

Fusion LIDAR/Photogrammétrie : Une Mise en Cohérence Globale

Fusionning LIDAR and Photogrammetry : a Global Registration

F. Bretar¹

M. Pierrot-Deseilligny¹

M. Roux²

¹ Institut Géographique National - MATIS

² GET-Télécom Paris

¹ Institut Géographique National. 2/4 avenue Pasteur 94165 Saint-Mandé Cedex

² URA 820 LTCI - Département TSI. 46 Rue Barrault 75013 Paris

e-mail : ¹{Frederic.Bretar,Marc.Pierrot-Deseilligny}@ign.fr, ²Michel.Roux@enst.fr

Résumé

Les systèmes laser aéroportés fournissent une représentation 3D de la topographie terrestre sous la forme d'un nuage de points. Bien que la technique d'acquisition assure aux données une qualité théorique intrinsèque élevée, on observe certaines imprécisions. Ceci est particulièrement visible dans le cadre de l'utilisation conjointe du laser et d'une autre technique, la photogrammétrie. La première étape d'un processus de fusion de données est de définir un espace commun afin d'assurer une cohérence géométrique globale. Cet article décrit une méthode de mise en cohérence d'une bande de points laser avec un Modèle Numérique de Surface (MNS) issu de la photogrammétrie. Il s'agit d'estimer des déformations linéaires locales grâce à un accumulateur tridimensionnel (espace des translations), puis d'estimer une déformation affine globale continue sur la zone étudiée. Nous montrons que chercher ces déformations locales revient à trouver le maximum de l'accumulateur. Les cas 2D et 3D sont étudiés en détails sur des simulations. Les résultats sur des données réelles sont significatifs de la non-conformité initiale des deux jeux de données. Après correction, la mise en cohérence est assurée.

Mots clés

Laser aéroporté, mise en coïncidence, corrections locales, MNS, accumulateur 3D.

Abstract

Airborne laser systems provide a three-dimensional (3D) perception of the Earth's topography with clouds of points. Whereas the technique ensures a high theoretical quality, one can observe discrepancies in certain areas. This situation may be of importance in case of

joint sensor application, like merging airborne laser scanner with photogrammetry. The first step of a fusion process is to define a common reference frame so that a global geometric coherence should be extracted. This article describes a methodology for matching a single laser strip with a photogrammetric derived Digital Elevation Model (DEM). It is based on calculating local linear deformations with a tri-dimensionnal accumulator (translation space), then estimating a global continuous deformation over the studied area. We show that searching for local discrepancy is equivalent to compute the maximum of the accumulator. 2D and 3D simulated problems are discussed in details and solved over known transformed data set. Results on real data show a significant improvement when applying retrieved local translations to laser points. After correction, both data sets tend to be expressed in the same reference frame. The accurate registration is then ensured.

Keywords

Airborne laser, co-registration, local corrections, DSM, 3D accumulator.

1 Introduction

L'altimétrie laser est maintenant reconnue comme une technique très précise de levé topographique terrestre à partir d'un vecteur aérien. Les distances mesurées par le lidar entre l'avion et le sol, couplées aux informations provenant d'un GPS embarqué et d'un système inertiel (INS) fournissent un nuage de points tridimensionnel géoréférencé [5]. Afin de fournir un ensemble de points 3D dense et étendu, et de minimiser les occultations, un jeu de données laser est composé de plusieurs bandes parallèles de largeur variable (quelques centaines de mètres), et possédant un fort recouvrement.

Les processus de fusion de ces bandes ont été au coeur des recherches au cours de ces dix dernières années [2]. Maas décrit une méthode basée sur une estimation par moindres carrés des décalages 3D sur une structure de TIN (Triangular Irregular Network) en utilisant à la fois les informations d'altitude et les réflectances [6]. Vosselman quant à lui, utilise la même méthode sur les données altimétriques mais introduit une fonction modélisant la réponse du faisceau laser sur des bords de bâtiments, permettant ainsi d'augmenter le nombre de mesures du décalage entre les bandes [10].

Outre le problème de fusion de bandes, les performances des systèmes laser ont orienté les recherches sur l'amélioration des Modèles Numériques de Surface (MNS), en particulier de sa composante altimétrique. Huising, dans une étude détaillée de la précision altimétrique du laser scanner aéroporté, a souligné le caractère systématique de certaines erreurs [4]. Il s'agit en particulier de celles introduites par les mesures du GPS et de l'INS entraînant des déformations des bandes laser ainsi acquises. Ces déformations peuvent être de nature locale, mais peuvent aussi provoquer déplacements, torsions ou inclinaisons de la bande entière [3]. Ries propose une modélisation des phénomènes de dérive du couple GPS/INS pour corriger les données de ces effets, ou du moins les diminuer [7].

Ces prédictions théoriques n'expliquent cependant pas toujours les erreurs présentes dans le jeu de données final. C'est pourquoi il est nécessaire de le corriger *a posteriori*. Dans le cas d'une utilisation conjointe de plusieurs techniques d'acquisition de données géographiques, par exemple le couplage du laser aéroporté avec la photogrammétrie, il est important d'estimer les erreurs planimétriques afin de travailler dans le même repère. Dans cette optique, Schenk a présenté une étude portant sur la précision des points laser en comparant les altitudes de structures caractéristiques détectées dans des images aériennes à celles de leurs homologues présentes dans le nuage [9]. Il décrit une procédure de rétro-projection des points laser dans des images aériennes. Il compare ensuite ces points rétro-projetés aux valeurs de la radiométrie en niveaux de gris qui représentent la vraie surface. Il souligne cependant que cette méthode n'est pas robuste pour l'estimation des décalages planimétriques parce que les structures linéaires sont difficilement détectables au sein du nuage de points laser.

Afin de remédier à ces difficultés, nous avons utilisé une approche statistique. Cette étude s'insère dans le cadre d'un projet plus vaste de couplage de données issues de laser aéroporté et de la photogrammétrie. La première étape d'un processus de fusion de données est de définir un espace commun afin d'assurer une cohérence géométrique globale. Cet article décrit une méthode de mise en cohérence d'une bande de points laser avec un MNS issu de la photogrammétrie.

Dans un premier temps, nous mettrons en évidence les problèmes de décalage entre les points laser et le MNS, suivi de la description des données que nous avons utilisées (partie 3). Puis nous décrirons notre méthode dans la partie 4 où sera présenté l'algorithme général (mesure des translations locales par un accumulateur 3D et estimation d'une transformation affine optimale minimisant l'écart entre les deux nuages de points). La mise en forme du problème suppose la détermination des déformations locales, et nous montrerons que ceci revient à trouver le maximum de l'accumulateur. Les cas 2D et 3D seront étudiés en détails sur des simulations (partie 4.4). Les résultats sur des données réelles seront enfin présentés sur des paysages urbains dans la partie 5. Nous concluons cet article en mentionnant différentes directions sur les recherches à venir.

2 Mise en évidence du phénomène

Bien que les données laser bénéficient d'une grande précision, on a constaté sur plusieurs jeux de données qu'il existait un certain décalage entre ces nuages de points et un MNS issu de la photogrammétrie. La figure 1 met en évidence ce décalage par la superposition du semis de points laser (dont la trace au sol est facilement identifiable, en noir) sur le MNS triangulé (surface grise). On remarque que les deux jeux de données ne sont pas exactement dans la même géométrie : il existe une légère translation des points laser par rapport au MNS.

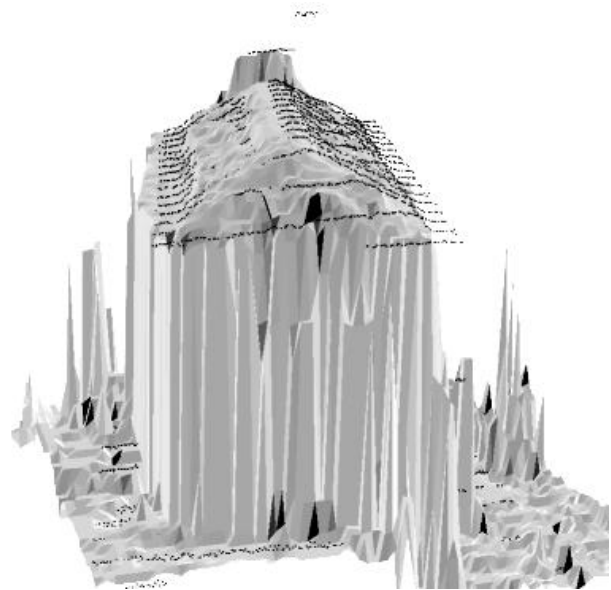


FIG. 1 – Superposition d'un MNS triangulé (en gris) et des points laser 3D **bruts** (points noirs) sur un bâtiment du centre ville d'Amiens, France.

La précision finale de ces deux systèmes ne dépend

pas des mêmes paramètres. C'est pourquoi ils peuvent être utilisés de manière conjointe, les qualités de l'un compensant les défauts de l'autre. La précision planimétrique du MNS dépend dans une large mesure de la qualité des orientations des images (paramètres de prise de vue), la composante altimétrique dépendant des résultats de la corrélation. La qualité des données laser est influencée par la qualité des mesures GPS/INS et leur fréquence d'acquisition qui, nettement plus faible que celles de l'émetteur laser, nécessite de faire des interpolations, ainsi que des calculs de compensation qui en résultent.

L'objectif de cette étude est de décrire une méthode permettant la mise en coïncidence précise du nuage de points laser avec un MNS issu de la photogrammétrie. Notre stratégie consiste à déterminer des translations locales dans le but d'estimer une déformation globale de la bande laser. Dans cet article, nous recherchons de faibles déformations puisque nous considérons que la géométrie initiale est déjà une bonne approximation de la mise en coïncidence finale des deux jeux de données. C'est pourquoi nous limiterons l'espace de recherche des translations à un module de 5 mètres, valeur qui est très supérieure aux valeurs que nous trouverons pas la suite.

3 Les données

Dans cette étude, les deux jeux de données ont été acquis à différentes dates, ce qui pourra expliquer certaines erreurs dans le processus d'estimation.

3.1 Les données Laser

Les données laser ont été acquises sur la ville d'Amiens par la société allemande TopoSys©. Elle possède son propre système LIDAR composé de deux ensembles de fibres optiques, l'un pour l'émission, l'autre pour la réception de l'impulsion laser (figure 2).

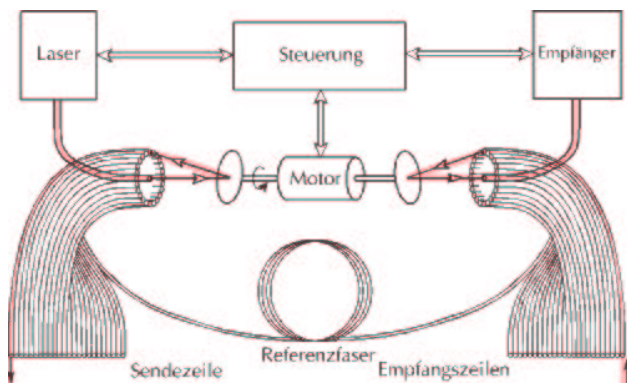


FIG. 2 – Principe de fonctionnement du LIDAR TopoSys©.

Le tableau 1 présente les principales caractéristiques techniques du système utilisé. A la différence de la plu-

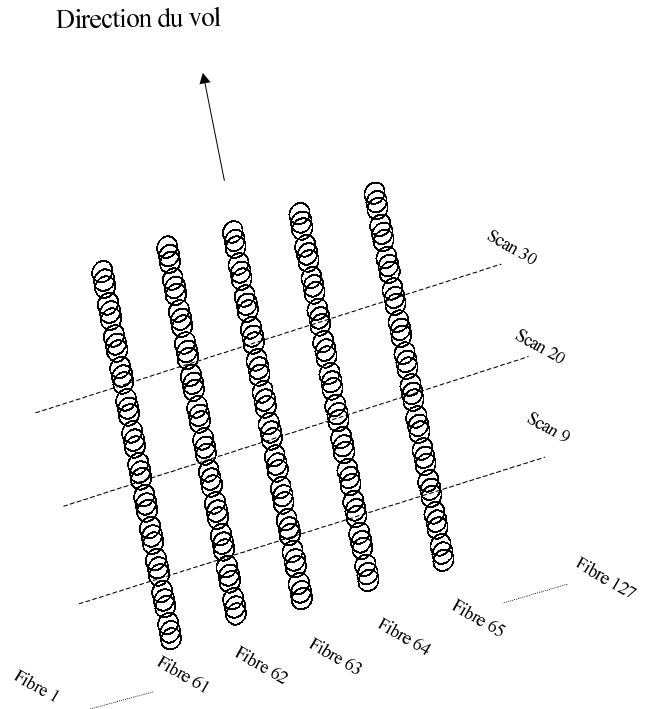


FIG. 3 – Trace au sol du LIDAR TopoSys©.

part des systèmes laser aéroportés, le principe d'acquisition des points n'est pas basé sur un miroir oscillant, mais sur l'enregistrement du retour de l'impulsion à travers les fibres réceptrices. Le système présenté ici possède un réseau de 127 fibres émettrices, le même nombre en réception. La trace sur le sol ainsi produite ressemble à celle d'un push-broom (figure 3). Notons que la diffraction du faisceau laser génère une tâche au sol d'environ 30 cm de diamètre. Le point final résulte de l'intégration du signal rétrodiffusé sur la surface circulaire associée à son centre. Ce mode d'acquisition permet d'éviter les problèmes d'imprécision relevés au sein des autres systèmes notamment provoqués par les vibrations de l'avion. Il permet également d'éviter les accumulations de points en bord de bandes, phénomène souvent rencontré avec les miroirs oscillants.

Hauteur de vol	1005 m
Largeur de bande	≈ 230 m
Fréquence de balayage	650 Hz
Longueur de l'impulsion	5 ns
Fréquence d'acquisition	83 kHz
Longueur d'onde laser	1.55 μm
Ouverture	14°

TAB. 1 – Caractéristiques techniques du système LIDAR TopoSys© ainsi que les paramètres du vol dur Amiens.

La densité spatiale est d'environ un point tous les 10 cm dans la direction de vol de l'avion, et de un point tous les 1.2 m dans la direction perpendiculaire, soit une moyenne de 7.5 *points/m*². Nous avons utilisé une seule bande, puisque le problème d'ajustement inter-bande ne sera pas traité dans la présente étude.

3.2 Le MNS

Le MNS que nous avons utilisé a été calculé par corrélation en utilisant la programmation dynamique sur les lignes épipolaires [1]. Le pas en planimétrie du MNS est de 0.2 m. Il est issu de la fusion d'un ensemble de MNS calculés à partir de plusieurs couples d'images (jusqu'à 6). La précision géométrique finale est assurée par la connaissance de l'orientation des images aériennes. En considérant de plus qu'un MNS calculé à partir d'images aériennes est sensible aux artefacts radiométriques, il peut exister un bruit résiduel. Dans un contexte urbain, il s'agira d'erreurs altimétriques importantes au niveau des rues étroites qui ont peu de chances d'être vues dans toutes les images, ainsi que sur certaines façades vues seulement sur une seule image de chacun des couples.

4 Théorie

4.1 Mise en forme du problème

Nous avons vu que bien que les deux jeux de données soient théoriquement géoréférencés, ils ne seront pas parfaitement superposables parce qu'ils n'ont juste-ment pas été acquis pas les mêmes systèmes physiques. Le MNS sera beaucoup plus bruité que les points laser à cause des problèmes de corrélation entre images, sans toute fois que la cohérence géométrique en soit altérée. La mise en coïncidence consiste à trouver une transformation de l'espace minimisant l'écart (au sens des moindres carrés) entre ces deux nuages de points représentant la même topographie. Ainsi, nous avons décidé d'estimer un modèle affine par soucis de généralité et de flexibilité (12 paramètres à estimer). D'autres modèles plus rigides (rotation) auraient aussi pu être utilisés, nous en discuterons dans la partie 5.4.

On veut donc résoudre un problème de la forme $AX = B$ où X est le vecteur des inconnues, B la matrice des observations et A la matrice modèle déterministe. Nous décrivons dans les parties 4.2 et 4.3 le calcul de B , qui consiste en la mesure des translations locales, puis la méthode d'estimation.

4.2 Mesure des translations locales

L'algorithme que nous proposons consiste à mettre localement en correspondance ces deux nuages de points en approximant le champ de déformation (on ne fait pas d'hypothèse sur sa nature) par des translations locales. Afin de mettre en évidence ces translations, nous suivrons une approche statistique basée sur la recherche d'un maximum global au sein d'un accumu-

lateur tridimensionnel représentant l'espace des translations 3D. Les accumulateurs présentés par la suite seront coupés à t_z constant (figure 7(a), 7(b), 9(a), 9(b)).

Description de l'algorithme. Soit un ensemble de régions carrées adjacentes R (Équation 1), et l'ensemble L_R des points laser appartenant à R (Équation 2).

$$R = [x_1, x_2] * [y_1, y_2] \in \mathbb{R}^2 \quad (1)$$

$$L_R = \{l_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix}_{i \in \mathbb{N}}^{laser} / \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} \in R\} \quad (2)$$

Soit V_{l_i} un voisinage de points appartenant au MNS centré sur les coordonnées planimétriques du point laser l_i (équation 3 où C est la dimension du voisinage).

$$V_{l_i} = \{p_j = \begin{pmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{pmatrix}_{j \in \mathbb{N}} \in MNS / \left\{ \begin{array}{l} |x_i - x_j| \leq C \\ |y_i - y_j| \leq C \end{array} \right\} \} \quad (3)$$

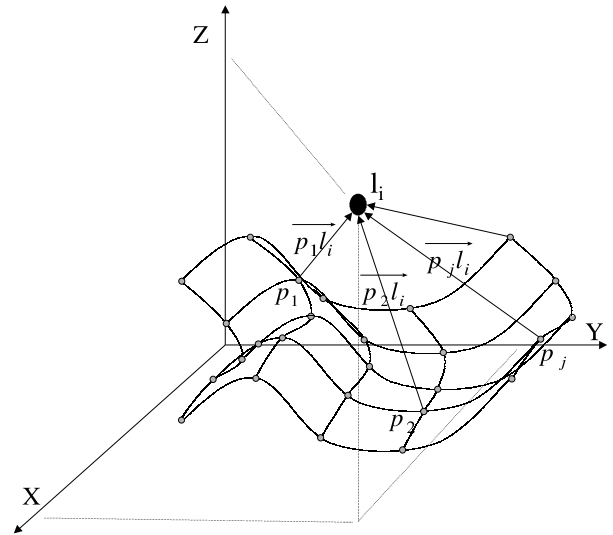


FIG. 4 – Schéma du processus d'accumulation locale. Le point l_i correspond au point laser exprimé en coordonnées géographiques, les points gris p_i sont les noeuds du MNS de référence.

Le processus d'accumulation est composé de deux étapes : on calcule en premier lieu les valeurs de l'accumulateur grâce aux translations trouvées. Cette étape est illustrée sur la figure 4. Pour chaque point laser l_i et chaque voisinage $V_{l_i} \in MNS$, on calcule le vecteur $\overrightarrow{p_j l_i}$ auquel on associe un vote dans l'accumulateur 3D. Compte tenu du caractère discret de l'accumulateur, et bruité des surfaces, on considérera que la distribution de ce vote sera non pas ponctuel, mais gaussien,

c'est à dire que chaque vote aura une influence sur ses voisins en fonction de l'écart type de la gaussienne utilisée. On montre que convoluer chaque vote indépendamment revient à convoluer globalement l'accumulateur final par cette même gaussienne. Ce filtrage permet de lisser la surface de l'accumulateur et de faire ressortir le maximum global (on verra que ce n'est pas toujours le cas et que cela dépend de la forme de l'accumulateur). On cherche ensuite la position de ce maximum (la recherche du maximum revient à déterminer la translation locale correspondante). La matrice B est donc déterminée par blocs de points laser. Grâce à ces translations locales, approximation empirique du champ de déformation de la bande laser par rapport au MNS, on peut dès lors estimer un modèle affine global et continu sur cette même zone.

4.3 Estimation d'un modèle affine

En effet, l'algorithme ne permet pas de trouver un maximum pour chaque accumulateur, la topologie de cet espace peut dans certaines circonstances mener à de fausses estimations du maximum (section 5). La correction du nuage s'effectue donc par bloc, d'où l'apparition de discontinuités à leur frontière. Un modèle continu permettra de corriger le nuage de points initial de manière uniforme. Nous cherchons donc à estimer les paramètres de la transformation affine définie par l'équation 4 :

$$\begin{pmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & t_x \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & t_y \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & t_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

où les indices r et f correspondent respectivement aux données brutes et aux données corrigées par bloc (observations).

Soit X le vecteur des paramètres à estimer. On utilise un M-estimateur robuste [11] pour résoudre le problème $A^T A X = A^T B$ où A^T est la matrice transposée de A . En effet, la méthode classique des moindres carrés étant très sensible aux fautes de mesures, il a été jugé préférable de minimiser non pas $\sum_i r_i^2$ (r_i^2 étant le résidu de la i^{th} donnée) mais $\sum_i \rho(r_i)$ où ρ est une fonction symétrique, positive, ne possédant qu'un seul minimum en zéro, et dont la croissance est inférieure à celle du carré. Dans le cadre de notre application, il s'agit d'une minimisation en norme L_p .

Vue générale de l'algorithme. L'algorithme final peut être représenté de façon synthétique par la description suivante :

0. **Pour Toute** région R
Initialisation de l'accumulateur 3D H
1. **Pour Tout** point laser $l_i \in L_R$
Calculer un voisinage V_{l_i} de points appartenant au MNS
2. **Pour Tout** $p_j \in V_{l_i}$
 $\vec{p_j l_i} \in \mathbb{R}^3$
 $H(\vec{p_j l_i}) + 1$
Fin Pour p_j
- Fin Pour** l_i
3. Convolution de H par un filtre Gaussien
4. Recherche du maximum global M_R de H
Fin Pour R
5. Correction du nuage laser par les $\{M_R\}_R$
6. Estimation L_p du modèle

4.4 Le cas 2D simulé

Considérons K couples de points $(x_k, f(x_k))$ où f est une fonction décrivant la topographie simulée (profil noir sur la figure 5(a)). Ces données constitueront notre MNS de référence. On applique à ce profil une translation $\begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix}$ pour créer l'ensemble L_R de points traduits (profil gris sur la figure 5(a)).

$$L_R = \{l_k\}_{k \in [1, K]} = \{(x_k + t_x, f(x_k) + t_y)\}$$

Soit V_{l_i} l'ensemble des n points voisins de l_i dans l'ensemble de référence avec $i \in [1, K]$ et $n \ll K$:

$$V_{l_i} = \{p_j \in [1, n]\} = \{(x_1, f(x_1)), \dots, (x_n, f(x_n))\}$$

on a

$$\bigcap_{l_i \in L_R} \{\vec{p_j l_i} / p_j \in V_{l_i}\} = \vec{p_i l_i} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix}$$

$$\text{mais} \quad \forall i, j \in [1, K], i \neq j \quad H(\vec{p_i l_i}) > H(\vec{p_i l_j})$$

$$\text{donc} \quad \arg \max_{X \in \mathbb{R}^2} H(\vec{X}) = \vec{p_i l_i} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} \quad (5)$$

L'équation 5 montre que le maximum de l'accumulateur H correspond à la translation appliquée. La figure 5(b) décrit l'accumulateur 2D correspondant au cas décrit précédemment. Le maximum (pointé par la flèche) représente la translation initialement appliquée (à la résolution de l'accumulateur près) au profil topographique.

4.5 Validation sur des données 3D simulées

La démonstration de l'équation 5 que nous avons donnée sur des données 2D est la même dans l'espace

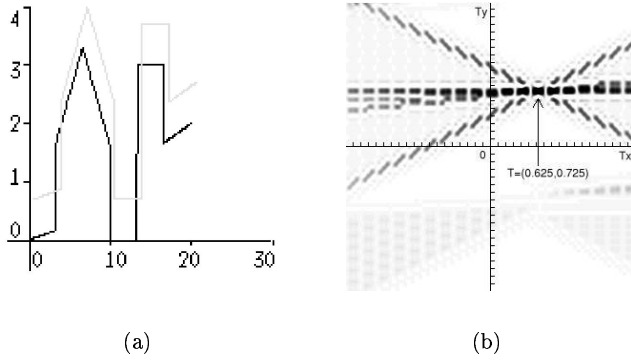


FIG. 5 – (a) Profils représentant la topographie simulée (en noir) et la topographie translatée (en gris). La translation nominale est de $(0.6, 0.7)$ cm. (b) Accumulateur 2D correspondant indiquant un maximum pour $(0.625, 0.725)$ cm. La précision finale dépend du pas d'échantillonnage de l'espace des paramètres.

3D. Afin de valider notre algorithme sur des données 3D, nous l'appliquons à un nuage de points 3D modifié d'une transformation connue. Le nuage de points initial sera dès lors le MNS sous-échantillonné, puis déformé. Nous calculons ensuite les accumulations locales de cet ensemble de points par rapport au MNS à sa résolution initiale dans le but de retrouver le champ de déformation.

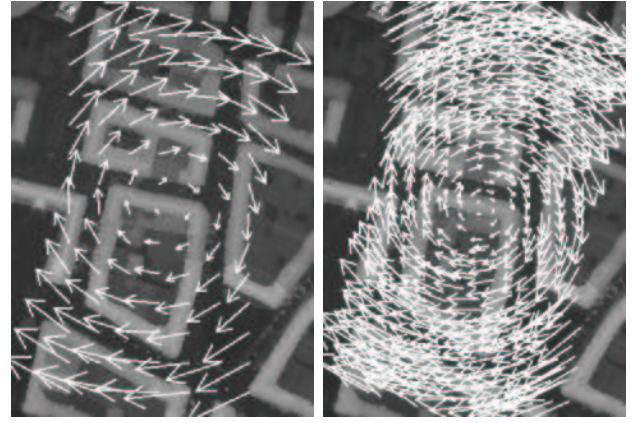
Description de la simulation. On applique une rotation définie par l'équation 6

$$P' = R_1(\theta)R_2(\psi)R_3(\phi) \cdot P \quad (6)$$

où $R_1(\theta)$, $R_2(\psi)$, $R_3(\phi)$ sont des matrices rotation 3×3 selon les trois angles d'Euler, P les points 3D initiaux et P' les points 3D transformés.

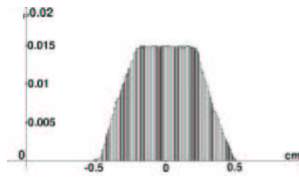
Le figure 6(a) représente le champ déformation “mesuré” par l'algorithme d'accumulations locales. L'estimation du modèle affine global fournit quant à lui les déformations présentés sur la figure 6(b). La décomposition SVD de l'application affine montre que les valeurs propres sont très proches de 1, validant le fait que cette forme affine estimée est très proche de la rotation appliquée. L'analyse des résidus montre l'absence de systématisme rémanent. C'est en particulier visible sur la composante altimétrique (figure 6(e)). L'apparent étalement des résidus planimétriques s'explique par le fait que loin du centre de rotation, l'approximation par une translation est moins fidèle. Les résidus seront donc plus élevés dans cette partie du nuage.

En paysage urbain, la plupart des accumulateurs ressemblent à celui présenté sur la figure 7(a) haut. Comme on le remarque sur le MNS, nous faisons l'accumulation sur des bords de bâtiments orthogonaux (on reviendra sur ce point dans la partie 5). Le fort gradient topographique multidirectionnel permet d'accro-

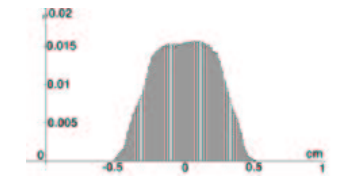


(a) Déformations mesurées par accumulations locales

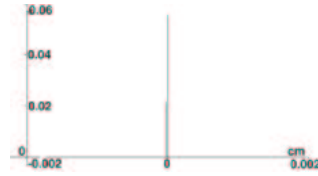
(b) Déformations modélisées



(c) Histogramme des résidus planimétriques en X



(d) Histogramme des résidus planimétriques en Y



(e) Histogramme des résidus altimétriques

FIG. 6 – Résultats de la simulation $\phi = 2^\circ$, $\psi = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$

cher l'accumulateur sur la solution désirée. Le maximum est ainsi bien défini, sans ambiguïté.

Il arrive cependant que la zone où a lieu l'accumulation ne satisfasse pas ces critères. Nous nous retrouvons alors dans la configuration décrite sur la figure 7(b). Dans ce cas, l'accumulateur est flou dans les trois directions de l'espace, entraînant une forte imprécision dans la détermination du maximum. La topographie est pratiquement invariante par translations planimétriques. Par nature, l'algorithme trouvera un maximum, mais celui-ci n'aura qu'une faible validité.

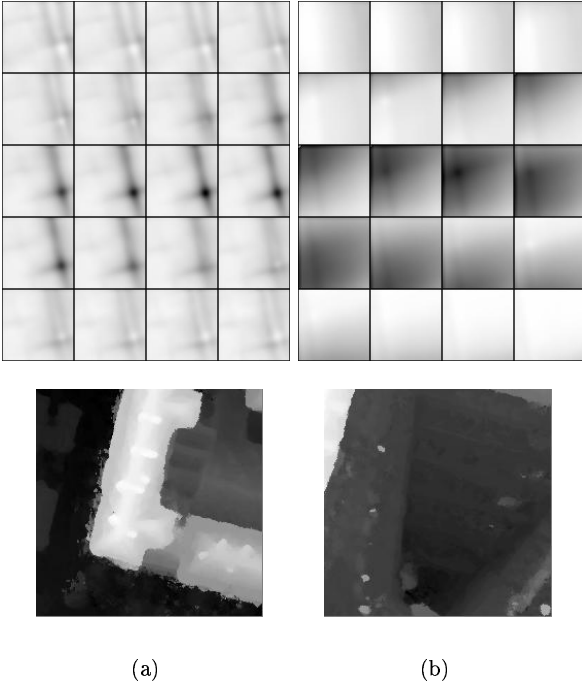


FIG. 7 – Haut : Deux accumulateurs 3D coupés successivement à t_z constant, calculés à partir de données simulées. Les MNS extraits correspondant sont montrés en dessous. (a) Cas idéal présentant un relief à fortes variations, (b) Accumulateur flou provoqué par un terrain plat.

5 Résultats expérimentaux et discussion

5.1 Paramètres de l'algorithme

Les résultats présentés ci-dessous ont été produits en utilisant les paramètres suivants. La résolution de l'accumulateur est de 0.1 m suivant chaque direction, les valeurs maximum et minimum étant comprises entre -5 m et $+5\text{ m}$ selon les trois composantes. On applique un filtre Gaussien d'écart type $\sigma = 0.2\sqrt{2}m$. Les points laser sont extraits par régions adjacentes R de $20 \times 20m^2$, comprenant environ 3000 points ($card(L_R) \approx 3000$). Le processus d'accumulation s'effectue sur des voisinages V_{l_i} du MNS de 121×121 pixels, soit $24.2 \times 24.2m^2$ avec une résolution de 0.2 m. Les translations dont le module final est supérieur à 2 m ne seront pas utilisées dans l'estimation car manifestement erronées. La norme L_p a été choisi pour $p = 1.2$.

5.2 Résultats

Nous présentons sur la figure 8(a) les résultats des accumulations locales sur une partie de bande laser de longueur environ 1.2 km. Ce champ de déformation n'a pas été calculé d'un seul bloc par souci de gestion de la mémoire vive. Les différents blocs sont plus net-

tament visibles sur la figure 8(b). Nous remarquons tout d'abord sur la figure 8(a) que certaines parties de la bande ne contiennent pas de translation. Il n'y a pas de mesure à cet endroit. Cette situation a déjà été rencontrée lors de la simulation (partie 4.5). Il s'agit ici encore de zones où la topographie n'est pas fortement prononcée à l'intérieur de la fenêtre d'accumulation (toit de gymnase, place, grandes intersections de routes...).

De plus, la détermination des maxima de certains accumulateurs est parfois ambiguë. La figure 9(a) représente un accumulateur coupé à différents t_z constant. On constate très nettement sa direction privilégiée, induite par la forme du MNS sur lequel l'accumulation locale a été calculée. Ces biais dans l'espace des paramètres influence la recherche du maximum, pouvant conduire à une mauvaise estimation. Un cas plus idéal est représenté sur la figure 9(b), où les contributions des directions orthogonales du bâtiment dessinent un maximum global net au sein de l'accumulateur. Dans ce cas, l'incertitude sur la détermination du maximum est faible.

La figure 8(b) représente le champ de déformation estimé par un M-estimateur à partir des données mesurées par accumulation. Le calcul a été effectué par blocs indépendants de dimensions environ $200m \times 200m$. L'estimation de ce modèle affine permet de corriger les données laser de manière continue. En effet, au delà de la correction à l'intérieur des blocs, nous constatons une régularité des déformations au niveau de leurs frontières. Ceci tend à valider le fait qu'il existe effectivement un modèle physique de déformation entre le nuage de points laser et le MNS.

5.3 Validation

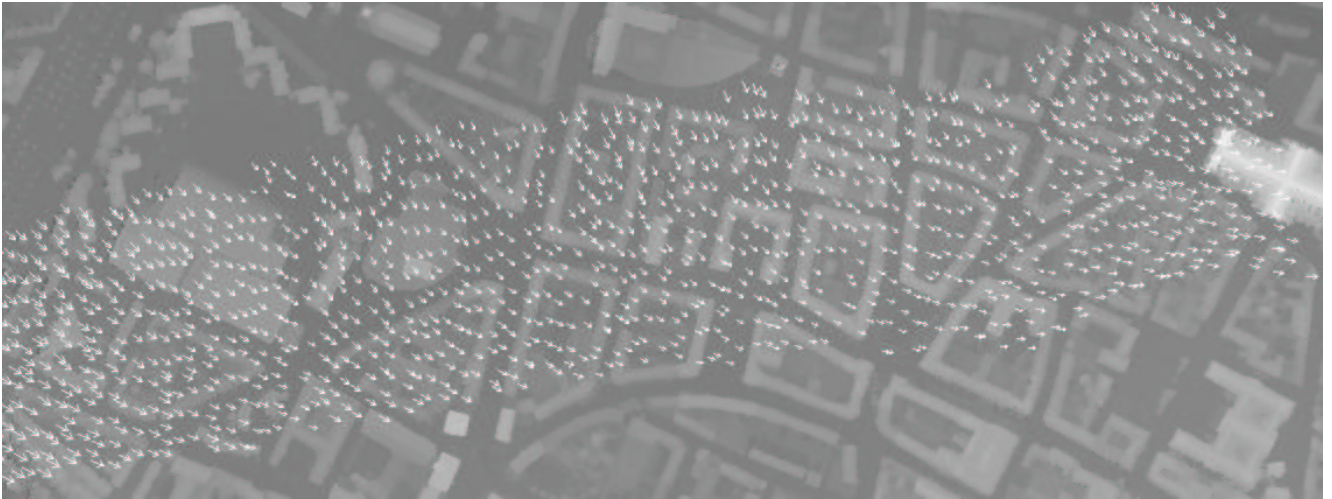
Les déplacements que nous cherchons à modéliser sont de faible amplitude. La figure 10 haut montre deux profils superposés, en noir les points laser bruts, en gris les points du MNS sur le même bâtiment. On remarque le léger décalage entre ces deux profils. La figure 10 bas représente le même profil MNS en gris, mais les points laser (noir) sont maintenant corrigés du modèle de déformation estimé par l'algorithme. L'amélioration est notamment visible sur le faite de toit. La correction est dans ce cas de $\begin{pmatrix} 0.35 \\ -0.35 \\ 0.05 \end{pmatrix}$ mètres.

Afin de caractériser quantitativement ces améliorations, nous avons calculé un coefficient de corrélation entre les deux profils (MNS et laser). Il est défini par l'équation 7

$$r = \frac{\sum_i (med_i(z_k^{laser}) - \overline{med}(z^{laser}))}{\sqrt{\sum_i (med_i(z_k^{laser}) - \overline{med}(z^{laser}))^2}} \times \frac{\sum_i (med_i(z_k^{mnt}) - \overline{med}(z^{mnt}))}{\sqrt{\sum_i (med_i(z_k^{mnt}) - \overline{med}(z^{mnt}))^2}} \quad (7)$$



(a) Champ de déformation mesuré à partir des accumulations locales sur le MNS



(b) Champ de déformation modélisé

FIG. 8 – Champ de déformation mesuré et modélisé entre un nuage de points laser et un MNS de corrélation

Compte tenu de la structure irrégulière des points, nous les avons ré-échantillonnées sur une grille régulière cohérente à une résolution fixée en fonction de la longueur du profil. Les valeurs corrélées de $med_i(z^{laser})$ et de $med_i(z^{mnt})$ sont les médianes des échantillons présents dans chaque maille de la grille décrite ci-dessus afin de diminuer le bruit des profils. Les résultats de cette corrélation sont présentés sur la figure 11. Nous voyons sur la courbe en pointillés les coefficients de corrélation entre le profil MNS et le profil laser **brut** sur les mêmes bâtiments. Les valeurs sont

élevées, le décalage étant faible par rapport aux dimensions de la structure globale (figure 10 haut). En ce qui concerne les coefficients de corrélation calculés entre le nuage de point laser **corrigé** et le MNS (courbe pleine noire), ils sont toujours supérieurs aux précédents : les deux nuages de points coïncident mieux. L'analyse des profils est une méthode permettant rapidement d'évaluer la qualité de la correction. Nous pourrions étendre cette validation au cas d'une corrélation 2D sur des bâtiments entiers.

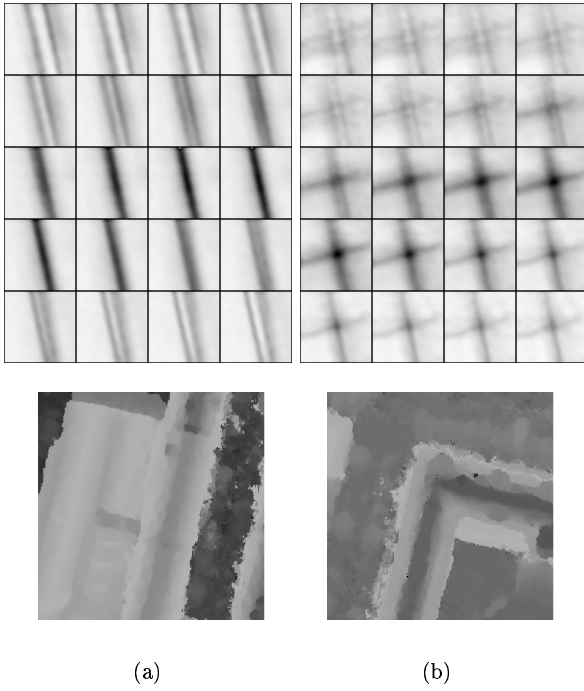


FIG. 9 – Haut : Deux accumulateurs 3D coupés successivement à t_z constant, calculés à partir de données laser brutes. Les MNS correspondant sont montrés en dessous. (a) accumulateur unidirectionnel, (b) accumulateur robuste.

5.4 Discussion et études futures

Nous avons montré qu'il était possible d'appliquer une correction continue au nuage de points laser, et par ce biais, d'améliorer la mise en coïncidence de ce nuage avec un MNS provenant de la photogrammétrie. Ce gain de précision peut être décisif lors de l'utilisation d'images à haute résolution auxquelles on désire joindre des informations du type laser. Une autre application est la régularisation d'un MNE de corrélation, bruité par nature, mais dense à la résolution des images, par un nuage de points certes moins dense, mais beaucoup plus régulier comme le laser. On peut aussi penser à la reconstruction 3D précise, de la détection d'arbres isolés....

Revenons maintenant sur notre méthode d'accumulation locale des translations. Nous avons souligné certaines situations dans lesquelles la forme floue ou unidirectionnelle des accumulateurs pouvait engendrer des estimations erronées de la translation locale. Ces configurations, dans le cas d'une invariance par translation de la surface, sont inhérentes à la méthode. Trois alternatives peuvent être considérées :

- a. agrandir le voisinage MNS pour qu'il contienne des paysages topographiques variés, mais le temps de calcul sera bien supérieur à ce qu'il est actuellement

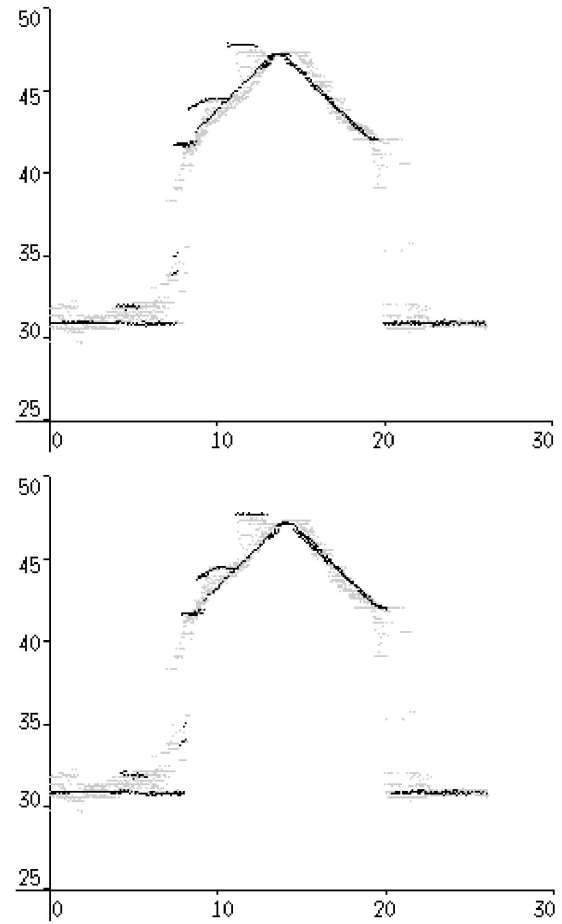


FIG. 10 – Profils d'un bâtiment. Échelle en mètres. Haut : profils des points laser **bruts** (en noir) et du MNS (en gris). Bas : profils des points laser **corrigés** et du MNS.

- b. agrandir le voisinage laser sur lequel a lieu l'accumulation, mais il est important de garder l'aspect local de la mesure.
- c. analyser la forme de l'accumulateur et quantifier le niveau d'incertitude sur la détermination du maximum.

Le choix d'un modèle est toujours délicat. Nous avons décidé d'estimer une transformation affine non contrainte pour la flexibilité des paramètres. Le modèle à 12 paramètres est sensé fournir une correction a posteriori de meilleure qualité. Nous ne voulions pas en effet réduire dans un premier temps notre recherche à celle d'une transformation rigide. Néanmoins, compte tenu de la géométrie d'acquisition des données laser, il serait intéressant d'estimer une rotation pure à évolution lente le long de la bande considérée afin de la comparer à celle de l'attitude de l'avion au moment de l'acquisition des données (nous ne disposons pas de ces données dans cette étude).

En outre, on peut considérer ce champ de déformation

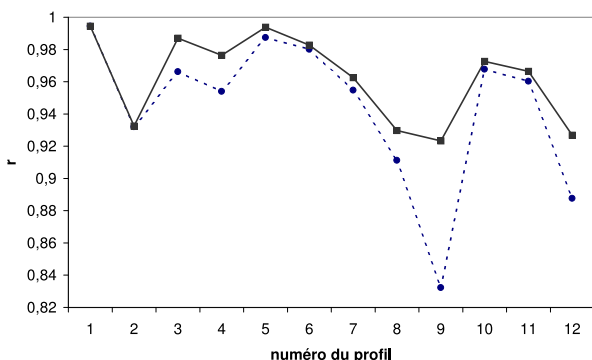


FIG. 11 – coefficients de corrélation calculés sur une série de 12 profils. Les courbes pleines et en pointillés correspondent respectivement aux données laser brutes et aux données corrigées.

comme les vecteurs erreur du système laser au moment de l'acquisition par rapport à notre référence qu'est le MNS de corrélation. Corriger la bande laser de ces erreurs revient à considérer des conditions idéales de prise de vues. L'application de cette méthode à un chantier comprenant plusieurs bandes, c'est à dire effectuer une correction indépendante propre à chaque bande, nous fournit des jeux de données toutes exprimées dans un même repère et acquise par le même système. Ceci constitue une alternative au problème de l'ajustement inter-bande pour une fusion millimétrique de plusieurs bandes au sein d'un même nuage de points et évite l'introduction *a priori* d'un modèle d'erreur dont certaines composantes sont difficilement modélisables [8].

La prochaine étape envisagée sera de tester l'algorithme sur des jeux de données différents, et de densité au sol variable. Il serait aussi souhaitable d'introduire des modèles de bruits liés à la nature physique des processus d'acquisition.

Notons pour finir que nos zones tests consistent principalement en des paysages urbains denses. Il est prévu de tester l'algorithme sur d'autres types de paysages : campagne, péri-urbain.

6 Conclusion

Cet article présente une méthode permettant de mettre en cohérence précisément un nuage de points laser avec un MNS provenant de la photogrammétrie. Il s'agit de corriger les données laser par un modèle affine de déformation calculé à partir de translations locales estimées entre le nuage de points 3D laser et le MNS de corrélation grâce à un processus d'accumulation locales. Les résultats de cette correction sont satisfaisants. Les données ainsi corrigées pourront être utilisées conjointement avec des images aériennes. La précision sera optimale lors de la fusion de ces deux sources.

Références

- [1] C. Baillard. *Analyse d'images aériennes stéréoscopiques pour la restitution 3D des milieux urbains*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris, 1997.
- [2] H. Burman. Adjustment of laserscanner data for correction of orientation errors. volume XXXIII-3/W4, pages 125–132, Part B3/1. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, October 2000.
- [3] M.J.E. Crombaghs, R.Brugelmann, and E.J. de Min. On the adjustment of overlapping strips of laseraltimeter height data. volume XXXIII, pages 224–231, Part B3/1. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000.
- [4] E.J. Huising and L.M. Gomes Pereira. Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53 (5) :245–261, 1998.
- [5] J. Kilian, N. Haala, and M. Englich. Capture and evaluation of airborne laser scanner data. volume XXXI, pages 383–388, Part B3. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996.
- [6] H.-G. Maas. Method for measuring height and planimetry discrepancies in airborne laserscanner data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(9) :933–940, September 2002.
- [7] C. Ries, H. Kager, and P. Stadler. High-quality geo-referencing of gps/imu-supported multi-spectral airborne scanner data - experiences and results. volume XXXIV, pages 222–226, Part 3B, Graz, Austria, September 2002. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.
- [8] T. Schenk. Modeling and analysing systematic errors in airborne laser scanners. Technical report, Departement of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, January 2001.
- [9] T. Schenk, S. Seo, and B. Csatho. Accuracy study of airborne laser scanning data with photogrammetry. volume XXXIV-3/W4. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, October 2001.
- [10] G. Vosselman. On estimation of planimetric offsets in laser altimetry data. volume XXXIV, pages 375–380, Part A3, Graz, Austria, September 2002. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.
- [11] G. Xu and Z. Zhang. *Epipolar Geometry in stereo, motion and object recognition*. Kluwer Academic Publishers, 1996.