

Géoréférencement direct des images par GPS/INS: Approche rigoureuse pour le calibrage des excentricités angulaires (boresight calibration)

Au cours de la dernière décennie, les systèmes de cartographie mobile utilisant GPS et INS pour la détermination directe des paramètres d'orientation (géoréférencement direct) sont devenus une alternative pertinente aux techniques s'appuyant sur le géoréférencement indirect. De nouvelles techniques d'acquisition de données spatiales n'étant pas basées sur des images, comme le LiDAR ou le RADAR, dépendent entièrement de cette nouvelle approche.

Même si beaucoup d'applications pratiques démontrent que les systèmes de géoréférencement direct peuvent concurrencer l'aéro-triangulation classique, nombre d'utilisateurs sont encore très sceptiques sur l'adoption de cette méthode dans la production. Le géoréférencement direct sans points d'ajustage est basé sur une extrapolation des paramètres d'orientation. Ceci implique que chaque erreur commise dans le calibrage du système intégral influence directement la qualité de localisation. Par conséquent, le processus de calibrage est une étape cruciale pour le géoréférencement direct et doit être réalisé avec beaucoup de soin.

Cet article présente quelques nouveautés pour le calibrage des excentricités angulaires (boresight calibration). L'algorithme développé tient compte du modèle stochastique des données d'entrée et permet ainsi de calculer une solution pondérée des excentricités angulaires tout en fournissant une estimation rigoureuse de leur précision. Ce nouvel algorithme se distingue particulièrement avec l'introduction d'une corrélation temporelle entre les mesures inertielles. Les premiers tests pratiques ont donné des résultats prometteurs.

Im Verlauf des letzten Jahrzehnts haben sich Systeme zur direkten Georeferenzierung von Bildern anhand von GPS/INS zu einer valablen Alternative zu den indirekten Referenzierverfahren entwickelt. Akquisitionssysteme von Geodaten, welche nicht auf Bildsensoren basieren, wie z.B. LiDAR und RADAR, sind völlig auf diese neue Art der Georeferenzierung angewiesen.

Etliche praktische Beispiele haben aufgezeigt, dass die direkte Georeferenzierung durchaus mit der klassischen Aero-triangulation konkurrenzieren kann. Trotzdem sind viele Anwender sehr skeptisch diese Methode in der Produktion anzuwenden. Direkte Georeferenzierung ohne Verwendung von Kontrollpunkten basiert auf einer Extrapolation des Orientierungsparameter. Dies hat zur Folge, dass jeder Fehler in der Systemkalibrierung direkt die Qualität der Punktbestimmung beeinflusst. Deshalb ist die Systemkalibrierung innerhalb der direkten Georeferenzierung eine sehr entscheidende Etappe und muss mit viel Sorgfalt ausgeführt werden.

Dieser Artikel hat zum Ziel einige neue Ansätze zur Berechnung der Winkelmissweissungen (boresight calibration) vorzustellen. Der neu entwickelte Algorithmus berücksichtigt die Präzision der Eingabedaten. Dies ermöglicht es eine gewichtete Lösung zu berechnen und eine realistische Schätzung der Präzision der Winkelmissweissungen zu liefern. Der Algorithmus besticht vor allem durch die Einführung einer temporalen Korrelation zwischen den Inertialmessungen. Erste praktische Versuche mit dem Algorithmus haben vielversprechende Resultate geliefert.

Philipp Schaer, EPFL-TOPO

Jan Skaloud, EPFL-TOPO

Julien Vallet, EPFL-PHOT

Introduction

L'étape la plus importante dans l'acquisition des données par photogrammétrie est le géoréférencement des images, qui permet la restitution des objets. L'aéro-triangulation, qui est le procédé de géoréférencement le plus couramment utilisé, se base sur l'utilisation de points d'ajustage. Selon le terrain, cette méthode « indirecte » nécessite beaucoup de temps et de ressources humaines. En plus, cette approche ne peut être utilisée que pour des capteurs basés sur des images. De nouveaux systèmes d'acquisition de données spatiales non basés sur des images, comme le LiDAR ou le RADAR, nécessitent un procédé de référencement différent.

Dès la fin des années 80, les progrès dans la localisation cinématique et la navigation ont permis le développement de méthodes de géoréférencement « direct » des capteurs utilisés en photogrammétrie et télédétection. Les technologies phares sont la localisation par GPS et la navigation inertielle [Schwarz et al., 1993].

La qualité de l'orientation directe d'une image aérienne par GPS/INS dépend principalement de la qualité du calibrage du système intégral. A côté des paramètres

internes de la caméra, les composantes critiques à calibrer sont les excentricités linéaires et angulaires des capteurs du système. Ces excentricités angulaires ont une très grande influence sur la précision de localisation, et feront donc l'objet d'une étape cruciale dans le procédé de géoréférencement direct.

Cet article donne un court aperçu du concept du géoréférencement direct et expliquera brièvement l'influence des différents paramètres calibrables sur la précision de la localisation. La partie principale est dédié à la problématique du calibrage des excentricités angulaires, pour lesquelles une approche rigoureuse et innovatrice de leur estimation est proposée.

Le concept du géoréférencement direct

Pour géoréférencer une image, les paramètres d'orientation internes et externes doivent être déterminés. Les paramètres d'orientation interne (coordonnées du point principal, focale, distorsion géométrique de la lentille) peuvent être mesurés en laboratoire. On peut considérer ces paramètres comme

constants dans le temps. Par contre, les éléments de l'orientation externe ($X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \omega, \kappa$) changent rapidement et leur évolution doit être suivie par des mesures en temps réel.

Tout système capable de fournir les informations de position et d'attitude avec une précision suffisante peut être utilisé pour le géoréférencement direct, par autant que les conditions suivantes soient remplies :

- les excentricités linéaires et angulaires entre les différents cadres associés aux capteurs du système peuvent être déterminées avec une précision suffisante,
- ces excentricités restent constantes ou leur variation peut être modélisée,
- les capteurs peuvent être synchronisés avec une précision suffisante sur une base de temps commune.

Modèle mathématique

La formulation mathématique du géoréférencement direct peut être exprimée comme suit :

$$\vec{r}_p^E = \vec{r}_{GPS}^E + R_b^E (a_0^b + s_p R_C^b \vec{r}_p^C) \quad [1]$$

où

a_0^b Excentricité linéaire entre le centre de projection et le centre de navigation de l'unité inertielle (IMU) dans le cadre de l'IMU (body - frame). Ce terme est supposé constant dans le temps.

$R_b^E (r,p,y)$ Matrice de rotation du cadre body (IMU) vers le cadre de l'objet (Earth - frame). Les angles d'orientation (roulis, tangage, lacet) sont mesurés par l'unité inertielle. Ils varient dans le temps.

$R_C^b (e_x, e_y, e_z)$ Matrice de rotation (boresight matrix) du cadre caméra vers le cadre body. Les excentricités angulaires e_x, e_y, e_z sont déterminées par calibrage. Elles sont supposées constantes dans le temps.

\vec{r}_{GPS}^E Centre de projection mesuré par GPS/INS dans le cadre objet

\vec{r}_p^C Coordonnées image du point dans le cadre de la caméra

\vec{r}_p^E Coordonnées du point dans le cadre objet

s_p Facteur d'échelle

Influence des erreurs de calibrage sur la précision de localisation

Comme le géoréférencement direct est basé sur une extrapolation des paramètres d'orientation, la précision du calibrage du système (orientation interne de la caméra, excentricités linéaires et angulaires) est le facteur limitant pour la précision de localisation. Celle-ci dépend directement de la précision du calibrage [Ellum, 2002] propose d'estimer l'influence des différentes composantes à calibrer par la dérivation de premier ordre de [1]:

l'erreur sur l'excentricité linéaire

$$d\vec{r}_p^E = R_b^E da_0^b \quad [2]$$

l'erreur sur l'excentricité angulaire (boresight)

$$d\vec{r}_p^E = R_b^E dR_C^b s_p \vec{r}_p^C \quad [3]$$

l'erreur sur les paramètres internes

$$d\vec{r}_p^E = R_b^E s_p R_C^b d\vec{r}_p^C \quad [4]$$

Basé sur ces dérivées partielles, l'influence des différentes composantes peut être estimée:

- La contribution des **excentricités linéaires** sur la précision de localisation ne dépend que de l'orientation de l'image (voir [2]). Ainsi l'ordre de grandeur de leurs contribution est égale à l'erreur et peut être négligée.
- Une imprécision sur les **excentricités angulaires** est amplifiée par l'échelle de l'image s_p (\rightarrow hauteur de vol) et a ainsi une influence significative sur la précision de la localisation.
- La relation [4] démontre qu'une imprécision sur les **paramètres internes** est multipliée par le facteur d'échelle. Dans le cas d'une image aérienne, une imprécision sur la focale influence principalement l'estimation du Z tandis qu'une imprécision sur le point principal se répercute sur une imprécision en X et Y.

Calibrage des excentricités angulaires (boresight)

En considérant le montage physique de l'IMU et de la caméra, un alignement parfait entre les deux systèmes n'est pas possible. Par conséquent, il faut une matrice de rotation $R_b^C (e_x, e_y, e_z)$ pour décrire les excentricités angulaires résiduelles entre le cadre IMU et le cadre caméra (voir Fig. 1).

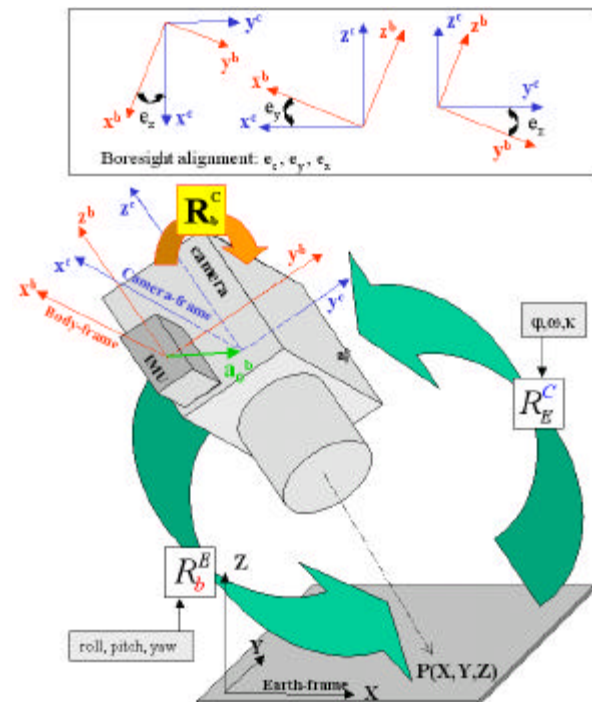


Figure 1 : Procédé de calibrage « 2-step »

Les excentricités linéaires peuvent souvent être déterminées par des mesures conventionnelles (théodolite,..) avec une précision centimétrique. Ceci n'est pas possible pour les excentricités angulaires. Il faut les déterminer indirectement en utilisant la photogrammétrie. Normalement le calibrage se fait

avec un vol sur une zone de calibrage muni de points d'ajustage précis et uniformément répartis.

Il existe plusieurs approches pour faire le calibrage des excentricités angulaires. Une possibilité est le procédé "1-step", où les trois paramètres de rotation (e_x , e_y , e_z) sont insérés directement comme inconnues supplémentaires dans un ajustement par faisceaux ou dans une compensation par moindre carrés [Kruck, 2002, Mostafa, 2001].

Une autre possibilité est le procédé «2-step». Le **premier pas** consiste à déterminer la matrice de rotation (R_b^E) du cadre body vers le cadre objet (Earth) et la matrice (R_C^E) du cadre objet vers le cadre caméra pour toutes les images (voir Fig. 1):

- Les éléments d'orientation photogrammétriques (R_C^E) sont calculés par une aéro-triangulation assistée par GPS.
- Pour déterminer R_b^E on peut utiliser les mesures de l'IMU pour chaque prise d'image.

Le **deuxième pas** consiste à comparer la matrice de rotation dérivée de l'IMU (R_b^E) avec celle déterminée par photogrammétrie (R_C^E) pour chaque image (voir [5]). Il s'en déduit une matrice de boresight (R_b^C) pour chaque image telle que :

$$R_b^C = R_C^E (R_b^E)^T \quad [5]$$

Il n'est pas possible de moyenner directement les éléments individuels des matrices R_b^C pour chaque image, car la matrice résultante ne sera probablement pas orthogonale, propriété d'une matrice de rotation. Pour y remédier, un jeu d'angles eulériens (e_x , e_y , e_z) doit être extrait de chaque R_b^C . La matrice de boresight finale peut être construite en faisant la **moyenne** sur les angles eulériens :

Paramétrisation de la matrice de boresight comme matrice antisymétrique (seulement valable pour des petits angles)

$$R_b^C = \begin{bmatrix} 1 & e_{z_n} & -e_{y_n} \\ -e_{z_n} & 1 & e_{x_n} \\ e_{y_n} & -e_{x_n} & 1 \end{bmatrix} \quad [6]$$

Moyenne des angles eulériens:

$$\bar{e}_x = \sum_n e_{x_n}, \bar{e}_y = \sum_n e_{y_n}, \bar{e}_z = \sum_n e_{z_n} \quad [7]$$

Reconstruction de la matrice moyennée:

$$\bar{R}_b^C = \begin{bmatrix} 1 & \bar{e}_z & -\bar{e}_y \\ -\bar{e}_z & 1 & \bar{e}_x \\ \bar{e}_y & -\bar{e}_x & 1 \end{bmatrix} \quad [8]$$

Prendre la moyenne sur n-images n'est pas une approche rigoureuse, parce que les éléments de l'orientation externe pour des images différentes n'ont pas la même précision. Le comportement stochastique des données AT-GPS et IMU/GPS est complètement différent. La Figure 2 montre les précisions estimées des éléments d'orientation pour 29 images en 4 lignes de vol:

- **IMU/GPS:** le roulis et le tangage peuvent être estimés avec une précision invariable d'environ 30arcs. Le comportement stochastique du lacet est plus complexe. L'absence de changements de direction sur une ligne de vol (vitesse constante, gap constant → pas d'accélération) fait croître

l'insécurité sur l'alignement de l'IMU. Des manœuvres de vol significatives (voir Fig. 3) permettent de réduire considérablement l'insécurité sur le lacet par des mises à jour GPS.

- **AT-GPS:** fournit des angles d'orientation avec une haute précision (<15arcsec). Due à la stabilité d'un bloc photogrammétrique, la précision des images à l'intérieur de ce bloc est supérieure à celle des images aux bords.

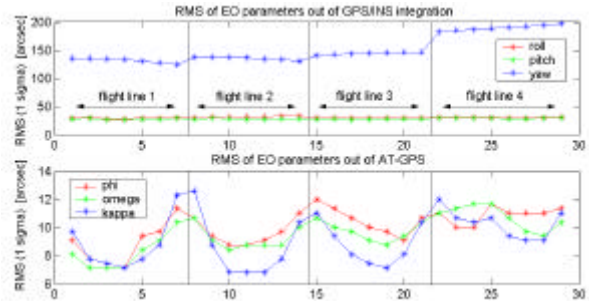


Figure 2: précision des angles d'orientation

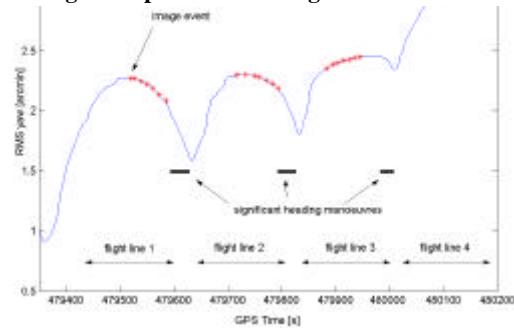


Figure 3: Précision du lacet en fonction des manœuvres

Calcul pondéré des excentricités angulaires

Afin d'obtenir une estimation rigoureuse des excentricités angulaires, il faut tenir compte des différents niveaux de précision des données en entrée. Ceci se fait avec un modèle stochastique, qui permet d'estimer les excentricités angulaires comme moyenne pondérée de toutes les images du bloc. Le modèle fonctionnel est très simple, car tout le calcul est basé sur une simple moyenne. La pondération des images est faite sur la base d'un modèle stochastique introduit dans une compensation par moindre carrés:

Modèle stochastique

$$K_{ll} = f(\mathbf{s}_{roll}, \mathbf{s}_{pitch}, \mathbf{s}_{yaw}, \mathbf{s}_j, \mathbf{s}_w, \mathbf{s}_k) \quad [9]$$

$$P = K_{ll}^{-1} \quad [10]$$

Cofacteur de l'angle estimé

$$q_{\hat{e}_x}^2 = (A^T P A)^{-1} \quad [11]$$

Estimation pondérée de l'angle

$$\hat{e}_x = q_x^2 A^T P \bar{l} \quad [12]$$

où: $A = [1 \dots 1]$, $\bar{l} = [e_{x_1} \dots e_{x_n}]^T$

De plus, la précision des angles pondérés peut être calculée comme suit:

Résidus compensés

$$\hat{V} = \bar{l} - A \hat{e}_x \quad [13]$$

Ecart-type a posteriori

$$\hat{S}_0 = \sqrt{\frac{\hat{V}^T P \hat{V}}{n-1}} \quad [14]$$

Ecart-type estimé pour l'angle pondéré

$$\hat{S}_{\hat{e}_x} = \hat{S}_0 \sqrt{q_{\hat{e}_x}^2} \quad [15]$$

même procédure pour e_y, e_z

Corrélation temporelle

La plate-forme inertielle (IMU) a un comportement stochastique fortement lié au temps. Il s'ensuit que les mesures de l'IMU ont une forte corrélation temporelle. Cette corrélation ne baisse significativement que d'une ligne de vol à une autre, si de forts changements dans la dynamique de vol (accélérations, changements d'attitude) sont observables. Le modèle stochastique doit en tenir compte.

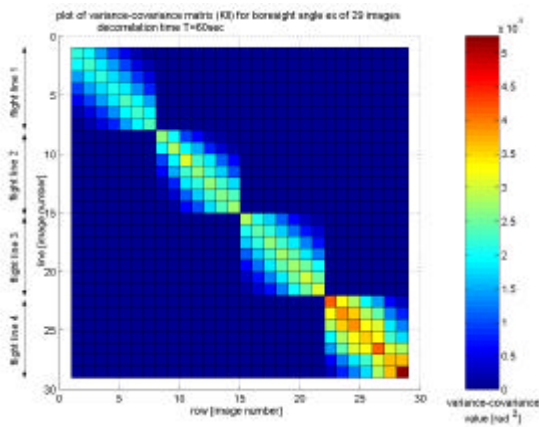


Figure 4: Tracé de la matrice Variance-Covariance

Le niveau de corrélation pourrait en théorie être extrait de la matrice de covariance dans le filtre de Kalman qui est utilisé pour l'intégration des mesures GPS et INS. Mais ces informations ne sont souvent pas disponibles pour l'utilisateur. Il faut alors trouver une autre approche. Des tests empiriques ont démontré qu'une fonction gaussienne se prête bien pour décrire cette corrélation :

$$\text{corr}(\Delta t) = e^{-\frac{\Delta t^2}{T^2}} \quad [16]$$

où Δt temps entre les 2 images
 T temps de décorrélation : ce facteur gouverne la rapidité avec laquelle la corrélation dans le temps décroît.

Si les précisions des angles d'orientation pour une image sont connues, la covariance entre le roulis, tangage et lacet entre deux évènements peut être calculée comme suit :

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{r_t, r_{t+\Delta t}} &= \text{corr}(\Delta t) \mathbf{S}_{r_t} \mathbf{S}_{r_{t+\Delta t}} \\ \mathbf{S}_{p_t, p_{t+\Delta t}} &= \text{corr}(\Delta t) \mathbf{S}_{p_t} \mathbf{S}_{p_{t+\Delta t}} \\ \mathbf{S}_{y_t, y_{t+\Delta t}} &= \text{corr}(\Delta t) \mathbf{S}_{y_t} \mathbf{S}_{y_{t+\Delta t}} \end{aligned} \quad [17]$$

Les effets d'une adjonction d'une corrélation temporelle entre les images peuvent être démontrés avec un tracé de la matrice de variance-covariance (K_{II}). La figure 4 montre 4 blocs sur la diagonale qui correspond aux 4 lignes de vol. Dans cet exemple, le temps de décorrélation est mis à 60 secondes. Ainsi, des images à l'intérieur d'une même ligne sont corrélées.

Résultats

Ce nouveau modèle fut testé en utilisant un jeu de données acquis par hélicoptère le 14 décembre 2001 dans la région de Sion. Le système était muni d'une caméra aérienne (Tomtecs HIEI G4), d'une unité inertielle (Litton LN-200) et d'un récepteur GPS (Leica SR530).

Les données suivantes ont été utilisées pour le calcul des excentricités angulaires :

- Coordonnées image des points d'ajustage et des points de liaison pour un bloc constitué de 29 images.
- Coordonnées objet de 24 points d'ajustage mesurés par GPS dans la zone de calibrage ($\sigma_{\text{pos}} \cong 3\text{cm}$).
- Paramètres d'orientation calculés par GPS/INS pour chaque image.

Pour estimer la précision des excentricités angulaires calculées, les orientations d'images obtenues par géoréférencement direct ont été utilisées pour une restitution des objets. Les coordonnées obtenues des objets ont ensuite été comparées avec les coordonnées des points d'ajustage connus afin de détecter une estimation de l'erreur moyenne quadratique (RMS). Tous les résidus ont été accumulés dans un estimateur de précision global \hat{S}_0 , qui permet une comparaison directe entre les différents modes de calcul.

Méthode de calibrage	Excentricités angulaires [deg]			Estimation de précision [deg]			\hat{S}_0 [μm]
	phi	omega	kappa	σ_{phi}	σ_{omega}	σ_{kappa}	
2-step: moyenne	0.623	-0.168	-0.100	0.013	0.016	0.015	36
1-step ¹	0.617	-0.175	-0.071	0.003	0.003	0.003	30
2-step ² (T=0)	0.624	-0.168	-0.099	0.003	0.003	0.003	35
2-step ² (T=90)	0.627	-0.169	-0.076	0.017	0.013	0.031	31
2-step ² (T=180)	0.639	-0.162	-0.063	0.022	0.018	0.049	43

¹ calculé avec BINGO-F [Kruck, 2002]
² calculé avec algorithme de pondération

Tableau 1: Estimation des excentricités angulaires par différentes méthodes

Le tableau 1 donne un aperçu sur les performances des 3 méthodes de calcul mentionnées. La différence principale se manifeste dans l'estimation de la précision. L'utilisation du procédé 1-step et 2-step sans corrélation temporelle (T=0) résulte dans une estimation de la précision beaucoup trop optimiste ($\sigma_{\text{pok}}=0.003^\circ \cong 10''$), parce que le comportement stochastique des données inertielles n'est pas intégralement pris en compte. Dès que la corrélation temporelle est incluse (T \neq 0), l'estimation de précision augmente et atteint un ordre de grandeur similaire aux précisions des données d'entrée GPS/INS (T=90: $\sigma_{\text{roll}} \cong 50''$, $\sigma_{\text{pitch}} \cong 60''$, $\sigma_{\text{yaw}} \cong 2''$).

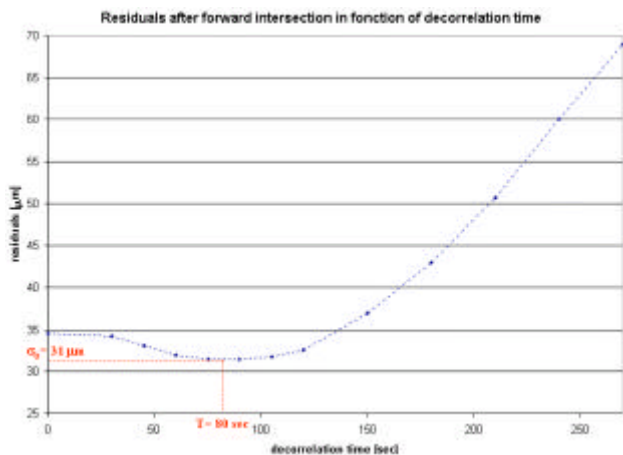


Figure 5: Résidus en fonction du temps de décorrélation

En analysant la précision de localisation, la figure 5 démontre que les résidus sur les points d’ajustage dépendent fortement du choix de T. Pour les 29 images de la zone de calibrage, la meilleure orientation directe est trouvée pour un temps de décorrélation d’environ 80 secondes ($\hat{S}_0 = 31 \mu\text{m}$), ce qui correspond à peu près à une longueur d’une ligne de vol. Si T est augmenté d’avantage, on établit une corrélation entre des images de différentes lignes de vol et les résidus croissent.

L’introduction d’une corrélation temporelle a pour effet de pondérer une image en fonction de son emplacement dans le bloc. Une corrélation élevée donne plus de poids aux images au milieu d’une ligne de vol. Ce comportement de l’algorithme est souhaité, car les images à l’intérieur d’un bloc ont une orientation beaucoup plus fiable que ceux aux bords. L’adjonction d’une corrélation temporelle permet ainsi d’utiliser toutes les images prises dans la zone de calibrage, quelque soit la qualité de leur orientation.

Conclusion

Cet article avait pour but de mettre en avant l’importance du calibrage du système intégral lors du géoréférencement direct et de présenter une approche rigoureuse pour le calibrage des excentricités angulaires. 3 procédés différents de calibrage étaient discutés: le procédé “1-step”, calculant les angles dans une compensation par faisceaux, une moyenne simple sur n-images et une pondération rigoureuse qui introduit une corrélation temporelle entre les images.

Les premiers tests pratiques avec le nouvel algorithme ont donné des résultats prometteurs. Les procédés 1-step et 2-step livrent des résultats très similaires pour la précision de localisation, mais ce n’est que la nouvelle approche qui fournit une estimation réaliste de la précision du calibrage des excentricités angulaires.

Comme l’algorithme attribue directement le poids en fonction de la position de l’image dans le bloc, toutes les images peuvent être utilisées pour le calibrage. Une sélection “manuelle” des meilleures images [Skaloud, 1999] devient superflue.

References

Ellum, C., El-Sheimy, N., Chapman, A.N. (2002) The Calibration of Image-Based Mobile Mapping Systems. Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary.

Colomina, I. (1999) GPS, INS and Aerial Triangulation: What is the best way for operational determination of photogrammetric image orientation? IAPRS (32) 3-2W5, pp. 121-130

Kruck, E. (2002) Combined IMU Sensor Calibration and Bundle Adjustment with BINGO-F, GIPAAalen.

Mostafa, M. (2002) Caméra/IMU Boresight Calibration: New Advances and Performance Analysis, ASPRS annual meeting, April 21-29, 2002, Washington (DC)

Schaer, P. (2003) Diploma thesis, System Calibration for Direct Orientation of Digital Imagery, Ecole Polytechnique de Lausanne

Schwarz, K.P., Chapman, M.A., Cannon M.E., Gong, P. (1993): An Integrated INS/GPS Approach to the Georeferencing of Remotely Sensed Data, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 59, No. 11, pp. 1667-1674.

Škaloud, J. (1999) Ph.D. Dissertation. Optimizing Georeferencing of Airborne Survey Systems by INS/DGPS, UCGE Report 20126, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary.

Philippe Schaer

Jan Skaloud

EPFL

Institut du Développement Territorial (INTER)

Laboratoire de Topométrie (TOPO)

Bâtiment GR

CH-1015 Lausanne

philipp.schaer@a3.epfl.ch

Jan.skaloud@epfl.ch

Julien Vallet

EPFL

Institut du Développement Territorial (INTER)

Laboratoire de Photogrammétrie (PHOT)

Bâtiment GR

CH-1015 Lausanne

Julien.vallet@epfl.ch