

Les systèmes de mesure laser scanner aéroportés appliqués aux relevés topographiques sont présents sur le marché depuis quelques années. Le principe de cette méthode est essentiellement

interpolation et filtrage des données laser scanner en zone boisée

David Desbuisson
Ingénieur ENSAIS

Projet de fin d'études ENSAIS réalisé de mars à septembre 1998 à l'Institut de Photogrammétrie et Télédétection (IPF) de Vienne sous la direction du Prof. Karl Kraus et du Dr. Helmut Kager.

basé sur la mesure de la distance de l'avion au sol par un télémètre laser positionné et orienté par un ensemble GPS/INS (Inertial Navigation System). La génération du Modèle Numérique de Terrain en zone boisée est un des domaines d'application privilégiés du système. En effet, le télémètre laser permet la mesure de point au sol malgré la couverture végétale avec un coefficient de pénétration de 20 à 60 % suivant la saison et le type de végétation. L'interpolation d'un M.N.T. avec de telles données nécessite l'application d'algorithmes de filtrage adaptés. Le professeur Karl KRAUS de l'Institut de Photogrammétrie et Télédétection de Vienne a conçu, pour le rejet des points de végétation, une méthode basée sur le processus d'estimation robuste.

Abstract : Airborne laser scanners for recording topographic data are since a few years on the market. The principle of this method consists in the measurement of the distance between the airborne and the terrain with a laser rangefinder, positionated and orientated by a GPS/INS (Inertial Navigation System) system. The production of Digital Terrain Model in wooded areas is an important application of this system. The laser rangefinder can obtain ground points in spite of the tree canopy with a penetration rate from 20 % to 60 % according to the season and the kind of vegetation. The computing of a DTM with such data requires to use some adequate algorithm for the filtering. The professor Karl KRAUS of the Institut for photogrammetry and remote sensing of Vienna has developed a method based on the robust estimation to reject the vegetation points.

Mots Clés : système laser scanner, Modèle Numérique de Terrain, zone boisée, interpolation, filtrage, estimation robuste.

Keywords : laser scanner, digital terrain model, wooded areas, interpolation, filtering, robust estimation.

Schlüsselwörter : Laser Scanner, digitales Geländemodell, bewaldetes Gebiet, Interpolation, Filterung, robuste Schätzung.

Zusammenfassung : Die flugzeuggetragenen Laser Scanner Systeme für topographische Messungen sind seit einigen Jahren auf dem Markt. Das Prinzip dieser Methode beruht im wesentlichen auf der Entfernungsmessung zwischen Flugzeug und Boden mit einem Laserdistanzmesser, der mit einem GPS/INS (Inertial Navigation System) System positioniert und orientiert wird. Die Erzeugung von digitalen Geländemodellen in bewaldeten Gebieten ist ein Haupteinsatzgebiet dieses Systems. Der Laserdistanzmesser kann nämlich Bodenpunkte trotz Vegetationsdecke mit einer Durchdringungsrate von 20 % bis 60 % entsprechend Jahreszeit und Vegetationstyp liefern. Die Interpolation eines digitalen Geländemodells aus solchen Daten erfordert die Verwendung passender Algorithmen für die Filterung. Professor Karl KRAUS vom Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung in Wien hat ein Methode, die auf robuster Schätzung basiert, um die Vegetationspunkte zu eliminieren, entwickelt.

1. INTRODUCTION

L'IPF [I-IPF] a commencé à s'intéresser de près aux données laser scanner en 1996, date à laquelle la ville de Vienne a souhaité obtenir un Modèle Numérique de

Terrain précis à partir de données laser scanner sur la partie boisée de son territoire (70 km² environ).

Ce projet (le projet Wienerwald) est mené en partenariat entre l'IPF et la ville de Vienne [KRA97a]. La saisie des données a été confiée à Topscan [I-HAN], une entre-

prise allemande utilisant le système Optech ALTM 1020 [I-OPT]. La difficulté du calcul d'un Modèle Numérique de Terrain à partir de données laser scanner en zone boisée tient au fait que les données brutes comportent à la fois des points de végétation et des points du sol. La firme Topscan a fourni une classification des points basée sur la méthode dite de l'opérateur géomorphologique [KIL96]. Cette méthode de tri n'est pas apparue satisfaisante aux yeux des responsables du service topographique de la ville de Vienne. Les données du terrain ainsi classifiées contenaient encore de nombreux points de végétation.

Suite à ce problème, le Professeur Karl KRAUS a conçu les fondements d'une nouvelle méthode basée sur le processus d'estimation robuste pour le rejet des points de végétation. Ce nouvel algorithme a été implémenté dans le programme SCOP. DTM (module de calcul du programme SCOP [I-INP] dédié à la gestion, à l'exploitation et au calcul des M.N.T.). Actuellement, cette méthode a été testée et même si les résultats ne sont pas encore parfaits de nombreux exemples ont été calculés et jugés satisfaisants.

Cet article expose en premier lieu les principes généraux du système de mesure laser scanner et de l'interpolation de surface topographique. La méthode proposée par le Professeur Karl KRAUS est ensuite décrite et illustrée de deux exemples.

2. LE SYSTÈME LASER SCANNER *

2.1. Présentation

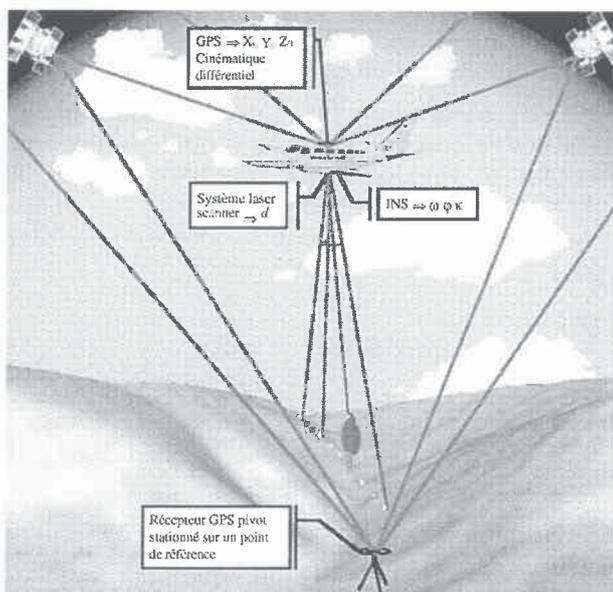


Figure 1. Le système laser scanner

Le système laser scanner est un système de mesure 3D aéroporté qui permet la mesure rapide, économique et précise de Modèles Numériques de Terrain et de Surface. De tels systèmes ne sont disponibles sur le marché que depuis quelques années. Ils sont spécialement utilisés pour les zones difficiles à exploiter par les méthodes plus traditionnelles, en particulier les zones boisées et les zones côtières. Le système laser scanner est essentiellement constitué d'un télémètre laser mesurant sans réflecteur la distance entre l'avion et le sol et d'un ensemble GPS/INS permettant l'orientation et le

positionnement absolu du faisceau laser lors de la mesure. Dans un tel système, le GPS est essentiellement utilisé pour le positionnement et la plate-forme inertielle pour la détermination de l'attitude du faisceau.

Le système scanner permet de mesurer le terrain par bandes de 250 à 700 m. On peut distinguer deux systèmes principaux :

- les systèmes composés de plusieurs télémètres laser émettant chacun un faisceau dans une direction particulière de sorte que l'incrément angulaire soit constant entre deux faisceaux,
- les systèmes à optique mobile, composés d'un seul télémètre laser dont le faisceau est dévié de manière périodique par un miroir en rotation ou en oscillation,

La mesure de la distance est effectuée par mesure du temps de propagation d'une impulsion laser. Cette technique a plusieurs avantages, elle permet une très haute fréquence de mesure (jusqu'à 80 kHz) et de plus permet de retenir la dernière réflexion de l'impulsion pour le calcul de la distance.

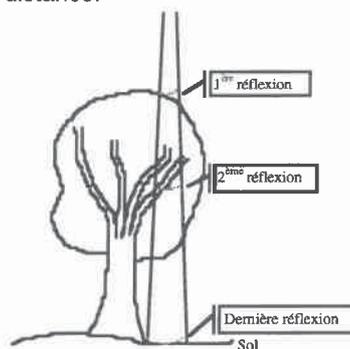


Figure 2. Réflexions multiples

Cette dernière propriété est très importante pour la mesure de M.N.T. en zone boisée. En effet, une impulsion peut subir plusieurs réflexions sur la couverture végétale avant d'atteindre le sol. Il est évident que pour ce type d'application, c'est toujours la dernière réflexion qui sera intéressante. Il peut cependant arriver qu'une impulsion soit entièrement réfléchiée avant d'atteindre le sol, le point ainsi mesuré n'étant alors pas sur la surface du sol, il faudra appliquer des algorithmes de filtrage adaptés pour le calcul du M.N.T.

2.2. Précision du système

Les précisions obtenues sont variables suivant le système utilisé. Il est cependant possible de donner un ordre de grandeur de manière à bien cerner les possibilités du système laser scanner.

Le positionnement GPS, utilisé en cinématique différentielle, fournit la position absolue (X, Y, Z) avec une précision variable suivant la longueur de la ligne de base utilisée, la configuration des satellites au moment des mesures et la connaissance des ondulations locales du géoïde. Cette précision peut être résumée par les chiffres suivants [CRA97] :

- 3-20 cm en planimétrie et 5-30 cm en altitude pour une ligne de base de 10 km,
- 15-30 cm en planimétrie et 20-40 cm en altitude pour une ligne de base de 50 km,

Les plates-formes inertielles généralement utilisées sur ce genre de système fournissent les angles d'orientation (ω , ϕ , κ) avec une précision de l'ordre de 0.01 degré.

* Exposé dans un article du n°78 (1^{er} trimestre 99).

Enfin le télémètre laser permet d'obtenir la distance avec une précision de l'ordre de 0,15 m.

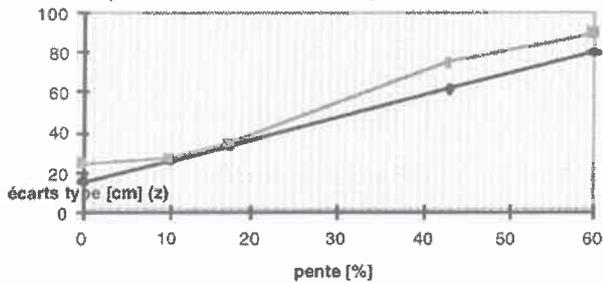


Figure 3. Précision de la méthode laser scanner

L'ensemble de ces précisions individuelles aboutit à une précision variable suivant les systèmes et en général suivant la pente du terrain. Les constructeurs annoncent des écarts types sur la cote altimétrique entre 0,05 m et 0,30 m et en général 0,10 m pour les coordonnées planimétriques. Cette précision est illustrée à titre d'exemple par la figure 3. Ce graphique est obtenu à partir du projet Wienerwald [KRA97a].

Il est clair que pour des pentes importantes, la précision effective est largement inférieure à celle annoncée par les constructeurs. La dégradation de la précision du système de mesure en fonction de la pente du terrain provient principalement de deux causes :

- Les erreurs commises sur le positionnement planimétrique du point mesuré entraînent une erreur sur la cote altimétrique d'autant plus importante que la pente est forte.

- La taille de l'impulsion laser au sol (entre 0,25 m et 1,5 m suivant le système et la hauteur de vol) entraîne une erreur sur la cote altimétrique d'autant plus importante que la pente est forte. Cette erreur provient du fait que la distance de l'avion au sol est obtenue à l'aide du premier ou du dernier retour de l'impulsion laser.

2.3. Conclusion

Le système de mesure laser scanner donne la possibilité d'obtenir de manière économique et rapide des Modè-

les Numériques de Surface et de Terrain dans des zones où les méthodes plus traditionnelles ont des difficultés. Le principal point faible de la méthode concerne le manque d'information sur la texture des objets mesurés. On peut imaginer pallier ce manque par enregistrement de l'intensité du signal retourné ou encore en rajoutant à bord de l'avion un dispositif photogrammétrique classique.

3. INTERPOLATION ET FILTRAGE DES DONNÉES LASER SCANNER EN ZONE BOISÉE

3.1. Interpolation de surface

La construction d'un Modèle Numérique de Terrain peut se ramener au problème suivant : soit un ensemble de points planimétriques P connus en altitude, à partir de ces données on recherche l'altitude de n'importe quel autre point situé dans le périmètre délimité par l'ensemble des points P .

Le programme SCOP. DTM calcule des M.N.T. de type grille. La méthode d'interpolation et filtrage utilisée est un compromis entre la méthode d'interpolation par sommation de surfaces élémentaires et la méthode d'interpolation par les moindres carrés [KRA87]. Cette méthode permet un filtrage des données observées. C'est-à-dire qu'il est tenu compte de la précision des observations pour tenter de corriger une partie des erreurs accidentelles affectant les mesures. Le filtrage implique que la surface interpolée ne passe plus par les points d'appui qui la soutiennent. On obtient donc des valeurs de résidus sur les points d'appui. Ceci est fondamental dans le cadre d'un processus d'estimation robuste puisque c'est l'analyse de ces résidus qui permet d'affecter un poids à chaque observation.

Pour la suite de l'article, il sera considéré que la méthode brute d'interpolation utilisée est la méthode d'interpolation par les moindres carrés. L'équation de base de cette interpolation est rappelée ci-dessous :

$$z = (C(PP_1), C(PP_2), \dots, C(PP_n)) \begin{pmatrix} V_{z_1 P_1} & C(P_1 P_2) & \dots & C(P_1 P_n) \\ & V_{z_2 P_2} & & C(P_2 P_n) \\ & & \cdot & \\ \text{sym.} & & & V_{z_n P_n} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \cdot \\ z_n \end{pmatrix} = \mathbf{c}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{z}$$

z = valeur interpolée réduite au point P .

z_i = valeur observée réduite à la tendance des observations, dans le SCOP cette tendance est un plan incliné.

$C(PP_i)$ = covariance de la valeur interpolée réduite z en P avec la valeur observée réduite z_i .

$C(P_i P_k)$ = covariance des valeurs observées réduites z_i et z_k .

$V_{z_1 P_1}$ = variance d'une valeur observée réduite de poids p_1 .

Figure 4. Formule de base de l'interpolation par les moindres carrés, d'après [KRA97b]

3.2. Estimation robuste

La méthode d'estimation robuste consiste à éliminer les observations faisant l'objet de fautes grossières dans le cadre d'une compensation. Cette méthode est itérative. Un premier calcul de compensation est effectué en affectant un poids identique à chaque observation. À la suite de ce premier calcul, une deuxième compensation

est calculée en donnant à chaque observation un poids fonction de son résidu v_i provenant du premier calcul.

Dans la méthode d'interpolation de surface par les moindres carrés, ces poids sont utilisés pour recalculer les valeurs $V_{z_1 P_1}$ situés sur la diagonale de \mathbf{C} .

On peut être amené à itérer plusieurs fois afin que le résultat de la compensation ne soit plus sous l'influence

des observations entachées de fautes. Comme fonction des poids affectés à chaque observation on prendra généralement :

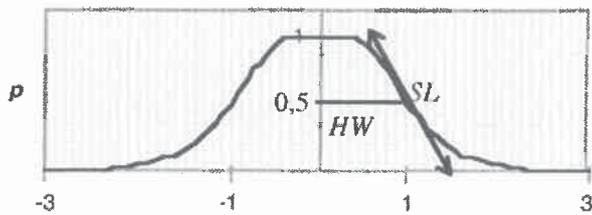


Figure 5. Fonction des poids ($a = 1$ et $b = 4$)

3.3. Algorithme adapté aux données laser scanner [KRA97b]

Les mesures provenant d'un système laser scanner en zone boisée présentent une répartition des écarts à la surface vraie bien particulière. Les écarts négatifs sont de type accidentel et sont soumis à l'écart type du système de mesure. Les écarts positifs sont par contre de deux types, on trouve d'une part des écarts accidentels et d'autre part des écarts grossiers correspondant aux points mesurés sur la couverture végétale.

Jusqu'ici, il n'a pas été tenu compte de cette répartition asymétrique des écarts à la surface vraie. L'application brute du processus d'estimation robuste aboutirait à l'élimination de points de sol. Pour prendre en compte cette répartition spécifique des écarts, la fonction classique des poids va être remplacée par la fonction suivante :

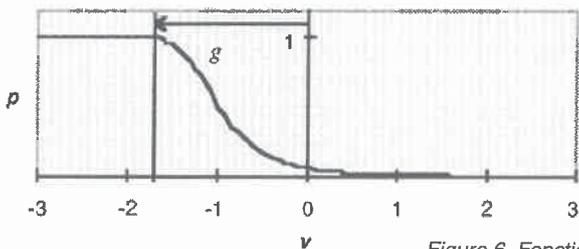


Figure 6. Fonction des poids adaptée aux données laser scanner

Cette nouvelle formule permet de prendre en considération, la forte influence des nombreuses erreurs grossières sur la première interpolation.

En effet, du fait de leur grand nombre, la première surface interpolée est relativement éloignée de la surface vraie du terrain. La valeur g correspond à la distance moyenne entre la surface calculée en première itération et la surface vraie du terrain. C'est aussi la distance de l'origine de l'histogramme des résidus à la médiane du nuage de points de sol dans ce même histogramme (sous réserve que la première surface soit relativement parallèle au sol).

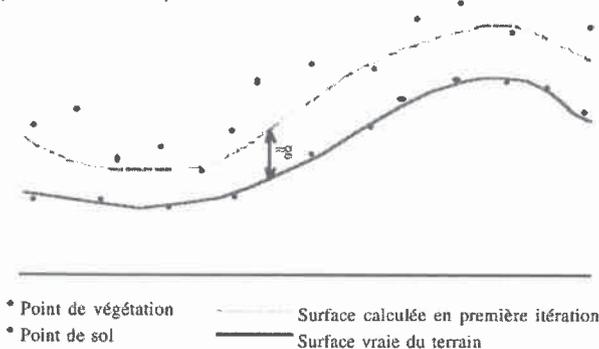


Figure 7. Points de sol, de végétation et première approximation de la surface

L'allure de la fonction des poids permet de prendre en compte la répartition asymétrique des points faux. En effet, les points de résidus inférieurs à g obtiennent un poids maximal de 1 car ils sont censés se situer sous la surface du terrain et donc ne faire l'objet que d'erreurs aléatoires. Les résidus supérieurs à g sont eux susceptibles d'être entachés de fautes et la fonction des poids classique de l'estimation robuste leur est appliquée.

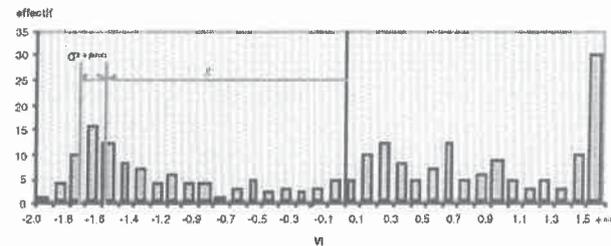


Figure 8. Histogramme des écarts à la surface interpolée

L'histogramme des résidus est établi après le calcul de la surface brute, obtenue en attribuant le même poids à tous les points d'appui. On suppose que cette surface est plus ou moins parallèle à la surface du terrain mesurée, toute la difficulté de mise en œuvre de la méthode consistera d'ailleurs à obtenir cette première surface parallèle. L'histogramme est alors étudié afin de déterminer le déplacement g .

Le déplacement g peut être déterminé par le calcul de l'écart type à gauche σ_l dans l'histogramme des écarts à la surface calculée. En un point quelconque d'abscisse l de l'histogramme, cet écart type σ_l est obtenu par la formule :

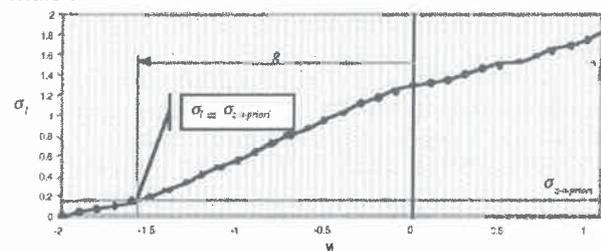


Figure 9. Étude de la fonction σ_l

Si la surface interpolée en première itération est bien parallèle au terrain, les points situés au sol gardent leur répartition normale. Par contre leur moyenne est déplacée vers la gauche de l'histogramme. On recherche par conséquent dans l'histogramme les valeurs de l pour lesquelles σ_l est égal à l'écart type attendu de la méthode laser scanner $\sigma_{2-priori}$. Les valeurs de l correspondantes peuvent être considérées comme de bonnes estimations de g .

Cette méthode de calcul de la valeur g est théoriquement fondée mais la pratique démontre qu'elle manque de robustesse. Pour pallier ce problème, une méthode de recherche de g basée sur une estimation du coefficient de pénétration du système a été mise au point.

Une fois ce déplacement g estimé la méthode est identique à l'algorithme d'estimation robuste vu au paragraphe 3.2.

4. EXEMPLES DE TRAITEMENTS DES DONNÉES LASER SCANNER

4.1. L'exemple LEOPOLDSBERG

Cet exemple est issu du projet Wienerwald, la superficie traitée est de 3250000 m². 215692 points ont été

mesurés par le système laser scanner sur cette zone. Un premier calcul a été effectué à partir des données brutes sans aucun filtrage, on constate le fort bruitage des données (*figure 10*). Le second calcul de la surface est le résultat obtenu après trois itérations du processus exposé au paragraphe 3.3., il ne reste alors que 108 848 points classifiés en points de sol (*figure 11*).

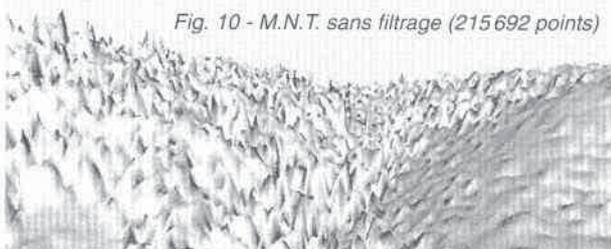


Fig. 10 - M.N.T. sans filtrage (215 692 points)



Fig. 11 - M.N.T. après filtrage (108 848 points)

4.2. Exemple de traitement des données test TopoSys

Les données TopoSys diffèrent de celle du projet Wienerwald par la densité de mesure du système qui atteint 80 kHz (60 000 points à l'hectare). Cette caractéristique du système implique une certaine lourdeur des calculs, qui cependant aboutissent à un résultat satisfaisant comme le démontre la *figure 12*. Cet exemple porte sur une surface de 288 800 m² sur laquelle se trouvent 289 941 points. Après application du processus itératif, il ne reste que 65 806 points classifiés en points de sol.



Figure 12. Résultat de l'interpolation après filtrage des données Toposys (65 806 points)

CONCLUSION

Les résultats obtenus avec la méthode d'interpolation et filtrage décrite ici démontrent bien que la génération de Modèle Numérique de Terrain en zone boisée à partir de donnée laser scanner peut être entièrement automatisée et devenir ainsi un domaine d'application privilégié pour cette nouvelle méthode de levé.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier l'ensemble du personnel de l'IPF pour son accueil durant ce projet et en particulier le

Professeur Karl KRAUS, le Dr Helmut KAGER, Hans THÜMINGER et Stefan WAGENKNECHT. Je remercie également Pierre GRUSSENMEYER pour son aide concernant la rédaction de cet article.

CONTACTS

David DESBUISSON : desb@galaxycorp.com

Karl KRAUS : kk@ipf.tuwien.ac.at

SITES INTERNET

• Constructeurs :

[I-ATM] NASA : www.csc.noaa.gov/crs/ALACE

[I-FUG] FUGRO : www.fugro-inpark.nl

[I-OPT] OPTTECH Inc : www.optech.on.ca

[I-SAA] Saab Survey Systems :
www.combitech.se/survey

[I-TOP] TopoSys : www.toposys.com

• Entreprises

[I-EAG] EAGLESCAN : www.eaglescan.com

[I-GEO] GEOSCAN : www.kwc.de/geoscan/default.htm

[I-HAN] HANSALUFTBILD/TOPSCAN :
www.hansaluftbild.de

[I-NEW] NEWTECH-Airborne :
www.newtech-airborne.com

• Instituts

[I-IFP] Institut de Photogrammétrie Stuttgart :
www.ifp.uni-stuttgart.de

[I-INP] INPHO GmbH : www.inpho.de

[I-INS] Institut de Navigation Stuttgart :
www.nav.uni-stuttgart.de

[I-IPF] Institut de Photogrammétrie et Télédétection de Vienne : www.ipf.tuwien.ac.at

BIBLIOGRAPHIE

- [CRA97] CRAMMER, Michael. : "GPS/INS integration", disponible sur [I-IFP].
- [KIL96] KILLIAN, J. HAALA, N. ENGLISH, M. : "Capture and evaluation of airborne laser scanner data", ISPRS-Archive, Volume XXXI, part B3, 1996, pages 383-388.
- [KRA87] KRAUS, Karl. : "PHOTOGRAMMETRIE", Band 2, C3-3, "Interpolation und Approximation von Flächen", DÜMMLER/BONN, 1987, pages 263-290.
- [KRA97a] KRAUS, Karl. HYNST, Erwin. BELADA, Peter. REITER, Thomas. : "Topographische Daten in bewaldeten Gebieten - Ein Pilotproject mit Laser-Scanner-Daten", Vermessung und GeoInformation, Heft 3, 1997, pages 174-181.
- [KRA97b] KRAUS, Karl. : "Eine neue Methode zur Interpolation und Filtering von Daten mit schiefer Fehlverteilung", Vermessung und GeoInformation, Heft 1, 1997, pages 24-31.
- [PFE98a] PFEIFER, Norbert. KÖSTLI, André. KRAUS, Karl. : "Interpolation of laser scanner data - Implementation and first results", ISPRS-Archive, Volume XXXIII, part 3/1, Columbus, OH, USA.
- [PFE98b] PFEIFER, Norbert. KRAUS, Karl. : "Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data", ISPRS journal 53, 1998, page 193-203.