

Reconstruction 3D par Images des Plans Epipolaires : Application à un interféromètre imageur hyperspectral aéroporté

Clara BARBANSON^{1,2}, Andrés ALMANSA³, Yann FERREC¹, Pascal MONASSE⁴

¹ONERA - Département d'Optique et Techniques Associées
Chemin de la Hunière, 91123 Palaiseau, France

²Telecom Paristech - Département Signal et Image
46 rue Barrault, 75013 Paris, France

³MAP5, CNRS UMR 8145
Université Paris-Descartes, 75270 Paris, France

⁴LIGM, UMR 8049
Ecole des Ponts, UPE, Champs-sur-Marne, France

`clara.barbanson@onera.fr`, `andres.almansa@parisdescartes.fr`
`yann.ferrec@onera.fr`, `monasse@imagine.enpc.fr`

Résumé – La restitution hyperspectrale par des interféromètres imageurs requiert une connaissance du relief du terrain. Pour des raisons de disponibilité, de coût et d'encombrement, ce traitement nécessite d'être effectué par traitement stéréoscopique. Par ailleurs, les acquisitions denses de ces instruments permettent d'utiliser des algorithmes multi-vues. Nous présentons une méthode basée sur les images des plans épipolaires, pour obtenir une carte de disparité éparsée, et sa densification par Graphcut. Nous exposons une chaîne complète de traitement, avec un pré-traitement de décomposition d'image, nécessaire pour certains instruments.

Abstract – Obtaining hyperspectral imagery using interferometers require a knowledge of the relief of the scene. Because retrieving it from other sources can be costly, cumbersome or simply unavailable, it is of interest to compute it through image processing means. We introduce a multi-view stereoscopic method based on epipolar-plane images in order to obtain a sparse disparity map. We also present a method to densify this map with graphcuts. The whole processing chain is given, including a pre-processing step of image decomposition, which is compulsory for certain instruments.

1 Introduction

L'imagerie hyperspectrale est une technologie très recherchée en télédétection. Elle peut être obtenue par interférométrie. Cette solution présente des avantages, comme un fort gain radiométrique et une résolution spatiale fine, mais peut causer des erreurs en zone de relief.

1.1 Interféromètres imageurs

La restitution hyperspectrale par des interféromètres imageurs possède la particularité de n'être pas instantanée, mais temporelle. En effet, le point commun à tous ces instruments est que, à mesure que l'instrument se déplace (à bord d'un avion, dans le cas présent), on acquiert toute une série d'images qu'il faut faire correspondre pour obtenir l'interférogramme de chaque objet de la scène observée. Celui-ci peut ensuite être transformé en spectre par calcul de la transformée de Fourier, voir figure 1.

Les exemples aéroportés de tels instruments sont variés. L'Hy-

percam de Telops [2] utilise un interféromètre de Michelson qui fait varier la différence de marche au cours du temps. Chaque image correspond alors à un échantillon de l'interférogramme. Il y a aussi le THI [8], qui utilise un autre type d'interféromètre, dit de Fabry-Perot, pour calculer cette fois les spectres par une transformée de Fourier spatiale. L'instrument utilisé ici est un spectromètre à transformée de Fourier statique, dont le principe est détaillé en section 3.1. Quel que soit le cas, il est nécessaire d'établir une correspondance des éléments de la scène sur une séquence d'images où la géométrie varie en raison de sommets de prises de vue distants.

Bien que l'application présentée ici porte sur un interféromètre imageur, il n'est pas inutile de mentionner que les traitements évoqués par la suite sont également nécessaires pour les instruments à filtre en coin, qui permettent eux aussi d'obtenir des imageurs hyperspectraux. Il s'agit d'une matrice de détecteurs devant laquelle le filtre est placé. On reconstruit alors le spectre en assemblant directement les valeurs fournies par le détecteur.

1.2 Importance de la stéréoscopie

Afin de ne pas avoir d'erreur sur la mise en correspondance des images, il est donc important de connaître le relief de la scène. En effet, cette erreur se reportera sur les valeurs des échantillons des interférogrammes. Les spectres seront alors faux. Des modèles numériques de surface peuvent être obtenus par Lidar, mais cela peut présenter des inconvénients en termes de coûts ou encombrement à bord de l'avion. Il est alors nécessaire d'obtenir l'élévation par traitement d'image.

Puisque le principe d'acquisition des interféromètres imageurs génère des séquences très denses d'images et que la trajectoire de l'avion doit être rectiligne, la méthode de stéréoscopie multi-vues des images des plans épipolaires (EPI) est particulièrement adaptée à ce type d'instrument. Elle est détaillée dans la partie 2. La carte éparse fournie par les EPI est ensuite densifiée par Graphcut comme décrit en 2.2. Les résultats sont fournis dans la partie 3. Cette partie dédie aussi un paragraphe à une méthode de décomposition d'image, étape de pré-traitement nécessaire pour certains interféromètres.

2 Traitement stéréoscopique

Le traitement stéréoscopique présenté dans cette section consiste à obtenir une carte de disparité éparse par méthode des EPI, puis à la densifier par Graphcut.

2.1 Obtention d'une carte éparse par EPI

La méthode des images de plans épipolaires a d'abord été développée dans [1]. Elle se base sur une extension de la contrainte épipolaire. En effet, lorsque la trajectoire de l'appareil de prise de vue est linéaire, les centres d'images de l'ensemble des clichés sont colinéaires. Dans ce cas, les plans épipolaires sont confondus entre toutes les paires d'images. Si l'acquisition est suffisamment dense, chaque plan intersecte de nombreux clichés, et un grand nombre de lignes épipolaires correspondantes sont ainsi obtenues.

On peut construire une nouvelle image à partir de chacune de ces lignes : l'image des plans épipolaires (EPI), fig. 3. Il s'agit d'une image spatiotemporelle : l'un des axes décrit le temps. Le second axe correspond à la direction du déplacement de l'instrument. Ce que l'on observe sur l'EPI sont donc les trajectoires, appelées chemins, des points de la scène en fonction de la position de la caméra selon l'axe de déplacement. La pente de ces trajectoires renseigne sur la position de l'objet dans la scène. En effet, dans le cas d'un déplacement linéaire de la caméra en visée orthogonale à la trajectoire, d'orientation constante, la disparité s'exprime :

$$d = B \frac{h}{D}$$

où d est la disparité, B la base (la distance entre deux prises de vue), h la hauteur du point observé et D la distance sol-caméra. Cette équation montre bien que la disparité varie linéairement

par rapport à la base, ce qui explique que les chemins soient rectilignes.

On comprend alors bien que la méthode des images de plans épipolaires nécessite de respecter deux contraintes : la caméra doit avoir une trajectoire rectiligne, et l'acquisition doit être suffisamment dense pour que les chemins sur les EPI soient continus. Ces deux conditions sont aussi présentes, pour des raisons expliquées dans la section 1, dans une acquisition par un interféromètre imageur.

Les EPI ont été mis en oeuvre dans des prises de vues terrestres rapprochées à des précisions pixelliques par [4] sur des objets et par [6] sur des scènes urbaines. Il s'agit ici, à notre connaissance, de la première application dans le cadre d'une acquisition aéroportée. Cela implique, comme on le voit dans la figure 3, une grande distance objet-caméra et donc des orientations des chemins peu variées. De plus, les conditions de vol entraînent l'apparition d'écarts à la trajectoire, qui vont perturber les EPI. Dans notre cas, les images sont recalées sur la trajectoire du plan de vol à l'aide des données de navigation (GNSS et INS). Cela peut entraîner des erreurs sur l'image. Nous les considérons négligeables, au vu de la qualité du pilotage.

L'obtention de la carte éparse se fait par extraction des chemins par un algorithme de détection a contrario d'alignements [5].

2.2 Densification

Afin d'obtenir un modèle numérique de surface continu, nous proposons de densifier la carte éparse. Pour cela, nous reprenons la méthode de [7] et l'adaptions au cas multi-vues. On note I_0 l'image de référence, c'est-à-dire l'image de la séquence pour laquelle la carte de disparité est calculée. L'énergie que l'on se propose de minimiser est donc la suivante.

$$E = E_{donnee} + E_{occ} + E_{reg} + E_{unicite} + E_{eparse}$$

où :

E_{donnee} est un terme d'attache aux données. Il est adapté au cas multi-vues. On ne considère donc plus des couples de pixels correspondants entre deux images, mais un ensemble de pixels d'une séquence d'images défini par un pixel de l'image de référence et une disparité (x_0, d) . L'image de référence correspond à l'image centrale de l'EPI pour laquelle la carte éparse a été construite. On définit le terme d'attache aux données sur l'ensemble des images de la séquence ainsi :

$$E_{donnee} = \frac{1}{N} \sum_{x \in \mathcal{P}} \sum_{k=1}^N |I_0(x) - I_k(x + kd(x))|^2$$

où I_k une image de la séquence, N le nombre total d'images, \mathcal{P} est l'ensemble des pixels d'une image et $d(x)$ la disparité associée.

E_{occ} est un terme qui pénalise les occlusions :

$$E_{occ} = K \sum_{x \in \mathcal{P}} 1_{x \in \mathcal{O}}$$

où \mathcal{O} est l'ensemble des pixels occultés sur I_0 et K est le coût associé à une occlusion.

E_{reg} est un terme de régularisation qui pénalise le fait que deux pixels adjacents (noté $x_1 \sim x_2$) aient des disparités différentes :

$$E_{reg} = \lambda \sum_{x_1 \in \mathcal{P}, x_1 \sim x_2} 1_{d(x_1) \neq d(x_2)}$$

$E_{unicite}$ assure l'unicité de la solution, c'est-à-dire qu'à chaque pixel ne soit attribué qu'une seule valeur de disparité :

$$E_{unicite} = \sum_{x \in \mathcal{P}} \infty \cdot 1_{d_1(x) \neq d_2(x)}$$

E_{eparse} intègre les résultats de la carte éparsée issue des EPI en empêchant la modification de ses valeurs :

$$E_{eparse} = \sum_{x \in \mathcal{F}} \infty \cdot 1_{d_{fixe}(x) \neq d(x)}$$

où \mathcal{F} est l'ensemble des pixels fixés par la carte de disparité éparsée obtenue dans la partie 2.1 et $d_{fixe}(x)$ la disparité associée à un pixel de \mathcal{F} .

Ces termes étant tous sous-modulaires, on utilise un algorithme d'expansion- α que l'on minimise par graphcut [7].

3 Résultats

3.1 Données

Nous présentons dans cette partie les résultats de notre méthode. Les images présentées ici sont issues de Sieleters, un instrument hyperspectral infrarouge développé par l'ONERA [3]. Il s'agit d'un spectromètre imageur à transformée de Fourier statique. Sa particularité est que les images qu'il génère contiennent l'ensemble des états d'interférences possibles. On observe donc des franges d'interférence sur les images, fig.1. Ces franges sont immobiles et c'est le déplacement de l'avion qui assure que tous les éléments de la scène passent dans les différents états d'interférence, afin de reconstruire l'interférogramme et le spectre.

L'avion vole à une hauteur de 2000 m. Le pas d'échantillonnage au sol des images présentées est de 50 cm.

3.2 Un prétraitement important

Les franges sur les images de Sieleters, très contrastées à certains endroits, perturbent les traitements stéréoscopiques. C'est pour cela que pour ce type d'instrument, un pré-traitement pour enlever les franges est nécessaire. Afin de correspondre au mieux au modèle de formation d'image, qui correspond à une modulation des fréquences de la scène par les fréquences des franges, la solution adoptée est de décomposer l'image suivant un modèle multiplicatif tel que :

$$w = u(1 + v)$$

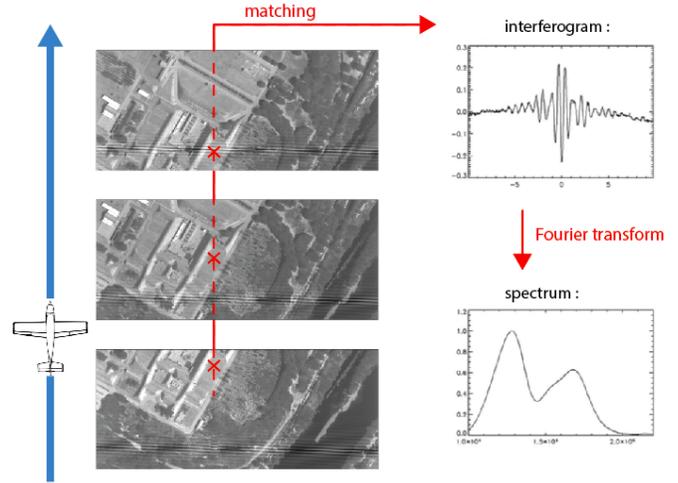


FIGURE 1 – Pour chaque élément de la scène, sa valeur en niveaux de gris sur chacune des images permet de construire son interférogramme selon la différence de marche. Ensuite, le spectre est déterminé par transformée de Fourier. La flèche bleue indique la direction de vol.

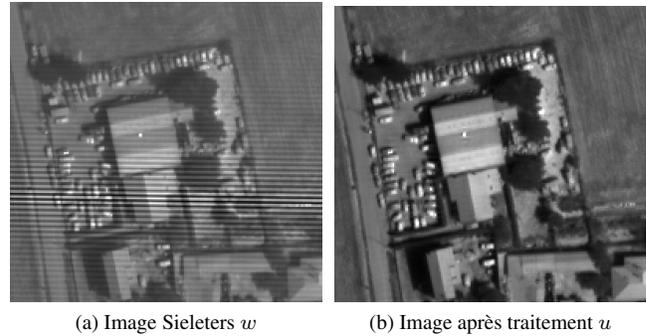


FIGURE 2 – (a) correspond à l'image mesurée par Sieleters. (b) correspond à la composante contenant l'image de la scène u après application de l'algorithme de décomposition.

où w est l'image mesurée par l'instrument, u est la partie contenant les fréquences de la scène et v est la composante contenant les fréquences des franges. Les perturbations liées au bruit sont négligées, ce qui est tout à fait acceptable au vu de la qualité des images de Sieleters. La résolution de ce problème, non convexe, a été publiée dans [9]. Il s'agit d'un algorithme minimisant une variation totale lisse sur u et v itérativement. On applique en particulier la variation totale sur une seule direction pour mieux s'adapter aux franges : horizontalement pour v , verticalement pour u . Une contrainte fréquentielle est également ajoutée sous la forme d'un masque appliqué au domaine spectral des franges.

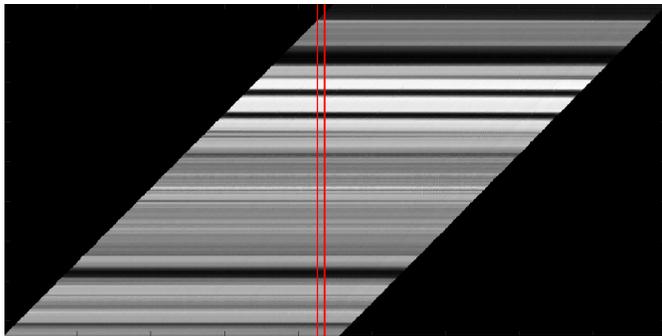
L'image de la scène résultante est montrée en fig. 2. Elle ne contient en particulier plus les franges très contrastées.

3.3 Restitution stéréoscopique

Une image des plans épipolaires issue de Sieleters est montrée en figure 3. Elle est constituée à partir de 901 images, dont on a pris à chaque fois la même colonne (la même ligne épipolaire).



(a) Image Sieleters



(b) Image des plans épipolaires

FIGURE 3 – (b) Image des plans épipolaires. L’axe vertical correspond à la coordonnée spatiale des colonnes de l’image d’origine. L’axe horizontal correspond au temps (ou au numéro d’image). La colonne rouge encadrée correspond à celle encadrée sur l’image mesurée par Sieleters en (a)

L’ensemble des EPI de l’image 3a permet de construire la carte de disparité éparse en figure 4a. La précision de cette carte atteint 0.2 pixel.

Un résultat de modèle numérique de terrain obtenu par densification de la carte éparse est montré sur la figure 4b. On constate que les valeurs obtenues par les EPI sont bien prises en compte et aident à la délimitation des objets. Sur les haies, où la carte éparse est un peu bruitée, le graphcut lisse le résultat. Cependant, le bruit de la végétation donne aussi des valeurs qui génèrent par la suite des aplats qui ne correspondent pas à la réalité, comme la tâche claire sur la figure 4b. Sur le bâtiment, où les limites sont plus délimitées et il y a moins de bruit, les valeurs aberrantes n’ont pas été prises en compte par le graphcut.

4 Conclusion

Nous avons présenté une méthode de stéréovision multi-vues adaptée à un interféromètre imageur hyperspectral aéroporté,

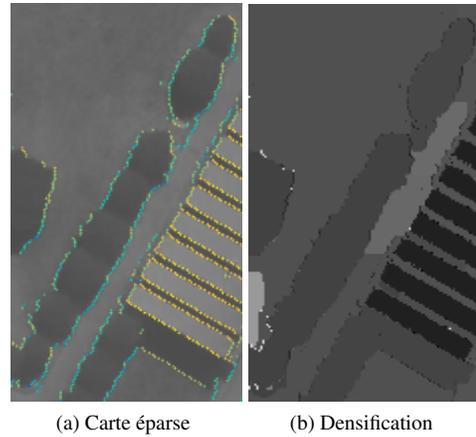


FIGURE 4 – (a) montre un détail de la carte éparse. Les valeurs d’élévation y sont codées en couleur et superposées à une image Sieleters en niveaux de gris. (b) présente le résultat de la densification de (a). Les niveaux de gris codent la disparité.

dans l’intérêt de pouvoir construire des spectres corrects en zone de relief. Les EPI fournissent un bon canevas pour la densification, mais sont très sujettes au bruit dans les zones de végétation. Pour la suite, il peut être intéressant dans la phase de densification de leur donner un poids suivant la fiabilité de la mesure.

- [1] R. BOLLES, H. H. BAKER et D. H. MARIMONT. “Epipolar-Plane Image Analysis : An Approach to Determining Structure From Motion”. In : *IJCV* 1.1 (1987), p. 7–55.
- [2] M. CHAMBERLAND et al. “Recent Instrument Development at Telops”. In : *Advances in Imaging*. OSA, 2009, FThA2. DOI : 10.1364/FThA2.2009.FThA2.
- [3] C. COUDRAIN et al. “SIELETTERS, an airborne infrared dual-band spectro-imaging system for measurement of scene spectral signatures”. eng. In : *Opt Express* 23.12 (2015), p. 16164–16176.
- [4] A. CRIMINISI. “Extracting layers and analysing their specular properties using epipolar-plane-image analysis”. In : *CVIU* 97.1 (2005), p. 51–85.
- [5] A. DESOLNEUX, L. MOISAN et J.-M. MOREL. “Meaningful Alignments”. In : *IJCV* 40.1 (2000), p. 7–23.
- [6] C. KIM et al. “Scene reconstruction from high spatio-angular resolution light fields”. In : *Proc. SIGGRAPH* 32.4 (2013), 73 :1–73 :12.
- [7] V. KOLMOGOROV, P. MONASSE et P. TAN. “Kolmogorov and Zabih’s Graph Cuts Stereo Matching Algorithm”. In : *IPOLE* 4 (2014), p. 220–251.
- [8] P. G. LUCEY, J. L. HINRICHS et J. AKAGI. “A compact LWIR hyperspectral system employing a microbolometer array and a variable gap Fabry-Perot interferometer employed as a Fourier transform spectrometer”. In : *Proc. SPIE* 8390 (2012).
- [9] D. SONCCO et al. “Fast and Accurate Multiplicative Decomposition for Fringe Removal in Interferometric Images”. In : *TCI* 3.2 (2017), p. 187–201.