

Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 99 (2001)

Heft: 10

Artikel: Triangulation aérienne : également pour l' ADS40?

Autor: Gervais, François

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-235818>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 25.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Triangulation aérienne: également pour l'ADS40?

L'imagerie générée par l'ADS40 de LH Systems, combinant exactitude géométrique et spectrale, ouvre de nouvelles perspectives dans l'analyse d'image numérique. Si la géoréférence déterminée par GPS et IMU est suffisante pour les applications de télé-détection, l'aérotiangulation demeure irremplaçable pour satisfaire aux exigences de précision et fiabilité de la photogrammétrie.

Die mit dem ADS40 Sensor generierten digitalen Luftbilder, in welchen geometrische und spektrale Genauigkeit kombiniert sind, eröffnen der digitalen Bildanalyse neue Perspektiven. Obwohl die Geo-Referenzierung mittels GPS und IMU für die meisten Fernerkundungsaufgaben ausreichend ist, können die photogrammetrischen Forderungen an die Genauigkeit und Zuverlässigkeit nur mit Luftbild-Triangulation erfüllt werden.

Le immagini generate dal sensore LH Systems ADS40, combinando la precisione geometrica e spettrale, aprono nuove prospettive all'analisi delle immagini digitali. Sebbene la geo-referenziazione determinata da il GPS e l'IMU sia ottima per applicazioni di telerilevamento, la triangolazione aerea rimane insostituibile nel fornire la precisione e l'affidabilità richiesta in fotogrammetria.

F. Gervais

Introduction

Le capteur numérique aéroporté ADS40 (Airborne Digital Sensor) a été introduit au XIX^{ème} congrès de l'ISPRS à Amsterdam en juillet 2000. Développé conjointement par le centre aérospatial allemand DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), l'ADS40 est le premier capteur d'imagerie numérique de performances, en termes de résolution et de surface couverte, similaire à celles des caméras aéroportées «film» et leur format 23 x 23 cm, leur distorsion minimale et leur résolution supérieure à 100 l/mm (lignes par millimètre). C'est une innovation majeure qui ouvre de nouvelles perspectives pour la photogrammétrie numérique. Les caméras numériques sont utilisées depuis longtemps dans les applications aériennes,

mais le format de ces capteurs (2000 par 3000 pixels soit 6 mégapixels) limite sérieusement la surface couverte. Ce défaut doit être compensé par des lignes de vol rapprochées et un nombre très important d'images, ce qui en limite l'attrait pour la photogrammétrie. Ainsi, la combinaison des performances dignes de la photogrammétrie avec l'avantage évident de l'imagerie numérique, en termes de radiométrie et processus totalement numérique, représente un progrès significatif. L'ADS40 représente une autre innovation majeure pour le monde de la photogrammétrie: le capteur est conçu non seulement pour satisfaire les standards de surface couverte et de résolution, mais aussi pour acquérir de l'imagerie multispectrale et ainsi intéresser le marché de la télé-détection. Cette fusion de la précision photogrammétrique (géoréférence) et le potentiel d'analyse et d'interprétation de l'image (classification) est nouvelle, déroutante et excitante.

Simultanément, le concurrent principal de LH Systems, Z/I Imaging développe un autre type de capteur numérique. La caméra modulaire numérique DMC2001 (Digital Modular Camera) comprend une

série de caméras numériques rectangulaires, combinée avec un post-traitement sophistiqué. L'ADS40 a été conçue de façon très différente et un bref résumé s'impose. L'effort est porté sur l'aspect géométrique, qui est plus concerné dans la suite de l'exposé que les aspects mécanique, électronique ou optique.

Conception

La base de la conception est le principe du scanner à trois lignes (three-line-scanner), défini par le Dr Otto Hoffman dans les années 70, où des barrettes (lignes de CCD) dans le plan focal saisissent l'imagerie en regardant en avant, à la verticale et en arrière de l'avion.

Il en résulte que chaque portion du sol est «photographiée» trois fois, ce qui est bien meilleure que les 50% résultants de la photographie aérienne classique (avec un recouvrement longitudinal de 60%)¹. Les barrettes panchromatiques de l'ADS40, d'une longueur de 78 mm, sont en fait constituées d'une paire de lignes de 12 000 pixels, une ligne de la paire étant décalée d'un demi-pixel (soit 3.25 µm) par rapport à l'autre ligne. En combinant judicieusement l'une avec l'autre, on obtient une résolution apparente de 3.25 µm ou 24 000 pixels [1].

Le plan focal contient également quatre barrettes simples de 12 000 pixels qui, combinées avec des filtres d'interférence (transmission-réflexion), acquièrent l'image dans les bandes rouge, verte, bleue (red-green-blue, RGB) et proche infrarouge (Near Infra-Red, NIR). Le «trichroïde», un séparateur de faisceau avec perte d'énergie minimale, garantit que le signal RGB d'une même surface de terrain est capté simultanément par les trois lignes, bien que disposées à 2.2 mm de distance les unes des autres (fig.1).

Les performances des CCD et des filtres sont maximisées grâce à l'objectif télécentrique qui fait que les rayons interceptent le plan focal à angle droit quel que soit l'angle d'incidence au point nodal d'entrée. L'ADS40 s'installe dans la même plate-forme gyro-stabilisée que les caméras «film» RC30.

¹ Les 50% de triple recouvrement résultant de 60% de recouvrement longitudinal est un problème géométrique intéressant. Chacun peut s'en faire sa propre démonstration.

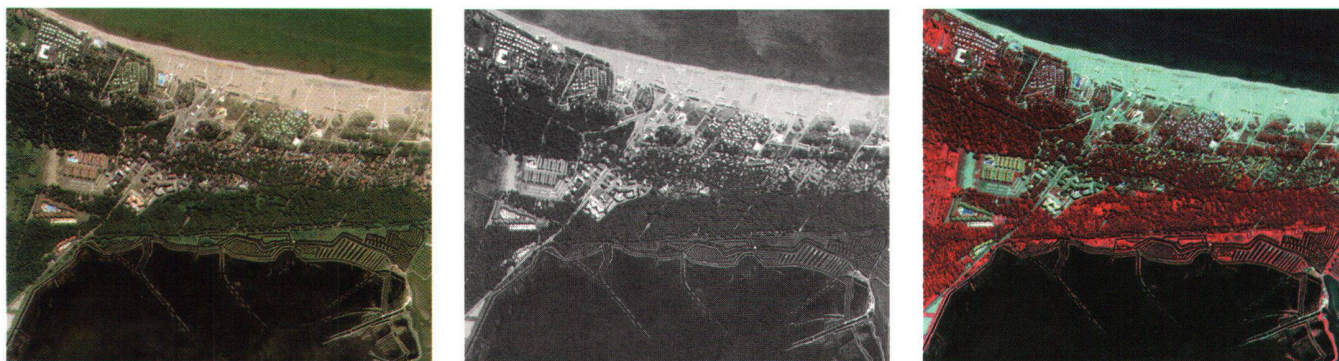


Fig. 1: Côte adriatique, Italie. Images couleur, panchromatique nadir et fausse couleur. H = 1500 m s/sol, GSD = 15 cm. Images totales 12 K x 70 K, 18.9 km² ; extraits 12 K x 14 K, 3.8 km².

L'enregistrement des données et leur post-traitement est sensiblement différent de la photogrammétrie classique, mais par la suite, les deux flux de données se rejoignent dans la station de travail numérique (logiciel de photogrammétrie numérique Socet Set®), et plus intéressant encore, lors de l'aérotriangulation (compensation par bloc avec ORIMA).

Procédé

La taille du pixel au sol (ou Ground Sample Distance, GSD) est conditionnée par l'altitude de vol, la vitesse par rapport au sol de l'avion, et la durée d'un cycle (intervalle entre deux saisies).

L'altitude détermine la «largeur» du pixel, alors que la «longueur» l'est par la vitesse de l'avion multipliée par la durée d'un cycle. Des paramètres de vol typiques sont: GSD pan / couleur = 15 / 30 cm; vitesse = 70 m/s; altitude = 3000 m s/sol; durée de cycle = 4.2 / 2.1 ms; largeur cou-

verte = 3.6 km. Les pixels peuvent être normalisés lors de la rectification. La durée d'un cycle (intervalle des mesures) est supérieure ou égale au temps d'intégration (durée des mesures). Le temps d'intégration minimum est de 1.25 ms (800 Hz). C'est le temps nécessaire pour transférer l'information collectée par les CCD. La vitesse de l'avion est donc une limitation de la GSD.

Les données compressées, environ 100 GB par heure d'acquisition, sont enregistrées durant le vol par un PC et une série de disques durs conditionnés (Mass Memory System, MMS). Seul le MMS, sorte de rack insérable, est acheminé au bureau pour le transfert des données. Le transfert par une interface SCSI est géré par un logiciel qui guide l'utilisateur à travers les différentes étapes de traitement des données [2].

Les données sont alors décompressées et organisées en imagerie (usuellement en format TIFF), en méta-données et en don-

nées de positionnement. Ces données de positionnement sont essentielles pour modéliser la position et l'altitude du senseur durant le vol et ainsi restituer le parallélisme des lignes scannées. La combinaison des mesures de positionnement (GPS) et inertielles (IMU), des grandeurs mesurées et des fréquences de mesure, permet de générer une trajectoire (position + attitude) précise et fiable avec une résolution de 200 Hz. Ce n'est pas surfait, car l'ADS40 acquiert l'imagerie à une fréquence maximale de 800 Hz (1.25 ms). La première étape du post-traitement est donc le calcul de cette trajectoire à l'aide du logiciel PosPAC d'Applanix Corporation. L'expérience montre qu'un soin tout particulier doit être apporté au calcul de la trajectoire par GPS (cinématique différentiel). Ceci est vrai pour la trajectographie par GPS uniquement destinée à l'aérotriangulation classique, et l'est aussi pour la trajectographie par GPS et IMU. Cela restera délicat tant que le traitement

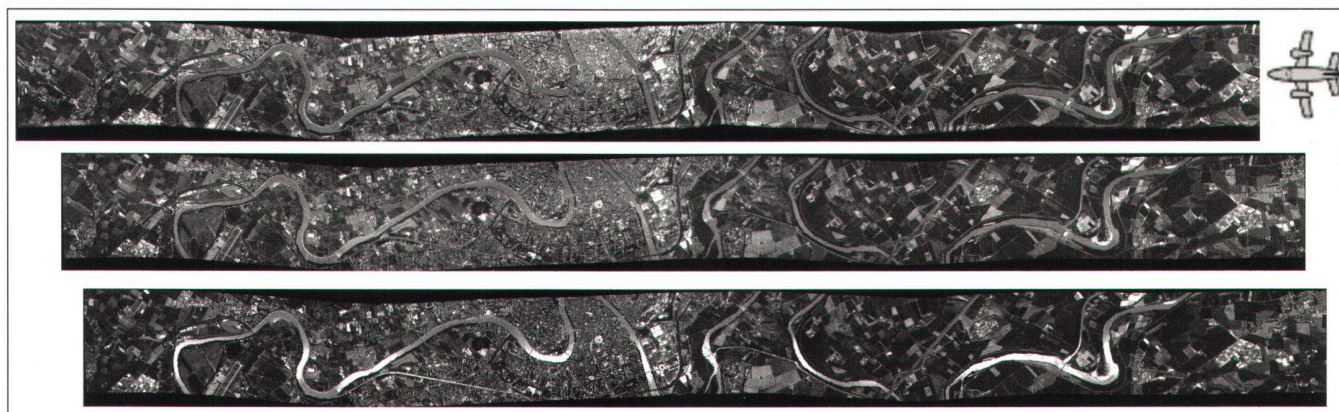


Fig. 2: Verone, Italie. Vues panchromatiques avant, nadir et arrière. H = 1500 m s/sol, GSD = 15 cm, 12 K x 132 K, 35.6 km².

des mesures GPS restera séparé du traitement des mesures inertielles. Les images sont ensuite calées sur la trajectographie grâce à un fichier de synchronisation. En ajoutant la calibration du plan focal (position de chaque pixel en x et y, comme pour des marques fiduciaires), chaque pixel est alors géoréférencé. Il ne reste alors plus qu'à rectifier les images brutes et à redonner à chaque pixel sa position relative. Ceci peut s'effectuer dans un plan à une altitude moyenne (rectification rapide) ou en combinaison avec un modèle numérique de terrain grossier (rectification précise).

L'image observée dans Socet Set® n'est alors pas différente d'une photographie scannée traditionnelle. La radiométrie est supérieure: les données sont collectées en 16 bits de tons de gris. La dynamique effective est entre 11 et 13 bits. On peut également les réduire en 8 bits lors de la rectification. Les lignes RGB et NIR sont réduites en 8 bits et combinées en RGB ou NIR-RG en 24 bits.

L'autre différence, plus notable, est la dimension de l'image. Les images panchromatiques haute résolution ont une largeur de 24 000 pixels, les images multispectrales et panchromatiques standards de 12 000 pixels. L'image «film» équivalente à l'exemple numérique mentionné précédemment serait à l'échelle 1:10 000 et scannée à 12.5 mm. La surface couverte est alors de 2.3 x 2.3 km pour une altitude de 1500 m et un objectif de 15 cm. En résolution standard, à la même GSD, la largeur couverte est de 1.8 km pour une altitude de 1500 m.

La similarité en terme de largeur couverte est évidente. La longueur de l'image par contre est pratiquement illimitée! Durant nos campagnes de vol au printemps 2001, la ligne la plus longue était de 132 000 pixels à une GSD de 15 cm, soit 19.8 km, pour un temps de vol de 5'30" à une vitesse de 115 kn.

Simultanément trois images panchromatiques avec des angles de vue différents sont collectées, puis géoréférencées individuellement (fig. 2). Elles peuvent donc être visualisées directement en mode stéréoscopique. La qualité de cette vue sté-

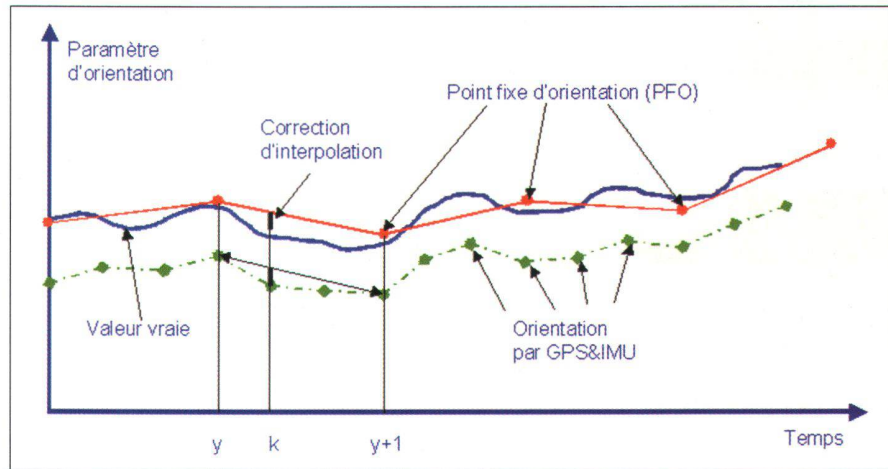


Fig. 3: Procédé d'ajustement des paramètres d'orientation
(Image: 800 Hz, IMU: 200 Hz, GPS: 2 Hz, Triangulation: 0.2 Hz).

reo est suffisante pour certaines applications, dans Socet Set® jusqu'à un niveau de minification 4:1 environ. Au-delà, la parallaxe résiduelle est gênante. Pour les applications nécessitant la précision maximale atteignable (environ 0.7 x GSD), l'aérotriangulation s'impose.

Principes de la triangulation

Les but essentiels de la triangulation sont [3] & [4]:

la calibration:

- détermination du désalignement des axes de l'IMU par rapport aux axes du capteur
- l'auto-calibration
 - distance principale
 - point principal d'autocollimation
 - distorsion de la lentille
 - position des lignes de CCD

fiabilité:

- redondance additionnelle grâce aux points de liaison
- contrôle indépendant des données GPS et IMU
- ajustement optimal avec le terrain grâce au point d'ajustage
- introduction de paramètres pour compenser les différences de datum entre le GPS aéroporté et les points d'ajustage au sol

réduction du coût de l'ADS40:

- utilisation d'IMU moins performants et moins coûteux

Compte tenu de la géométrie particulière des images générées par l'ADS40, le logiciel bien établi ORIIMA a été adapté au nouveau modèle de capteur.

La préparation d'un bloc est très similaire à celle d'un bloc traditionnel: importation des fichiers «support», importation des points de contrôle, définition de la distribution des points de liaison, mesure automatique des points de liaison et mesure semi-automatique des points d'ajustage, ajustement par bloc avec la méthode des moindres carrés robuste, écriture des fichiers «support» et de calibration ajustés.

Mais qu'ajuste-t-on au fait, puisqu'il n'y a plus ni centre de projection, ni orientation externe en tant que tels?

De par son mode d'acquisition, l'image forme un tout très homogène, puisque dès sa création, il s'agit d'une entité continue. On peut donc prétendre qu'il n'y a pas de changement brusque ou de discontinuité. Par contre, sur une durée et une distance telles qu'énoncées précédemment, on peut s'attendre à des modifications lentes, des dérives et, évidemment, des biais systématiques. Rappelons que l'imagerie est saisie à 800 Hz, les mesures inertielles à 200 Hz et les mesures GPS à 2 Hz. L'idée est donc d'avoir une



Fig. 4: Shinjuku, Tokyo, Japon. Images panchromatiques arrière, nadir et avant. $H = 2000$ m s/sol, GSD = 20 cm. Images totales 12 K x 53 K, 25.4 km²; extraits 1120 x 1320, 5.9 ha.

mesure «indépendante» chapeautant le tout (fig. 3).

Cette information est idéalement fournie par la triangulation aérienne. A l'importation des images, des points fixes d'orientation (PFO) sont générés à intervalle régulier tout au long de la trajectoire. L'intervalle est dépendant de plusieurs paramètres, dont les caractéristiques de l'IMU et la distance entre la vue nadir et arrière (2400 pixels). La dépendance par rapport à l'IMU se comprend aisément quand on sait la tendance à dériver de ce type de capteur. La dépendance vis-à-vis de la distance entre la vue nadir et arrière est plus spécifique.

On a dit que chaque élément de surface de terrain est saisi trois fois par les lignes panchromatiques. Contrairement aux caméras «film», les angles de vue sont fixes pour la composante longitudinale, soit 0° pour la vue nadir, 14° pour la vue arrière et 28° pour la vue avant. La vision stéréoscopique s'effectue donc pour n'importe quel point sous un angle de 14° (nadir – arrière), 28° (avant – nadir) ou 42° (avant – arrière), en fonction de la texture et la topographie. La composante latérale varie entre 0° et 32° (fig. 4).

Dans le cas de la triangulation, chaque point de liaison est donc mesuré selon ces trois angles. L'origine des faisceaux incidents n'est pas le centre de projection x et le centre de projection $x+1$ comme dans l'imagerie classique. L'origine du faisceau avant est située entre le point fixe d'orientation y et celui $y+1$. L'origine du faisceau nadir est située idéalement entre le PFO

$y+2$ et $y+3$, et celle du faisceau arrière entre le PFO $y+3$ et $y+4$ (la base avant est deux fois plus longue que la base arrière). Ainsi, avec un seul point de liaison, on fait participer cinq PFO successifs (fig. 5).

Il ne reste alors plus qu'à mesurer un nombre suffisant de points de liaison. A cet effet, une distribution de point adaptée au format semi-variable des images est générée. La dimension y est bien définie (12 000 pixels) et des points sont placés en haut, au milieu et en bas de l'image; la dimension x est variable et la distribution est simplement répétée, de manière que 2 x 3 points se situent entre deux PFO contigus. Cette distribution est calquée sur celle de von Gruber. Il est ensuite possible de densifier la distribution par des agglomérats de points («cluster»), un plus grand nombre de lignes, etc.

Résultats

L'expérience accumulée au printemps 2001 durant les campagnes de vol en Suisse, au Japon et en Italie, a montré que la précision finale de l'ajustement se situait entre 1/3 et 2/3 de GSD (sigma zéro, σ_0). Ceci correspond aux résidus observés pour les points d'ajustage. Les valeurs pour l'altimétrie sont environs deux fois plus élevées que ces valeurs, concernant la planimétrie. Compte tenu de la géoréférence préexistante (post traitement du GPS & IMU), les lignes transversales ne sont pas nécessaires sauf si une auto-calibration fiable est envisagée. Plus intéressant encore, les points d'ajustage («ground control point») ne sont nécessaires que si un ajustement du datum du GPS aéroporté est envisagé. Sinon, l'in-

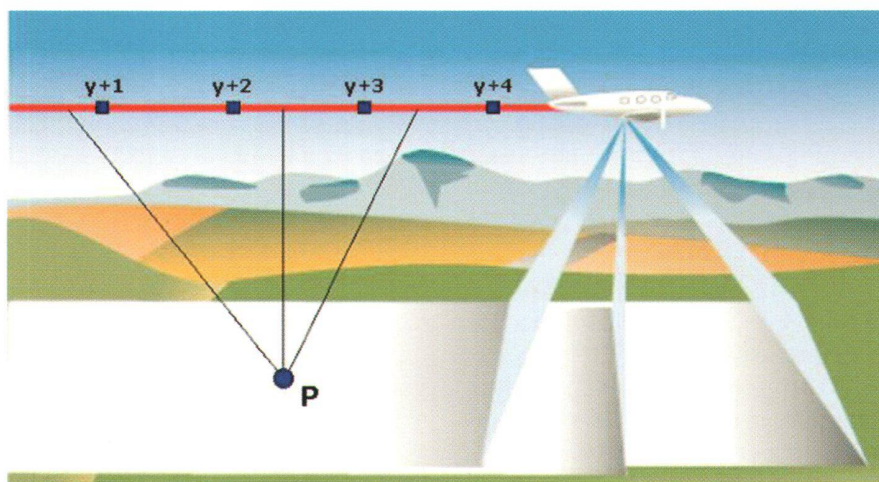


Fig. 5: Mise à contribution de cinq points fixes d'orientation (PFO) par la mesure d'un seul point de liaison.

troduction des points de liaison suffit à éliminer totalement la parallaxe résiduelle. C'est cependant une configuration peu recommandable et un minimum de points de contrôle («check point») devrait être mesuré afin de contrôler la qualité de la géoréférence déterminée par GPS.

Etant donné la structure symétrique et répétitive des points de liaisons, il est aisé d'isoler et d'inspecter les points qui n'ont pas pu être corrélé complètement. Toutes les fonctions graphiques et numériques d'ORIMA sont disponibles et permettent une analyse rationnelle du bloc triangulé. L'environnement étant très similaire, la phase d'apprentissage est extrêmement courte.

Perspectives

Une fois la géométrie des vues panchromatiques ajustée, une multitude de combinaisons spectrales et géométriques est possible. Par exemple, les images haute résolution panchromatiques peuvent être «colorisées» à l'aide de l'image RGB en résolution standard. Il faut rappeler que les images RGB se combinent aisément, les composantes individuelles étant issues du même faisceau incident. La majorité des applications requièrent une rectification précise et donc un modèle numérique de terrain. Celui-ci est assez aisément dérivé des images panchromatiques après rectification rapide.

Le potentiel de combinaison n'est pas encore totalement exploité, voire imaginé, mais ces nouvelles perspectives sont passionnantes.

Bibliographie:

- [1] Sandau, R. et al., (2000) – Design principles of the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, Part B1, Amsterdam, Netherlands, pp. 258–265.
- [2] Tempelmann, U. et al. (2000) – Photogrammetric software for the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, Part B2, Amsterdam, Netherlands, pp. 552–559.
- [3] Hinsken, L. et al. (2001) – Triangulation of LH Systems' ADS40 using ORIMA, ASPRS, St. Louis, USA, 2001.
- [4] Greening, W.J.T. et al. (2001) – The proper use of directly observed orientation data: aerial triangulation is not obsolete, ASPRS, St. Louis, USA, 2001.

François Gervais
LH Systems
Airborne Systems, Asia-Pacific Region
c/o Leica Geosystems (S'pore) Pte Ltd
8 Pandan Crescent #02-04, UE Tech Park,
Singapore 128466
gervais@lh-systems.com



MOTOROLA



schnell
sicher
modern
Sprechfunk

Neu
Jetzt schon ab
CHF 727.-
inkl. MWST



Kurz und bündig Anweisungen erteilen. Unmittelbar und direkt Informationen entgegennehmen. Schnell ausführen. Ohne Zeit raubendes Wählen und Warten. Einfach Taste drücken und sprechen. Verbindung ist sofort hergestellt. Das ist Motorola-Sprechfunk. Für jeden Anwender. Immer das passende Modell. Handlich, vielseitig und robust. Keine Gesprächsgebühren. Ideal für Service, Unterhalt, Sicherheit, Bau, Vermessung usw.

Professional Radio

MOTCOM
Communication

Motcom Communication AG
Herostrasse 9, 8048 Zürich
Tel. 01-437 97 97, Fax 01-437 97 99
www.motcom-com.ch
contact@motcom-com.ch

GRATIS-FUNK-KONTAKT

JA, ich bin an modernem Sprechfunk interessiert.

☐ Bitte senden Sie mir das kostenlose **Funk-Info-Paket**.

☐ Senden Sie mir bitte das **Händlerverzeichnis**.

Name/Vorname

Firma

Strasse

PLZ/Ort

Telefon

Telefax

Senden an: Motcom Communication AG, Herostr. 9, 8048 Zürich