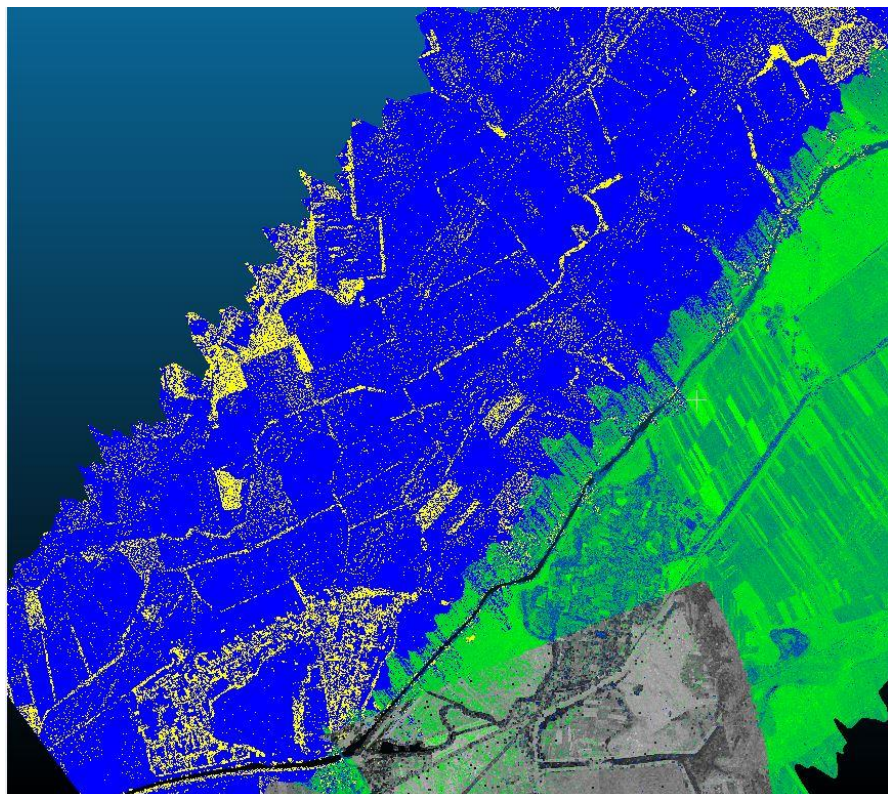




COMPENSAREA RIGUROASĂ A BENZILOR LASER SCANNER AEROPURTAT

Raport de cercetare numărul II- 2020

Conducător de doctorat

Prof. Univ. Dr. Ing. Petre Iuliu
DRAGOMIR

Studentă doctorand

Drd.ing. Iuliana Adriana CUIBAC
PICU

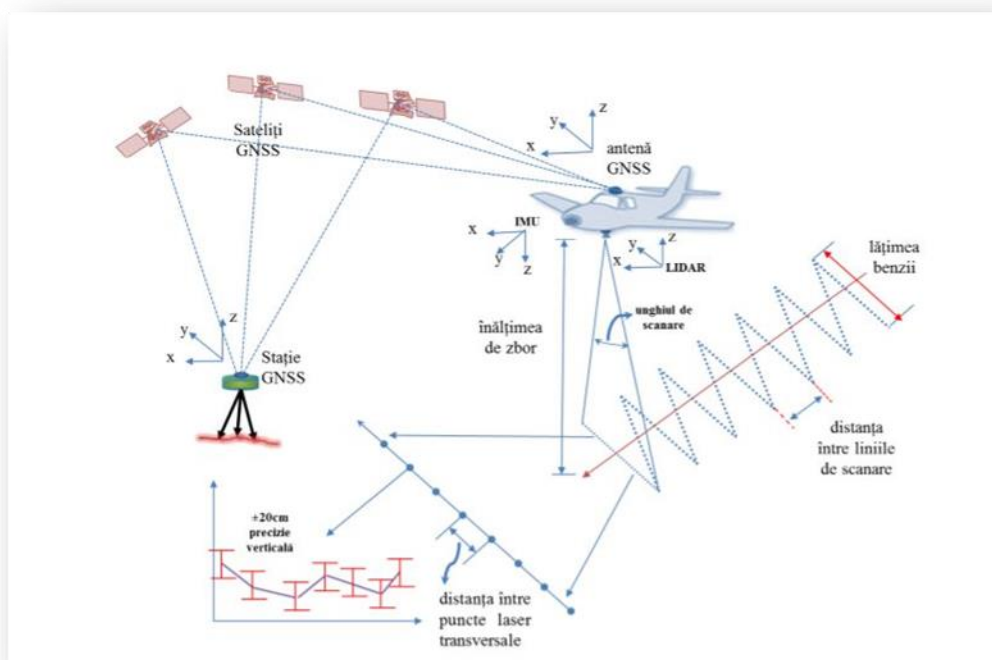
CUPRINS

I.	Introducere	2
II.	Metode de compensare (alinieri a benzilor ALS)	6
A.	Metoda directă de aliniere folosind suprafețe de control (control area CA) și traiectoria dată de GNSS.	7
B.	Metoda riguroasă de compensare - folosind algoritmul iterativ al punctului cel mai apropiat (ICP)	12
III.	Studiul de caz	18
A.	Descrierea datelor de intrare	18
	Descrierea proiectului LAKI II	18
	Descrierea softurilor folosite pentru fiecare metodă în parte	19
B.	Georeferențierea directă	20
C.	Georeferențierea riguroasă	27
D.	Compararea metodelor	39
	Concluzii	40
	Bibliografie	42

I. Introducere

Laser scannerul aeropurtat (engl. Airborne laser Scanner – ALS) respectiv LiDAR aeropurtat, este un sistem activ de teledetecție utilizat într-o mare varietate de domenii (topografie, hidrografie, arhitectură, arheologie, exploatare petroliere, industria minieră sau silvicultură) de peste un deceniu. Unul dintre avantajele laser Scannerului Aeropurtat (LSA) în comparație cu fotogrammetria aeriană sau cu datele optice satelitare de mare rezoluție, este preluarea datelor tridimensionale (3D) cu o precizie ridicată, prin metoda coordonatelor polare (unghiuri și distanțe înclinate) pentru obținerea geometriei suprafeței terenului. Sistemul este compus dintr-un dispozitiv LiDAR (în engl. Light Detection And Ranging) și din senzori de navigație de înaltă precizie, montați pe o aeronavă (fig.1). Se folosește ca senzor de navigație un sistem IMU (unitate de măsură inerțială) și un receptor GNSS (sistem global de navigație prin satelit, de exemplu, GPS, Sistemul de poziționare globală) care sunt operate sincron cu mecanismul de scanare LiDAR (Hebel et. al. 2010). Valorile intervalului sunt obținute din măsurarea timpului de zbor a unui singur impuls laser, iar scanarea este efectuată de una sau mai multe oglinzi de deflexiune în combinație cu aeronava în mișcare. Senzorii de navigație sunt folosiți pentru a obține puncte 3D asociate cu măsurători ale impulsului laser și a intervalului de timp, rezultând un nor de puncte georeferențiat. Scanerul laser disponibil în prezent sunt capabile să achiziționeze datele sub formă de undă completă a impulsurilor reflectate, permițând astfel noi metode de analiză (Jutzi et. al, 2006; Wagner et. al 2006; Stilla et. al 2008).

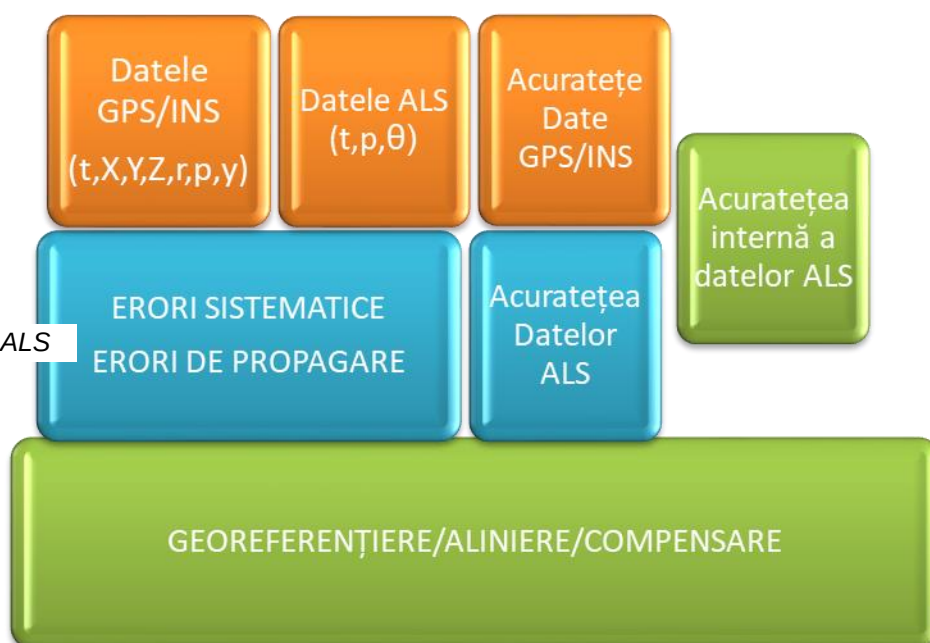
Figura 1.
Sistemul ALS
(Iordan, 2014)



Cea mai cunoscută aplicație a datelor obținute cu tehnologia LiDAR în zonele urbane este generarea de modele 3D ale orașului. Calitatea modelului 3D al orașului derivat depinde foarte mult de acuratețea datelor preluate, care depinde direct de precizia informațiilor de navigație. În acest context, este necesară utilizarea uneia sau a mai multor stații de referință la sol GNSS, la fel ca optimizarea globală a datelor de traiectorie GNSS / IMU (Rieger, 2008). În timpul achiziției de date ALS, măsurătorile cu raza laser sunt transferate pe coordonatele geografice în ceea ce privește poziția / orientarea curentă a scannerului laser și unghiul oglinzilor de deflexiune. Scanarea laser aeropurtată se realizează, la fel ca și fotogrammetria clasică, în poziția nadir, permițând reducerea suprafețelor ascunse atunci când se scanează terenul în zonele urbane, dar acest lucru duce la lipsa structurilor din date, de exemplu, fațade ale clădirilor și a zonelor aflate sub poduri sau adăposturi acoperite. Pe lângă modelarea 3D a orașului, astfel de date oferă o bază ideală pentru detectarea schimbărilor în zonele urbane (de exemplu diferite clădiri ridicate, dărâmate, etc).

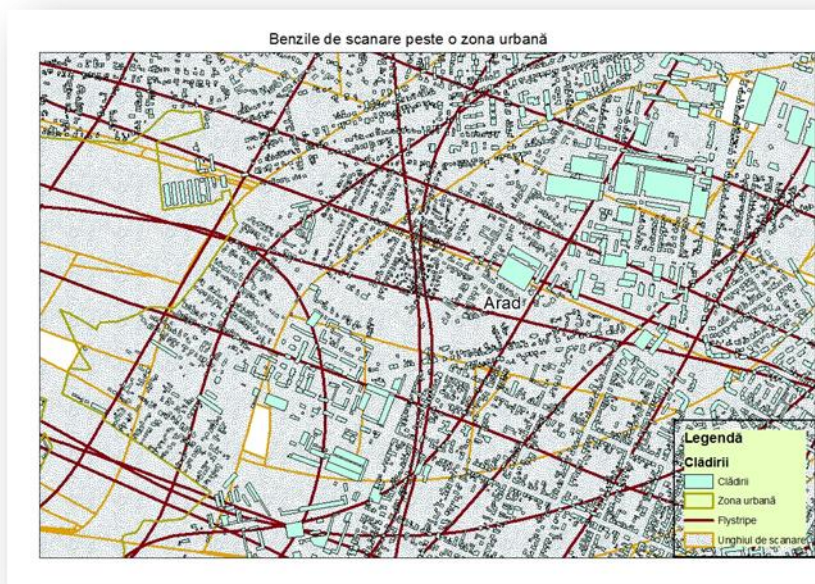
În ultimele două decenii, înregistrarea norilor de puncte și calibrarea sistemelor de scanare laser în aer au fost explorate de diverși oameni de știință, pentru a putea determina erorile apărute și a le corecta ajungându-se la o acuratețe ridicată a datelor. În urma unui control al calității datelor livrate dintr-un proiect de achiziționare cu scanare laser aeropurtată am evidențiat discrepanțe sistematice mari (de până la mai mult de 60 cm) în suprapunerea benzilor vecine, care a condus la generarea eronată a produselor finale: nor de puncte clasificat greșit, cât și un Model Digital al Terenului (MDT) și un Model Digital al Suprafeței (MDS) eronate. Din acest motiv, a fost necesară o îmbunătățire a georeferențierii datelor prin alinierea benzilor prin cele două metode evidențiate în acest raport. Metodele vor fi comparate pentru a se putea observa diferențele dintre cele două metode și descoperirea cărei metodă se pliază la proiectul avut. O să se specifice toate erorile apărute (*fig.2*) în urma efectuării zborului propriu zis și etapele parcurse pentru a putea obține un produs final precis.

Figura 2. Georeferențierea datelor ALS



Scanarea laser aeropurtată, spre deosebire de cea terestră cu laser (TLS), generează coordonatele norului de puncte în etapa de preprocesare, după efectuarea zborului propriu zis. Datele laser sunt fuzionate cu traiectoria zborului (datele GNSS) într-un proces denumit „georeferențiere directă”. Pentru date 3D obținute cu o precizie mai mare, estimarea traiectoriei necesită integrarea observațiilor inerțiale și cele de la satelit, de la rover și unul sau mai mulți receptori de bază (Skaloud, 2010). Datele de bază ale receptorului sunt disponibile în mod normal numai după zbor și, prin urmare, integritatea poziționării diferențiale în faza de purtător (CP-DGPS) poate fi obținută doar atunci. Dacă calitatea poziționării este insuficientă pentru perioade mai lungi de 10 până la 30 s, există o mare probabilitate ca și calitatea traseului integrat GPS / INS să fie, de asemenea, insuficientă în acest interval. În unele cazuri, eroarea de poziționare rezultată are o influență constantă în timpul liniei de zbor (fig.3). Apoi, efectul său ar putea fi atenuat prin compensarea benzilor, presupunând că există o bună suprapunere între benzile adiacente (Filin et. al., 2004; Pfeifer et. al. 2005).

Figura 3. Benzile datelor ALS deasupra unei zone urbane



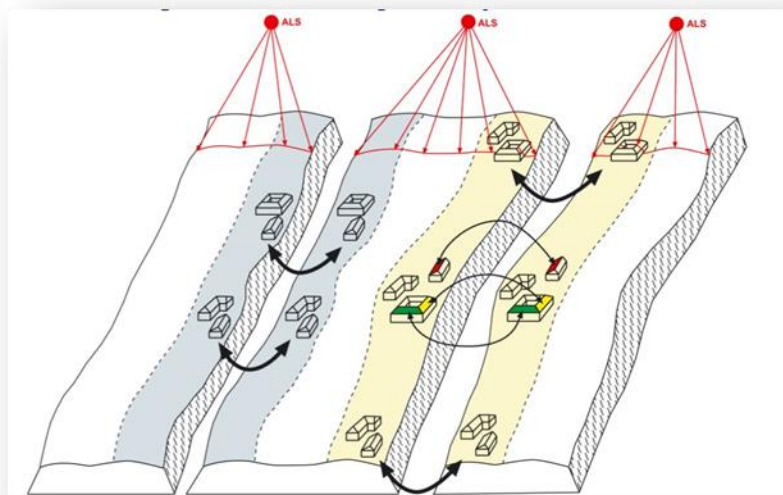
Există două tipuri de soluții de compensare a benzilor ALS:

- **soluții directe**, care folosesc traiectoria dată. În unele situații folosesc și punctele măsurate la teren ca date de intrare (Ressl et. al., 2011);
- **soluții riguroase**, care folosesc datele originale ale scannerului, cât și măsurătorile GPS și cele inerțiale ale traiectoriei.

Georeferențierea poate fi definită ca un proces de obținere a datelor despre originea unui eveniment în spațiu-timp, această origine în cazul de față este definită de parametrii Orientării Exterioare (OE) exact ca în fotogrammetria clasică, cum ar fi timpul, poziția, altitudinea (orientarea) și, eventual, și de viteza obiectului. Atunci când aceste informații sunt obținute direct prin măsurătorile de la senzor în bordul aeronavei, este folosit termenul de georeferențiere directă (GD). Cu alte cuvinte, GD cuprinde un proces lung de flux de informații care implică achiziția, sincronizarea, procesarea, integrarea și transformarea datelor de măsurare din navigație (GPS / INS) și instrumentul de teledetecție, scannerul laser folosit, în obiecte 3D cunoscute. Termenul GD este uneori înțeles ca un flux de date unidirecțional de la GPS / INS prin intermediul senzorului de cartografiere către obiectul scanat. Atunci când există o legătură, o comunicare între datele detectate de la distanță și parametrii de navigare, se utilizează termenul de orientare integrată a senzorilor (ISO). DG nu garantează întotdeauna exploatarea corectă sau atingerea calității necesare a parametrilor OE (Skaloud, 2007). Georeferențierea directă prezintă diferite erori, ca de exemplu faptul că parametrii de orientare exterioară sunt afectați de o anumită instabilitate în timp (în special de rotația dintre IMU și sistemul laser). În consecință, valorile acestor parametri în timpul unui anumit zbor vor diferi de ultimele valori cunoscute (de exemplu, determinate în timpul unei calibrări). Acești parametri nu pot fi corecți în timpul procesării GNSS / IMU, deoarece acolo măsurătorile scannerului laser nu iau parte. În ciuda asamblării atente și exacte a sistemului de senzori, georeferențierea duce în mod obișnuit la deplasări considerabile în zona de suprapunere a benzilor. Sursele de erori se găsesc în precizia datelor GNSS, sincronizarea senzorului sau controlul oglinzilor de scanare.

Chiar și sincronizarea dintre datele GNSS / IMU și măsurătorile laser poate fi greșită. Din aceste motive (chiar și după o prelucrare GNSS / IMU fără erori), georeferențierea directă va utiliza parametrii de transformare greșiți, ceea ce va duce la coordonate greșite ale punctelor de pe suprafață măsurată. În produsul final obținut, cum ar fi Modelul Digital al Terenului (DTM) acest lucru poate duce la salturi bruște de-a lungul marginilor benzii. Pentru îmbunătățirea preciziei punctelor trebuie să se facă o aliniere corectă, o compensare riguroasă a punctelor pe zona de suprapunere, similară cu compensarea blocului fotogrammetric (fig.4) (Ressl et. al., 2011).

Figura 4. Georeferențierea datelor ALS
în bloc



Soluțiile riguroase de compensare utilizează diferite metode care variază în funcție de datele de intrare folosite, cum ar fi parametrii estimați și corespondențele lor, dar aceștia trebuie să derive de la principalele componente ale sistemului ALS. Cele mai utilizate metode se concentrează pe estimarea erorilor dintre scanner și sistemul inerțial (Hebeland Stilla, 2012; Toth, 2002). Corespondențele sunt fie generate pe baza norului de puncte inițial, fie pe un derivat al acestuia (de exemplu, grile interpolate sau triangulații). Majoritatea metodelor folosesc planurile ca elemente geometrice corespunzătoare, acestea pot fi de dimensiuni fixe sau de dimensiuni variabile găsite prin segmentare (de exemplu, pe acoperișuri). În alte articole de specialitate care au cercetat aceste metode s-a demonstrat folosirea primitivelor de ordin superior ca parametru de corespondență (Kersting et. al. 2012).

Măsurătorile GNSS și INS servesc la estimarea traiectoriei aeronavei, adică poziția (trei coordonate) și orientarea acesteia (trei unghiuri). Folosind traiectoria, parametrii de montare, de calibrare (care descriu poziția și rotația dintre scanner și sistemele GNSS / INS) și măsurătorile scannerului (intervalul și unghiul), pot fi determinate coordonatele 3D ale suprafeței. Erorile sistematice din oricare dintre aceste date de intrare conduc la o deformare sistematică, de obicei neliniară a norilor de puncte colectați. Aceste erori pot fi recunoscute sub două forme: ca discrepante între benzi care se suprapun și ca discrepante între benzi și date despre realitatea din teren, de exemplu, puncte de control la sol. Folosind alinierea riguroasă a benzilor, calitatea norilor de punct ALS poate fi îmbunătățită prin minimizarea simultană a acestor discrepante.

II. Metode de compensare (aliniere a benzilor ALS)

În acest raport, ne concentrăm pe georeferențierea datelor ALS prin cele două soluții evidențiate mai sus, adică alinierea scannerului laser la senzorii de navigație cu ajutorul softurilor și metodelor prezentate în continuare. A fost relatat faptul că pentru a putea reconstrui traiectoria de zbor sunt necesare datele obținute de la sistemele GNSS sau INS în funcție de soluția aleasă de aliniere. Datele GNSS sunt prelucrate prin metode GNSS diferențiale pentru a obține informații exacte pentru pozițiile de zbor pe întreaga durată a zborului (Iordan, 2014). Prin urmare, de exemplu, o viteză de zbor de 70 m/s și un rezultat al ratei de înregistrare GNSS de 2 Hz rezultă o spațiere de 35 m la care pozițiile sunt disponibile. Pentru soluția riguroasă de aliniere, unde se folosesc ambele sisteme pentru estimarea traiectoriei (măsurătorile GNSS și INS), se definește noțiunea de „smoothed best estimated trajectory” (SBET) care reprezintă traiectoria plană estimată cel mai bine. Ca exemplu, dacă datele de altitudine și poziție au fost interpolate la 800 Hz, poziția și orientarea sunt disponibile la intervale de aproximativ 0,09 m (la viteza unei aeronave de 70 m/s). Folosind prelucrarea GNSS/IMU obișnuită, coordonatele platformei pot fi reconstituite cu precizie de 10 cm. Decalajul acestor date, poate fi eliminat în timpul prelucrării datelor prin compensarea benzii pe baza punctelor de control la sol, puncte din suprafețele de control utilizate în momentul calibrării (Beraldin, 2010).

Sistemul ALS este afectat de multe surse de eroare, contaminând datele cu erori aleatorii și sistematice. Analiza și modelarea adecvată a acestor erori în prelucrarea datelor reprezintă o problemă majoră, deoarece datele preluate reprezintă o modalitate recunoscută și utilizată pe scară largă pentru a genera MDT-ul de înaltă acuratețe. În prezent, în pachetele software utilizate au fost deja implementate o serie de abordări pentru reducerea acestor erorilor sistematice (Burman, 2002). Abordările sunt destul de complexe, fie neautomate, fie limitate la eșanțioane mici de date, ceea ce creează probleme pentru o compensare a unor cantități mari de date, cum sunt capabile să colecteze sistemele moderne de scanare de tip AR de 25 sau de 50 kHz (Kornus, 2003).

A. Metoda directă de aliniere folosind suprafețe de control (control area CA) și traiectoria dată de GNSS.

Metoda directă de georeferențiere ale benzilor ALS necesită trei tipuri de date de intrare: traiectoria zborului, măsurătorile obținute de la scanner și parametrii de calibrare, adică suprafețele de control ca date opționale (Skaloud et. al., 2006; Hebel et. al., 2012)(fig.5). Combinând toate aceste măsurători, coordonatele punctului la momentul t sunt date de următoarea ecuație matematică:

$$x^e(t) = g^e(t) + R_n^e(t)R_i^n(t) \left(a^i + R_s^i x^s(t) \right) \quad (1)$$

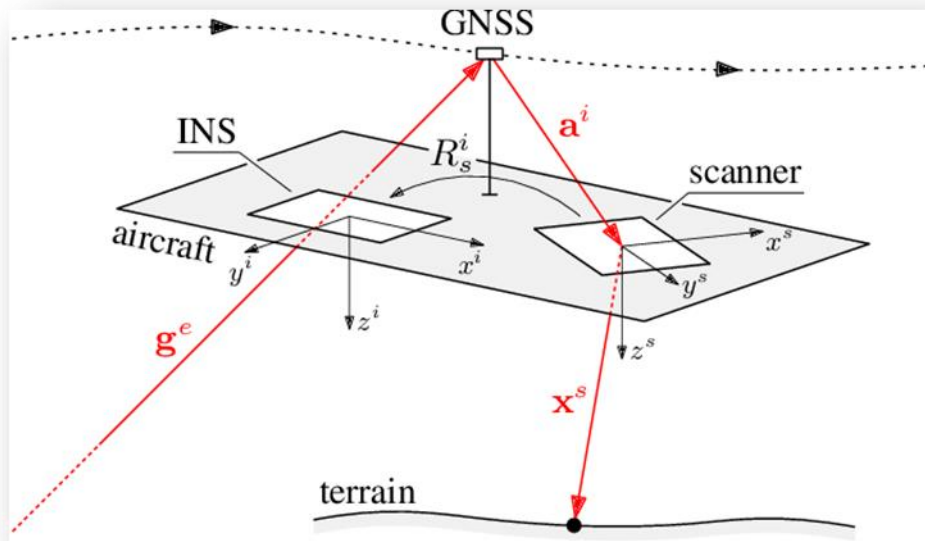
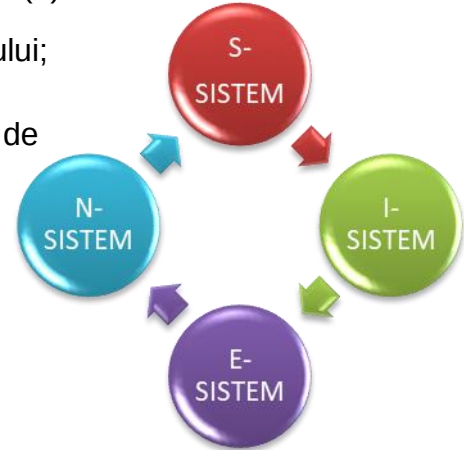


Figura 5. Georeferențierea directă a datelor ALS (Gliraa et. al., 2015)

Din ecuația (1) se poate observa sistemul de coordonate în care este definit punctul $^*/\text{laser}$ (măsurătoarea), în timp ce notația $R_{\text{sursă}}^{\text{țintă (target)}}$ este utilizată pentru a desemna o transformare dintr-un sistem de coordonate sursă la un sistem de coordonate obiectiv (target). În consecință, patru sisteme de coordonate apar în ecuația (1):

- s-sistem - sistemul de coordonate al scannerului;
- i-sistem – sistemul de coordonate INS;
- n-sistem - sistemul de coordonate de navigație, egal cu un sistem local de coordonate;
- e-sistem - sistemul de coordonate centrat pe Pământ, fixat pe Pământ (ECEF).



Ecuația (1) include:

$x^e(t)$ vector cu coordonatele punctului $^*/\text{laser}$ din sistemul s. În general, aceste coordonate pot fi exprimate ca funcție a intervalului ρ și a două unghiuri α și β :

$$x^e(t) = x^s(\rho(t), \alpha(t), \beta(t)) \quad (2)$$

R_s^i matrice de rotație 3 cu 3 care descrie rotația de la sistemul s la sistemul i , adică de la scanner la sistemul inerțial. Această rotație este de obicei notată (boresight) ca fiind neliniară și este definită de parametrii compuși din trei unghiuri Euler:

$$R_s^i(t) = R_s^i(\omega, \phi, \kappa) \quad (3)$$

a^i vector care descrie poziția paralelă dintre antena GNSS și sistemul de scanare original s. Acest vector este de obicei denumit braț de pârghie.

$R_i^n(t)$ matrice de rotație 3 cu 3 care descrie rotația de la sistemul i la sistemul n ca parte a datelor de traiectorie. Această rotație poate fi estimată din măsurătorile GNSS și este definită prin intermediul a trei unghiuri Euler:

$$R_i^n(t) = R_n^e(\lambda(t), \varphi(t)) \quad (4)$$

R_n^e matrice de rotație 3 cu 3 care descrie rotația de la sistemul n la sistemul e. Această rotație nu este respectată, dar este o funcție a longitudinei λ și a latitudinii φ corespunzătoare valorii reale a $g^e(t)$:

$g^e(t)$: vector care descrie poziția antenei GNSS în sistemul e ca parte a traiectoriei datelor.

Compensarea benzii prezentată la studiul de caz, prin metoda de georeferențiere directă este complet realizată în sistemul e. Doar după aceea, punctele obținute prin ecuația (1) sunt proiectate de la sistemul e la un sistem arbitrar de coordonate cartografice (m-sistem), sistemul național de referință Stereografic 1970 și sistemul de altitudine Marea Neagră 85.

Orice dată de intrare în ecuației (1) poate fi afectată de erori sistematice, care la rândul lor provoacă o deformare neliniară a benzii ALS (Glennie, 2007; Habib et. al., 2007). Pentru a reduce la minimum aceste erori în compensarea benzii, trebuie să se introducă parametri suplimentari de calibrare și corecție în ecuația de georeferențiere directă (1). Acești parametri pot fi împărțiți în trei grupuri (fig.6):

- **parametrii de calibrare ai scannerului** compensează erorile sistematice ale scannerului ALS, a măsurătorilor x^s . Estimarea acestor parametri în cadrul compensării este menționată ca o calibrare pe loc, în momentul efectuării zborului și scanării. Alegerea specifică a parametrilor depinde în primul rând de tipul de construcție al scannerului ALS. De exemplu, parametrii necesari pentru modelarea adecvată a erorilor scannerelor care reflectă fasciculul *laser numai într-o direcție (scanere liniare), diferă de cele care reflectă fasciculul *laser într-un model circular (scanere conice). Nu a fost descoperită vreo recomandare generală, dar s-a definit ecuația (2) ca funcție a coordonatelor polare ρ , α și β :

$$x^s(t) = \begin{bmatrix} \rho(t) \cos \alpha(t) \sin \beta(t) \\ \rho(t) \sin \alpha(t) \\ \rho(t) \cos \alpha(t) \cos \beta(t) \end{bmatrix}^s \quad (5)$$

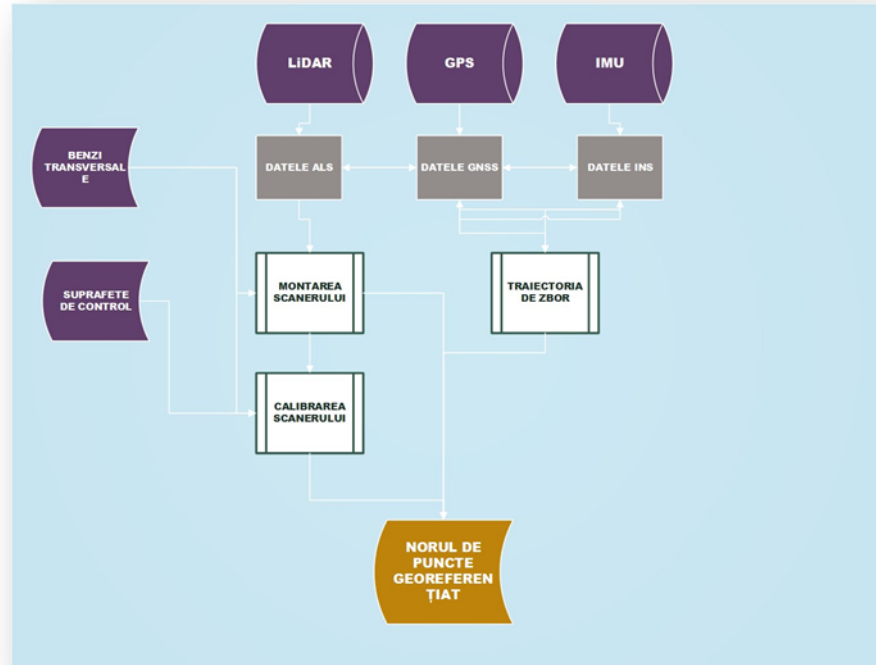
Notă: Scanerele liniare nu influențează raza laser într-o singură direcție (de obicei de-a lungul liniei de zbor), astfel, α poate fi interpretat ca unghiul de deflecție a fasciculului, în timp ce β este egal cu zero, deci parametrii asociați cu β , adică $\Delta\beta$ și $\epsilon\beta$, pot fi omiși în acest caz. Parametrii rămași compensează pentru o eroare a distanței ($\Delta\rho$), o eroare de scară a sferei ($\epsilon\rho$), o eroare de punct zero a codicatorului unghiular ($\Delta\alpha$) și o eroare de scară a codicatorului unghiular ($\epsilon\alpha$). Totuși, acești parametri pot compensa și alte efecte corelate (și posibil necunoscute). De exemplu, parametrul $\epsilon\alpha$ nu numai că servește pentru a corecta o eroare la scară unghiulară, ci și minimizează influența refracției atmosferice.

- **parametrii de corecție a traiectoriei.** Traectoria aeronavei, adică orientarea și poziția ei este estimată de către măsurătorile GNSS și INS într-un filtru Kalman. Filtarea Kalman, cunoscută și sub denumirea de estimare quadratică liniară (LQE), este un algoritm care folosește o serie de măsurători observate de-a lungul timpului, acestea conținând zgomot statistic și alte inexactități. Algoritmul produce estimări ale variabilelor necunoscute care tind să fie mult mai exacte decât cele bazate pe o singură măsurare, estimând o distribuție de probabilitate comună asupra variabilelor pentru fiecare interval

de timp . Aceste măsurători sunt puternic afectate de influențele externe și, prin urmare, precizia lor nu este constantă în timp. Erorile sistematice ale traiectoriei pot varia în cadrul unei singure linii de scanare laser și este recomandată estimarea parametrilor de corecție în funcție de timp pentru fiecare bandă în parte. Totuși estimarea acestor erori depinde puternic de geometria terenului. Prin urmare, pentru fiecare bandă în parte avem un set de 3 parametri de corecție ai traiectoriei: 3 corecții de coordonate, iar în cazul soluțiilor riguroase acești parametri de corecție sunt în număr de 6, adăugând și cele 3 corecții ale unghiurilor.

- **parametrii de montare în momentul calibrării.** În cele mai multe situații acești parametri de montare sunt deja cunoscuți, de exemplu, dintr-un proiect de calibrare efectuat anterior sau din planurile tehnice ale sistemului de scanare. Cu toate acestea, aceste valori pot fi inexacte sau depășite în timp. Astfel, se recomandă reestimarea calibrării de montare prin alinierea benzii de scanare. O aliniere incorectă poate provoca deplasări punctuale mari, deoarece efectul produs de erorilor unghiulare este direct proporțional cu distanța de la scanner până la obiectul scanat. Din acest motiv multe metode de aliniere a benzii se concentrează pe estimarea valorii lui R_S^i , neglijând alți parametri (Toth, 2002; Hebel et. al., 2012), deși acești parametri sunt deja incluși în ecuația (1).

Figura 6. Parametrii introduși în compensare



În metoda directă de compensare în bloc a benzilor de scanare, ca în cazul fotogrammetriei clasice, se presupune că înălțimea este constantă pe fiecare bandă în parte. În compensarea în bloc a benzilor de scanare avem ca date de intrare următoarele trei grupuri de observație pentru a se putea genera modelul digital al terenului:

- diferențe de înălțime între date din benzile de scanare și benzile transversale de scanare;
- diferențele de înălțime între benzile de date scanate și suprafețele de control;
- pseudo-observațiile pentru înălțimile punctelor de control din cadrul suprafețelor.

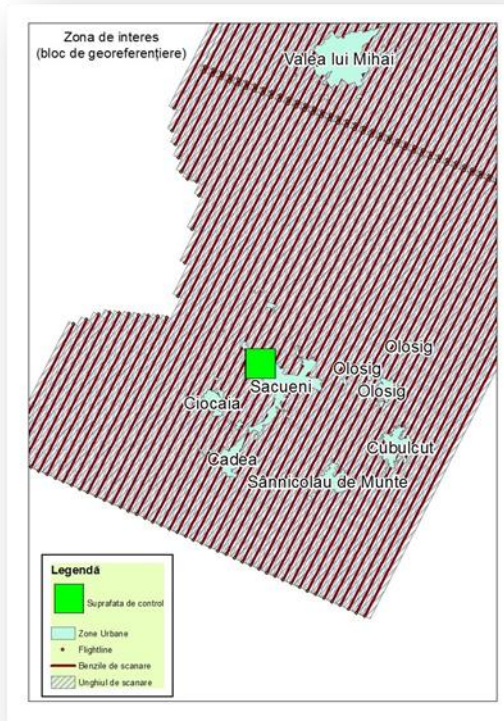
Pentru generarea din *primul grup de observații*, mai întâi, sunt detectate locațiile benzilor transversale. Pentru această sarcină, programul citește datele din sistemul de navigație folosit GNSS și calculează un MDT într-un sistem de grilă regulat din punctele laser pentru fiecare bandă și fiecare bandă transversală în parte. Diferențele de înălțime între punctele de grilă sunt analizate statistic, se elimină valorile necorespunzătoare și se calculează diferența medie de înălțime. Precizia apriori a diferențelor este definită ca o funcție a abaterii standard calculate.

În cazul celui de-al doilea *grup de observații* este generat un MDT și se calculează diferența medie între înălțimile tuturor punctelor de control și înălțimile MDT-ului interpolate în suprafețele de control. Precizia a priori este definită ca funcție a abaterii standard calculată din diferențe medii de înălțime și a abaterii standard a punctelor de control.

În cazul celui de-al treilea *grup de observații*, este generat un MDT precis pentru zone largi într-un timp rezonabil. Este metoda cea mai simplă de generare a unui MDT, fiind aproape complet automată. Această abordare implică un design special al blocului și, desigur, necesită și un sistem LIDAR bine calibrat. Se folosesc ca date de intrare suprafețele de control și benzile de zbor suplimentare transversale. Fiecare bandă de scanare trebuie acoperită cu cel puțin o bandă de trecere sau transversală, adică pentru un bloc obișnuit cu toate benzile de zbor paralele, o bandă transversală și o suprafață de control sunt suficiente, în timp ce în cazul formelor de blocuri mai complicate pot fi necesare mai multe benzi transversale. Acesta din urmă va reduce erorile, introduse prin variația de precizie GPS, care ar putea apărea pe benzi lungi.

Ca suprafața de control se selectează de obicei terenurile de fotbal, care sunt plane și, astfel, o posibilă eroare orizontală într-un punct laser nu ar afecta componenta sa verticală. Designul blocului, din proiectul LAKI II, din care am extras datele ce urmează a fi georeferențiate este prezentat în figura 7. Zona prezentată conține o suprafață de control de 5x5 m cu 50 de puncte măsurate la teren și benzile de scanare care se suprapun zonei urbane Săcuieni, precum și banda transversală.

Figura 7. Benzile ALS și suprafață de control dintr-o zonă a proiectului LAKI II



B. Metoda riguroasă de compensare - folosind algoritmul iterativ al punctului cel mai apropiat (ICP)

ICP este un algoritm folosit pentru a minimiza diferența dintre doi nori de puncte și este adesea folosit pentru a reconstrui suprafețe 2D sau 3D din diferite scanări (Besl et. al. 1992). În zilele noastre termenul ICP nu se referă neapărat la algoritmul prezentat în publicațiile originale, ci mai degrabă la un grup de algoritmi de potrivire a suprafeței scanate care au în comun următoarele aspecte:

- **I:** corespondențele sunt stabilite iterativ;
- **C:** se folosește ca parametru de corespondență punctul cel mai apropiat sau în general, punctul corespunzător;
- **P:** corespondențele sunt stabilite punctual (Glira et al., 2015).

Pentru a putea georeferenția datele brute ale scannerului sunt necesare următoarele informații (Skaloud et. al., 2006):

- Poziția și orientarea platformei de achiziție. Acestea sunt măsurate printr-un sistem de poziție și orientare format din sistemul GNSS (sistem global de navigație prin satelit) și sistemul INS (sistem de navigație inerțială);
- Parametrii de orientare relativă, constând dintr-o rotație și o translație – parametrii de montaj în momentul de calibrare;

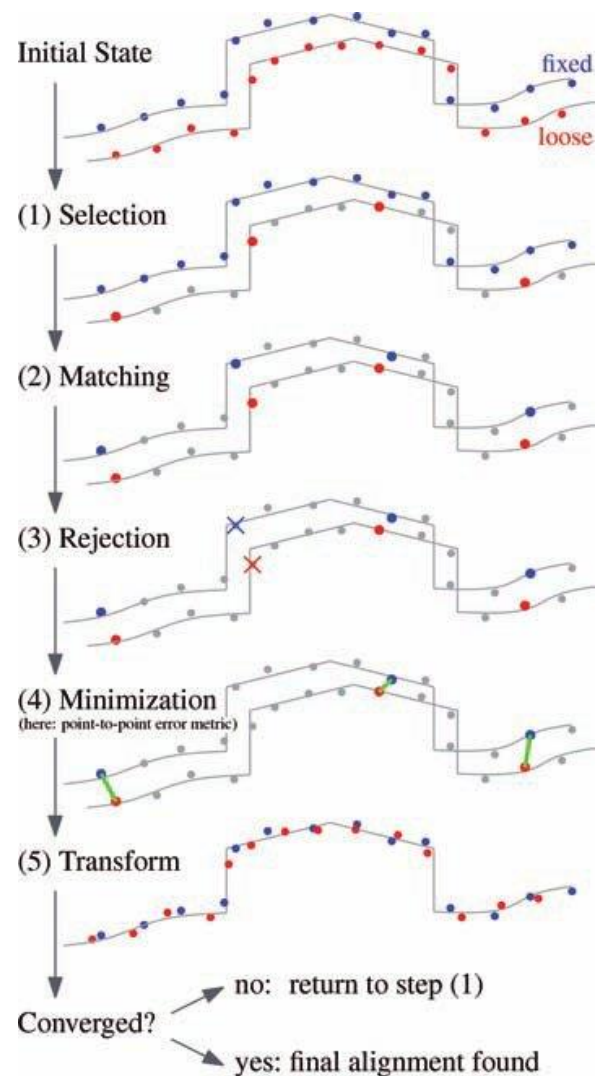
- Sincronizarea timpului între scaner și sistemele GNSS/INS;
- Parametrii scanerului intern , de exemplu , punctul zero, unghiul de scanare cât și intervalul de scanare.

Scopul algoritmului ICP este compensarea cât mai riguroasă, în zona de suprapunere a minim 2 nori de puncte 3D optime. Transformarea geometrică aplicată în algoritmul ICP este de obicei o transformare plană rigidă. În compensarea benzilor ALS ținând cont de informațiile traiectoriei și de parametrii scanerului, modelul de transformare este mai complex (Skaloud et. al., 2006). Cu toate acestea, cea mai mare problemă este cea a corespondenței. După o cercetare amănunțită în literatura de specialitate s-a constatat ca algoritmului inițial ICP i-a fost introdus o taxonomie în cinci etape (Rusinkiewicz et. al. 2001). Conceptul general al algoritmului este de a îmbunătăți alinierea a doi sau mai mulți nori de puncte prin minimizarea discrepanțelor în zona de suprapunere a acestor nori de puncte. Alinierea este optimizată prin transformarea iterativă a norului de puncte ales ca target, în timp ce poziția celui alt nor de puncte rămâne fixă, acesta fiind norul de puncte sursă. Este necesar cunoașterea datelor inițiale a orientării relative a punctelor pentru se putea îndeplini, cerință principală în ALS (Toth, 2008). Algoritmul ICP are la bază 5 pași de urmat pentru a se putea realiza compensarea. Acești pași sunt:

1. Selectarea. Selectarea din zona de suprapunere a unui set de puncte din norul de puncte ales ca sursă. Există 4 tipuri de categorii/strategii de selecție utilizate, diferența între acestea fiind tipul de date de intrare și informațiile utilizate ca date de intrare pentru selectarea punctelor:

- **Eșantionarea aleatorie (RS)** Aceasta este cea mai rapidă strategie, deoarece punctele sunt pur și simplu selectate aleatoriu, fără a avea în vedere coordonatele sau vectorii normali ai punctelor. (Masuda & Yokoya, 1995).;
- **Eșantionarea uniformă (US)** Scopul acestei strategii este de a selecta punctele din spațiul obiectului cât mai uniform posibil. Acest lucru duce la o distribuție omogenă a punctelor selectate. Această opțiune a fost implementată prin împărțirea zonei de suprapunere într-o structură voxel și selectarea celui mai apropiat punct de la fiecare centru voxel. În consecință, lungimea muchiei unui singur voxel poate să fie interpretată ca distanța medie de eșantionare de-a lungul fiecărei direcții;
- **Eșantionarea normală a spațiului (NSS)**. Scopul acestei strategii este să selecteze puncte astfel încât distribuția înălțimilor în spațiul unghiular să fie cât se poate de uniformă (Rusinkiewicz et. al., 2001). Pentru aceasta, spațiul unghiular (pantă vs. aspect) este împărțit în clase (de exemplu, $2,5^\circ \times 10^\circ$), iar punctele sunt aleator eșantionate în cadrul acestor clase. Această strategie nu ia în considerare poziția punctelor;

Figura 8. Cei cinci pași de bază ai algoritmului ICP pentru două benzi suprapuse (albastru = bandă fixă, roșu = bandă liberă, verde = corespondență) (Glira et. al., 2015)



- **Eșantionare maximă printr-o pârghie (MLS).** Această strategie selectează acele puncte, care sunt cele mai potrivite pentru estimarea parametrilor. Această strategie are în vedere coordonatele și vectorii normali ai punctelor.
- 2. Potrivire.** Găsirea punctelor corespunzătoare celor selectate din setul de date al norului de puncte sursă, în alt nor de puncte, alta bandă laser.
Această etapă stabilește corespondențele dintre puncte, adică fiecare punct selectat din pasul anterior este asociat cu cel mai apropiat vecin al său (punctul cel mai apropiat) al benzii suprapuse (Chen & Medioni, 1991). Compensarea distanței de la punct la plan este minimizată pentru fiecare corespondență în parte, iar două puncte asociate nu trebuie să fie identice în spațiu obiect, dar ele trebuie să aparțină aceluiași set de date inițial (de exemplu, suprafața plană a terenului), (Blais & Levine, 1995). Datorită unei bune orientări inițiale și a densității norului de puncte, această cerință este îndeplinită în cea mai mare parte. Cea mai apropiată căutare a vecinului poate fi realizată eficient folosind arbori K-D (Sharp et. al., 2002).

3. **Respingerea.** Corespondențele false (valori exterioare-outliers) sunt respinse pe baza compatibilității punctelor. Scopul acestei etape este identificarea a priori și respingerea ulterioară a corespondențelor nesigure sau false (Hampel, 1974). Fiecare corespondență este testată pentru trei criterii, acestea sunt:

- **Respingere bazată pe rugozitatea planului corespunzător punctelor.** Trebuie asigurată fiabilitatea vectorilor normali pentru minimizarea distanței de la punct la plan. Desigur, această condiție nu este îndeplinită dacă obiectul scanat poate să nu fie modelat corespunzător, de ex. în cazul de vegetație;
- **Respingere bazată pe unghiul dintre vectorii normali ai punctelor și corespondența lor.** Pentru a se asigura că cele două puncte corespunzătoare aparțin aceluiași plan, unghiul dintre vectorii normali ai acestor puncte nu trebuie să depășească o parte superioară. De obicei este setată valoarea maximă de 5° .
- **Respingere bazată pe distanța punct - plan între punctele corespunzătoare.** În afară de câteva corespondențe false, se presupune că distanțele punct- plan sunt distribuite în mod normal pentru fiecare pereche de benzi suprapuse.

4. **Minimize.** Estimarea parametrilor de transformare prin minimizarea distanțelor dintre punctele corespunzătoare.

Parametrii de transformare sunt de obicei estimați prin reducerea sumei pătratelor distanțelor între corespondențele stabilite. Se folosesc frecvent două tipuri de distanțe.

- **Distanța euclidiană (neatribuită)** dintre punctele corespondente – se mai numește și eroare metrică. Această eroare de măsurătoare ar putea fi evitată în ALS, deoarece din cauza eșantionării diferite la sol a două benzi ALS, nu există corespondențe reale punct-la-punct, iar viteza de convergență este oarecum lentă (RuSinkiewicz & Levoy 2001). Dacă se aplică o transformare afină, există o soluție de formă închisă (constantă) pentru această eroare metrică (Horn et al, 1998).
- **Distanța perpendiculară (atribuită)** a unui punct față de planul tangent al celuilalt punct, care poartă denumirea de eroare metrică „punct la plan” (Chen & Medioni, 1991). În această eroare de măsurare nu este necesară ca, corespondența între puncte să fie identică. Singura cerință este ca punctele corespunzătoare să aparțină aceluiași plan în spațiul obiect, de ex. acoperișul. Se caracterizează printr-o viteză de convergență ridicată, întrucât scanarea regiunii plane este identică fără costuri suplimentare, adică fără a crește valoarea funcției obiect. Există o soluție de formă închisă pentru transformarea afină numai după linearizarea matricei de rotație, adică pentru rotații mici (Chen & Medioni, 1991).

5. Transformarea. Transformarea norului de puncte folosind parametrii estimați, cei 6 parametri de rotație și translație, folosind transformarea afină pentru îmbunătățirea orientării relative și absolute a benzilor ALS. Cu toate acestea este important să se utilizeze o transformare afină cu 12 parametri, pentru reducerea efectelor unei calibrări greșite la montare fără a ține cont de datele de traiectorie GNSS-INS (Ressl et. al. 2009).

În final este testat un criteriu de convergență adecvat. Dacă nu este îndeplinit, procesul repornește de la pasul 1 sau pasul 2 dacă selecția punctelor nu se repetă iterativ (Glira et. al., 2015). Se poate observa că desfășurarea etapelor este sub formă logică și că există două bucle de iterație: în bucla de iterație exterioară corespondențele sunt restabilite după fiecare rulare, iar în bucla de iterație internă este necesară a se rezolva sistemul de ecuații neliniare din cadrul compensării (fig. 9).

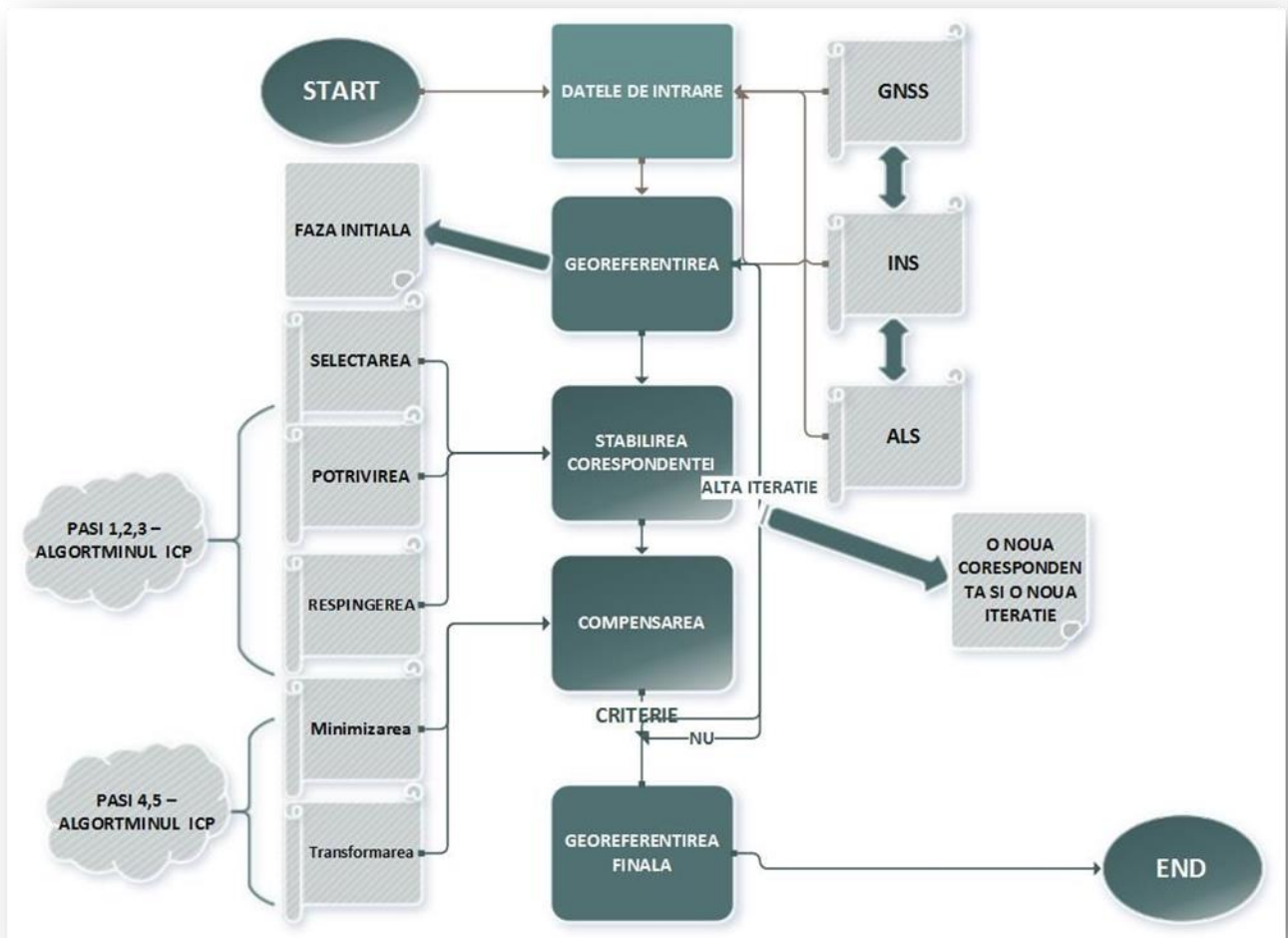


Figura 9. Algoritm ICP

Rezultatul obținut în urma compensării benzilor laser este puternic afectat de corespondențele utilizate. Algoritmul ICP își propune alegerea corespondențelor pe baza punctelor originale ALS și principalele motive sunt: exploatarea celui mai înalt nivel posibil de rezoluție a datelor, nu este necesară preprocesarea consumatoare de timp (în contrast cu corespondențele care se regăsesc prin segmentare și / sau interpolare) și nu se impun restricții spațiului obiect (de exemplu, prezența acoperișurilor sau a ferestrelor orizontale). O singură corespondență este definită prin întrebuintări de la suprapunerea și de la vectori ne comuni (estimată din punctele învecinate). Un punct și vectorul lui normal definesc un plan tangent, în consecință, o corespondență reprezintă un spațiu de corespondență.

În contextul corecției datelor ALS, principalele dezavantaje ale metodelor de înregistrare bazate pe ICP sunt următoarele:

- precizia absolută rămâne incertă, deoarece un set de date este păstrat neschimbat – banda aleasă ca target și ceilalți nori de puncte sunt aliniați după aceasta;
- aplicarea algoritmului ICP presupune o transformare afină pentru a fi suficientă în rezolvarea problemei de achiziționare a datelor 3D (Hebel et. al., 2012).

De fapt, această presupunere este incorectă pentru un sistem de senzori ALS eronat – necalibrat corespunzător. În cazuri de georeferențierii directe norii de puncte 3D existenți sunt distorsionați neliniar prin erori de calibrare, dar parametrii acestei alinieri de obicei nu sunt stocați (Ressl et.al.,2009). Datele de intrare folosite pentru a putea utiliza acest algoritm în compensarea benzilor laser sunt: măsurătorile scannerului, traiectoria de zbor, parametrii de calibrare în momentul montării (valori constante,cunoscute) precum și punctele de control la sol.

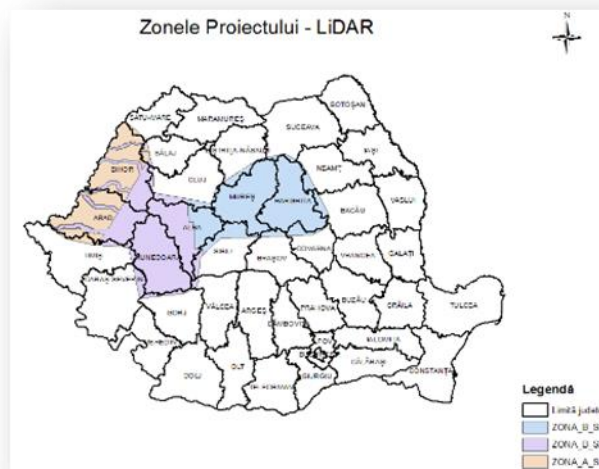
III. Studiul de caz

A. Descrierea datelor de intrare

Descrierea proiectului LAKI II

În 2014, Agenția Națională de Cadastru și Publicitate Imobiliară a demarat un proiect din fondurile programului - RO03 EEA Grants 2009-2014. Scopul proiectului este de a produce un model digital al terenului prin scanare aeriană, fotografiile aeriene și producția de hărți noi și ortofotoplanuri pentru aproximativ 50 000 de km pătrați din 6 județe: Bihor, Arad, Hunedoara, Alba, Mureș, Harghita.

Figura 10. Zona proiectului LAKI – obținută prin scanare aeriană



Datele folosite pentru studiul de caz au fost obținute prin scanare aeriană cu tehnologia LiDAR. Datele de intrare sunt:

- Date ALS – reprezintă detaliile tehnice ale scannerului folosit la achiziționarea datelor. Zborul LiDAR a fost efectuat cu aeronava de tip DA42 MPP, având montat un scanner RIEGL Q780. Datele au fost achiziționate prin ALS și asigură o densitate a norului de puncte de 8 puncte/mp pentru zona de graniță - prima zonă din proiect. Cele mai importante caracteristici ale acestui tip de scanner sunt:
 - ❖ scanarea este de tip “Full waveform”;
 - ❖ unghiul de scanare este de 60°;
 - ❖ metoda de scanare este de tip: linii paralele;
 - ❖ deviația radiației *laser este <0.25 mrad;
 - ❖ rata de repetiție a pulsului *laser este > 400 kHz;
 - ❖ rata de măsurare efectivă este > 266 kHz;
 - ❖ precizie de scanare este de 20 mm.

➤ Date GNSS – detaliile tehnice ale sistemului de navigație cu care a fost dotat aparatul de zbor, acest sistem este unul auxiliar. Modelul GNSS folosit este de tip NOVATEL OEM4/OEMV. Timpul GPS este timpul satelitar – GPS standard – minus 1×10^9 .

➤ Date IMU - detaliile tehnice ale sistemului inerțial cu care a fost dotat aparatul de zbor, acest sistem este tot unul auxiliar. Modelul INS folosit este de clasă D, tipul IGI , având 256 Hz.

În cadrul proiectului au fost folosite suprafețe de control pentru calibrarea aparatului, repartizate uniform pe întreaga zonă. Punctele de control au fost măsurate prin nivelment de precizie plecând din puncte de nivelment de ordinul 3 sau 4.

Descrierea softurilor folosite pentru fiecare metodă în parte

Pentru metoda de compensare directă a fost utilizat softul de prelucrare a norului de puncte denumit VRMesh ediția 11.1, versiunea Demo, extensia de măsurători, denumită VRMesh Survey. VRMesh este o soluție avansată pentru *clasificarea* automată a norilor de puncte și extragerea caracteristicilor. Acest soft ajută la clasificarea vegetației, a acoperișurilor construcțiilor și a punctelor la sol din datele LiDAR sau din imaginile UAV. Detectează amprente de construcție, linii electrice, stâlpi, coroane de copac, borduri și căi ferate. Dar scopul/ obiectul fundamental în VRMesh Survey este detectarea vegetației. Acest scop poate fi folosit și în compensarea între benzi printr-o altă metodă.

În cea de-a doua parte a studiului de caz din acest raport a fost efectuată o compensare riguroasă utilizând algoritmul ICP implementat în softul OPALS. OPALS este un sistem de programe modulare format din module grupate tematic în pachete. Scopul OPALS este de a oferi un lanț de procesare complet pentru prelucrarea datelor ALS (descompunerea formei de undă, controlul calității, georeferențierea, extragerea liniei de structură, clasificarea norului de puncte, generarea DTM) și în mai multe domenii de aplicare precum silvicultura, hidrografia, modelarea orașului și linii de alimentare. Acest soft a fost dezvoltat de cercetătorii în domeniul fotogrammetriei și teledetecției ai Universității de la Viena, Departamentul de Geodezie și Geoinformatică.

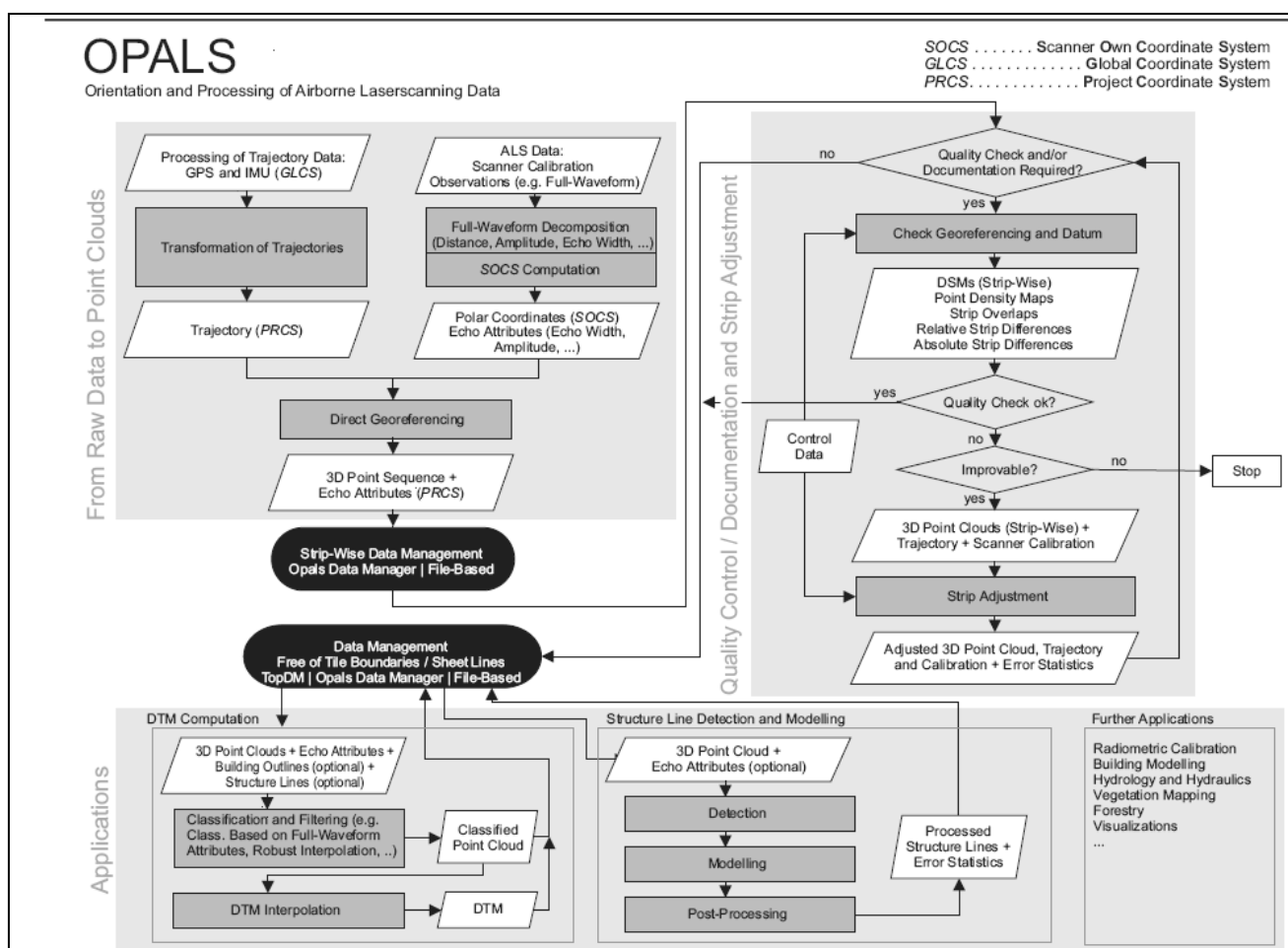


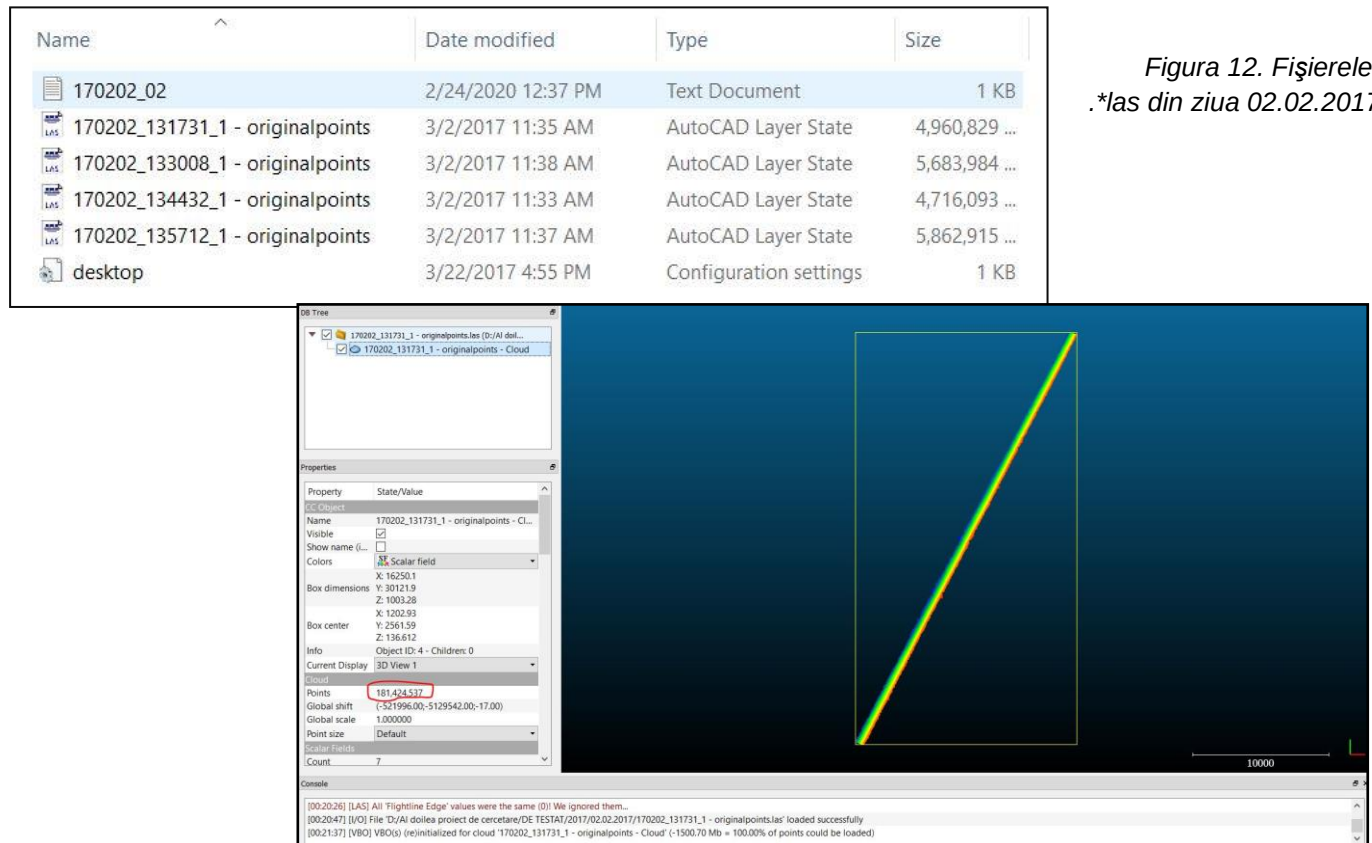
Figura 11. Fluxul de lucru al softului Opals
(https://opals.geo.tuwien.ac.at/html/stable/usr_sw_concept.html)

B. Georeferențierea directă

Pentru această metodă de compensare a benzilor laser s-a folosit softul VRMesh versiunea demo 11.1, având ca date de intrare traiectoria, cât și fișierele originale *.las cu norii de puncte.

Pentru testare au fost alese ca date de intrare, informații din proiectul LAKI II predate în livrarea 4 – Zbor Lidar zona A-S1 (zona de graniță – cu o densitate medie de 8 pct/mp), cât și livrarea 3- MDT și MDT zona A-S1 pentru aceeași zonă din proiect. Din Livrarea 3- s-au folosit fișierele *.las originale neprelucrate extrase din scanner.

Ziua zborului este 02.02.2017 – adică februarie 2017. Orice fișier *.las conține peste 150 de milioane de puncte, care reprezintă un volum mare de date, prin urmare nu pot fi accesate simultan toate cele 4 benzi de zbor într-un soft open source, cum este Cloud Compare.



Pentru testarea georeferențierii directă a acestor benzi ALS, trebuie redus numărul mare de informații avute în benzile ALS. Acest lucru poate fi realizat prin tăierea efectivă a benzilor pe o anumită zonă cu ajutorul softului VRMesh. Fișierul traiectoriei utilizat este în format **txt* și conține cei 6 parametri ai unei orientări exterioare, exact ca în cazul fotogrametriei clasice, cele 3 coordonate și cele 3 unghiuri, Roll, Pitch și Yaw. Acest fișier conține următoarele detalii:

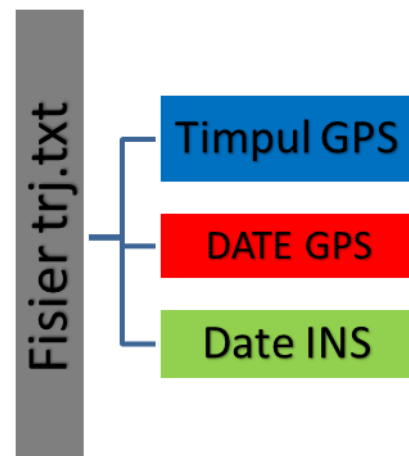
- ❖ Parametru 1: Timpul GPS - Acuratețe=10 Precizie=5 Unități=secunde- săptămână
- ❖ Parametru 2: Latitudine/Datum-WGS84 - Acuratețe=9 Precizie=10 Unități=Grade (DD.ddd)
- ❖ Parametru 3: Longitudine/Datum-WGS8 - Acuratețe=10 Precizie=10 Unități=Grade (DD.ddd)
- ❖ Parametru 4: Alitudinea elipsoidală/Datum-WGS84 - Acuratețe=6 Precizie=3 Unități=Metri
- ❖ Parametru 6: Unghiul Roll - Acuratețe=6 Precizie=5 Unități=Grade (DD.ddd)
- ❖ Parametru 7: Unghiul Pitch - Acuratețe=6 Precizie=5 Unități=Grade (DD.ddd)
- ❖ Parametru 8: Unghiul Yaw - Acuratețe=6 Precizie=5 Unități=Grade (DD.ddd)


```

81 + Item / : Altitude/raw
82 Width=6 Precision=5 Unit=Degrees (DD.ddd)
83
84 *****
85 Output of continuous data
86
87 392846.82766 46.1758995584 21.2722170631 150.709 0.42182 3.52114 -84.66528
88 392846.83153 46.1758995575 21.2722170619 150.709 0.42158 3.52112 -84.66490
89 392846.83547 46.1758995566 21.2722170607 150.709 0.42299 3.52171 -84.66473
90 392846.83935 46.1758995557 21.2722170595 150.709 0.42231 3.52170 -84.66428
91 392846.84327 46.1758995548 21.2722170583 150.709 0.41999 3.52104 -84.66358
92 392846.84715 46.1758995538 21.2722170571 150.708 0.42038 3.51968 -84.66287
93 392846.85109 46.1758995528 21.2722170560 150.708 0.42248 3.51948 -84.66251
94 392846.85497 46.1758995518 21.2722170548 150.708 0.42240 3.52020 -84.66188
95 392846.85889 46.1758995506 21.2722170536 150.708 0.42103 3.51968 -84.66070
96 392846.86277 46.1758995494 21.2722170523 150.708 0.42242 3.51983 -84.65950
97 392846.86671 46.1758995482 21.2722170510 150.708 0.42485 3.51951 -84.65897
98 392846.87058 46.1758995469 21.2722170497 150.708 0.42527 3.51929 -84.65812
99 392846.87451 46.1758995457 21.2722170484 150.708 0.42417 3.51907 -84.65666
100 392846.87838 46.1758995445 21.2722170471 150.708 0.42375 3.51873 -84.65555
101 392846.88232 46.1758995434 21.2722170457 150.708 0.42436 3.51900 -84.65489
102 392846.88620 46.1758995425 21.2722170445 150.708 0.42347 3.51943 -84.65458
103 392846.89012 46.1758995415 21.2722170432 150.708 0.42136 3.51992 -84.65357
104 392846.89400 46.1758995406 21.2722170419 150.708 0.41944 3.51998 -84.65266
105 392846.89794 46.1758995397 21.2722170406 150.708 0.41939 3.52055 -84.65204
106 392846.90181 46.1758995388 21.2722170393 150.708 0.41875 3.52057 -84.65134
107 392846.90574 46.1758995378 21.2722170381 150.708 0.41765 3.51980 -84.65078
108 392846.90961 46.1758995368 21.2722170369 150.707 0.41645 3.51897 -84.64961
109 392846.91355 46.1758995356 21.2722170356 150.707 0.41796 3.51923 -84.64838
110 392846.91743 46.1758995344 21.2722170342 150.707 0.41975 3.52019 -84.64791
111 392846.92136 46.1758995332 21.2722170329 150.707 0.42011 3.51955 -84.64674
112 392846.92523 46.1758995319 21.2722170317 150.707 0.42003 3.52003 -84.64528
113 392846.92917 46.1758995307 21.2722170304 150.707 0.42037 3.51966 -84.64452
114 392846.93305 46.1758995295 21.2722170291 150.707 0.42175 3.51943 -84.64360
115 392846.93697 46.1758995284 21.2722170278 150.707 0.42083 3.52082 -84.64271
116 392846.94085 46.1758995274 21.2722170265 150.707 0.41826 3.52165 -84.64180
117 392846.94479 46.1758995265 21.2722170253 150.707 0.41582 3.52203 -84.64107
118 392846.94866 46.1758995256 21.2722170240 150.707 0.41556 3.52223 -84.64090
119 392846.95259 46.1758995249 21.2722170228 150.707 0.41465 3.52231 -84.64081
120 392846.95646 46.1758995241 21.2722170216 150.707 0.41180 3.52160 -84.63979
121 392846.96040 46.1758995232 21.2722170204 150.706 0.40923 3.52041 -84.63884

```

Figura 13. Fișierul
traectoriei



Datele traiectoriei de zbor au fost încărcat în soft-ul VRMesh cu comanda **Separate LiDAR Strips** – această comandă încarcă traiectoria, decupează orice traiectorie care conține suprapunere și le separă în fișiere de tip *.las.

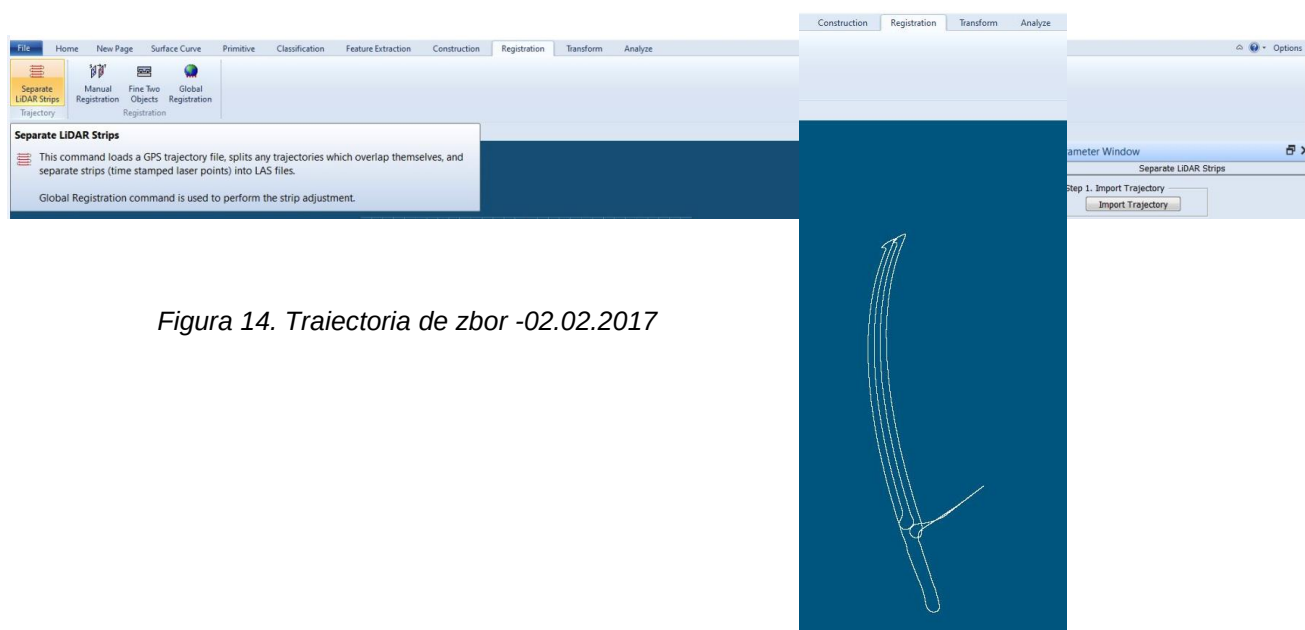
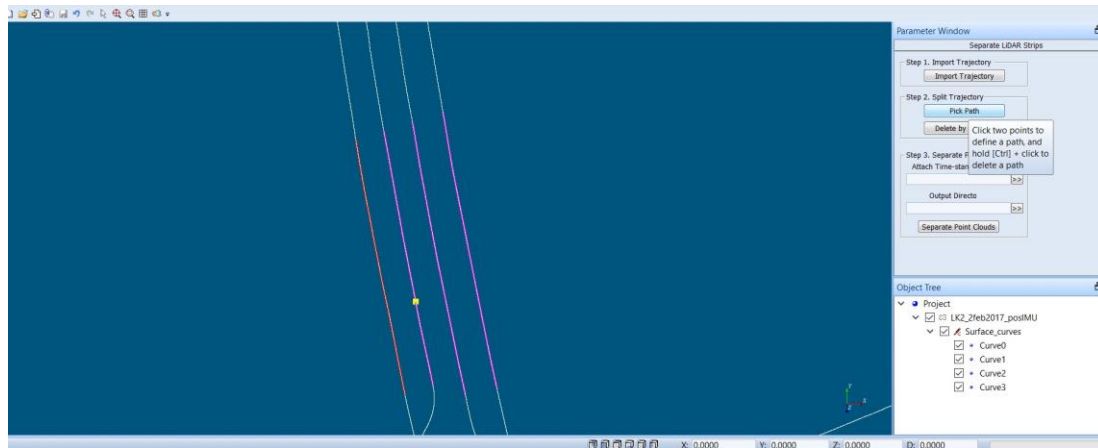


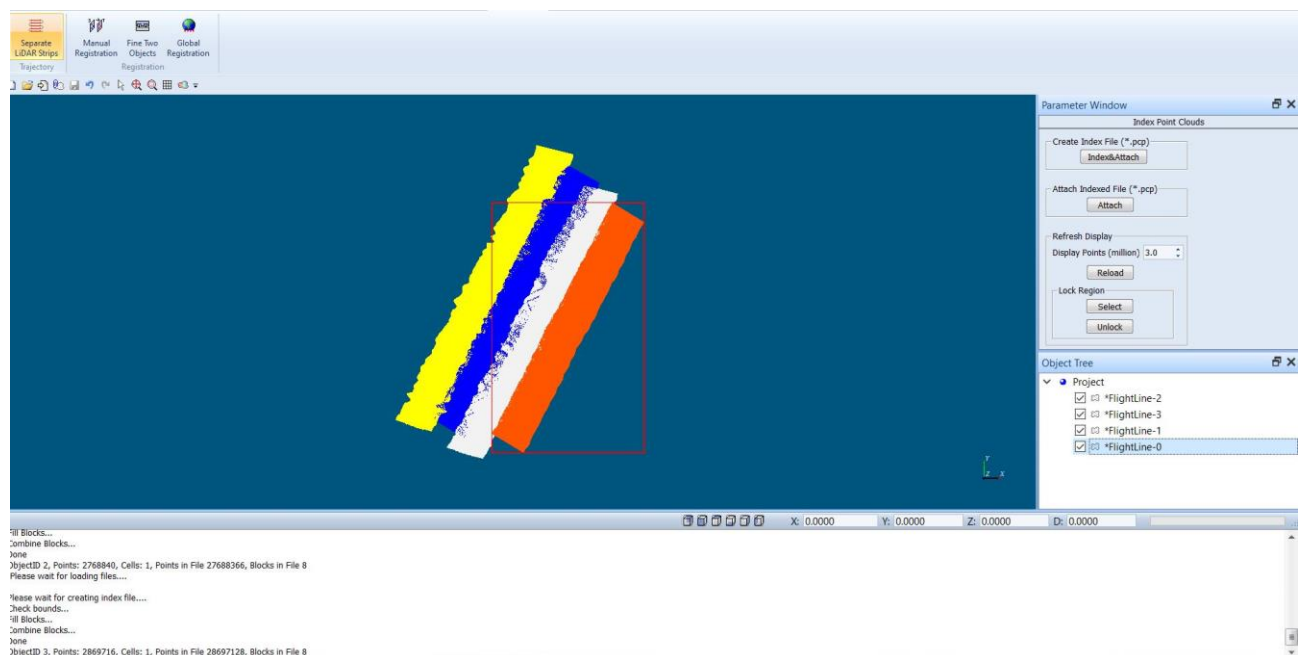
Figura 14. Traiectoria de zbor -02.02.2017

Zona de testare a fost aleasă în așa fel încât să se permită decuparea fișierelor *.las și a putea efectua alinierea celor patru benzi ale scannerului. Zona selectată este cuprinsă între punctele evidențiate pe traiectorie.



*Figura 15 Selectarea zonei de lucru și decuparea fișierelor *.las pe această zonă*

Datorită versiunii Demo a softului, fișierele *.las se salvează ca index. Au fost încărcate cele 4 benzi ALS avute pe traiectoria respectivă și s-a continuat cu georeferențierea directă a lor. Pentru fiecare fișier *.las în parte se evidențiază numărul de puncte și numărul de blocuri conform tabelului nr. 1:

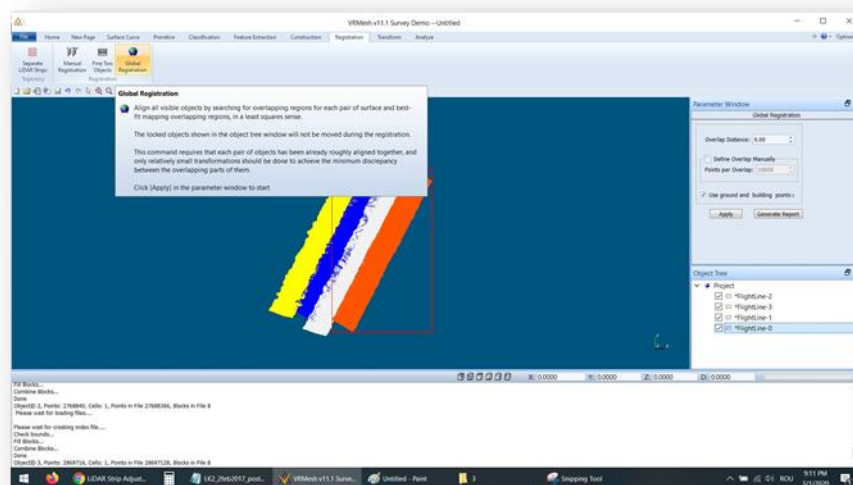


*Figura 16. Zona de testare-fișierelor *.las decupate după traiectorie -02.02.2017*

Nr. crt.	Denumire fișier	Numărul de puncte	Numărul de blocuri
1	Banda de zbor 2(culoarea albastră)	319026026	16
2	Banda de zbor 3(culoarea albă)	26752282	8
3	Banda de zbor 1(culoarea galben)	27688366	8
4	Banda de zbor 0(culoarea roșu)	28697128	8

Comanda de georeferențiere directă a benzilor este: **Global Registration**. Aceasta compensează pe baza parametrilor traiectoriei, toate benzile vizibile prin căutarea regiunilor de suprapunere a fiecărei perechi de suprafață și alinierea lor prin metoda celor mai mici pătrate. Se folosește o transformare afină pentru a alinia benzile între ele, pentru a elimina o minimă discrepanță dintre zonele de suprapunere. Ca parametru pentru această comandă este distanța inițială de suprapunere. Valoarea inițială va fi ajustată automat în timpul procedurii de înregistrare. Am setat distanța de suprapunere ca fiind egală cu zero, pentru a permite programului să aloce o valoare inițială pentru a găsi suprafața suprapusă.

Figura 17. Ajustarea automată prin metoda directă a benzilor ALS



Se calculează și se obține numărul total de regiuni de suprapunere între benzile ALS. Pentru zona de test din acest raport valoarea este egală cu **14511**, iar pentru fiecare bandă în parte se găsesc regiunile comune plecând de la prima bandă până la ultima.

Figura 18. Zonele de suprapunere a benzilor ALS din suprafața testată

```

Use all points for registration
Number per overlapped region is: 14511

Match and registration...

Object: 2 , Overlapped Regions: 12
Object: 0 , Overlapped Regions: 152
Object: 1 , Overlapped Regions: 50
Total error in the step 0: 0.696661
Object: 2 , Overlapped Regions: 14
    
```


Rezultatul obținut este un fișier *.las compensat și se va genera un raport pe baza următoarelor formule evidențiate în tabelul nr. 2:

Nr. Crt.	Parametrii	Formula
1	Media	$\bar{A} = \sum A_i / N$
2	Abaterea standard	$D = \sqrt{(\sum (A_i - \bar{A})^2 / N)}$
3	Variația	$V = D / \bar{A} * 100\%$
4	Îmbunătățirea	$I = (Old - New) / Old * 100\%$

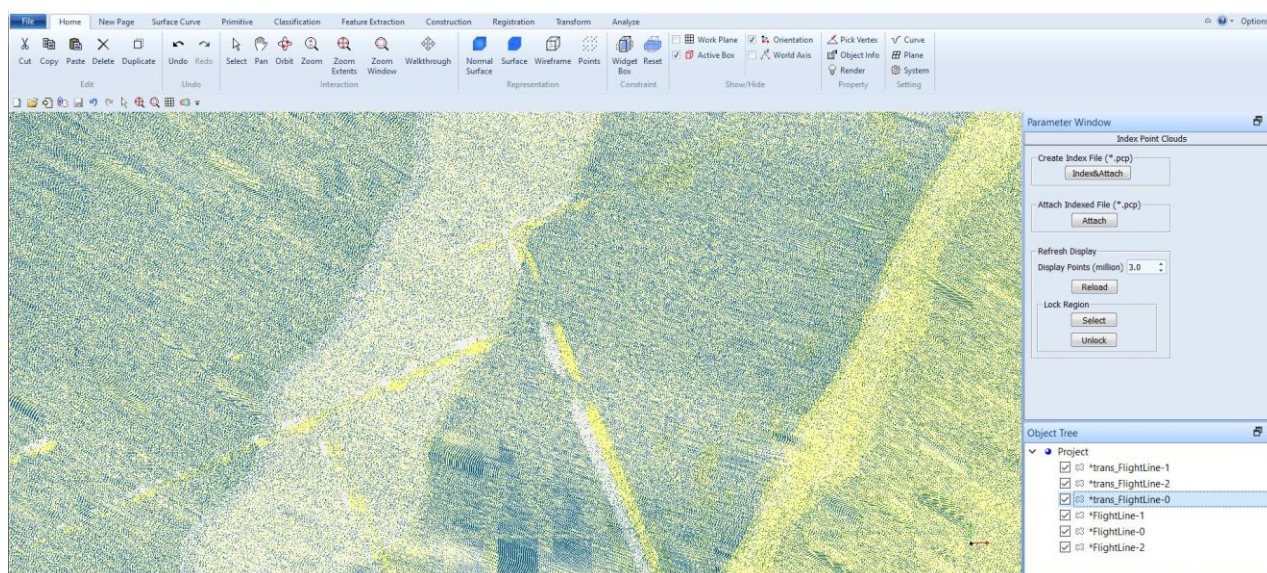
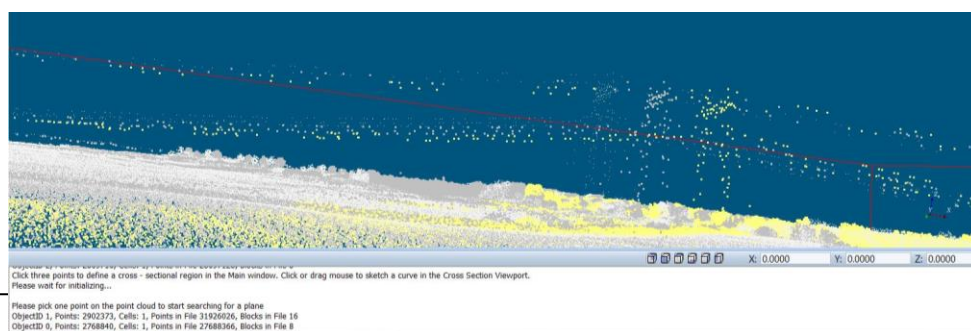


Figura 18. Fișiere ALS alinate

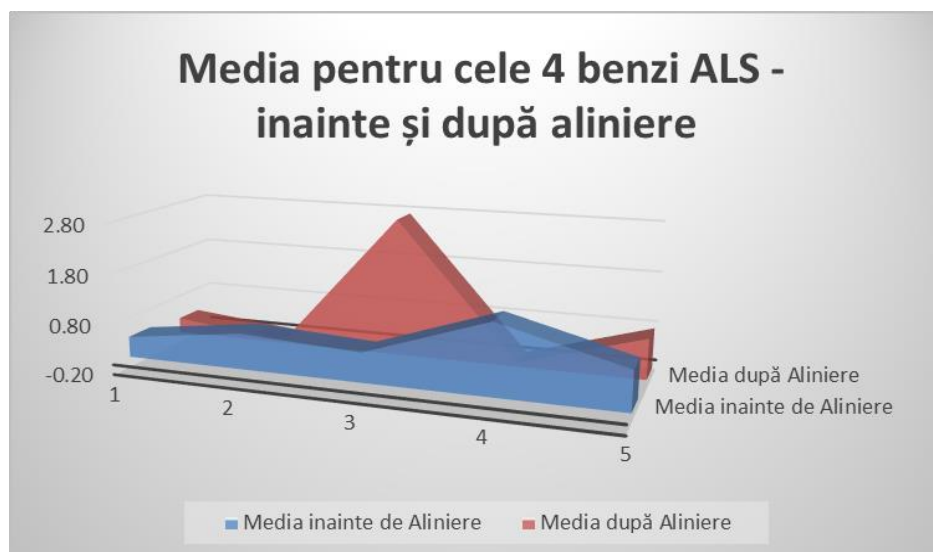
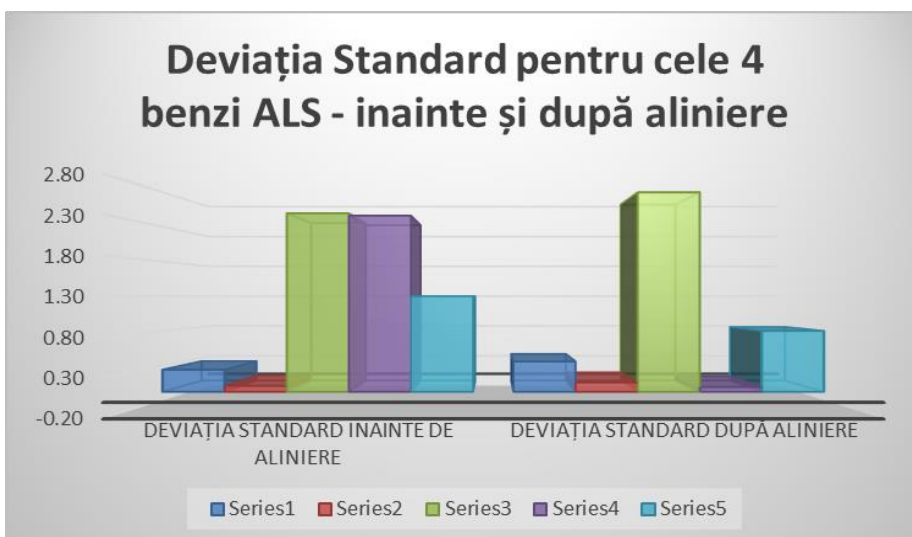
Figura 19. Raportul final



VRMesh									
Registration Report									
Object		Before Registration			After Registration			Improvement	
ID	Overlaps	Mean	Deviation	Variation%	Mean	Deviation	Variation%	Mean%	Deviation%
0	149	0.4135	0.3006	72.6776	0.3091	0.4114	133.1030	25.2617	-36.8773
1	55	0.7153	0.0800	11.1895	0.0731	0.1262	172.6540	89.7785	-57.7190
2	11	0.5888	2.4271	412.1750	2.7602	2.7116	98.2391	-368.7410	-11.7212
3	8	1.4113	2.3949	169.7020	0.0879	0.0642	73.0145	93.7702	97.3196
Total Average:		0.7822	1.3007		0.8076	0.8283		-3.2379	36.3130

Raportul a fost salvat în format *pdf*, dar datorită versiunii demo a softului, fișierele **las* nu pot fi exportate sau salvate pentru a putea fi folosite ulterior în efectuarea unei clasificări și generarea modelului digital al terenului.

Figura 20. Grafice cu rezultatele obținute în urma alinierii



C. Georeferențierea riguroasă.

La această metodă de aliniere a benzilor ALS s-a folosit ca date de intrare – fișierele originale ale scannerului în format Synopsys Design Constraints File (SDC) , care reprezintă un fișier text de tip ASCII (cu extensia ***sdc**) ce conține restricții de proiectare și atribuții de calendar în formatul standard. Limitările dintr-un fișier de restricții de proiectare sunt utilizate folosind diferite limbaje de comandă/ de scriere, cum este și softul utilizat la această metodă – softul Opals versiunea 2.3.2.

Ca dată de intrare s-a mai folosit și fișierul traiectoriei în format ***txt**, cât și în formatul ***pof** care este un format binar - un fișier obiect programator (POF) care conțin un volum mare de date (peste 3 milioane de înregistrări).

Datele au fost achiziționate în data de 07 septembrie 2017.

În softul Opals există un modul conceput pentru alinierea riguroasă a benzilor ALS. Acest Modul se numește **StripAdjust**. Pentru a putea utiliza acest modul am instalat și limbajul de scriere MATLAB RunTime. Modulul **StripAdjust** folosește ca unitate de măsură a unghiurilor - gradația sexagesimală (cerc complet = 360 °). Valorile unghiulare sunt înregistrate, raportate și exportate în fișiere output în grade. Cu toate acestea, după regula generală a OPALS, unghiurile sunt stocate în radian. Prin urmare, pentru unghiurile citite din fișier (traiectorii și orientări exterioare ale imaginii), factorul de conversie în radian trebuie să fie furnizat în fișierul de definire a formatului OPALS.

Fluxul de lucru pentru acest modul este:

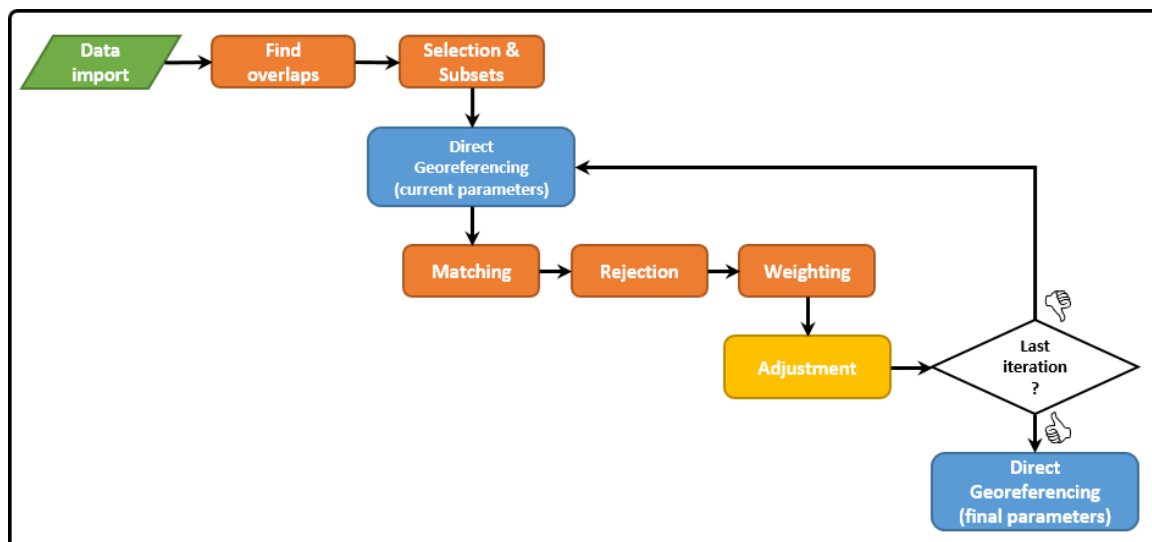


Figura 20. Fluxul de lucru **Strip Adjust** (<https://opals.geo.tuwien.ac.at/html/stable/ModuleStripAdjust.html>)

Testarea a început prin crearea fișierului de configurare; în acesta se definesc parametrii utilizați în compensare, parametrii algoritmului ICP cât și locația și denumirea datelor de intrare, fișierele .sdc și fișierul traiectoriei. Traectoria pe lângă fișierul *txt* mai trebuie să aibă definit și un fișier *xml*, care face parte din codul sursă.

Parametrii utilizați și datele de intrare sunt următoarele:

Date de intrare generale

- Fișierele norului de puncte în format .sdc (fig. 21)
- Fișierele traiectoriei în format txt și format xml (fig. 22)
- Fișierul de configurare a softului în format txt (fig. 24)
- Parametri fișierului de traiectorie (3 opțiuni - poligon, liniar și cubic)

Parametri utilizați în compensare

- Date despre sistemul de proiecție a datelor de intrare
- Lungimea voxel folosită pentru a găsi suprapuneri între nori de punct în spațiul obiect
- Numărul maxim de iterații
- Orientarea scannerului în timpul montării pe platforma aeriană
- Raza de căutare pentru determinarea planului prin estimarea normalelor realizat cu un alt modul al softului și numărul de vecini
- Parametri de decalare dintre antena GNSS și scanner
- Parametri de corespondență folosiți la suprapunere dintre benzile ALS
- Parametri de selecție- modul folosește esanționarea uniformă
- Criterii pentru respingerea corespondențelor

Setul de date este compus din 4 benzi ALS – pentru a putea crea perechi, a vedea suprapunerea dintre ele și alinierea riguroasă a acestora. Fișierele SDC au un volum mare de date, lucru observat în spațiul pe care îl dețin și sunt compuse din mai multe fișiere adiacente.

Figura 21. Fișierele ALS în format SDC

170907_082949_1.idx	3/10/2020 11:35 AM	IDX File	8,083 KB
170907_082949_1.idx	3/10/2020 11:35 AM	Text Document	10 KB
170907_082949_1.sdc	3/10/2020 11:35 AM	SDC File	988,322 KB
170907_082949_1.sdc	3/10/2020 11:35 AM	Text Document	10 KB
170907_082949_1.sdc.sig	3/10/2020 11:35 AM	SIG File	1 KB
170907_082949_1.sdh	3/10/2020 11:29 AM	SDH File	2 KB
170907_083249_1.idx	3/10/2020 11:07 AM	IDX File	9,326 KB
170907_083249_1.idx	3/10/2020 11:08 AM	Text Document	10 KB
170907_083249_1.sdc	3/10/2020 11:08 AM	SDC File	1,149,199 ...
170907_083249_1.sdc	3/10/2020 11:08 AM	Text Document	10 KB
170907_083249_1.sdc.sig	3/10/2020 11:08 AM	SIG File	1 KB
170907_083249_1.sdh	3/10/2020 11:01 AM	SDH File	2 KB
170907_083635_1.idx	3/10/2020 11:16 AM	IDX File	11,325 KB
170907_083635_1.idx	3/10/2020 11:17 AM	Text Document	10 KB
170907_083635_1.sdc	3/10/2020 11:17 AM	SDC File	1,418,736 ...
170907_083635_1.sdc	3/10/2020 11:17 AM	Text Document	10 KB
170907_083635_1.sdc.sig	3/10/2020 11:17 AM	SIG File	1 KB
170907_083635_1.sdh	3/10/2020 11:09 AM	SDH File	2 KB
170907_083951_1.idx	3/10/2020 11:26 AM	IDX File	12,033 KB
170907_083951_1.idx	3/10/2020 11:27 AM	Text Document	10 KB
170907_083951_1.sdc	3/10/2020 11:27 AM	SDC File	1,474,982 ...
170907_083951_1.sdc	3/10/2020 11:27 AM	Text Document	10 KB
170907_083951_1.sdc.sig	3/10/2020 11:27 AM	SIG File	1 KB
170907_083951_1.sdh	3/10/2020 11:18 AM	SDH File	2 KB

Fișierul traiectoriei este compus din cele 3 coordonate, cele 3 unghiuri ale avionului (Roll, Pitch și Yaw) și Timpul GPS pentru cel puțin 3 milioane de observații achiziționate în data de 07.09.2017. Pentru utilizarea acestui fișier a fost necesară modificarea fișierul *xml* al traiectoriei cât și codul sursă al softului, deoarece acesta era programat pentru un fișier cu coordonate carteziane geocentrice, iar fișierul traiectoriei conținea coordonate geografice. Plus ordinea lor nu era ca cea din codul sursă. Într-un anumit moment de testare am fost obligată să transform coordonatele geografice în coordonate carteziane geocentrice. Am realizat acest lucru cu ajutorul softului PCTrans versiunea 5.0, pentru toate cele 3 milioane de observații.

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1" ?>
<?xml-stylesheet type="text/xsl" href="opalsFormatDefinitionStyle.xml" ?>

<!-- OPALS Format Definition Section -->
<opalsFormatDefinition>
  <description>Trajectory ASCII Format</description>
  <!-- Trajectory format x y z time roll pitch yaw -->
  <ascii>
    <commentInitiator val="#" />
    <header>
      <text val="#" Trajectory format: Latitudine[deg] Longitudine[deg] Elevation[m] Time[s] Roll[deg] Pitch[deg] Yaw[deg]" />
    </header>
    <data>
      <entry val="x" />
      <entry val="y" />
      <entry val="z" />
      <entry val="GPSTime" />
      <entry val="RollAngle" toInternal="x*pi/180" toExternal="x/pi*180" />
      <entry val="PitchAngle" toInternal="x*pi/180" toExternal="x/pi*180" />
      <entry val="YawAngle" toInternal="x*pi/180" toExternal="x/pi*180" />
    </data>
  </ascii>
</opalsFormatDefinition>
```

a) .xml

Infos from the postprocessing logfile:
AEROoffice V5.4.50 2015-12-15 .
Dongle-ID: 2-1999962 .
09/09/2017 08:39:43 .
Header of imported GNSS File .
.
Project: LK2_trajectorii_7septembrie_m1 .
Program: GrafNav Version 8.60.6717 .
Profile: IGI AEROCTRL .
Source: GNSS Epochs(GNSS Combined) .
ProcessInfo: Run (1) by primer on 09/09/2017 at 08:35:43 .
.
Datum: ETRS89, (processing datum) .
Master 1: Name DEVA, Status ENABLED .
Antenna height 0.000 m, to L1PC [LEIAT504(LEIS)] .
Position 45 52 42.29505, 22 54 48.71898, 246.602 m (ETRS89, Ellipsoidal hgt)
Master 2: Name BAIA, Status ENABLED .
Antenna height 0.000 m, to L1PC [LEIAT504(LEIS)] .
Position 47 39 06.42476, 23 33 27.76011, 270.818 m (ETRS89, Ellipsoidal hgt)
Master 3: Name OROS, Status ENABLED .
Antenna height 0.000 m, to L1PC [LEIAT504GG(LEIS)] .
Position 46 33 18.80168, 20 40 16.84376, 146.024 m (ETRS89, Ellipsoidal hgt)
Remote: Antenna height 0.000 m, to L1PC [Generic(NONE)] .
SD Scaling Settings: .
Position: 1.0000 .
Velocity: 1.0000 .
.
(sec),,,(deg),(deg),(m),(m/s),(m/s),(m/s),(m),(m),(m),(m/s),(m/s),(m/s) .
GPS-Leverarm: 0.604m 0.272m -1.364m .
Mount-Center-Leverarm: 0.000m 0.000m 0.000m .
375901.00607 47.0085906701 22.0446620042 987.463 1.30748 -2.50910 -37.24992
375901.00997 47.0085925794 22.0446605266 987.451 1.30608 -2.50363 -37.24692
375901.01387 47.0085944887 22.0446590490 987.438 1.30094 -2.50458 -37.24474
375901.01778 47.0085963980 22.0446575714 987.425 1.29528 -2.50347 -37.24324
375901.02168 47.0085983074 22.0446560939 987.412 1.29423 -2.49623 -37.24188
375901.02559 47.0086002169 22.0446546164 987.399 1.29194 -2.49322 -37.24141
375901.02949 47.0086021264 22.0446531389 987.386 1.28563 -2.51359 -37.24030
375901.03339 47.0086040358 22.0446516616 987.374 1.27825 -2.51681 -37.23780
375901.03730 47.0086059452 22.0446501842 987.361 1.27354 -2.49928 -37.23503
375901.04120 47.0086078548 22.0446487068 987.348 1.27114 -2.51089 -37.23446
375901.04511 47.0086097643 22.0446472296 987.335 1.26631 -2.51953 -37.23492
375901.04901 47.0086116738 22.0446457524 987.323 1.25909 -2.50293 -37.23384

b) txt

Figura 22. Fișierul traiectoriei în ambele
formate

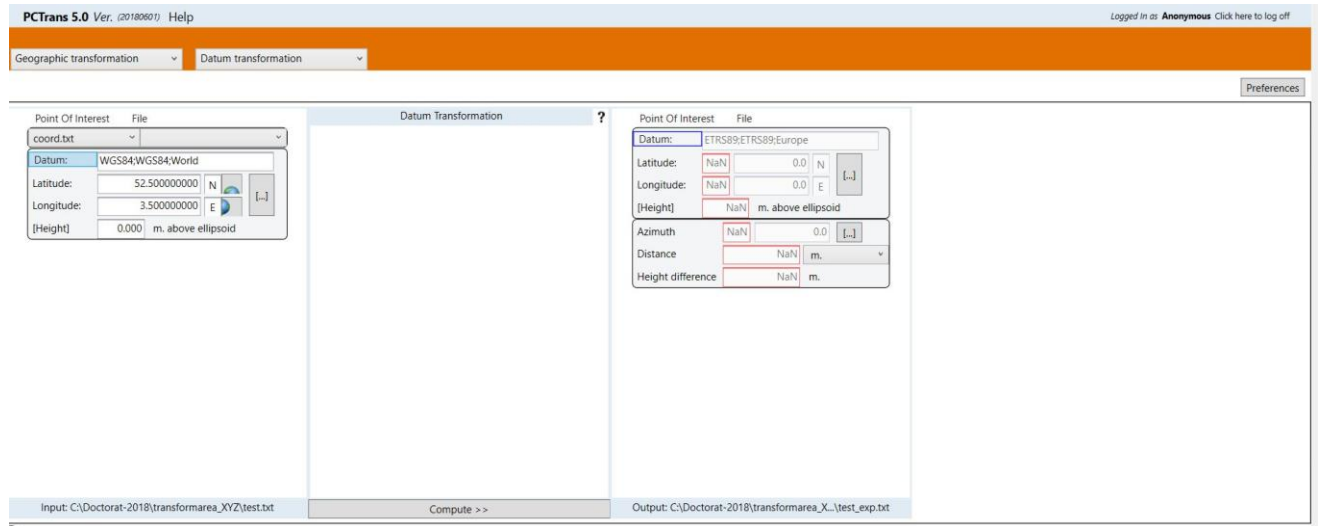


Figura 23. softul PcTrans – modificarea coordonatelor

Fișierul de configurare cu extensia cfg este prezentat mai jos introducând valorile parametrilor necesari alinierii benzilor ALS.

Figura 24. Fișierul cfg

```
[opalsStripAdjust]
utm.zone = 32
utm.hemisphere = north
adjustment.voxelSize = ....
adjustment.maxIter = ....
strips.strips.all.iFormat = sdc
strips.strips.all.oFormat = odm
strips.strips.all.scannerOrientation = frd
strips.strips.all.trajectory.correctionModel = bias
strips.strips[0].inFile = 170907_082949_1.sdc
strips.strips[1].inFile = 170907_083249_1.sdc
strips.strips[2].inFile = 170907_083635_1.sdc
strips.strips[3].inFile = 170907_083951_1.sdc
strips.strips[1].trajectory.dX.sigmaApriori = 0
strips.strips[1].trajectory.dY.sigmaApriori = 0
strips.strips[1].trajectory.dZ.sigmaApriori = 0
strips.strips[1].trajectory.dRoll.sigmaApriori = 0
strips.strips[1].trajectory.dPitch.sigmaApriori = 0
strips.strips[1].trajectory.dYaw.sigmaApriori = 0
strips.normals.searchRadius = .....
sessions[0].trajectory.inFile = LK2_Traietorii_7septembrie2017.txt
sessions[0].trajectory.iFormat = trajectory.xml
sessions[0].trajectory.timeLag = 0.0004
correspondences.strip2strip.overlap = .....
correspondences.strip2strip.selection.samplingDist = .....
correspondences.strip2strip.rejection.maxDist = .....|
```

Datorită neinformării în totalitate despre datele de intrare, am efectuat diverse testări de parametrii pentru a putea realiza alinierea riguroasă a benzilor ALS. Primul parametru pentru care nu am știut adevărata valoare este orientarea scannerului în momentul montării pe platformă.

Nr. crt	Orientarea scannerului	Definiție	Opțiunea testată	Explicații
1	FRD	Față/dreapta/jos	-testată de cele mai multe ori	-conform benzilor de zbor și a notiunilor din certificatul de calibrare am folosit această valoare.
2	DFR	Jos/față/dreapta	-testată de 2 ori	- a dat eroare de nesuprapunere a benzilor
3	DBL	Jos/spate/stânga	-testată o dată	- a dat eroare de nesuprapunere a benzilor
4	ULB	Sus/stânga/spate	-testată o dată	- a dat eroare de nesuprapunere a benzilor
5	URF	Sus/dreapta/față	-testată o dată	- a dat eroare de nesuprapunere a benzilor
6	RDF	Dreapta/jos/față	-testată o dată	- a dat eroare de nesuprapunere a benzilor
7	LDB	Stanga/jos/spate	-testată o dată	- a dat eroare de nesuprapunere a benzilor

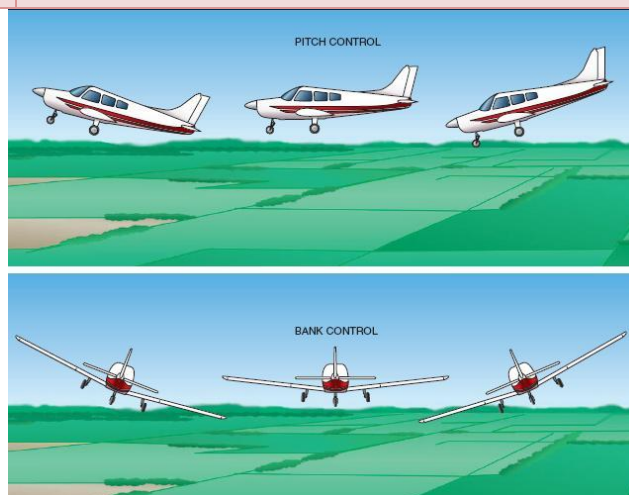
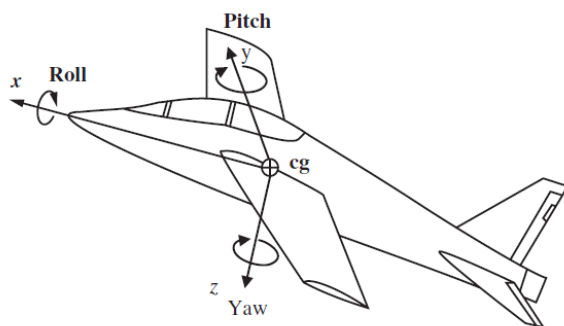


Figura 25. Orientarea scannerului (https://en.wikiversity.org/wiki/Aircraft_piloting/)

Softul permite utilizarea diferitelor epoci de achiziționare a datelor prin gruparea lor începând indexarea de la 0, atribuindu-i fiecărei traiectorii câte o sesiune și orientarea scannerului specifică. Pentru corectarea traiectoriei există un parametru care trebuie definit în momentul executării programului de aliniere. Aceste opțiuni sunt:

- ❖ BIAS – polinomial - compensări de poziție și rotație. Gradul polinomial: 0
- ❖ LINEAR- linear - compensări și scalări ale poziției și ale rotației. Gradul polinomial: 1
- ❖ SPLINE – cubic spline. Gradul polinomial: 3

Acest parametru definește modelul utilizat pentru corectarea traiectoriei. Au fost testat 2 valori ale acestui parametru: BIAS și LINEAR. În alinierea corectă a benzilor ALS acest

parametru a avut valoarea **BIAS**. În momentul introducerii punctelor de control la sol valoarea parametrului va deveni liniară, deoarece se va executa și o scalare a datelor traiectoriei.

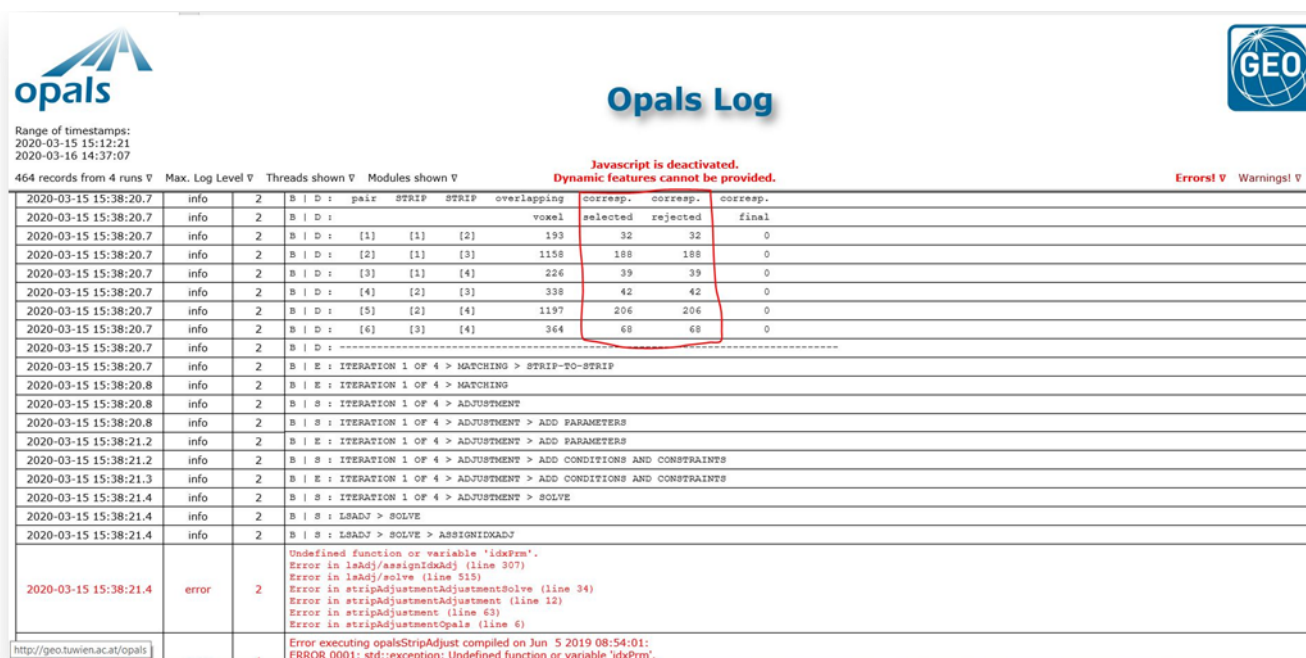
Pentru a putea găsi suprapunerile dintre benzile ALS trebuie definită lungimea **voxel** pentru fiecare nor de puncte. Această structură este construită din centrele voxel care conțin punctele din fișierele sdc. Dacă numărul de voxel comuni între doi nori de puncte este mai mare decât valoarea definită în fișierul de configurare (-correspondențe. {Strip2strip, control2strip, image2strip} .overlap), se presupune că norii de puncte se suprapun. Lungimea fiecărui voxel folosit trebuie să fie o valoare întreagă $f_{mod}(100, x) == 0$. Au fost testate diferite valori pentru acest parametru, acestea sunt evidențiate în tabelele cu nr. 4 și cu nr. 5:

Nr. crt.	Valoare Parametru	Rezultat - explicații
1	1	Această valoare ne prezintă în proporție de 90 % numărul exact de blocuri de suprapunere între benzile ALS introduse ca date de intrare. Testarea cu această valoare a eșuat , deși au fost evidențiate cele mai multe blocuri de suprapunere.
2	5	Valoarea acesta era evidențiată în exemplu dat de soft. Se poate folosi dar numărul blocurilor de suprapunere este redus, iar în pasul următor de selectare a corespundențelor, acesta este înjumătățit.
3	10	Este valoarea DEFAULT . Această valoare a fost folosită, având cele mai bune rezultate.
4	20	Aceste 2 valori au fost testate pentru a putea înțelege cum trebuie definit acest parametru. Softul nu a putut procesa dând eroare de Excessive values
5	50	

Nr. pereche	Benzile din pereche	Nr celulelor Voxel Valoare=1	Nr celulelor Voxel Valoare=5	Nr celulelor Voxel Valoare=10
1	1-2	9896	560	193
2	1-3	173772	4984	1158
3	1-4	9937	601	226
4	2-3	14890	1073	338
5	2-4	190610	5439	1197
6	3-4	15451	1063	364

Numărul de iterații ales a variat între valorile 2 și 4, datorită timpului mare de procesare și a diferitelor erori întâlnite pe parcursul procesului de aliniere a benzilor ALS. Deoarece orientarea relativă inițială a norilor de punct în ALS este, de obicei, destul de bună, doar câteva iterații (<5) sunt necesare pentru a atinge minimul global al funcției de eroare. prin erori grosolane.

Raza de căutare pentru montarea planului, acest parametru este folosit pentru estimarea vectorului normal într-un punct. Toate punctele învecinate din raza de căutare sunt folosite pentru a se potrivi cu un plan. Vectorul normal rezultat este necesar pentru calcularea distanțelor punct-la-plan. În plus, este utilizat pentru respingerea corespondențelor false. Numărul de vecini corespondent valorii impuse de **1.5 este de 8 vecini**. Cred că acest parametru a influențat foarte mult datele de intrare, respingând toate corespondențele găsite și ducând la eroarea obținută în aproape toate testările efectuate.



Opals Log

Range of timestamps:
2020-03-15 15:12:21
2020-03-16 14:37:07

464 records from 4 runs V Max. Log Level V Threads shown V Modules shown V

JavaScript is deactivated.
Dynamic features cannot be provided.

Errors! V Warnings! V

2020-03-15 15:38:20.7	info	2	B D	pair	STRIP	STRIP	overlapping	corresp.	corresp.	corresp.
2020-03-15 15:38:20.7	info	2	B D				vowel	selected	rejected	final
2020-03-15 15:38:20.7	info	2	B D	[1]	[1]	[2]	193	32	32	0
2020-03-15 15:38:20.7	info	2	B D	[2]	[1]	[3]	1158	188	188	0
2020-03-15 15:38:20.7	info	2	B D	[3]	[1]	[4]	226	39	39	0
2020-03-15 15:38:20.7	info	2	B D	[4]	[2]	[3]	338	42	42	0
2020-03-15 15:38:20.7	info	2	B D	[5]	[2]	[4]	1197	206	206	0
2020-03-15 15:38:20.7	info	2	B D	[6]	[3]	[4]	364	68	68	0
2020-03-15 15:38:20.7	info	2	B D							
2020-03-15 15:38:20.7	info	2	B E	ITERATION 1 OF 4 > MATCHING > STRIP-TO-STRIP						
2020-03-15 15:38:20.8	info	2	B E	ITERATION 1 OF 4 > MATCHING						
2020-03-15 15:38:20.8	info	2	B S	ITERATION 1 OF 4 > ADJUSTMENT						
2020-03-15 15:38:20.8	info	2	B S	ITERATION 1 OF 4 > ADJUSTMENT > ADD PARAMETERS						
2020-03-15 15:38:21.2	info	2	B S	ITERATION 1 OF 4 > ADJUSTMENT > ADD PARAMETERS						
2020-03-15 15:38:21.2	info	2	B S	ITERATION 1 OF 4 > ADJUSTMENT > ADD CONDITIONS AND CONSTRAINTS						
2020-03-15 15:38:21.3	info	2	B S	ITERATION 1 OF 4 > ADJUSTMENT > ADD CONDITIONS AND CONSTRAINTS						
2020-03-15 15:38:21.4	info	2	B S	ITERATION 1 OF 4 > ADJUSTMENT > SOLVE						
2020-03-15 15:38:21.4	info	2	B S	LEADJ > SOLVE						
2020-03-15 15:38:21.4	info	2	B S	LEADJ > SOLVE > ASSIGNIDKADJ						
2020-03-15 15:38:21.4	error	2		Undefined function or variable 'idxPm'. Error in leadj/assignIdkadj (line 307) Error in leadj/solve (line 515) Error in stripAdjustmentAdjustmentSolve (line 34) Error in stripAdjustmentAdjustment (line 12) Error in stripAdjustment (line 63) Error in stripAdjustmentOpals (line 6)						
http://geo.tuwien.ac.at/opals/	error	1		Error executing opalsStripAdjust compiled on Jun 5 2019 08:54:01: ERROR 0001: std::exception: Undefined function or variable 'idxPm'.						

Figura 26. Eroare depistată datorita razei de căutare

Pentru testul final – folosit la alinierea benzilor ALS a fost folosită valoarea **1 cu doar 4 vecini**.

Corespondențele sunt stabilite între diferite tipuri de nori de puncte în spațiul obiect și în cadrul softului prezintă diferiți parametrii care conduc la o setarea corectă necesară unei ajustări riguroasă.

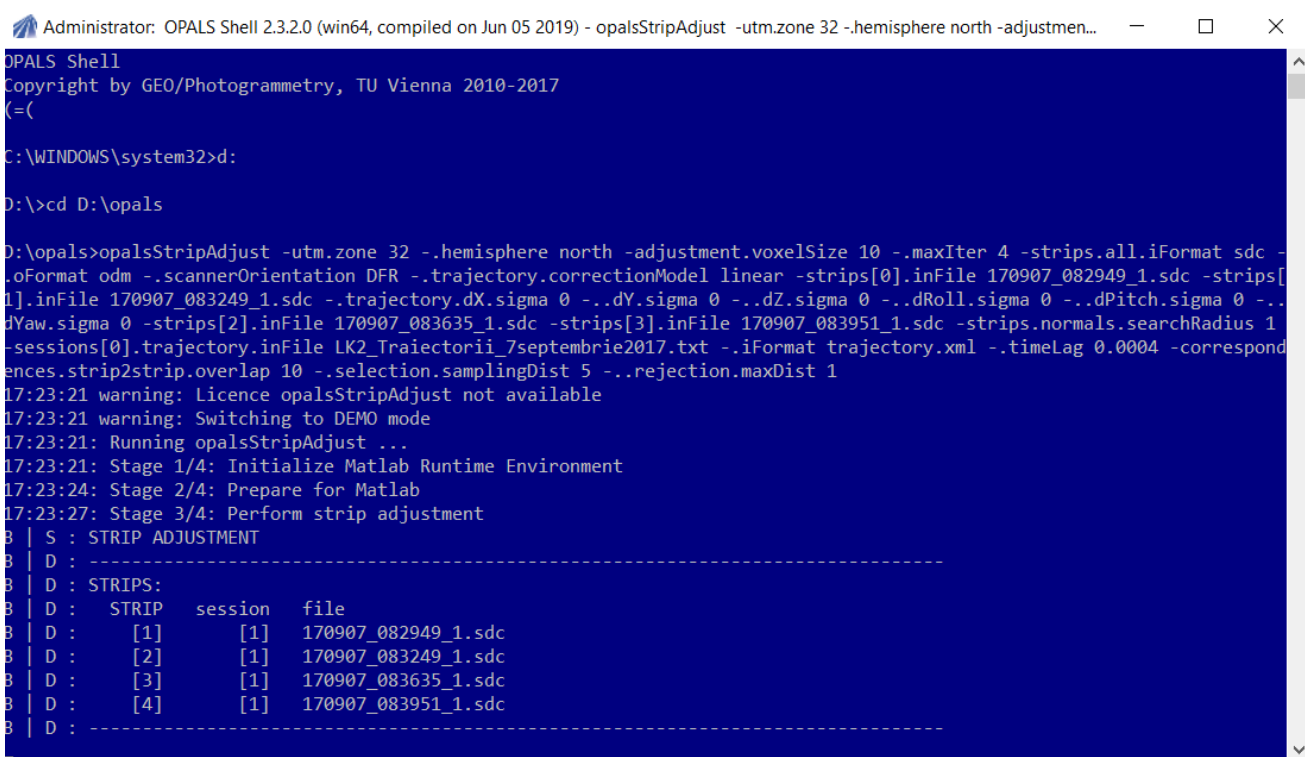
Suprapunerea – acest parametru are de obicei aceiași valoare ca și lungimea voxel. Benzile ALS sunt suprapuse numai dacă numărul de voxeluri suprapuse este mai mare sau egal cu această valoare. A fost setat un număr suficient de mare pentru a evita ca perechile de benzi ALS cu suprapuneri minore să fie luate în considerare deoarece în ele se găsesc

corespondențe destul de mari. Valoarea finală pentru acest parametru este cea egală cu parametru setat la celule voxel de **10**.

Selecția - acest parametru se determină prin metodele de selecție enumerate mai sus. Acest soft face o selecție prin esantionare uniformă – și este direct proporțional cu parametrii de suprapunere folosiți anterior. Este un procent care pleacă de la valoarea zero și ajunge la 100. În cazul nostru a fost folosită valoarea default de **5** procente.

Respingerea – acest parametru determină criteriile de respingere a corespondențelor. Cum este prezentat și în partea de teorie, nu toate corespondențele punct la punct găsite în etapa de potrivire sunt, de asemenea, corespondențe valide în sensul alinierii benzii. Așa că este necesară eliminarea corespondențelor potențial greșite. O corespondență greșită este dată, dacă cele două puncte nu se află pe aceeași suprafață sau dacă o estimare normală fiabilă nu este posibilă datorită rugozității mari. Acest parametru este direct influențat de parametru introdus la raza de căutare, ajugând ca toate corespondențele să fie respinse. Valoarea setată pentru testul final în alinierea benzilor ALS a fost de **1**.

În urma tuturor testelor efectuate și obținerea valorilor corecte ale parametrilor menționați mai sus corespunzător setului meu de date, s-a trecut la efectuarea alinierii benzilor ALS cu ajutorul softului Opals. Toate datele au fost introduse atât în fișierul de configurare, cât și în linia de comanda dată. Se poate observa cum au fost importate cele 4 benzi ALS pe datele traiectoriei (fig. 27).



```
Administrator: OPALS Shell 2.3.2.0 (win64, compiled on Jun 05 2019) - opalsStripAdjust -utm.zone 32 -hemisphere north -adjustmen...
OPALS Shell
Copyright by GEO/Photogrammetry, TU Vienna 2010-2017
(=(
C:\WINDOWS\system32>d:
D:\>cd D:\opals
D:\opals>opalsStripAdjust -utm.zone 32 -hemisphere north -adjustment.voxelSize 10 -.maxIter 4 -strips.all.iFormat sdc -
.oFormat odm -.scannerOrientation DFR -.trajectory.correctionModel linear -strips[0].inFile 170907_082949_1.sdc -strips[
1].inFile 170907_083249_1.sdc -.trajectory.dX.sigma 0 -.dY.sigma 0 -.dZ.sigma 0 -.dRoll.sigma 0 -.dPitch.sigma 0 -.
dYaw.sigma 0 -strips[2].inFile 170907_083635_1.sdc -strips[3].inFile 170907_083951_1.sdc -strips.normals.searchRadius 1
-sessions[0].trajectory.inFile LK2_Traectorii_7septembrie2017.txt -.iFormat trajectory.xml -.timeLag 0.0004 -correspond
ences.strip2strip.overlap 10 -.selection.samplingDist 5 -.rejection.maxDist 1
17:23:21 warning: Licence opalsStripAdjust not available
17:23:21 warning: Switching to DEMO mode
17:23:21: Running opalsStripAdjust ...
17:23:21: Stage 1/4: Initialize Matlab Runtime Environment
17:23:24: Stage 2/4: Prepare for Matlab
17:23:27: Stage 3/4: Perform strip adjustment
B | S : STRIP ADJUSTMENT
B | D : -----
B | D : STRIPS:
B | D : STRIP session file
B | D : [1] [1] 170907_082949_1.sdc
B | D : [2] [1] 170907_083249_1.sdc
B | D : [3] [1] 170907_083635_1.sdc
B | D : [4] [1] 170907_083951_1.sdc
B | D : -----
```

Figura 27. Comanda efectuată și importarea benzilor ALS

După importare s-au creat cele 6 perechi de benzi, s-au determinat blocurile voxel de suprapunere după care s-a trecut la selectare corespondențelor –bandă cu bandă - pornind de la prima bandă, datorită parametrului introdus utilizat în această etapa a fost afișat pe ecran numărul corespondențelor găsite în zona de suprapunere. Datorită volumului mare de date se crează subseturi utilizându-se diferite alte module din codul sursă al softului. Se crează potrivirea pentru cele 6 perechi – bandă cu bandă- se face o georeferențiere directă, ținând cont de datele GPS, pentru fiecare iterație în parte, evidențiindu-se numărul de corespondențe respinse, numărul de corespondențe finale, abaterea standard și valoarea medie pentru distanța de la punct la plan. Rezultatele după prima iterație sunt afișate în tabelul nr. 6:

Nr. perechi	Nr. benzi	Suprapunere Voxel	Corespondențe selectate	Corespondențe respinse	Corespondențe finale	Abaterea standard	Media
1	1-2	193	6019	6019	0		
2	1-3	1158	37686	37639	47	0.522	-0.280
3	1-4	226	6897	6897	2	0.007	-0.652
4	2-3	338	10568	10568	0		
5	2-4	1197	40054	40001	53	0.567	0.203
6	3-4	364	11916	11916	0		

S-a trecut la alinierea bandă cu bandă, adăugându-se constrângerile și condițiile, numărul de observații și tot ce e necesar unei alinieri riguroase a datelor introduse respectând numărul de iterații cerut și obținându-se valori după fiecare iterație în parte. Rezultatele ultimei iterații înainte de corectarea – compensarea traiectoriei sunt afișate în tabelul nr 7:

'STR2STR point-to-plane observations'

Numărul observațiilor = 96
Std(v)= 0.4483404
Media(v)= 0.1229541
Std_mad(v)= 0.4662228
Median(v)= 0.0757106

Numărul erorilor grosolane detectate = 0

Std(v) (fără erori grosolane)= 0.4483404

Media(v) (fără erori grosolane)= 0.1229541

Std_mad(v) (fără erori grosolane)= 0.4662228

Median(v) (fără erori grosolane)= 0.0757106



Opals Log



Range of timestamps:
2020-03-14 13:51:02
2020-03-14 16:21:09

702 records from 3 runs ▾ Max. Log Level ▾ Threads shown ▾ Modules shown ▾

JavaScript is deactivated.
Dynamic features cannot be provided.

Errors! ▾ Warnings! ▾

2020-03-14 16:04:54.7	info	2	In stripAdjustmentAdjustment (line 12)
2020-03-14 16:04:54.7	info	2	In stripAdjustment (line 63)
2020-03-14 16:04:54.7	info	2	In stripAdjustmentOpals (line 6)
2020-03-14 16:04:54.7	info	2	B I : LSADJ > SOLVE : Adjustment overview:
2020-03-14 16:04:54.7	info	2	B V : 1.00000 = sigma0 a priori
2020-03-14 16:04:54.7	info	2	B V : 100 = number of conditions/observations
2020-03-14 16:04:54.7	info	2	B V : 0 = number of constraints
2020-03-14 16:04:54.7	info	2	B V : 0 = number of detected gross errors (pFacRWA = 0.010)
2020-03-14 16:04:54.7	info	2	B V : 3 = number of conditions/observations with zero weight
2020-03-14 16:04:54.7	info	2	B V : 25 = number of parameters
2020-03-14 16:04:54.8	info	2	B V : 72 = redundancy
2020-03-14 16:04:54.8	info	2	B I : LSADJ > SOLVE : Adjustment results:
2020-03-14 16:04:54.8	info	2	B T : nIt v'Pv norm(dx) norm(v) maxLinError epsKraus converged? condition satisfConstr time2solve
2020-03-14 16:04:54.8	info	2	B T : 1 2.52326937e+01 1.41978215e+01 4.68743258e+00 4.8154e-04 9.6850e-08 1 NaN NaN 0.023s
2020-03-14 16:04:54.8	info	2	B I : LSADJ > SOLVE : 1 (out of 1 = 1.00%) worst "active" observations with normalized residuals vNorm >= 3.0:
2020-03-14 16:04:54.8	info	2	B T : i idkAdj vNorm v sigb b bhat pFac pFacRWA allowRWA
2020-03-14 16:04:54.8	info	2	B T : 1 47 15.63727 0.12113 0.00775 0.00000 0.12109 0.00000 1.00000 1
2020-03-14 16:04:54.8	info	2	B I : LSADJ > SOLVE : 0 (out of 0 = 0.00%) worst "non active" observations:
2020-03-14 16:04:54.8	info	2	B I : LSADJ > SOLVE : -> None!
2020-03-14 16:04:54.8	info	2	B S : LSADJ > SOLVE > A POSTERIORI STOCHASTIC
2020-03-14 16:04:54.8	info	2	B V : 0.5519516 = sigma0 a posteriori
2020-03-14 16:04:54.8	info	2	B V : 0.4533872 = std(v)
2020-03-14 16:04:54.8	info	2	B V : 0.1273414 = mean(v)
2020-03-14 16:04:54.8	info	2	B V : 0.4533872 = std(v) (without gross errors)
2020-03-14 16:04:54.8	info	2	B V : 0.1273414 = mean(v) (without gross errors)

Figura 28. Log-ul softului cu valori obținute după prima iterație

Parametrii finali sunt evidențiați în tabelul cu nr. 8, iar pentru fiecare dată de intrare a fost creat un fișier cu rezultate. Fișierele *sdc compensate care conțin norul de puncte aliniat pentru fiecare bandă în parte a fost salvat sub formă de *odm (format *las pentru softul Opals). Traectoria a fost corectată iar varianta sa finală a fost salvată în format *trj (format *ascii) pentru fiecare bandă în parte. Au mai fost salvate și corespondențele dintre fiecare pereche de benzi la fiecare iterație. Se poate observa din parametrii finali că alinierea riguroasă a benzilor este de o acuratețe și o precizie superioară unei alinieri directe. Se poate lucra cu un volum mare de date de intrare achiziționate chiar și în epoci GPS diferite. Singurul dezavantaj al acestei metode și utilizarea acestui soft îl reprezintă neinformarea corectă cu privire la datele de intrare.

Parametrii finali	
[0].trajectory.dX.value	-8.09987332924755
[0].trajectory.dY.value	3.54174730559599
[0].trajectory.dZ.value	1.36078337285548
[0].trajectory.dRoll.value	-0.114582141319452
[0].trajectory.dPitch.value	0.286610553168481
[0].trajectory.dYaw.value	0.083462493872385
[1].trajectory.dX.value	0
[1].trajectory.dY.value	0
[1].trajectory.dZ.value	0
[1].trajectory.dRoll.value	0
[1].trajectory.dPitch.value	0
[1].trajectory.dYaw.value	0
[2].trajectory.dX.value	-8.06207731023042
[2].trajectory.dY.value	0.616141532095415
[2].trajectory.dZ.value	0
Sesiunea [2].trajectory.dRoll.value	0
[2].trajectory.dPitch.value	0
[2].trajectory.dYaw.value	0
[3].trajectory.dX.value	0

[3].trajectory.dY.value	0
[3].trajectory.dZ.value	0
[3].trajectory.dRoll.value	0
[3].trajectory.dPitch.value	0
[3].trajectory.dYaw.value	0
scanner.range.offset.value	0
scanner.range.scale.value	1
scanner.scanAngle.offset.value	0
scanner.scanAngle.scale.value	1
scanner.tiltAngle.offset.value	0
scanner.tiltAngle.scale.value	1
datum.dX.value	0
datum.dY.value	0
datum.dZ.value	0

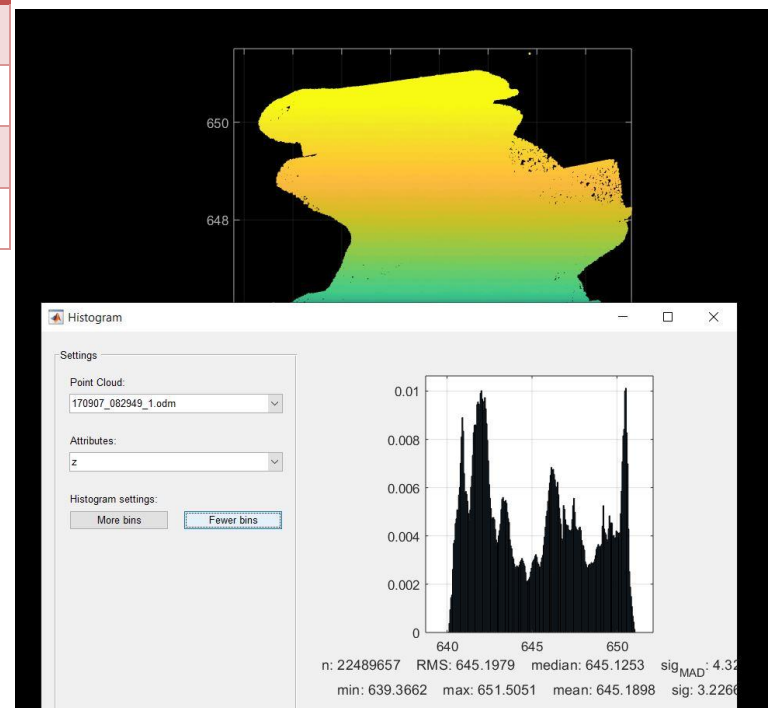
Pentru vizualizarea fișierelor finale ale norului de puncte compensat se utilizează modul Iview din cadrul softului Opals printr-o simplă linie de comandă. În momentul afișării sunt evidențiate numărul de puncte pentru fiecare fișier odm în parte.

```
Administrator: OPALS Shell 2.3.2.0 (win64, compiled on Jun 05 2019) - opalsView -inFile 170907_082949_1.odm 170907_083249_1.odm 170907_083635_1.odm 170907_083951_1.odm
D | I : POINTCLOUD > IMPORT : Point cloud label = '170907_083635_1.odm'
D | S : POINTCLOUD > IMPORT > READ DATA
Unexpected Standard exception from MEX file.
What() is:Manager file exceeds demo data limit.
...
Error in pcread (line 143)
Error in pointCloud (line 243)
Error in plot_addPC (line 10)
Error using pause (line 20)
Error while evaluating Menu Callback.
Plot window closed
22:36:12: Running opalsView took: 01:32:07
D:\opals\CEL MAI BUN!!!!\strips>opalsView -inFile 170907_082949_1.odm 170907_083249_1.odm 170907_083635_1.odm 170907_083951_1.odm
22:37:50: Running opalsView ...
22:37:50: Stage 1/2: Initializing Matlab Runtime Environment...
22:37:55: Stage 2/2: Load data and run viewer...
D | S : POINTCLOUD > IMPORT
D | I : POINTCLOUD > IMPORT : Point cloud label = '170907_082949_1.odm'
D | S : POINTCLOUD > IMPORT > READ DATA
```

Figura 28.
comanda de vizualizare a benzilor ALS compensate

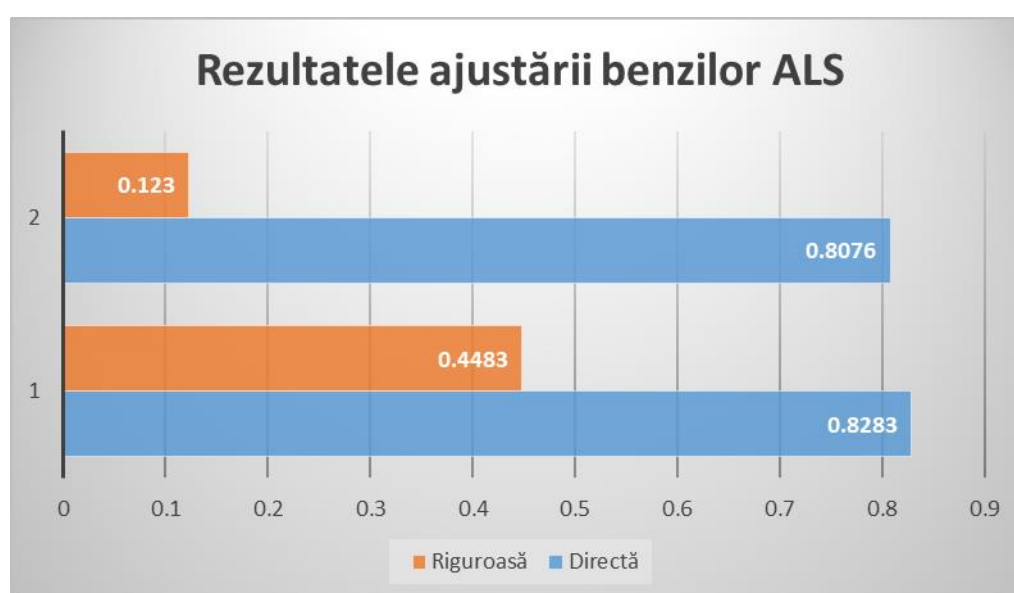
Tabelul cu nr. 9 conține numărul de puncte 3D din fișierele ALS compensate.

Numele benzi ALS compensată	Numărul de puncte din fiecare bandă
170907_082949_1	22489657
170907_083249_1	26150494
170907_083635_1	32283953
170907_083951_1	32694968



D. Compararea metodelor

Metoda folosită	Rezultate dupa Ajustare		
	Numărul de observații	Abaterea standard	Media
Directă	149	0.8283	0.8076
Riguroasă	96	0.4483	0.1230



Se poate observa că deși numărul observațiilor din zona de suprapunere a benzilor ALS este mai mare în metoda directă precizia metodei de ajustare riguroasă este net superioară. Atât valoarea abaterii standard cât și media obținute în urma compensării sunt aproximativ egale în metoda directă de ajustare și sunt de două ori și respectiv de șase ori mai mici la metoda riguroasă de compensare.

Un alt avantaj al metodei riguroasă de ajustare o reprezintă capacitatea de a alinia benzii ALS care conțin un volum mare de date. Si eliminarea pe o scară largă a discrepanțelor sistematice pentru un bloc de benzi ALS destul de mare- cum a fost și zona testată.

Concluzii

- Pentru un o zonă de scanare mare se recomandă utilizarea unor benzi transversale. Pentru a crește redundanța și încrederea compensării, se recomandă ca suprafețele de control să fie acoperite de o bandă de zbor de trecere iar benzile de date mai lungi să fie traversate de mai multe benzi transversale;
- Pentru georeferențierea directă nu avem nevoie decât de traiectoria dată de cele două sisteme GPS și INS și fișierele *.las originale, iar rezultatele sunt destul de satisfăcătoare dacă suprafața de scanare nu este una mare cu un volum mare de date;
- Cu cât zona de suprapunere este mai mare cu atât de mult este îmbunătățită alinierea benzilor ALS;
- Procesul de georeferențieră directă nu necesită un calculator performant, dacă setul de date nu prezintă un volum mare de informații sau dacă el este tăiat în prealabil pe diferite zone, întregul proces poate dura de la 10 minute pentru o zonă mică decupată până la maxim 1 oră pentru un volum mai mare de informații. Cum a fost și cazul datelor testate, cele 4 benzi din ziua de 02 februarie 2017;
- Pentru îmbunătățirea acestor metode de georeferențiere se pot utiliza și punctele măsurate la teren pentru a determina suprafața de control, utilizată în procesul de calibrare;
- Pentru compensare riguroasă este recomandată utilizarea punctelor de control la sol, pentru o apreciere cât mai exactă a acurateții. Parametrii acestor puncte de control la sol se definesc conform cerințelor softului;
- Dezavantajul acestei metode este clasificarea unui nor de puncte care poate avea în zona de suprapunere erori de câțiva cm- lucru care duce la generarea unor produse finale, cum este MDT-ul nu atât de precise;
- În cadrul celui de-al treilea Raport de cercetare voi introduce punctele de control la sol în metoda de ajustare riguroasă, prin modificare codului sursă – introducând parametrii de transformare a proiecției Stereo 70 – codul sursă a softului Transdat.
- Datorită lipsei diferitelor informații necesare în efectuarea ajustării riguroase a benzilor ALS, cum ar fi orientare exactă a scannerului în timpul montării pe platforma aeropurtată, au fost necesare diferite testări prin înlocuirea parametrului necesar.
- Parametrii introduși sunt în strânsă legătură cu datele de intrare, iar necunoașterea cu exactitate a datelor de intrare duce la testarea parametrilor pentru găsirea soluției exacte în realizarea alinierii benzilor ALS;
- Corespondențele trebuie stabilite cu atenție, deoarece au un efect mare asupra alinierii finale a benzilor ALS. Nu există corespondențe reale din punct de vedere al punctelor în datele ALS. Acest fapt trebuie luat în considerare prin minimizarea distanțelor dintre puncte și planul tangent al acestora (în locul minimizării distanțelor punct la punct);

- Alinierea riguroasă este mult mai precisă decât alinierea directă, deși numărul observațiilor din zona de suprapunere a benzilor ALS este mai mare în metoda directă;
- Softul permite utilizarea diferitelor epoci de achiziționare a datelor prin gruparea lor începând indexarea de la 0, atribuindu-i fiecărei traiectorii câte o sesiune;
- Softul permite utilizarea unui volum mare de date și alinierea unor benzi ALS într-un timp relativ scurt și cu o precizie ridicată;
- Singurul dezavantaj al acestei metode și utilizarea acestui soft îl reprezintă neinformarea corectă cu privire la datele de intrare;
- Este evidențiat în acest raport faptul că ținând cont de necesitatea și acuratețea produsului final rezultat din norul de puncte – cum este MDT-ul – se poate utiliza oricare dintre aceste 2 metode. Mai trebuie avut în vedere și tipul datelor de intrare avute.

Bibliografie

- J.A. Beraldin, F. Blais and U. Lohr, "Airborne and Terrestrial *laser Scanning", pag.20-30, 2010;
- Besl, Paul J. and N.D. McKay, "A Method for Registration of 3-D Shapes", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 14 (2): 239–256. doi:10.1109/34.121791, 1992;
- G. Blais and M. Levine, "Registering Multiview Range Data to Create 3D Computer Objects." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 17 (8):239–256, 1995;
- H. Burman, "Airborne strip adjustment for data calibration and verification", ", *Int. Archives of Photogr. and Remote Sensing (IAPRS)* Vol. 34 (3), A-67-72, Graz, Austria, 2002;
- Y. Chen and G. Medioni, "Object Modeling by Registration of Multiple Range Images." *IEEE Conference on Robotics and Automation*:2724– 2729,Sacramento,CA,USA , 1991;
- S. Filin and G. Vosselman,"Adjustment of airborne *laser altimetry strips". *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*34(PartB3),285–289, 2004;
- C. Glennie, "Rigorous 3d error analysis of kinematic scanning LIDAR systems." *Journal of Applied Geodesy* 1(3), pp.147– 157, 2007;
- P. Gliraa, N. Pfeiffera, C. Briesea and C. Ressler, "Rigorous Strip Adjustment Of Airborne *laser Scanning Data Base Don The Icp Algorithm", *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-3/W5, La Grande Motte, France 2015 *ISPRS Geospatial Week 2015*;
- A. Habib, and J. Rens," Quality assurance and quality control of lidar systems and derived data." In: *Advanced Lidar Workshop*, University of Northern Iowa, United States 2007;
- F., R. Hampel, "The Influence Curve and its Role in Robust Estimation." *Journal of the American Statistical Association* 69:383–393, 1974;
- M. Hebel, and U. Stilla," Simultaneous calibration of ALS systems and alignment of multiview LiDAR scans of urban areas". *Geoscience and Remote Sensing*, *IEEE Transactions on* 50(6), pp. 2364–2379, 2012;
- B. Horn, H. Hilden, and S. Negahdaripour,:"Closed-Form Solution of Absolute Orientation Using Orthonormal Matrices." *Journal of the Optical Society of America A* 5 (7): 1127–1135, 1998;
- D. Iordan, "Aplicarea Tehnologiilor *laser La Studiul Topografic Al Bazinului Hidrografic Someș-Tisa", teză de doctorat, Universitatea Din București Facultatea De Geologie Și Geofizică Școala Doctorală De Geologie,cap 1, parag. 2.3.3, 2014;
- B. Jutzi and U. Stilla, "Range determination with waveform recording *laser systems using a Wiener Filter," in *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 61, no. 2, pp. 95–107, November 2006;
- W. Kornus and A. Ruiz, "Strip Adjustment Of Lidar Data ", *V Semana Geomática de Barcelona*, 2003;
- T. Masuda and N. Yokoya, "A Robust Method for Registration and Segmentation of Multiple Range Images" *Computer Vision and Image Understanding* 61 (3): 295–307, 1995;
- N. Pfeiffer, E. Oude, S. Filin,"Automatic tie elements detection for *laser scanner strip adjustment." *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (Part3/W19), 8 (onCDROM) 2005;
- P. Rieger, "The Vienna *laser scanning survey," in *GEOconnexion International Magazine*, pp. 40–41, May 2008;
- C. Ressler, N. Pfeiffer and G. Mandlbürger, "Applying 3D affine transformation and least squares matching for airborne *laser scanning strips adjustment without GNSS/IMU trajectory data." In: *Proceedings of ISPRS Workshop *laser Scanning*, Calgary, Canada, 2011;

- C. Ressler, G. Mandlbauer, N. Pfeifer, "Investigating adjustment of airborne *laser scanning strips without usage of GNSS/IMU trajectory data," in *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 38, no. 3/W8, pp. 195–200, September, 2009;
- S. Rusinkiewicz, M. Levoy, "Efficient variants of the ICP algorithm" – 3Rd international conference on 3d digital Mapping and Modeling: 145–152, Quebec, Canada, 2001;
- C., M. Shkarji, "Least-squares fitting algorithms of the NIST algorithm testing system." *Journal of Research-National Institute of Standards and Technology* 103:633–641, 1998;
- G., C. Sharp, S., W. Lee, and D., K. Wehe, "ICP registration using invariant features." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 24(1): 90–102, 2002;
- J. Skaloud, P. Schaer, Y. Stebler and P. Tomé, "Real-time registration of airborne *laser data with sub-decimeter accuracy", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, doi:10.1016/j.isprsjprs.2010;
- J. Skaloud, "Reliability of direct georeferencing – beyond the achilles' heel of modern airborne mapping. „ In: D. Fritsch (ed.), *Photogrammetric Week '07*, pp. 227–241, 2007;
- J. Skaloud and D. Lichti, "Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne *laser scanning". *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 61(1), pp. 47–59, 2006;
- U. Stilla and B. Jutzi, "Waveform Analysis for Small-Footprint Pulsed *laser Systems," in *Topographic *laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, J. Shan and C. K. Toth, Eds. CRC Press, Boca Raton, pp. 215–234, 2008;
- C. K. Toth, "Calibrating airborne lidar systems." In: *ISPRS Commission II, Symposium 2002, Xian, China, ISPRS Archives, Volume XXXIV Part 2*, pp. 475–480, 2002;
- C.K. Toth, "Strip Adjustment and Registration", *Topographic *laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*.—CRC Press 2008;
- W. Wagner, A. Ullrich, V. Ducic, T. Melzer, N. Studnicka, "Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne *laser scanner," in *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 60, no. 2, pp. 100–112, April 2006;
- C. Yang and G. Medioni, "Object modelling by registration of multiple range images". *Image Vision Comput.* 10 (3): 145–155. doi:10.1016/0262-8856(92)90066-C, 1991;
- Z. Zhengyou, "Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces", *International Journal of Computer Vision*. 13 (12): 119–152. CiteSeerX 10.1.1.175.770. doi:10.1007/BF01427149, 1994;
- https://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter
- https://opals.geo.tuwien.ac.at/html/stable/usr_sw_concept.html
- <https://opals.geo.tuwien.ac.at/html/stable/ModuleStripAdjust.html>
- https://en.wikiversity.org/wiki/Aircraft_piloting/Attitude_flying