrukci z fotografií. Výsledky 3D rekonstrukce z fotografií se rozlišením a přesností přibližují laserovému skenování v některých případech. Přesto má mobilní laserové skenování stále výhodu ve spolehlivosti a jednoduchosti zpracování naměřených dat. Z těchto důvodů byla vybrána vzducholodě jako nejvhodnější nosič schopný unést laserový skener a nutné příslušenství.

Reálná náplň projektu AMA může být rozdělena do několika částí. Jedná se o vývoj vzducholodi včetně autonomního ovládání, (vnitřní) kalibraci jednotlivých senzorů např.^[1], časovou synchronizaci senzorů^[2] a geometrickou kalibraci vzájemných prostorových vztahů senzorů. Tento dokument se zabývá posledním uvedeným předmětem vývoje - geometrickou kalibrací vzájemných prostorových vztahů senzorů. V tomto případě konkrétně pracujeme s pozičním senzorem INS/GPS iMAR iTracer – F200 a jeho prostorovým vztahem ke skenovací jednotce Sick LD-LRS1000. Předmětem kalibrace je určení zbytkových úhlových odsazení (bore-sights) a délkových odsazení (lever-arms). Délkové odsazení je definováno jako posun počátku souřadnicového systému senzoru od počátku souřadnicového systému INS/GPS (vyjádřený v souřadnicovém systému INS/GPS). Délkové odsazení může být měřeno s dostatečnou přesností (jednotky milimetrů) přímo nebo nepřímo laboratorně. Zbytkové úhlové odsazení je rotační odchylka mezi skutečným souřadnicovým systémem senzoru a jeho přibližně známou orientací (přibližná orientace je buď známa z návrhu nebo přibližně přímo změřena) a reprezentuje náročnější úlohu.

Existuje několik knih např.^{[3],[4],[5],[6]} a vědeckých příspěvků na téma kalibrace leteckých měřických přístrojů. Literatura je výrazně více frekventovaná v případě kamer než laserových skenerů, protože letecká fotogrammetrie má delší tradici a přístrojové vybavení je obvykle dostupnější. Příspěvky^{[7],[8],[9]} byly studovány v našem projektu. Situace je problematičtější v případě laserového skenování, protože je znám pouze jeden systém^[11], u kterého byly zveřejněny detaily kalibrací. Vývojáři komerčních leteckých skenovacích systémů (např. společnosti Leica, Riegl, Optech, ...) z obchodních důvodů detaily svých kalibračních postupů nezveřejňují. Pracovali jsme zejména s příspěvkem^[10] (a kniha^[3] s kapitolou 3 od stejných autorů) a^[11], které popisují systém Helimap a jeho kalibraci a s příspěvkem^[12]. Systém Helimap byl vyvinut v EPFL - Swiss Federal Institute of Technology Lausanne.

2. TECHNOLOGIE

Autonomní mapovací vzducholodě (dále AMA - Autonomous Mapping Airship) je mapovací systém se specifickými vlastnostmi vhodnými pro efektivní mapování středně velkých oblastí (jednotky až desítky čtverečných kilometrů za den). Systém by měl být vhodný k použití zejména pro oblasti příliš velké pro klasické geodetické měření s GNSS aparaturou nebo totální stanicí a příliš malé pro použití pilotovaných leteckých prostředků z hlediska přesnosti a ekonomičnosti. Jednotlivé součásti systému umožňují např. vytváření termometrických georeferencovaných map,

mapování nepřístupných nebo nebezpečných oblastí (skládky, povrchové doly), sběr dat pro modelování zastavěných oblastí. Z těchto důvodů je platforma vzducholodi vybavena laserovým skenerem, kamerou ve viditelném spektru (dále VIS), termo kamerou a INS/GPS senzorem, pro určování vnější orientace platformy. Výsledná absolutní přesnost výstupů ze systému je podle jejich typu 5-10 cm (směrodatná odchylka) s náhodnou složkou nižší než 5 cm. Tato přesnost je nižší než u klasického geodetického měření, ale výrazně vyšší než u obdobných systémů na pilotovaném leteckém prostředku. Z hlediska vlastností (přesnost, rychlost sběru dat) je systém podobný jako pozemní mobilní skenovací systémy, od kterých se liší zejména terénní dostupností. Podrobnější informace o projektu AMA jsou uvedeny například v publikaci [2].

Výběr vzducholodi jako nosiče byl založen na našich specifických požadavcích jako je vysoká užitečná nosnost, dlouhá doba letu, bezpečnost (v případě poruchy nehrozí nebezpečí prudkého pádu, vzducholod' je o několik kilogramů těžší než vzduch a proto by měla plynule klesnout bez ohrožení zdraví lidí a vybavení) a letové charakteristiky (stabilita letu z hlediska vibrací a možnost pomalého letu).

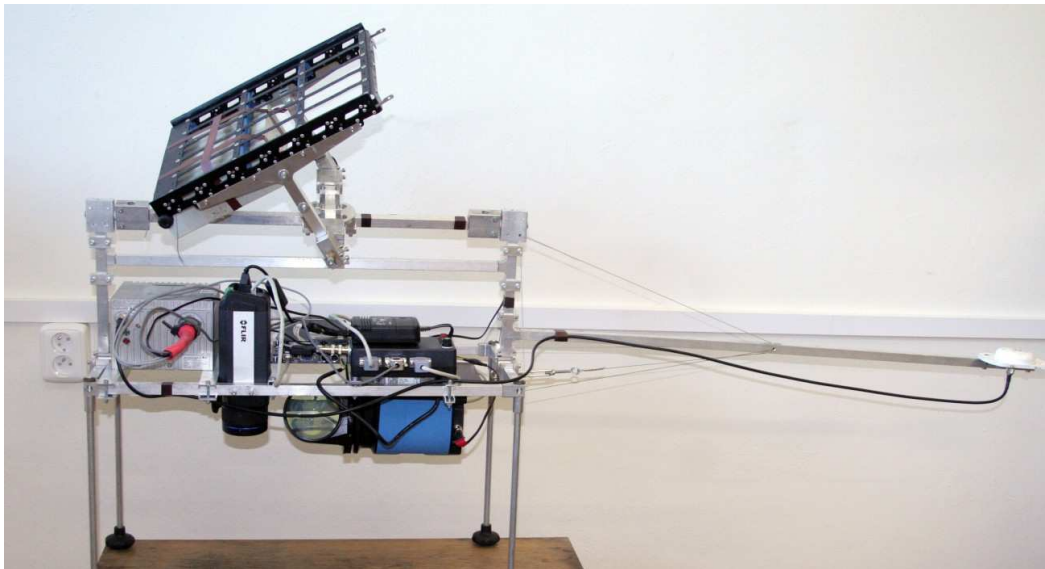
Vzducholod' ACC15X byla vyrobena společností airshipclub.com a je 12 metrů dlouhá s maximálním průměrem balónu 2.8 metru, objem balónu je 57 m³ a provozní plyn je helium. Základní provozní rychlost je 30 km/h, maximální 55 km/h, výšková dostupnost je 1000 m. Pohon je realizován dvěma postranními elektromotory s vrtulemi. Vzducholod' je napájena benzínovým motorem s generátorem, který zabezpečí napájení na přibližně 3 hodiny.



Obrázek 1. Autonomní mapovací vzducholod' – AMA

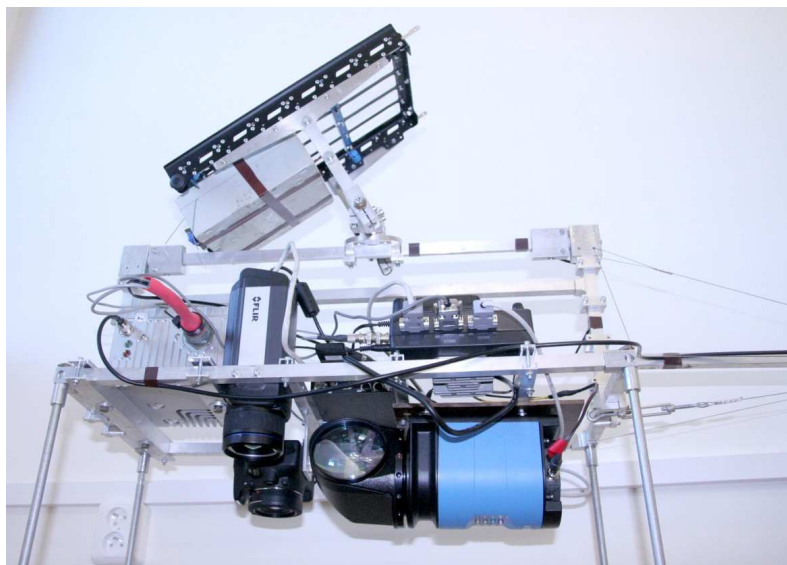
2.1 Měřicí platforma

Měřicí platforma byla navržena a optimalizována speciálně pro zavěšení na vzducholodi. Její součástí je mechanicky tlumený (stahovatelná teflonová vložka) gravitační Cardanův závěs. Má modulární návrh, který umožňuje použití různých senzorů ve vhodných pozicích. Jediným limitním faktorem pro senzory je hmotnost, která je dána užitečnou nosností vzducholodi. Cardanův závěs byl zvolen pro stabilizaci platformy během letu z důvodu stabilizace zorného pole senzorů.



Obrázek 2. Měřicí platforma se senzory

V současné době se dostupné senzory skládají z INS/GPS poziční jednotky (iMAR iTraceRT – F200), laserového skeneru (Sick LD-LRS1000), digitální kamery ve viditelném spektru (Canon EOS 100D) a profesionální termometrické kamery (FLIR SC645). Pro záznam dat je používán průmyslový minipočítač Stealth LPC-125LPM. Určení prostorových vztahů jednotlivých komponent je jedním z hlavních předmětů řešení projektu a teoreticky bylo popsáno v [16].



Obrázek 3. Detailní pohled na přístrojové vybavení platformy

2.2 Laserový skener - Sick LD-LRS1000

Jedná se o rotační profilový (liniový) laserový skener s pulsní technologií vyvinutý primárně pro bezpečnostní aplikace v průmyslové výrobě (bezpečnost práce a provozu). Společnost Sick AG má dlouho tradici ve výrobě tohoto typu senzorů a jejich produkty se vyznačují výhodným poměrem ceny a výkonu. Z tohoto důvodu jsou jejich senzory velmi často používány v mobilních robotických a mapovacích projektech např. [13].



Obrázek 4. Sick LD-LRS1000

Nejdůležitější parametry skeneru jsou uvedeny v tabulce č. 1, podrobně je produkt popsán v technické dokumentaci ^[14].

Tabulka 1. Nejdůležitější parametry laserového skeneru Sick LD-LRS1000

Délkový dosah/odrazivost	2.5m - 250m/100%, 80m/10%
Úhlový dosah	360°
Max. frekvence měření délek	14400 Hz
Rotační frekvence	5-10 Hz
Směrodatná odchylka délky	25 mm
Přesnost (systematická složka)	±38 mm to 80m, ±63 mm nad 80m
Minimální úhlové rozlišení	0.125°
Průměr laserového svazku na výstupu	40 mm
Rozbíhavost laserového svazku	2.8 mrad = 0.16°
Dostupná rozhraní	RS-232/RS-422, Ethernet, CAN

2.3 Časová synchronizace

Byl navržen a vyroben deska s mikrokontrolérem založená na standard Arduino k zabezpečení přesné časové synchronizace (lépe než 1 ms) měření laserového skeneru. Byla k tomu využita služba laserového skeneru nazvaná Interface Routing, která umožňuje úplnou kontrolu komunikace pro vybraný pár dostupných rozhraní. Zpráva složená z přesného UTC času (založena na signálech INS/GPS) je poslána na rozhraní RS-232. Laserový skener tuto zprávu neinterpretuje, pouze uloží čas vnitřních hodin pro poslední znak této zprávy a přepoše ji společně s časem na tzv. Master Interface (v našem případě Ethernet).

Vnitřní hodiny mikrokontroléru jsou nastaveny a udržovány pomocí přesných PPS pulsů (v řádu nanosekund) a jim příslušných NMEA zpráv (typu \$GPGGA) z INS/GPS senzoru s přesností lepší než 1 ms. Příkazy k sejmutí vizuálních nebo termometrických snímků jsou zaslány z řídicího počítače do mikrokontroléru. Po vykonání příkazu mikrokontrolér zašle zpět do řídicího počítače zprávu s identifikací příkazu a přesným UTC časem jeho vykonání. Dále mikrokontrolér automaticky zasílá ve zvoleném intervalu synchronizační zprávy s UTC časem do laserového skeneru, který je společně se záznamem svých vnitřních hodin přeposílá do řídicího počítače.

3. MATEMATICKÉ ŘEŠENÍ PROBLÉMU

Literatura věnující se určení prostorových vztahů mezi senzory typu INS/GPS a laserovým skenerem je méně častá a dostupná než v případě kamer. Důvodem je pravděpodobně kratší čas tohoto typu přístrojů a jejich menší rozšíření z důvodu jejich ceny. Systémy s těmito senzory jsou většinou produkovány a interně kalibrovány zavedenými výrobci jako Leica, Riegl nebo Optech. Tyto společnosti kalibrační postupy ani jiné know-how nezveřejňují z obchodních důvodů.

Pouze několik systémů tohoto typu vyvíjených výzkumnými institucemi existuje ve veřejně dostupných zdrojích. Nejvýznamnějším zdrojem inspirace pro nás byl systém Helimap ^[11]. V rámci tohoto původně akademického projektu byla vyvinuta nová kalibrační metoda pro určení prostorových vztahů mezi INS/GPS a liniovým skenerem a byla prezentována v příspěvku ^[10]. Stejní autoři na stejné téma taky kapitolu č. 3 v knize ^[3]. Jejich metoda je založena na minimalizaci čtverců vzdáleností jednotlivých bodů od zaměřovaných rovinných povrchů. Postup založený na stejném

principu je prezentován i jiným autorem v příspěvku ^[12], ale tato publikace je méně věrohodná, protože neobsahuje praktické výsledky.

Měření v rámci této metody představují:

- Přímé měření délky a úhly na jednotlivé body laserovým skenerem,
- Polohy a orientace INS/GPS jednotky interpolované pro okamžik měření každého podrobného bodu v referenčním souřadnicovém systému.

Hledané (vyrovnávané) parametry jsou:

- Zbytková úhlová odsazení mezi souřadnicovými systémy INS/GPS a skeneru (tvoří bore-sight matici),
- Definiční parametry všech použitých rovin.

Určení délkového odsazení (lever-arm) je v literatuře výše doporučeno určit přímým laboratorním měření stejně jako v případě kamer.

3.1 Přímé georeferencování

Základní rovnice pro výpočet jednotlivých podrobných bodů v geocentrickém souřadnicovém systému, nazývaná také přímé georeferencování, je (založena na rovnici 3.20 v ^[3]):

$$\mathbf{x}^e = \mathbf{x}_b^e + \mathbf{R}_l^e \cdot \mathbf{R}_b^l \cdot \mathbf{R}_{b'}^b \cdot \mathbf{T}_s^{b'} \cdot (\mathbf{x}^s - \mathbf{x}_b^s) \quad (1)$$

Kde:

- \mathbf{x}^e - je vektor souřadnic podrobného bodu zaměřeného laserovým skenerem v e -systému (ECEF - Earth-centered, Earth-fixed, nejčastěji WGS84),
- \mathbf{x}_b^e - je vektor souřadnic centra b -systému (INS/GPS) v e -systému,
- \mathbf{R}_l^e - je matice rotace z l -systému (lokální systém) do e -systému, definovaná geografickou polohou (φ , λ) INS/GPS,
- \mathbf{R}_b^l - je matice rotace z b -systému (INS/GPS) do l -systému parametrizovaná typicky úhly roll, pitch a yaw,
- $\mathbf{R}_{b'}^b$ - je předmětná bore-sight matice,
- $\mathbf{T}_s^{b'}$ - je přibližně známá a konstantní matice rotace souřadnicového systému skeneru (s -systém) do b -systému,
- \mathbf{x}^s - je vektor souřadnic podrobného bodu zaměřeného laserovým skenerem v jeho s -systému,
- \mathbf{x}_b^s - je inverzní vektor délkových odsazení (lever-arm) mezi centry INS/GPS a skenerem vyjádřený v s -systému skeneru.

Obecně horní index v popisu reprezentuje referenční (cílový) souřadnicový systém a dolní index vstupní souřadnicový systém.

Mezi rovnicí (1) a rovnicí 3.20 v ^[3] jsou drobné rozdíly. Nevýznamnějším rozdílem je znaménko vektoru \mathbf{x}_b^s , které je chybně uváděno kladně v rovnici 3.20, ale záporně v (1) a v ^[12]. Dalším rozdílem je začlenění rotační matice $\mathbf{R}_{b'}^b$ (bore-sight), který reprezentuje zbytkovou část rotace s -systému do b -systému a která je hlavním předmětem kalibrace. Rovnice (1) není v použité literatuře odvozena a proto je její odvození uvedeno dále.

Rovnice (1) vychází a je složena ze tří jednoduchých Euklidovských transformací:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^b &= \mathbf{x}_s^b + \mathbf{R}_s^b \cdot \mathbf{x}^s = \mathbf{x}_s^b + \mathbf{R}_{b'}^b \cdot \mathbf{T}_s^{b'} \cdot \mathbf{x}^s \\ \mathbf{x}^l &= \mathbf{x}_b^l + \mathbf{R}_b^l \cdot \mathbf{x}^b \\ \mathbf{x}^e &= \mathbf{x}_l^e + \mathbf{R}_l^e \cdot \mathbf{x}^l \end{aligned} \quad (2)$$

Pokud tyto tři transformace zkombinujeme tak odvodíme:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x}^e &= \mathbf{x}_l^e + \mathbf{R}_l^e \cdot \left[\mathbf{x}_b^l + \mathbf{R}_b^l \cdot (\mathbf{x}_s^b + \mathbf{R}_s^b \cdot \mathbf{x}^s) \right] \\
 \mathbf{x}^e &= \mathbf{x}_l^e + \mathbf{R}_l^e \cdot \mathbf{x}_b^l + \mathbf{R}_l^e \cdot \mathbf{R}_b^l \cdot (\mathbf{x}_s^b + \mathbf{R}_s^b \cdot \mathbf{x}^s) \\
 \mathbf{R}_l^e \cdot \mathbf{x}_b^l &= \mathbf{x}_b^{e(l)} \\
 \mathbf{x}_l^e + \mathbf{x}_b^{e(l)} &= \mathbf{x}_b^e \\
 \mathbf{x}^e &= \mathbf{x}_b^e + \mathbf{R}_l^e \cdot \mathbf{R}_b^l \cdot (\mathbf{x}_s^b + \mathbf{R}_s^b \cdot \mathbf{x}^s) \\
 \mathbf{x}^e &= \mathbf{x}_b^e + \mathbf{R}_l^e \cdot \mathbf{R}_b^l \cdot \mathbf{R}_s^b (\mathbf{R}_s^b \cdot \mathbf{x}_s^b + \mathbf{x}^s) \\
 \mathbf{R}_b^s \cdot \mathbf{x}_s^b &= -\mathbf{x}_b^s \\
 \mathbf{x}^e &= \mathbf{x}_b^e + \mathbf{R}_l^e \cdot \mathbf{R}_b^l \cdot \mathbf{R}_s^b (\mathbf{x}^s - \mathbf{x}_b^s) \\
 \mathbf{x}^e &= \mathbf{x}_b^e + \mathbf{R}_l^e \cdot \mathbf{R}_b^l \cdot \mathbf{R}_s^b \cdot \mathbf{T}_s^{b'} (\mathbf{x}^s - \mathbf{x}_b^s)
 \end{aligned} \tag{3}$$

Jediná nova a pomocná proměnná je $\mathbf{x}_b^{e(l)}$, která reprezentuje vektor souřadnic počátku b -systému (INS/GPS) vůči l -systému vyjádřený v e -systému. Můžeme snadno odvodit, že \mathbf{x}_b^s musí mít záporné znaménko v rovnici (1):

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x}^b &= \mathbf{x}_s^b + \mathbf{R}_s^b \cdot \mathbf{x}^s \\
 \mathbf{R}_b^s &= (\mathbf{R}_s^b)^{-1} \\
 \mathbf{x}^s &= -\mathbf{R}_b^s \cdot \mathbf{x}_s^b + \mathbf{R}_b^s \cdot \mathbf{x}^b = \mathbf{x}_b^s + \mathbf{R}_b^s \cdot \mathbf{x}^b \\
 \mathbf{x}_b^s &= -\mathbf{R}_b^s \cdot \mathbf{x}_s^b
 \end{aligned} \tag{4}$$

Do rovnice (1) můžeme dodat parametry jednotlivých matic:

$$\mathbf{x}^e = \mathbf{x}_b^e + \mathbf{R}_l^e(\varphi, \lambda) \cdot \mathbf{R}_b^l(r, p, y) \cdot \mathbf{R}_b^s(\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa) \cdot \mathbf{T}_s^{b'}(\omega, \varphi, \kappa) \cdot (\mathbf{x}^s - \mathbf{x}_b^s) \tag{5}$$

Jednotlivé matice jsou popsány a vyjádřeny dále zleva doprava (používáme notaci $\sin \varphi = s_\varphi$, $\cos \varphi = c_\varphi$):

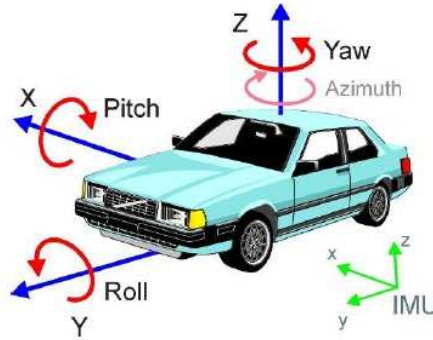
$$\mathbf{R}_{l_{ENU}}^e(\varphi, \lambda) = \begin{pmatrix} -s_\lambda & -s_\varphi c_\lambda & c_\varphi c_\lambda \\ c_\lambda & -s_\varphi s_\lambda & c_\varphi s_\lambda \\ 0 & c_\varphi & s_\varphi \end{pmatrix} \tag{6}$$

Matice rotace (6) reprezentuje rotaci z lokálního l -systému (pro každý podrobný bod jedinečný) do e -systému (ECEF). V našem projektu používáme tzv. ENU variantu (East-North-Up), protože je to výchozí lokální systém pro použité INS/GPS iMAR iTraceRT F200 i pro použitý zpracovatelský software Inertail Explorer společnosti NovAtel. ENU varianta byla odvozena jednoduchou záměnou sloupců a znamének NED varianty (North-East-Down) z publikace [3].

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R}_b^l(r, p, y) &= \mathbf{R}_z(-y) \cdot \mathbf{R}_x(-p) \cdot \mathbf{R}_y(-r) \\
 \mathbf{R}_b^l(r, p, y) &= \begin{pmatrix} c_y & -s_y & 0 \\ s_y & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_p & -s_p \\ 0 & s_p & c_p \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_r & 0 & s_r \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_r & 0 & c_r \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\mathbf{R}_b^l = \begin{pmatrix} c_y \cdot c_r - s_y \cdot s_p \cdot s_r & -s_y \cdot c_p & c_y \cdot s_r + s_y \cdot s_p \cdot c_r \\ s_y \cdot c_r + c_y \cdot s_p \cdot s_r & c_y \cdot c_p & s_y \cdot s_r - c_y \cdot s_p \cdot c_r \\ -c_p \cdot s_r & s_p & c_p \cdot c_r \end{pmatrix} \tag{8}$$

Poněkud nezvyklá forma matice rotace z b -systému do l -systému je způsobena výchozí a doporučenou orientací INS/GPS jednotky iMAR a je převzata z jeho technické dokumentace viz následující obrázek.



Obrázek 5. Doporučená orientace pro iMAR iTraceRT-F200 (převzato z dokumentace)

Následující matice rotace $\mathbf{T}_s^{b'}$ představuje přibližně známou (a konstantní během výpočtů) rotaci z s -systému do b -systému. Je možné použít jakékoliv pořadí rotací kolem jednotlivých souřadnicových os, ale z konvenčních důvodů budeme používat pořadí podle publikace [5], [6]:

$$\mathbf{T}_s^{b'}(\omega, \varphi, \kappa) = \mathbf{R}_X(\omega) \cdot \mathbf{R}_Y(\varphi) \cdot \mathbf{R}_Z(\kappa) = \begin{pmatrix} c_\varphi c_\kappa & -c_\varphi s_\kappa & s_\varphi \\ c_\omega s_\kappa + s_\omega s_\varphi c_\kappa & c_\omega c_\kappa - s_\omega s_\varphi s_\kappa & -s_\omega c_\varphi \\ s_\omega s_\kappa - c_\omega s_\varphi c_\kappa & s_\omega c_\kappa + c_\omega s_\varphi s_\kappa & c_\omega c_\varphi \end{pmatrix} \quad (9)$$

Pro upřesnění uvádíme, že rotace proti směru hodinových ručiček má kladné znaménko, při pohledu po ose k počátku.

Poslední vyjádřenou maticí je hledaná matice bore-sight, což je diferenciální matice rotace vycházející z matice rotace (9):

$$\mathbf{R}_{b'}^b(\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa) = \begin{pmatrix} 1 & -\Delta\kappa & \Delta\varphi \\ \Delta\kappa & 1 & -\Delta\omega \\ -\Delta\varphi & \Delta\omega & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Na závěr uvádíme ještě rovnice pro vektor \mathbf{x}^s :

$$\mathbf{x}^s = \begin{pmatrix} d \cdot \cos \sigma \\ d \cdot \sin \sigma \\ 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

Kde d je měřená vzdálenost a σ je úhlová polární souřadnice vypočtená z měřeného úhlu $\sigma = 360^\circ - \varphi$.

Pokud všechny výše vyjádřené matice (6), (8), (9), (10) a vektor (11) doplníme do rovnice (1), tak získáme vztah pro přímé georeferencování jednotlivých bodů.

3.2 Parametrizace roviny

Prezentované řešení určení bore-sight matice je založeno na minimalizaci čtverců vzdáleností jednotlivých bodů od rovinných ploch.

Implicitní rovnice roviny je:

$$a \cdot x + b \cdot y + c \cdot z + d = 0, \quad (12)$$

Protože se jedná o homogenní rovnici z hlediska hledaných parametrů a , b , c a d , je nutné ji doplnit další podmínkou. Z důvodu obecnosti byla použita rovnost kvadratické normy normálového vektoru roviny (a , b , c) jedné:

$$a^2 + b^2 + c^2 - 1 = 0. \quad (13)$$

Další nejednoznačnost představují znaménka parametrů, takže je volena kladná hodnota pro parameter d :

$$d > 0. \quad (14)$$

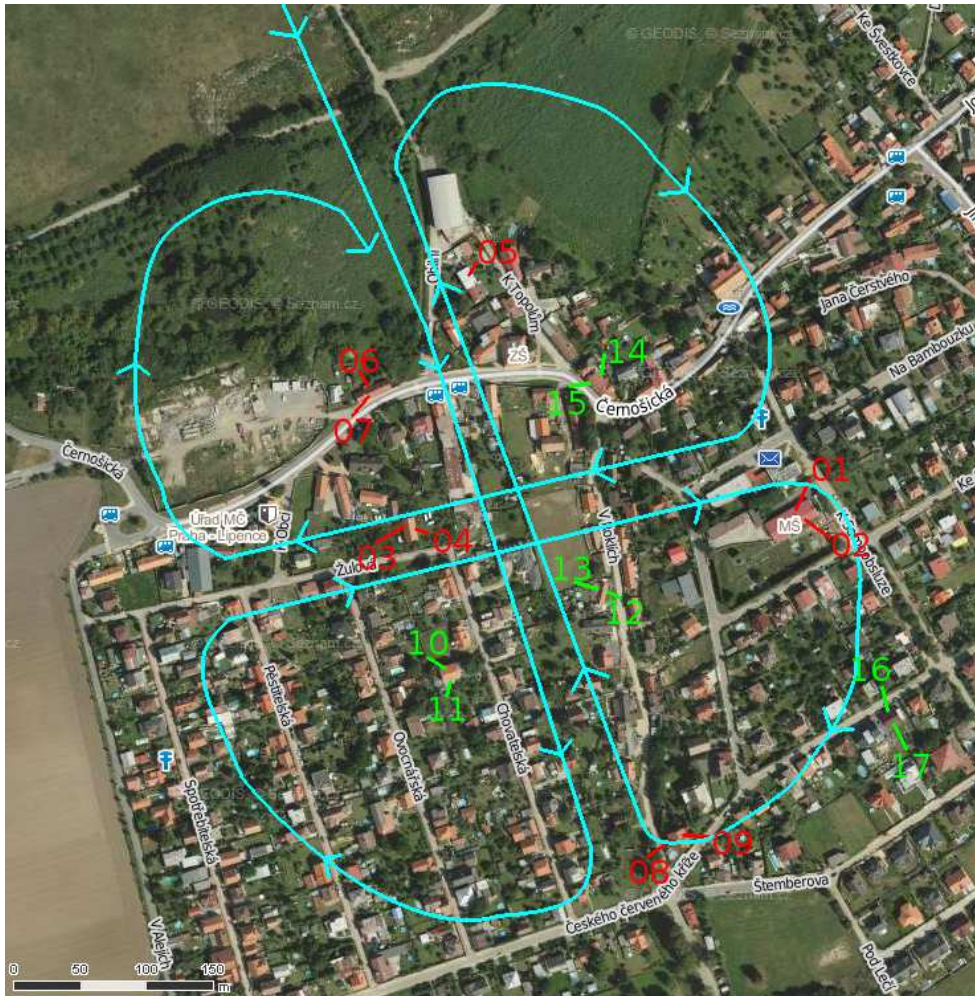
Při zavedení podmínky (13) je nejkratší (ortogonální) vzdálenost bodu i od roviny definována:

$$d_i = a \cdot x_i + b \cdot y_i + c \cdot z_i + d. \quad (15)$$

4. MĚŘENÍ

Kalibrační měření bylo realizováno v zastavěné oblasti obce Lipence, která se nachází v blízkosti Prahy směrem na jih.

Nálet dodržoval tzv. čtyřlístkový vzor s vnějším rozměrem přibližně 500 x 500 metrů a byl uskutečněn v souladu s obecným a logickým doporučením v [10] ve dvou výškách nad terénem. Byly zvoleny výšky 60 a 110 metrů s ohledem na pracovní dosah skeneru a předpokládané operační nasazení systému AMA.



Obrázek 6. Oblast kalibrace s tzv. čtyřlístkovým vzorem náletu (modře), kalibračními rovinami (červeně) a kontrolními rovinami (zeleně)

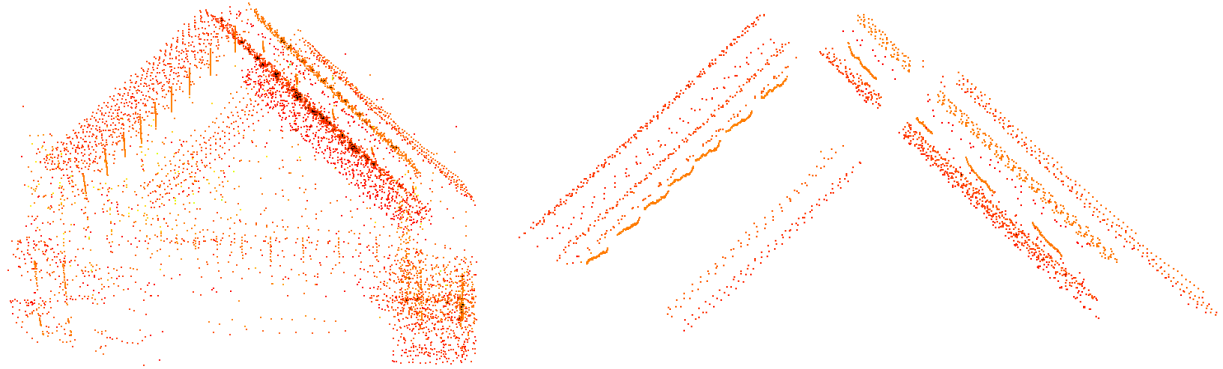
Pozemní letová rychlost byla 5-10 m/s, rotační frekvence skeneru 10 Hz a úhlový krok 0.25 stupně. Toto nastavení odpovídá pozemním hustotě podrobných bodů 0.5-1 metr ve směru letu a 0.25-0.5 metru v příčném směru.

5. ZPRACOVÁNÍ

Poziční data z INS/GPS jednotky iMAR iTraceRT-F200 byla zpracována v software Inertial Explorer (NovAtel) s použitím statických dat z referenční stanice. Poziční data (čas GPS, zeměpisná délka, šířka, výška nad elipsoidem, roll, pitch, heading) byly po vyhodnocení exportovány v intervalu 5 ms (200Hz, maximální frekvence INS/GPS) v referenčním systému WGS84.

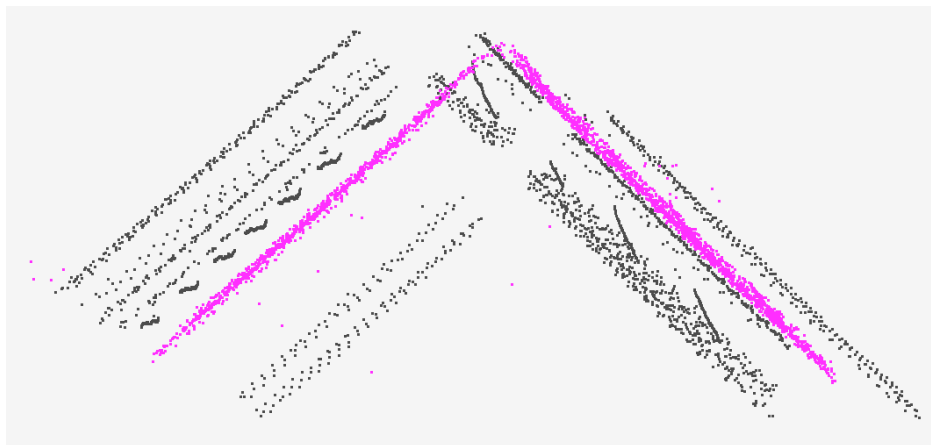
Další zpracování proběhlo v programech vlastní produkce „Zeppelin Calibrate“ a „Zeppelin Process“. Poziční data byla interpolována pro jednotlivé podrobné body ze skeneru podle GPS času. Po zadání přibližné matice orientace skeneru

$\mathbf{T}_s^{b'}$ byly vypočteny první nekalibrované pozice podrobných bodů a exportovány v souřadnicovém systému UTM. Následně byly manuálně vybrány body náležející devíti zvoleným kalibračním rovinám (roviny 01-09 na obr. 6). To bylo celkem obtížné, protože přibližná matice $\mathbf{T}_s^{b'}$ byla určena pouze na základě orientace komponent platformy při montáži a byla tedy poměrně nepřesná viz. obr. 7.



Obrázek 7. Výběr bodů zvolených kalibračních rovin (vlevo původní mračno, vpravo selektované body rovin)

Na základě identifikovaných bodů kalibračních rovin proběhlo první vyrovnání. Výsledky vyrovnání nesplňovali očekávání – aposteriorní směrodatná odchylka jednotková byla 0.092 m (v tomto případě reprezentuje kvadratický průměr vzdáleností všech podrobných bodů od příslušných kalibračních rovin). Jako důvod této hodnoty se ukázaly hrubé chyby/body, které byly začleněny do vyrovnání viz následující obrázek.



Obrázek 8. Graficky identifikovatelné chybné body po první kalibraci viditelné jako vzdálené purpurové body (šedivě jsou zobrazeny původní body bez kalibrace, purpurové body po první kalibraci)

Po manuálním vyloučení chybných bodů bylo realizováno druhé vyrovnání. Výsledky byly výrazně lepší a v souladu s očekáváním - aposteriorní směrodatná odchylka jednotková byla 0.036 m.

5.1 Vyrovnání

Měření a hledané parametry jsou v komplikovaném vztahu (vztahy (5) jsou začleněny do rovnice roviny (15)) a není možné je separovat. Použitý model vyrovnání musí taky zahrnovat podmínku (13) pro každou rovinu. Z toho vyplývá, že je nutné použít nejobecnější model vyrovnání tzv. „Gauss-Helmertův model s podmínkami pro neznámé“ podle [4]. Bohužel není známa apriorní plošná směrodatná odchylka skeneru (viz podrobná dokumentace [14]), takže není možné korektně tento model vyrovnání použít. Na druhou stranu je možné předpokládat, že přesnost (směrodatná odchylka) vzdálenosti všech bodů od příslušných rovin v kalibraci je téměř stejná (přesnostní charakteristiky pulsních laserových skenerů jsou téměř nezávislé na menší změny v délce na rozdíl od fázových laserových skenerů viz. [15]). Proto je možné použít jednodušší model vyrovnání tzv. „Gauss-Markův model s podmínkami pro neznámé“ podle [4]. V tomto případě uvažujeme apriorní směrodatné odchylku vzdálenosti bodu od roviny za neznámou a pro určení přesnosti vyrovnaných parametrů je nutné použít aposteriorní jednotkovou směrodatnou odchylku.

6. VÝSLEDKY

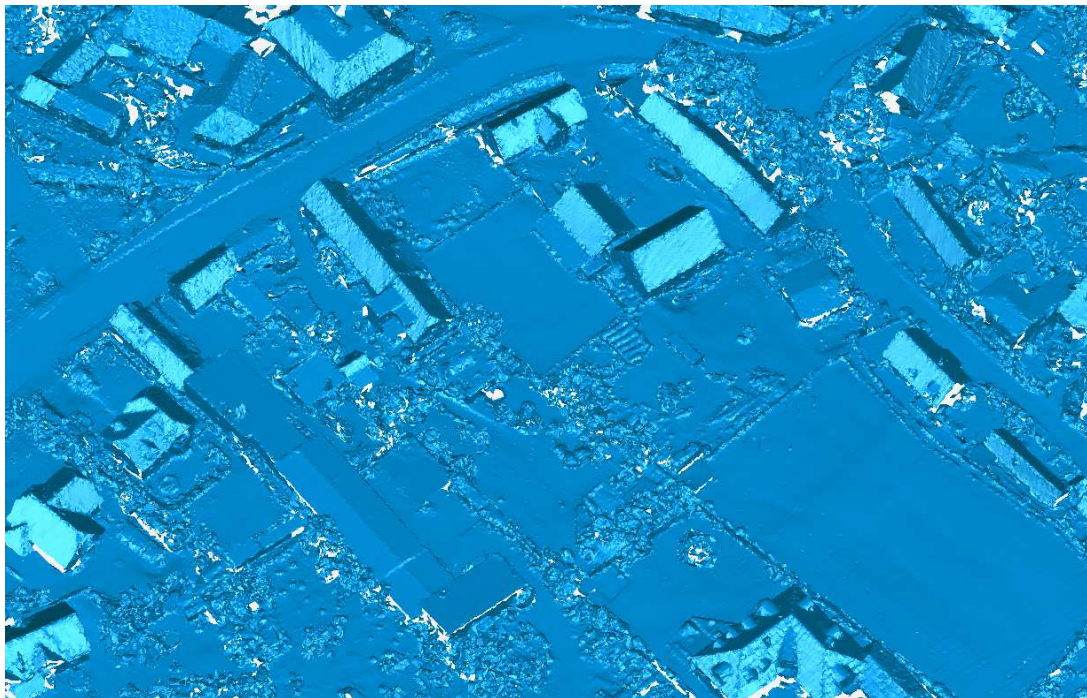
Hlavním výsledkem kalibrace jsou vyrovnané úhly rotace $\Delta\omega$, $\Delta\varphi$ a $\Delta\kappa$ bore-sight matice \mathbf{R}_b^b , a jejich směrodatné odchylky. Ty jsou svázané s aposteriorní jednotkovou směrodatnou odchylkou, která dosáhla hodnoty 0.036 metru ve finálním vyrovnaní a reprezentuje kvadratický průměr vzdáleností všech bodů od příslušných rovin. Výsledná úhlová odsazení $\Delta\omega$, $\Delta\varphi$ a $\Delta\kappa$ jsou: -0.84711, 0.27711 a -0.69817 stupně a jejich směrodatné odchylky 0.00077, 0.0017 a 0.00057 stupně. Největší odchylku má podle očekávání $\Delta\varphi$, které reprezentuje azimutální rotaci.

Dalším výstupem je ověření dosažené přesnosti na kontrolních rovinách, které nebyly součástí kalibrace. Osm takových rovin bylo vybráno viz roviny 10-17 na obr. 6. Výsledek proložení kontrolních rovin je prezentován v následující tabulce.

Tabulka 2. Směrodatné odchylky proložení kontrolních rovin

Číslo roviny	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]
10	971	0.035
11	464	0.049
12	301	0.030
13	736	0.040
14	628	0.021
15	465	0.045
16	992	0.016
17	574	0.032
	Průměr	0.034

Porovnání s výsledky podobného projektu v publikaci ^[10] je zajímavé. Maximální směrodatná odchylka při kalibraci zde byla dosažena pouze 3 mm (viz Tabulka 3 v ^[10]), což by byl vynikající výsledek i pro statický terestrický skener. Na druhou stranu průměrná směrodatná odchylka proložení na čtyřech kontrolních rovinách byla 0.045 metru (viz Tabulka 4 v ^[10]). Kontrolní výsledky v ^[10] jsou tedy v souladu s našimi výsledky i pokud vezmeme v úvahu rozdílnosti obou systémů (Helimap používá laserový skener s vyšší přesností, ale nosičem je pilotovaná helikoptéra, který lítá výrazně vyšší rychlostí a ve vyšších výškách).



Obrázek 9. Trojúhelníková síť (mesh) vytvořená z kalibrovaného mračka bodů (bez čištění a úprav)

7. ZÁVĚR

V dokumentu je představen kalibrační postup a jeho výsledky pro liniový laserový skener s využitím exteriérového kalibračního pole velkého rozsahu. Dosažené výsledky jsou v souladu s naším očekáváním, potřebami a plánovaným použitím systému AMA. Jsou také v souladu s výsledky publikovanými v rámci podobných projektů^[10]. Unikátností našeho projektu je použití přesného laserového skenování s bezpilotním nosičem. Další vývoj bude aplikace prezentovaného postupu na laserový skener s kónickou modifikací^[1].

LITERATURA

- [1] Koska, B., "Calibration of Profile Laser Scanner with Conical Shape Modification for Autonomous Mapping System," Proc. SPIE 8791A, (2013).
- [2] Jon, J., Koska, B. and Pospíšil, J., "Autonomous Airship Equipped with Multi-Sensor Mapping Platform," ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W1, 119-124 (2013).
- [3] Vosselman, G. and Maas, H., [Airborne and Terrestrial Laser Scanning], Whittles Publishing, Scotland (2010).
- [4] McGlone, Ch., Mikhail, E. M. and Bethel, J., [Manual of Photogrammetry], American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda (2004).
- [5] Kraus, K., [Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans], Walter de Gruyter, Berlin (2007).
- [6] Kraus, K., [Photogrammetry Volume 2 - Advanced Methods and Applications], Ferd. Dummlers Verlag, Bonn (1993).
- [7] Skaloud, J. and Schaer, P., "Towards A More Rigorous Bore-sight Calibration," Proc. ISPRS International Workshop on Theory, Technology and Realities of Inertial / GPS Sensor Orientation (2003).
- [8] Schmitz, M., Wübbena, G., Bage, A. and Kruck, E. J., "Benefit of Rigorous Modeling of GPS in Combined AT/GPS/IMU-Bundle Block Adjustment," OEEPE Workshop "Integrated Sensor Orientation" (2001).
- [9] Pivnicka, F., Kemper, G. and Geissler, S., "Calibration Procedures in Mid Format Camera Setups," International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIX-B1, 149-152 (2012).
- [10] Skaloud, J. and Lichty, D., "Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning," ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 61, 47-59 (2006).
- [11] Vallet, J. and Skaloud, J., "Development and Experiences With a Fully-Digital Handheld Mapping System Operated from a Helicopter," The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXV-B, 791-796 (2004).
- [12] Friess, P., "Towards a rigorous methodology for airborne laser mapping," Proceedings of EuroCOW, Castelldefels (2006).
- [13] Derenick, J., Miller, T., Spletzer, J., Kushleyev, A., Foote, T., Stewart, A., Bohren, J. and Lee, D., "The Sick LIDAR Matlab/C++ Toolbox: Software for Rapidly Interfacing/Configuring Sick LIDARs," <http://www3.lehigh.edu/images/userImages/jgs2/Page_7287/LU-CSE-08-008.pdf> (24 March 2013). <http://sicktoolbox.sourceforge.net>
- [14] SICK AG, "LD-OEM Laser Measurement System, Description and Technical Data of LD-LRS1000/2100/3100," <<http://sicktoolbox.sourceforge.net/docs/sick-ld-supplement.pdf>> (24 March 2013).
- [15] Třasák, P., Štroner, M., Smítka, V. and Urban, R., "Testing of the accuracy dependency of prismless distance measurement on the beam incidence angle," Geoinformatics 7, 117-129 (2012).
- [16] Koska, B., "Bore-sights and Lever-arms Determination of Sensors Mounted on Autonomous Mapping Airship," Proceeding of 13th International Multidisciplinary Scientific GeoConferences SGEM 2, 579-586 (2013).