

Séparation des décalages induits par l'attitude et le relief entre images d'un couple stéréoscopique

Sylvie ROQUES¹, Fabien BRACHERE¹, Bernard ROUGÉ², Michel PAUSADER²

¹Laboratoire d'Astrophysique de l'OMP - 14, avenue Edouard Belin - 31400 Toulouse

²CNES - QTIS - 18, avenue Edouard Belin - 31400 Toulouse

sylvie.roques@ast.obs-mip.fr, fabien.brachere@ast.obs-mip.fr

bernard.rouge@cnes.fr, michel.pausader@cnes.fr

Résumé – L'objet de cet article est d'identifier les microvibrations subies par un satellite à partir d'un couple d'images stéréoscopiques dans lesquelles se combinent les effets du relief d'un paysage et ceux des vibrations de la plate-forme. Les résultats que nous présentons, qui utilisent quelques concepts de géométrie des surfaces, permettent de reconstituer les variations d'attitude (roulis, tangage et lacet) de manière quantitative. Des comparaisons avec les méthodes traditionnelles sont également présentées.

Abstract – In this paper, we identify the microvibrations of a satellite from a stereoscopic couple in which are combined the terrain details and the vibrations. The results presented use some concepts of surface geometry, and allow us to restaure attitude variations (roll, pitch and heading) in a quantitative manner. Comparisons with traditional methods are also carried on.

1 Microvibrations, couples stéréoscopiques et décalages

L'observation stéréoscopique permet de restituer le relief d'un paysage à partir du fusionnement d'un couple d'images planes [1]. Le couple d'images est acquis à partir de deux angles de visée différents. Ce changement du point d'observation provoque un décalage apparent de la position d'un objet par rapport au système de référence de l'image, et permet d'extraire les coordonnées cartographiques X , Y et Z des points au sol.

Dans le contexte de l'observation de la Terre par satellite, l'étude des images acquises en stéréoscopie demande, avant de reconstruire la troisième dimension à partir des deux images, que celles-ci soient corrigées des perturbations d'attitude (roulis, tangage et lacet) liées aux vibrations de la plate-forme. En effet, le satellite a tendance à se dépointer sous l'action de couples produits par l'environnement ou en son sein (par le mouvement d'une pièce mécanique par exemple). Si ce dépointage n'a pas de conséquence sur la trajectoire, en revanche il ne permet pas au système optique de rester pointé vers la zone au sol dont on veut obtenir l'image.

Pour maintenir un pointage parfait et éviter l'effet de « bougé » sur les images, un contrôle de l'orientation angulaire est assuré en permanence à bord par une boucle d'asservissement. Toutefois, pour des raisons techniques, ce contrôle ne permet pas d'assurer une bonne correction des déstabilisations dans la gamme 0.1-100 Hz. Celles-ci vont donc se répercuter sur les images et doivent faire l'objet d'un traitement au sol.

Dans le cas d'un couple d'images stéréoscopiques, chacune des deux images cumule les effets dus au paysage avec

ceux provoqués par les variations d'attitude. De même, l'inter-corrélation des deux images du couple (appelée *image de décalages*), qui représente les « défauts » de superposition des deux images à apparier, contient d'une part les décalages relatifs dus aux variations d'attitude, et d'autre part ceux issus du relief et liés au principe de la vision stéréoscopique.

Nous allons utiliser ces décalages pour caractériser et supprimer les irrégularités introduites par les micro-vibrations du satellite, et ainsi séparer les informations réelles liées au paysage de celles provenant des micro-vibrations. Le « nettoyage » de l'image de décalages représente une étape essentielle pour l'opération finale de redressement (extraction des coordonnées cartographiques 3D).

Une des principales difficultés pour réaliser cette séparation provient du fait que la corrélation ne peut être suffisamment précise pour obtenir les décalages exacts entre les deux images, et les erreurs inhérentes à celle-ci doivent aussi être prises en compte lors des traitements [2]. Nous avons donc un problème à trois effets simultanés : l'attitude, le relief et le bruit de la corrélation. Dans cet article, nous nous intéressons à l'étape préliminaire qui consiste à séparer l'attitude et le relief. La prise en compte du bruit de corrélation sera l'étape suivante.

2 Analyse des images de décalages

Dans un mode d'acquisition *push-broom* (cas SPOT4 par exemple : une barette de détecteurs balayant le sol), pour analyser les images de décalages (qui sont des champs de vecteurs - voir Fig. 1), on se ramène traditionnellement à un signal unidimensionnel dont les éléments sont des vecteurs à deux composantes. Chaque élément représente la

moyenne d'une ligne de la matrice de décalages, et les deux composantes sont orthogonales. Les composantes dans la direction du déplacement du satellite (signal scalaire dit *colonne moyenne*) donnent des informations sur le tangage. Celles dans la direction de la barette d'acquisition (signal scalaire dit *ligne moyenne*) donnent des informations sur le roulis. Jusqu'à présent, l'identification de ces vibrations était effectuée uniquement à partir de ce signal vectoriel [3]. Toutefois, cette analyse ne permet pas de séparer l'influence de la vibration de celle du paysage.

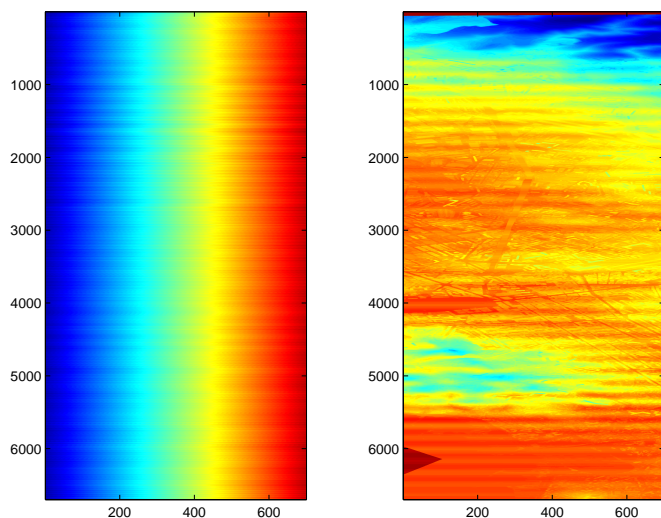


FIG. 1: Décalages en ligne (à gauche) et en colonne (à droite) obtenus à partir d'un couple stéréoscopique où les deux images du couple subissent trois vibrations non-stationnaires simulées à partir d'un Modèle Numérique de Terrain réel (vue de Marseille).

Pour s'affranchir des limitations liées à l'hypothèse de séparabilité des phénomènes de micro-vibrations, et éviter ainsi que les contributions des variations d'attitude et du relief ne se mélangent dans les signaux moyennés, nous proposons une approche globale bi-dimensionnelle. En travaillant directement sur les champs de vecteurs, on peut affiner la caractérisation des micro-vibrations, qui peuvent alors être identifiées de manière quantitative.

Les images présentées correspondent à un modèle dynamique fourni par le CNES. Les images de décalages utilisées pour cette étude correspondent à des *décalages vrais*, c'est-à-dire qu'elles n'ont pas été calculées par corrélation. Nous rappelons qu'il ne s'agit pas ici d'analyser l'influence du bruit de corrélation, mais d'identifier les perturbations sur les images de décalages vibrées, et de comparer les résultats obtenus avec les vibrations qui avaient été introduites.

3 Identification du tangage

Nous proposons, une méthode fondée sur les *invariants de l'image*. Il s'agit de prendre en compte le fait que le tangage conservera plate une portion plate du paysage. Nous recherchons donc sur une ligne (dans les composantes en colonne des décalages) les portions de l'image

de décalages qui restent invariantes (c'est à dire plates). Puis nous déterminons l'intersection de ces lieux avec ceux qui restent également invariants dans la ligne suivante ou précédente (voir Fig. 2). En considérant que la distance entre ces lieux (à l'avancement du satellite près) n'est due qu'au tangage, et non pas au paysage puisqu'il est sans relief, la médiane des déplacements de ces zones donnera alors la valeur du tangage à un instant donné. En répétant le processus pour toutes les lignes, on obtient alors le tangage pour toute la durée de l'observation.

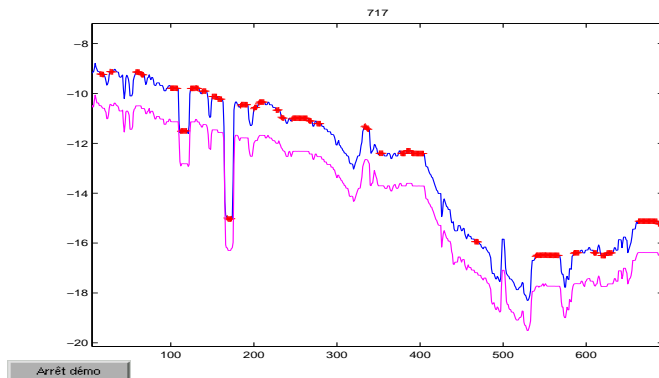


FIG. 2: Représentation de la 717ème ligne des décalages en colonne. Magenta: sur l'image non vibrée. Bleu: sur l'image vibrée. Les zones en rouge indiquent les lieux où la dérivée est nulle sur au moins 5 points consécutifs (paysage plat). Lorsqu'on répète le processus sur la ligne suivante, on repère les lieux des zones restées plates. Théoriquement, la distance entre deux lignes, calculée sur une zone plate, est la même quelle que soit la zone. En pratique, cela n'est pas le cas, en raison d'effets résiduels de relief; la médiane de ces valeurs est un bon estimateur du tangage.

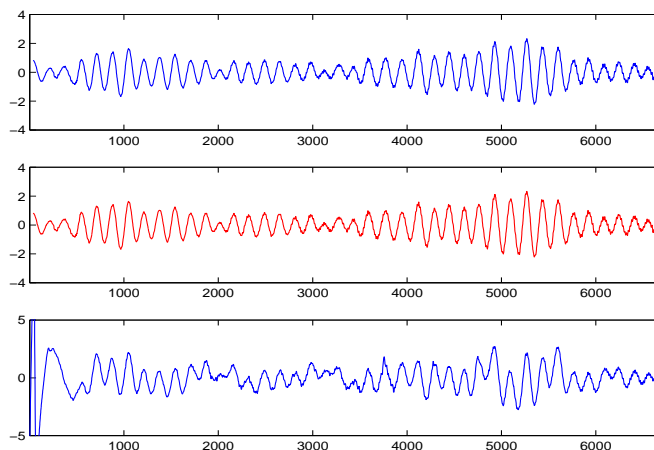


FIG. 3: Identification du tangage. En haut: tangage réel. Au milieu: tangage reconstruit par la méthode des invariants (la phase a été recalée). En bas: comparaison avec la colonne moyenne traditionnellement utilisée.

Dans ce processus, la phase de la vibration est perdue, mais est facilement retrouvée par comparaison avec la colonne moyenne de l'image de décalages. Les amplitudes

réelles ne sont pas restaurées en raison du caractère relatif de cette identification. Toutefois, le rapport de la variance de la colonne moyenne avec celui du tangage restauré permettra un recalage correct de l'amplitude (voir Figs. 3 et 9).

4 Identification du roulis

Nous proposons pour le roulis une méthode permettant d'analyser les variations de la « rampe » autour d'une position moyenne, et cela ligne par ligne (dans les composantes en ligne des décalages). Ce qu'on appelle « rampe » est un plan incliné qui se superpose aux composantes de l'image de décalages dans la direction de la barette de détecteurs (horizontalement), et qui est dû au fait que les pixels de chacune des deux images du couple stéréoscopique ne correspondent pas à des zones au sol de taille identique (effet de parallaxe dû à la visée oblique). Sous l'hypothèse que la position de la rampe de l'image non vibrée correspond à la moyenne des positions des rampes de l'image vibrée, on peut déterminer dans un premier temps une *rampe moyenne* à partir des images vibrées puis, ligne à ligne, les écarts à cette rampe moyenne. Les rampes n'étant pas exactement parallèles en raison d'effets résiduels du paysage et d'un effet faible de lacet, nous effectuons également une moyenne pondérée de ces écarts. Voir Figs. 5, 7 et 9.

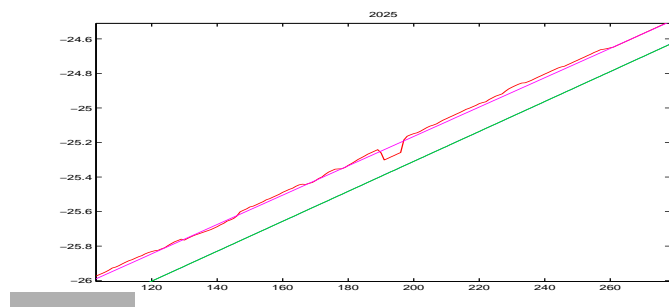


FIG. 4: Exemple illustrant la détermination du roulis par les mouvements sur la rampe (ici sur une portion de 200 colonnes, on représente une ligne des composantes horizontales de l'image de décalages). La rampe de l'image vibrée (en rouge) oscille autour de la position stable de la rampe non-vibrée (en vert). Superposé en magenta: droite ajustant la rampe de l'image vibrée. Ce sont les oscillations de celle-ci (au fur et à mesure des lignes) qui permettent l'identification du roulis.

5 Identification du lacet

Pour identifier le lacet, les méthodes traditionnellement utilisées analysant les variations des pentes de la colonne moyenne échouent en cas de présence de paysage dans l'image de décalages.

A chaque passage du satellite, la barette décrit pendant la prise d'image une surface \mathcal{S}_i (non plane et qui se projette sur le sol), où l'indice $i = 1, 2$ correspond aux deux passages. Cette surface est entièrement déterminée par sa

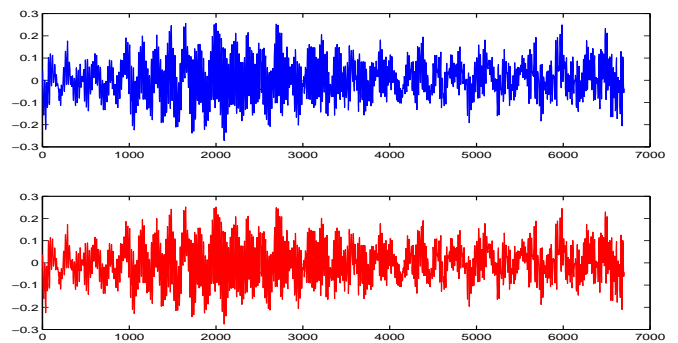


FIG. 5: Identification du roulis. En haut : roulis réel. En bas : roulis reconstruit. Les phases et les amplitudes sont restituées par la méthode de façon exacte.

métrique qui dans les notations de Gauss s'exprime par [4]: $ds_i^2 = E_i du^2 + 2F_i du dv + G_i dv^2$. L'indice $i = 1, 2$ correspond là encore aux deux passages; u et v sont les coordonnées dans la direction de la barette et dans la direction du déplacement du satellite. Les fonctions E_i , F_i et G_i de u et v s'expriment en termes de vecteurs tangents à la surface \mathcal{S}_i . Il est alors possible d'exprimer facilement les attitudes en termes de ces métriques.

Plus explicitement, le satellite sera alors repéré par des coordonnées géographiques (x_i, y_i, z_i) , et l'image sera décrite par la fonction vectorielle:

$$f_i(u, v) = \begin{pmatrix} x_i(u, v) \\ y_i(u, v) \\ z_i(u, v) \end{pmatrix}$$

La coordonnée z_i peut être reliée à un Modèle Numérique de Terrain ou d'Élévation (MNT/MNE), et les variables u et v correspondent aux directions de la barette et de l'avancement du satellite. On a:

$$E_i = \left\| \frac{\partial f_i}{\partial u} \right\|^2, \quad F_i = \left(\frac{\partial f_i}{\partial u} \mid \frac{\partial f_i}{\partial v} \right) \quad \text{et} \quad G_i = \left\| \frac{\partial f_i}{\partial v} \right\|^2$$

qui sont les fonctions qui déterminent la métrique sur la surface \mathcal{S}_i et qui donnent accès entre autres aux éléments d'aire sur cette surface.

On pourra donc relier la matrice de décalage à cette métrique (c'est-à-dire aux fonctions (E_i, F_i, G_i)), et donc aux variations d'attitude. En particulier, la variation du vecteur $\frac{\partial f_i}{\partial u} \wedge \frac{\partial f_i}{\partial v}$ normal à la surface, pourra décrire le roulis et le tangage, et le lacet peut être mesuré par le produit scalaire F_i .

Dans les résultats qui suivent (Fig. 6), le terme f_i considéré est la matrice des décalages le long des lignes, et c'est la colonne moyenne du produit scalaire qui est représentée. Pour l'instant, dans cette identification, la phase et l'amplitude absolue ne sont pas restaurées.

6 Analyse des résultats

Un algorithme de type *matching pursuit* peut jouer dans un deuxième temps un rôle clé [5] pour analyser les résultats obtenus. Il s'agit de parcourir un dictionnaire contenant des ondes élémentaires, et de choisir l'onde qui

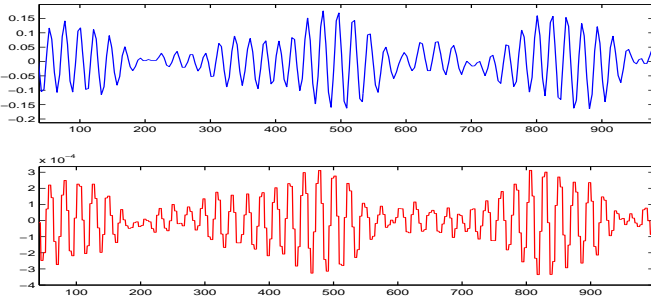


FIG. 6: Identification du lacet sur une portion de la vibration (les 1000 premiers points). En haut : lacet réel. En bas : lacet reconstruit. Les amplitudes ne sont pas normalisées.

ressemble le plus à une partie du signal. On utilise la notion de soustractions itératives, où à chaque pas une information extraite du signal est encodée, et on répète le processus avec le reste. Ce dictionnaire redondant autorise une représentation concise et une classification de vibrations stationnaires ou non, et le processus constructif associé permet de détecter et de caractériser les composantes temps-fréquence de la vibration une par une (des plus hautes énergies jusqu'aux plus basses) [6].

Un exemple d'analyse temps-fréquence sur le roulis reconstruit est présenté Fig. 7. On peut identifier sur ce signal un *sinus balayé* (chirp), caractéristique d'un mouvement d'amortissement au sein du satellite. Voir également [7] pour télécharger le logiciel d'analyse temps-fréquence.

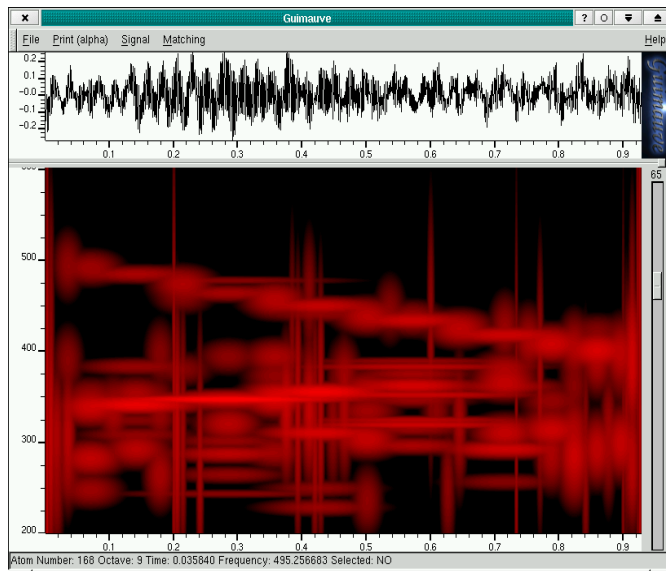


FIG. 7: Décomposition temps-fréquence du roulis reconstruit. Un zoom sur les moyennes fréquences est représenté. Le sinus balayé est bien visible sur la durée de l'enregistrement.

Références

[1] M. Leroy, Capteurs imageurs optiques, Cours de DEA Paris VI-Jussieu, 1991.

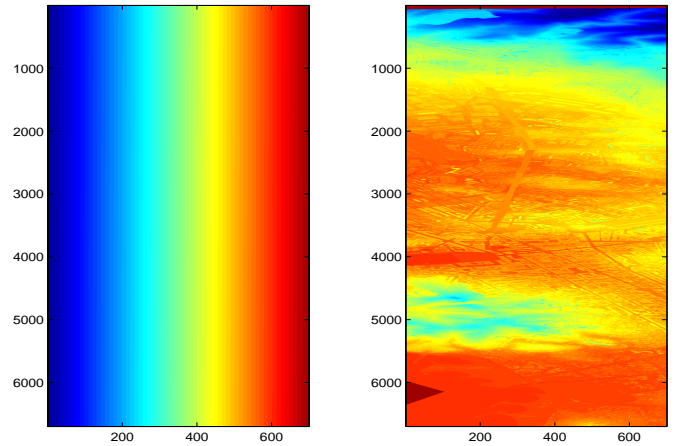


FIG. 8: Images de référence : décalages en ligne (à gauche) et en colonne (à droite) obtenus à partir du couple stéréoscopique sans vibrations. On observe l'effet de rampe sur les décalages en ligne.

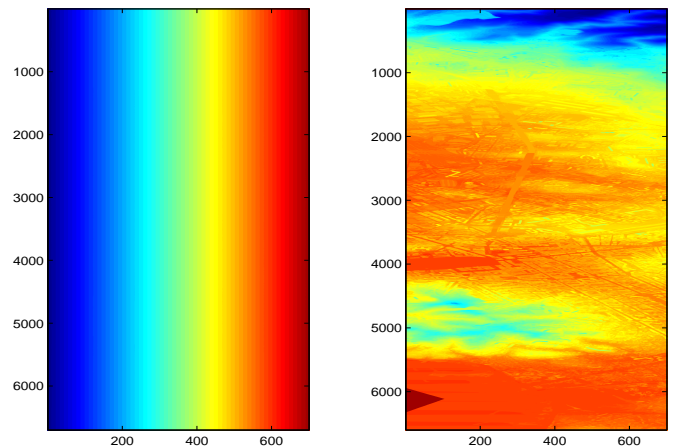


FIG. 9: Décalages reconstruits après suppression du roulis et du tangage identifiés sur les images de décalages. A comparer avec les Figs. 1 et 8. Erreurs quadratiques de reconstruction : roulis : 0.3%, tangage : 4.2%.

[2] H. Carfantan, Etat de l'art en corrélation automatique – Synthèse et analyse, Rapport de Post-doc CNES, Mai 1999.

[3] M. Pausader, M.-C. de Gaujac, P. Gigord et M.-C. Charneau, *Mesure des microvibrations sur des images SPOT*, dans les Actes du Colloque Caractérisation géométrique en vol des systèmes imageurs optiques – CNES, Bordeaux, 1999.

[4] G. Valiron, Théorie des fonctions, Masson, 1966.

[5] S. Mallat et Z. Zhang, *Matching pursuit with time-frequency dictionaries*, IEEE Trans. Signal Process., 41(12), p. 3397, 1993.

[6] S. Roques et F. Brachère, Séparation des décalages induits par l'attitude et le relief dans un couple d'images stéréoscopiques, rapport de contrat CNES/OMP 762/99/7809, 2000.

[7] F. Brachère, logiciel Guimauve, Unix/Linux, 2001 <http://webast.ast.obs-mip.fr/people/fbracher/>