

ارزیابی کنترل کیفیت ابر نقاط سنجنده لایدار مبتنی بر کالیبراسیون هندسی

محمد سعادت سرشت^۱ یاسین قربانی فولادی^۲

msaadat@ut.ac.ir+qorbani.yasin@ut.ac.ir

چکیده:

سیستم های لایدار، امروزه یک تکنولوژی رایج برداشت اطلاعات سه بعدی عوارض سطح زمین است که امکان تولید سریع و دقیق مدل های سطح زمین را فراهم می سازد. در روند تصحیح داده ی لایدار ، بایستی خطاهای سیستماتیک مدل شوند که این کار مبتنی بر کالیبراسیون سیستم لایدار می باشد. پروسه ی کالیبراسیون با استفاده از معادله مشاهداتی لایدار و اندازه گیری های خام GPS، INS و لیزر اسکنر خطاهای سیستماتیک را بهبود می بخشد. با در نظر گرفتن تاثیرات کالیبراسیون بر روی نتایج داده، می توان طراحی پرواز بهینه را انجام داد و با ارزیابی درجه سازگاری میان ردپاهای لیزر در نوارهایی که هم پوشانی دارند برآوردی از کنترل کیفیت داده داشت. این مقاله روشی را برای ارزیابی کنترل کیفیت ابرنقاط سنجنده لایدار پیشنهاد می کند. در روش پیشنهاد شده سه مرحله اساسی برای ارزیابی کنترل کیفیت ذکر شده است که عبارتند از استخراج و تناظریابی اولیه عوارض، اندازه گیری های مشابه و برآورد سطح نویز. در انتها نتایج به دست آمده از هر مرحله با یک تست تجربی مورد ارزیابی قرار می گیرد.

واژه های کلیدی: خطاهای سیستماتیک، واحد لیزر، کالیبراسیون سیستم لایدار، طراحی پرواز، کنترل کیفیت

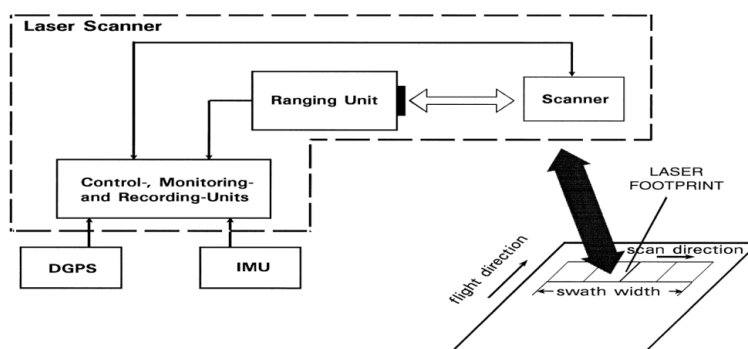
۱- استادیار گروه مهندسی نقشه برداری ، دانشگاه تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری ، گروه مهندسی نقشه برداری ، دانشگاه تهران

مقدمه

این اساس سیستم های لایدار امروزی از سه بخش اصلی تشکیل شده اند که عبارتست از سیستم اسکن لیزری به منظور اندازه گیری فاصله ی بین نقطه ی ارسال پالس و سطح زمین، سیستم تعیین موقعیت جهانی تفاضلی به منظور تعیین مختصات محل ارسال لیزر و سیستم INS به منظور اندازه گیری زاویه ی ارسال لیزر. بنابراین با داشتن سه پارامتر موقعیت مرکز ارسال لیزر، امتداد ارسال لیزر و فاصله مایل بین مرکز ارسال لیزر و هر نقطه زمینی، مختصات آن نقطه محاسبه می شود.

لایدار یک تکنیک جمع آوری اطلاعات از سطح اشیا است که بر مبنای اندازه گیری فاصله به وسیله لیزر عمل می کند. اندازه گیری لایدار بر این اصل استوار است که مختصات هر نقطه روی زمین با مشخص بودن مختصات محل ارسال لیزر، اندازه گیری طول فاصله مایل بین نقطه ارسال پالس و سطح زمین و اندازه گیری زاویه ارسال موج از محل ارسال پالس تا سطح زمین قابل محاسبه است. بر



شکل ۱- طرح کلی یک سیستم لایدار

تعیین موقعیت جهانی تفاضلی و IMU با هم ترکیب شوند . مدل مشاهده به صورت زیر بیان می شود.

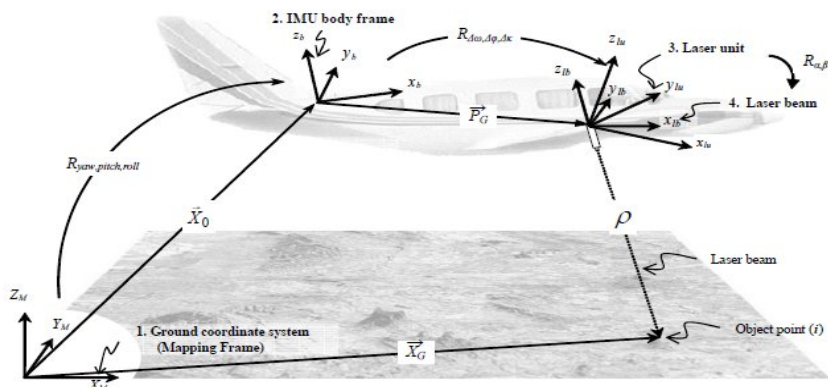
معادله مشاهداتی لایدار

برای به دست آوردن مختصات هر نقطه روی سطح زمین، باید اطلاعات فاصله یاب لیزری، سیستم اسکن، سیستم

$$X_G = X_O + R_{yaw,pitch,roll} P_G + R_{yaw,pitch,roll} R_{\Delta\omega,\Delta\varphi,\Delta\kappa} R_{\alpha,\beta} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho \end{pmatrix} \quad (1)$$

زمینی و سیستم مختصات IMU، $R_{\Delta\omega,\Delta\varphi,\Delta\kappa}$ ماتریس دوران بین سیستم مختصات IMU و سیستم مختصات واحد لیزر، $R_{\alpha,\beta}$ ماتریس دوران بین سیستم مختصات واحد لیزر و سیستم مختصات جهت لیزر، می باشد.

در رابطه ی فوق X_G بردار مختصات زمینی نقاط ثبت شده توسط لیزر، X_O بردار بین مرکز سیستم مختصات زمینی و مرکز سیستم مختصات IMU، P_G آفست بین واحد لیزر و سیستم مختصات IMU، ρ بردار لیزر، ماتریس دوران بین سیستم مختصات



شکل ۲- سیستم های مختصات و کمیت های موجود در معادله لایدار

کالیبراسیون سیستم لایدار

دقت نتایج یک سیستم ALS بستگی به دقت سیستم GPS، IMU و Laser range دارد برای به دست آوردن بالاترین دقت نیاز است تا همه مولفه های ALS کالیبره شوند. به طور کلی می توان روند کالیبراسیون را به دو گروه تقسیم نمود که عبارتند از کالیبراسیون قبل از پرواز، کالیبراسیون بعد از پرواز.

کالیبراسیون قبل از پرواز

این مرحله مربوط به قبل از انجام پرواز و اخذ دیتا می باشد که توسط کارخانه سازنده صورت می پذیرد و مولفه های سیستم به صورت جداگانه کالیبره می شوند.

کالیبراسیون بعد از پرواز

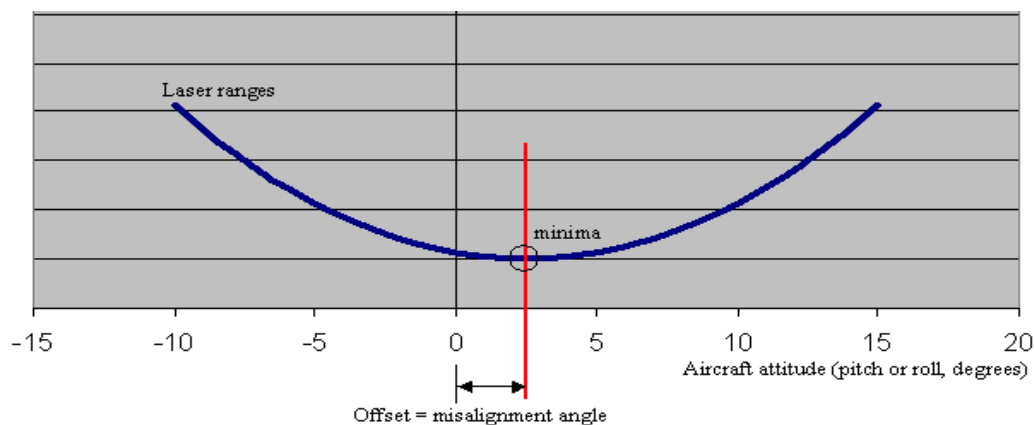
چندین پارامتر کالیبراسیون وجود دارد که نمی تواند به طور مستقیم اندازه گیری شود. این پارامترها شامل خطاهای بزرگ هستند که عبارتند از: زاویه بین شتاب سنج های INS و فریم اسکنر که به عنوان یک مجموعه از محورها بر روی آینه اسکنر تعریف می شود. در هر سیستم ALS نیاز است این پارامترها تعیین شوند. متد استاندارد برای تعیین این پارامترها وجود ندارد تکنیک

منابع خطا در سیستم لایدار

کیفیت ابرنقاط به دست آمده از سیستم لایدار وابسته به خطاهای سیستماتیک و اتفاقی اندازه گیری ها و پارامترهای سنجنده است. مقدار خطاهای اتفاقی به دقت اندازه گیری های سیستم، شامل تعیین موقعیت، توجیهات، زاویه آینه و طول بستگی دارد، همچنین خطاهای سیستماتیک به علت بایاس پارامترهای boresight ایجاد می شود. به طور کلی می توان خطاهای سیستم لایدار را به چهار دسته تقسیم بندی کرد که عبارتند از خطاهای سیستم ناوبری که شامل خطاهای GPS و INS می باشد. از جمله خطاهای سیستم GPS، می توان به خطای یونسفر و تروپوسفر، خطاهای مداری، ابهام فاز و هندسه ماهواره اشاره کرد. خطای دریافت ژيروسکوپ و خطاهای roll، pitch و heading از جمله خطاهای INS می باشند. دسته دوم خطاها مربوط به اسکنر است. از جمله خطاهای اسکنر میتوان به خطاهای اندازه گیری range finder لیزر و خطای encoder اسکنر اشاره کرد. دسته سوم خطاها مربوط به ترکیب سه سیستم INS، GPS و لیزر اسکنر است که از جمله این خطاها می توان به خطای ترانسفورماسیون بین سنسورها و سیستم مختصات و همچنین خطای هم زمانی اشاره کرد. دسته چهارم خطاها خطاهای محیطی است که شامل شرایط اتمسفری، هندسه زمین و پوشش زمین است.

محور صفر سیستم مختصات نمایش داده شده است . پارامترهای کالیبراسیون توسط ترسیم زاویه (roll, pitch) در برابر range اندازه گیری شده تعیین می شود

های متنوعی با استفاده از قیود سطح و سرشکنی کمترین مربعات برای حل این پارامترها پیشنهاد شده است. در شکل زیر می توان اثر زاویه Misalignment را مشاهده نمود که توسط آفست بین مینیمم منحنی و



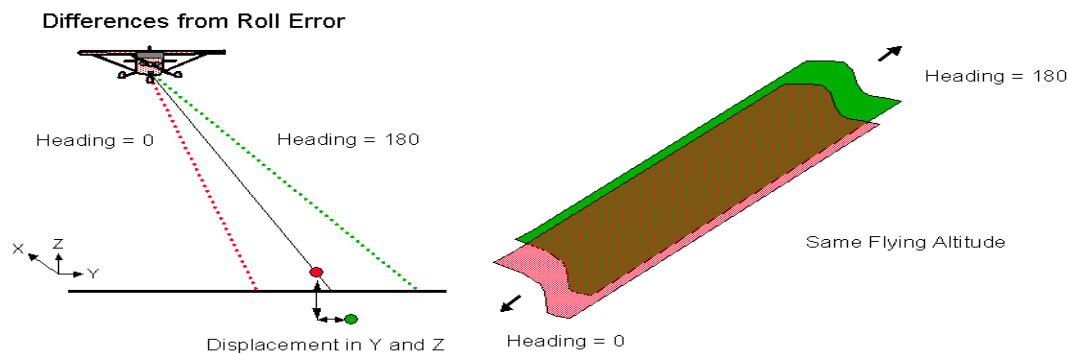
شکل ۳- roll and pitch misalignment

صاف است، مشروط بر این که تاثیرات خطای misalignment مدل شده باشد.

Roll misalignment موجب می شود که فاصله اندازه گیری شده در موقعیت نادرست نشان داده شود. بیشترین عدم انطباق در نوارهایی که هم پوشانی دارند، در جهت مثبت محور نوار ایجاد می شود . جابجایی در راستای Y و Z صورت می گیرد .

طراحی پرواز

به منظور حل پارامترهای کالیبراسیون با بالاترین دقت و پایداری، بایستی هم پوشانی بین نوارها ماکزیمم باشد . بدین منظور طراحی پرواز نیاز است با در نظر گرفتن تاثیرات کالیبراسیون بر روی نتایج داده انجام گیرد. در کاربردهای کلی و تجاری ALS ، کالیبراسیون پروازها در باندهای فرودگاه به گونه ای که کاملاً صاف باشد صورت می گیرد . بنابراین طراحی پرواز نیازمند داشتن سطح

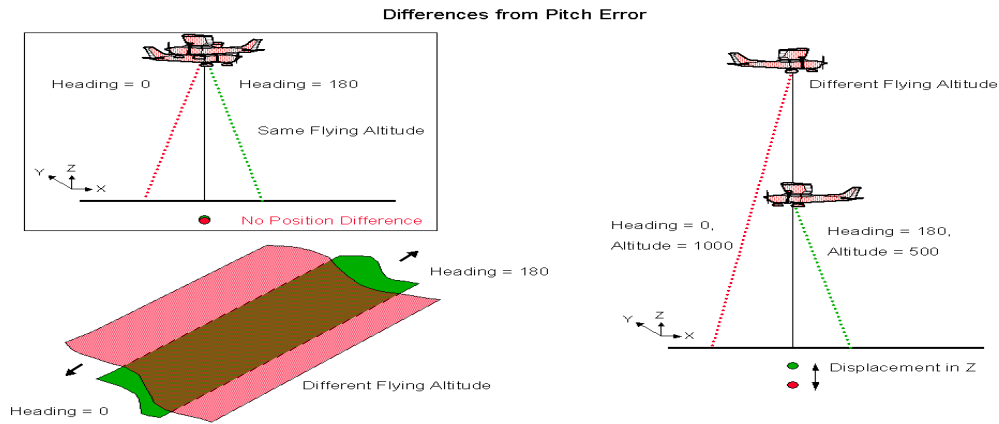


شکل ۴- تاثیر خطای roll در هم پوشانی داده

برداشت شوند، یک اختلافی در موقعیت نقطه در راستای قائم ایجاد می شود. این اختلاف به ارتفاع پرواز بستگی دارد و از رابطه زیر به دست می آید.

$$\Delta h = (H_1 - H_2) \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (2)$$

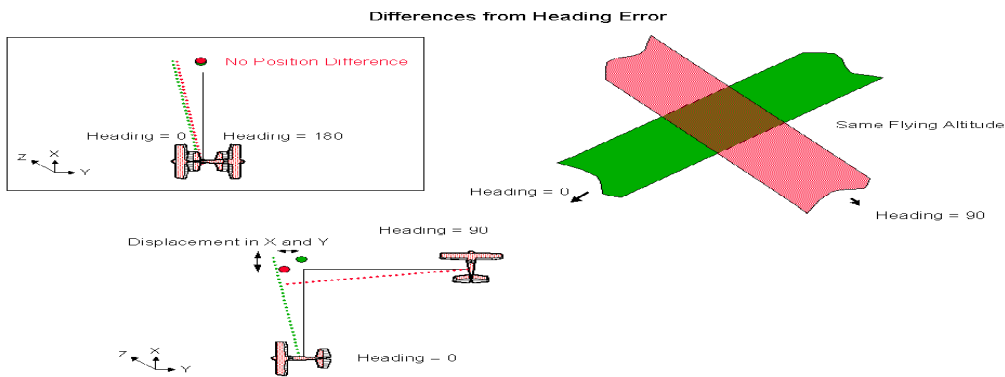
بر روی زمین های شیب دار، همان استدلال فوق برای خطای pitch misalignment صادق است. بر روی زمین صاف، اگر دو نوار با ارتفاع های پرواز یکسان ولی در جهت مخالف یکدیگر برداشت شوند، موقعیت نقطه تغییر نخواهد کرد ولی اگر با ارتفاع های پرواز متفاوت دو نوار



شکل ۵- تاثیر خطای pitch در هم پوشانی داده

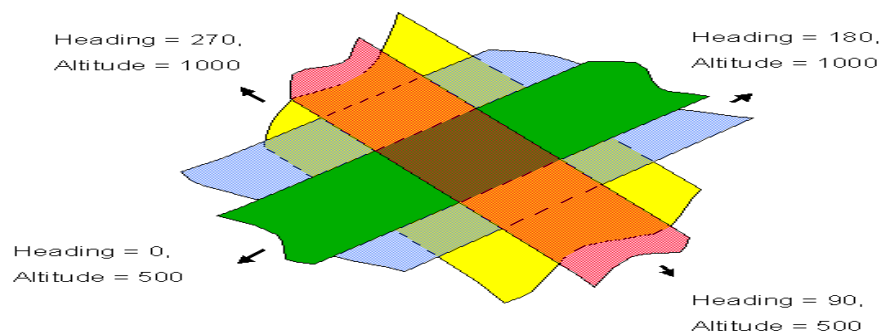
اختلاف ایجاد می گردد و این جابجایی در راستای X و Y می باشد. با این شرایط اندازه گیری عوارض پلانیمتریک مشکل تر است چون دقت افقی داده ی ALS پایین است.

تأثیرات مستقیم و معکوس این خطا جابجایی یکسانی بر روی نقطه ثبت شده ایجاد می کند. اگر خطوط پرواز با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم توجیه شده باشند بیشترین



شکل ۶- تاثیر خطای heading در هم پوشانی داده

ترکیبی از پارامترهای فوق را می توان برای داشتن الگوی پرواز بهینه در شکل زیر مشاهده نمود.



شکل ۷- الگوی پرواز بهینه برای کالیبراسیون

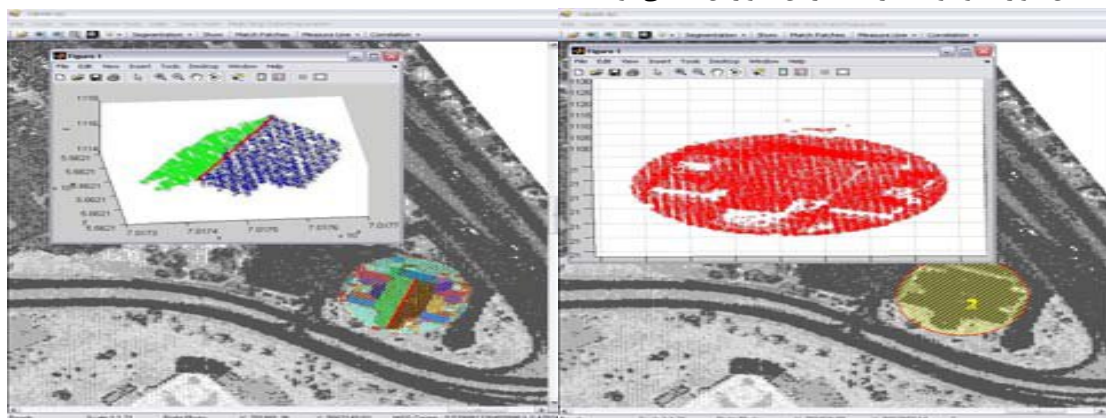
سطحی به کار گرفته می شوند. عوارض خطی از تقاطع patch های همسایه به دست می آید. بدین صورت که تصاویر Intensity لایدار داریم، در نوارهایی که هم پوشانی دارند اپراتور یک ناحیه که عارضه ی خطی در آن وجود دارد را انتخاب می کند (به عنوان مثال سقف). کاربر بر روی مرکز ناحیه بعد از تعریف شعاع دایره، کلیک می کند.

کنترل کیفیت داده لایدار

کنترل کیفیت، مبتنی بر ارزیابی درجه سازگاری میان ردپاهای لیزر، در نوارهایی است که هم پوشانی دارند. مراحل کنترل کیفیت عبارتند از:

استخراج اولیه و تناظریابی

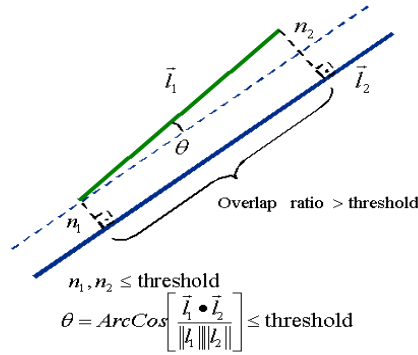
به علت طبیعت نامنظم داده های لایدار، تناظر نقطه به نقطه بین نوارها وجود ندارد. بنابراین عوارض خطی و



شکل ۸- ناحیه انتخاب و استخراج عوارض خطی به وسیله تقاطع patch های سطحی سگمنت شده

هیچ تضمینی وجود ندارد که یک تناظر یک به یک بین عوارض استخراج شده وجود داشته باشد. برای حل این مشکل، یک راه استفاده از خصوصیات عوارض استخراج شده است. عوارض خطی متناظر می تواند به صورت اتوماتیک با استفاده از فاصله نرمال، همسانی و درصد هم پوشانی بین خطوط کاندیدا، تناظریابی شود.

برای استخراج عوارض خطی، patch های سطحی همسایه تعریف می شود و پارامترهای سطح تعیین می گردد. سپس سطوح همسایه تقاطع داده می شوند تا یک خط مستقیم نامحدود تولید گردد. با استفاده از patch های سگمنت شده نقاط انتهایی خط تعیین می شود. به علت طبیعت اخذ داده لایدار (زاویه اسکن، نرمال سطح و ...)

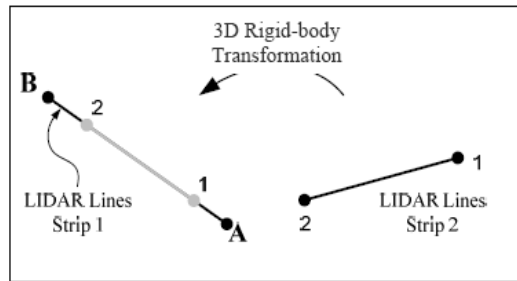


شکل ۹- تناظر یابی عوارض خطی متناظر در نوارهایی که هم پوشانی دارند.

اندازه گیری مشابه

داده می شوند، به منظور جبران کردن عدم تناظر بین نقاط انتهای خط، قیود لازم معرفی می شود تا پس از تعیین پارامترهای ترانسفورماسیون سه بعدی، متناظر خط موجود در نوار اول را در نوار دوم مشخص کند.

در این بخش تناظریابی عوارض به کمک تابع ترانسفورماسیون توصیف می شود. خطوط متناظر با نقاط انتهایشان نمایش



شکل ۱۰- عوارض خطی متناظر در دو نوار برای تعیین پارامترهای ترانسفورماسیون

نمایش ریاضی این قیود برای این نقاط طبق معادله زیر است.

$$\begin{pmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{pmatrix} + R_{(\Omega, \Phi, K)} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix} + \lambda_1 \begin{pmatrix} X_E - X_A \\ Y_E - Y_A \\ Z_E - Z_A \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{pmatrix} + R_{(\Omega, \Phi, K)} \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix} + \lambda_2 \begin{pmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{pmatrix} \quad (4)$$

ترانسفورماسیون را به دست آورد (حداقل ۲ خط غیر هم صفحه نیاز می باشد).

با خلاصه سازی معادلات (۳) و (۴) به معادله ی زیر می رسیم و بدین ترتیب می توان شش پارامتر

$$\frac{(X_T+x_1-X_A)}{(Z_T+z_1-Z_A)} = \frac{(X_T+x_2-X_A)}{(Z_T+z_2-Z_A)} \quad (5)$$

$$\frac{(Y_T+y_1-Y_A)}{(Z_T+z_1-Z_A)} = \frac{(Y_T+y_2-Y_A)}{(Z_T+z_2-Z_A)} \quad (6)$$

که در معادلات فوق:

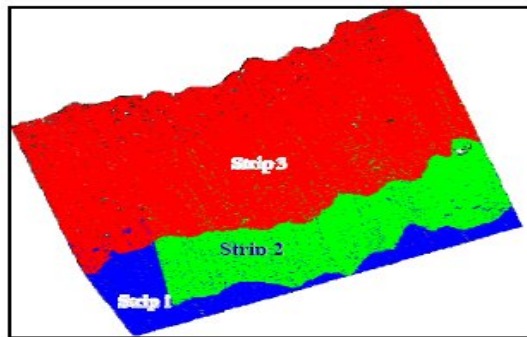
$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = R_{(\Omega, \Phi, \kappa)} \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} \quad \text{و} \quad \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = R_{(\Omega, \Phi, \kappa)} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix}$$

تست تجربی

برای ارزیابی دقت روش پیشنهادی، تستی بر روی dataset حقیقی صورت گرفت. dataset استفاده شده یک منطقه شهری است که شامل سه نوار می باشد

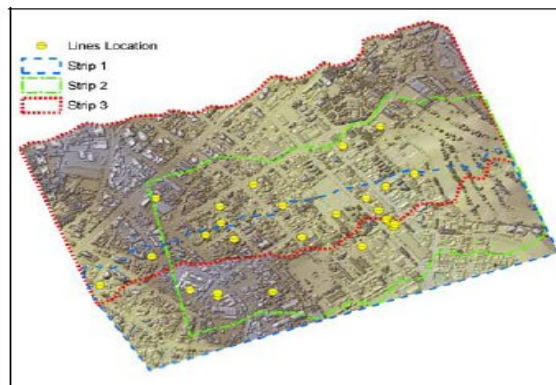
برآورد سطح نویز

سطح نویز در داده لایدار به کمک میزان انطباق عوارض متناظر ارزیابی می شود. این مساله می تواند به کمک محاسبه فاصله نرمال متوسط بین عوارض خطی متناظر بعد از به دست آوردن پارامترهای ترانسفورماسیون انجام شود.



شکل ۱۱- dataset استفاده شده برای تست

خطوط متناظر استخراج شده را می توانید در سه نوارى که هم پوشانی دارند، ملاحظه نمایید که با نقاط زرد رنگ نمایش داده شده اند.



شکل ۱۲- خطوط استخراج شده در سه نوار

جدول (۱) پارامترهای ترانسفورماسیون برآورد شده بین نوارها را نشان می دهد.

<u>Transf. Parameters</u>	Strips 1&2	Strips 2&3	Strips 3&4
$x_T(m)$	0.39	0.72	-0.09
$y_T(m)$	0.06	-0.17	0.21
$z_T(m)$	0.01	0.01	-0.14
Ω	-0.0174	-0.0300	0.0119
Φ	-0.0096	-0.0093	0.0011
κ	0.0027	-0.0133	-0.0212
RMSE	0.12	0.15	0.20

جدول ۱- پارامترهای ترانسفورماسیون برآورد شده بین نوارها به همراه RMSE

عوارض قابلیت انعطاف و پتانسیل بالایی دارد. یکی از مواردی که در این مقاله مورد تایید قرار گرفت، ضرورت انجام پیش پردازش قبل از انجام هرگونه پردازش بر روی داده است. چرا که عدم حذف مشاهدات اشتباه، می تواند کیفیت نتایج سایر مراحل را به میزان بسیار زیادی تحت تاثیر قرار دهد. همچنین قابلیت طراحی پرواز بهینه و انجام کالیبراسیون، برای کنترل دقت در مولفه های سیستم وجود دارد و بدین ترتیب می توان کنترل کیفیت ابر نقاط را ارزیابی نمود.

سطح نویز، با محاسبه فاصله نرمال متوسط بین عوارض خطی متناظر پس از به دست آوردن پارامترهای ترانسفورماسیون، ارزیابی شده است. در واقع RMSE برآورد شده بیان گر سطح نویز می باشد.

نتیجه گیری

امکان اخذ سریع داده های توپوگرافی قابل اطمینان و دقیق بدون نیاز به انجام پیمایش به کمک LIDAR امکان پذیر است و LIDAR در اتوماتیک سازی روند استخراج

منابع

10Shenck, T., 1999, "photogrammetry and laser altimetry", in processing of the ISPRS

wprkshop on mapping surface and Topography by Aire borne and spaceborne lasers, 1999, Lajollan.USA.

20Walker, MK, 2002,"calibration of Airborne Laser Scanner",M.sc. thesisi,departman of geomatics enginnering,university of Calgary

30Baltsavias,. 1999, "A Comparison between LIDAR and photogrametry", in processing of the ISPRS journal.

40Baltsavias, E., 1999. "Airborne laser scanning:existing system and firm and other resourses",ISPRS journal of photogrametry an Remote Sensing.

50Kilin, J, N. Haala, and M. English (2003)."Capture and evaluation of airborne laser scanner data"Internation Archived of photogrametry and remote sensing.

60Habib, A.F, 2009,"Error Budget of LIDAR systems and Quality Control of The Derived Point cloud",ISPRS journal of photogrametry and Remote sensing.

70Petzold, Bettina,et al., 2004, "laser scanning-surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models", ISPRS journal of photogrametry and Remote sensing.

80Burman, H., 2000."Calibration and Orientation of Airborne image and Laser Scanner Data Using GPS and INS",ph.D dissertation,Royal institute of Technology.

90Huising E.J., 2005. "Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications,ISPRS journal.

100Katzenberisser, R., 2003. "About the Calibration of LIDAR sensors", processing of the ISPRS.

110 Skaloud,J., and D.Lichti, 2006."Rigorous Approach to boresight Self-Calibration in airborne laser scanning", ISPRS Journal photogrametry and Remote sensing.