

SuperSenseur Terre/étoiles, ou comment décontraindre la ligne de visée d'un instrument spatial d'observation de la terre très haute résolution.

JEAN-MARC DELVIT¹, CHRISTIAN BUIL¹, GUILLAUME BORRUT²

¹ Centre National d'Etudes Spatiales : 18, avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse cedex 9, France

² C-S : 3, rue du Professeur Pierre Vellas, 31300, Toulouse, France

Résumé - Dans le but de décontraindre la stabilité de la ligne de visée et d'améliorer la performance de localisation, on propose d'intégrer au senseur étoile un senseur terre composé d'un capteur matriciel à faible résolution avec un champ aussi large que le champ de la mission principale d'un télescope spatial d'observation de la terre. On peut alors s'appuyer sur cette prise de vue pour recalibrer par corrélation la bande panchromatique de la mission principale. La restitution d'un biais, d'un grandissement ou d'une dérive est possible avec une erreur de l'ordre du dixième de pixel de la mission principale. De même, on constate qu'il est tout à fait envisageable de retrouver les caractéristiques de vibrations ou des informations statiques de type résidus de cartographie du plan focal.

Abstract - In order to reduce the stability of the line of sight, we designed an Earth sensor with a low-resolution matrix sensor with a field of view as wide as the field of view of the main earth observation mission telescope. Using correlation it is possible to find biases, magnification factors or drifts with an error in the order of one tenth of a pixel of the main mission. It is also possible to find the vibration characteristics or static information of the focal plane cartography.

1 Introduction

La connaissance de la ligne de visée des instruments d'observation de la Terre en orbite s'appuie traditionnellement sur un référentiel stellaire [1], observé via un ou plusieurs senseur(s) dédié(s). C'est particulièrement le cas en observation haute résolution.

Dans ce papier une nouvelle approche est proposée [4] permettant d'améliorer significativement la performance des dispositifs actuels pour la détermination de la ligne de visée de chaque image. Elle est particulièrement nécessaire dans les situations où il est toléré une certaine déformabilité du télescope de l'instrument de prise de vue et/ou lorsque celui-ci est équipé d'un dispositif d'optique active, l'un et l'autre étant susceptible de modifier l'axe de visée instantané par rapport au référentiel étoile défini par la géométrie des senseurs stellaires traditionnels.

L'idée s'appuie sur le schéma ci-après :

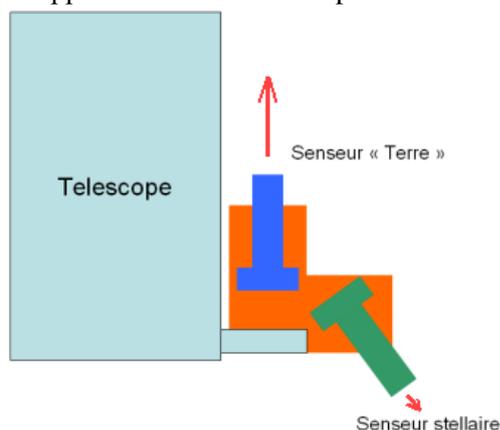


Figure 1 : schéma de principe

Il est question de coupler rigidement à un ou plusieurs senseurs stellaires un senseur "Terre". Ce dernier est une

caméra imageuse (prise de vue quasi instantanée d'une image 2D) équipée d'une optique de focale relativement courte (typiquement 200 à 500 mm de distance focale).

La première clef du système est le banc optique ultra-stable dimensionnellement dessiné en orange dans la figure : il lie mécaniquement le senseur "étoile" et le senseur "terre" avec une précision et une stabilité angulaire temporelle relative de l'ordre du microradian, voire mieux.

La seconde clef du système est la capacité de mesure angulaire relative entre le bloc "senseur Terre/Stellaire", d'une part, et la ligne de visée effective du télescope principal, d'autre part. Cette mesure est réalisée au moyen d'une corrélation numérique entre l'image acquise avec le senseur Terre et l'image prise avec le télescope principal. Ce calcul peut être réalisé en différé de la prise de vue (traitement sol). La précision de registration attendue est typiquement de 1/10 de la taille des pixels du senseur « Terre », voire mieux.

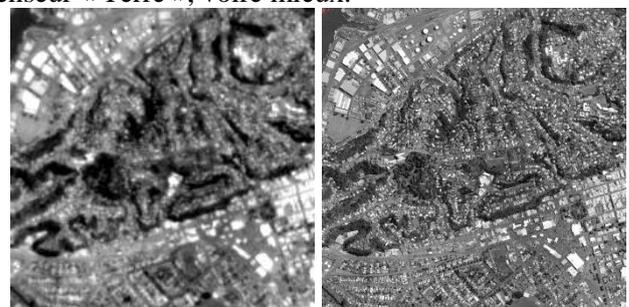


Figure 1 : Simulation SSTE à 10m (200*200) à gauche et à droite simulation Panchromatique à 30cm (6666*6666).

Au final, on anticipe avec le dispositif décrit une précision de localisation des images de l'ordre du microradian, dans le référentiel stellaire et donc in fine sur le Géοiდე terrestre, ce qui constitue un progrès réel en regard des systèmes actuels.

Le champ angulaire du senseur Terre couvre au minimum celui du télescope principal, ou même un peu plus si on veut lui donner un rôle de surveillance de l'environnement de la scène observée en haute résolution. De plus, le fait que le senseur Terre fasse une acquisition à partir d'un capteur matriciel ouvre des perspectives pour mieux diagnostiquer la qualité de prise de vue du télescope principal (attitude, microvibrations, cartographie du plan focal...).

Ce papier synthétise différents cas d'étude simulés. On appellera ce nouveau senseur le Super Senseur Terre Etoiles (SSTE).

2 Quelques hypothèses

Dans le but de décontraindre la stabilité de la ligne de visée, d'améliorer la performance de localisation, on propose d'intégrer au senseur étoile un senseur terre composé d'un capteur matriciel à faible résolution avec un champ aussi large que le champ de la mission principale (THR). On peut alors s'appuyer sur cette prise de vue pour recalibrer la bande panchromatique (PAN) de la mission principale.

Ce SuperSenseur Terre/Etoiles (SSTE) pourrait utiliser des matrices de type CMV2000 ou CMV4000 (détecteurs de 5,5µm).

Le dimensionnement serait typiquement à une altitude de 700km :

- focale de 770mm pour du 5m (petit miroir) champ de 20km - FTM à $f\lambda/2$ autour de 0,1 et pas de soucis de bruit (signal à bruit de 30 dans les ombres).
- focale de 385mm pour du 10m (petit miroir) champ de 40km - FTM à $f\lambda/2$ autour de 0,1 et pas de soucis de bruit (signal à bruit de 30 dans les ombres).
- tous les intermédiaires sont à tester

Un des avantages d'utiliser des matrices est de réduire les incertitudes statiques et dynamiques de la ligne de visée THR (cf. paragraphes suivants).

On constate que d'un point de vue système le SSTE a une focale petite et un débit négligeable (+0,5% par rapport à la mission principale à 1.5% si trois SSTE).

Les simulations sont réalisées en utilisant une image source sur le site de Napier (Nouvelle Zélande) de très grande taille à une résolution de 10cm de taille 20000*20000 avec laquelle on produira :

- Une simulation « SSTE » de taille 200*200 à 10m.
- Une simulation « PAN » de taille 6666*6666 à 30cm [3].

La difficulté de cette expérimentation réside dans le fort écart de résolution entre les 2 types d'images à corrélérer, notre objectif sera de déterminer quelle précision on peut atteindre à partir de corrélations à une résolution de 10m. On se place donc dans un contexte d'une focale de 385mm et l'on connaît parfaitement la distorsion de l'instrument SSTE. Il faut noter que le SSTE simulé ne représente que 1% du champ d'une matrice CMV2000.

Les résultats statistiques de corrélation présentés ci-après sont donc pessimistes.

3 Description de la méthode

3.1 Procédure

On part du principe que l'acquisition du capteur SSTE est « stable » puisque le capteur est matriciel et rigidement lié à la boucle SCAO et que la voie THR subit des perturbations. Il est à noter que le rôle des images SSTE et THR pourrait être inversé.

1ère étape : simulations PAN et SSTE.

- Simulation d'une image PAN à 30cm perturbée,
- Simulation d'une image SSTE à 10m sans perturbations.

2ème étape : rééchantillonnage du PAN.

L'image PAN est rééchantillonnée à la résolution SSTE, ainsi nous pouvons appliquer une corrélation entre les 2 images à 10 mètres obtenues.

3ème étape : corrélation des images au pas SSTE.

Le résultat de la corrélation, sous forme de décalages ligne et décalages colonne, nous renseigne sur le type de déformation. Ces décalages sub-pixéliques sont comparés aux décalages injectés en amont et l'analyse de ces résultats permet de dire si ce que l'on retrouve correspond bien à ce que l'on attend.

3.2 Introduction des perturbations

L'injection des perturbations se fait à l'aide d'une grille de perturbation et d'un filtre de rééchantillonnage. Les perturbations peuvent être de type polynomiale, de type vibration ou une combinaison des deux. Nous construisons donc une grille (grille ligne et grille colonne) qui contient les informations de décalages. Nous simulerons dans un premier temps des déformations simples comme des biais et des dérives, puis nous nous intéresserons aux déformations de type vibrations [5].

Le filtre de rééchantillonnage utilisé est le rapport entre la FTM de la bande SSTE et de la FTM de l'image source où la FTM est la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle de l'instrument. Par ailleurs, le choix du sur-échantillonnage est très important, car c'est la valeur du « facteur de surechantillonnage » qui conditionnera la précision des perturbations injectées. Par exemple une FTM à la résolution instrument (10m) et avec un surech de 100 va permettre d'introduire des déformations avec une précision de 10cm, ce qui dans certains cas, peut être assez grossier.

Dans cette étude, nous utiliserons un filtre de taille importante et avec un suréchantillonnage de 2000, qui permettra d'injecter une déformation avec une précision de 0.5cm, ce qui conviendra à l'ensemble de nos cas.

3.3 Mise en géométrie du THR dans la géométrie du SSTE

L'image PAN doit être dézoomée à la résolution SSTE pour que l'on puisse appliquer la corrélation. Pour sous-échantillonner proprement l'image PAN, et en supposant que l'on connaît les spécifications des capteurs

PAN et SSTE (FTM, occultation, ouverture...), il faut utiliser comme filtre interpolateur la réponse impulsionnelle associée au rapport des FTM SSTE / FTM PAN.

3.4 Paramètres de la corrélation

Dans nos tests nous utilisons une corrélation de type ZNCC, une des mesures de similarité les plus utilisées sur des images réelles.

$$ZNCC = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

où x_i (y_i) = valeur du pixel à la position i dans la fenêtre de référence (secondaire)

n = nombre de pixels de chaque fenêtre

\bar{x} (\bar{y}) = radiométrie moyenne de la fenêtre de référence (secondaire)

Un des avantages de la ZNCC est son invariance à un biais et un gain radiométrique entre les deux fenêtres. Parmi les 15 mesures étudiées dans [6], ZNCC est systématiquement en très bonne position.

La fenêtre de corrélation dans notre cas est choisie entre 3 et 23 pixels. Si la taille de la fenêtre est trop grande, la corrélation va moyenniser les décalages d'une zone ce qui aura tendance à faire baisser la valeur du décalage (ou l'amplitude dans le cas de vibrations). La fenêtre d'exploration est dimensionnée en fonction du besoin, plus lâche en colonne pour une dérive en roulis par exemple.

4 Quelques résultats

4.1 Biais et dérives

Les erreurs d'estimations commises sont très faibles lorsque l'on insère des biais : l'écart entre le biais inséré et le biais mesuré est compris entre 5nrad et 40nrad (entre 4mm et 3cm au sol) pour nos cas de simulation. On rappelle que la corrélation est faite sur des images à une résolution de 10m !). De plus, avec une fenêtre de corrélation suffisamment grande (à partir de 15*15) l'écart-type est également très faible : compris entre 3 et 5 cm. Ce qui indique une bonne précision de corrélation pour l'ensemble des points. Les dérives statiques ou dynamiques sont également correctement estimées.

4.2 Vibrations

Plusieurs cas de vibrations « pures » sont simulés :

#	Perturbations insérées en roulis	
1	Amplitude = 280 nrad (20cm)	Période = 25Hz (300m)
2	Amplitude = 110 nrad (7.5cm)	Période = 25Hz (300m)
3	Amplitude = 35 nrad (2.5cm)	Période = 7Hz (1000m)
4	Amplitude = 71 nrad (5cm)	Période = 50 Hz (150m)
5	Amplitude = 35 nrad (2.5cm)	Période = 250 Hz (30m)

A partir des résultats de la corrélation, on fabrique une ligne et une colonne moyenne, qui permettent de représenter l'attitude du capteur qui a subi une

perturbation. Il faut noter que l'on restitue les fréquences et les amplitudes avec seulement 200 échantillons, en utilisant une CMV2000 ou 4000 on augmentera la statistique et l'on améliorera l'estimation. Pour la vibration #5 (amplitude 35 nrad - 2.5cm, 250 Hz période 30m), la taille de la fenêtre de corrélation est 3*3, il est impossible d'accéder aux fréquences avec un SSTE à 10m. Pour restituer de telles fréquences il faudrait utiliser d'autres méthodes de type différentielles sur la mission principale: corrélation des bandes multi-spectrales ou entre la panchromatique et les bandes multi-spectrales [1].

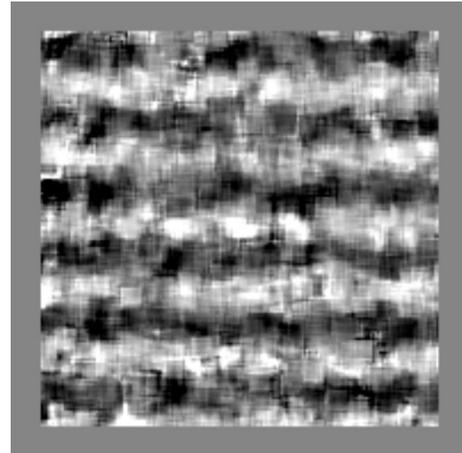


Figure 2 : Exemple #1 de résultat de corrélation en deccol.

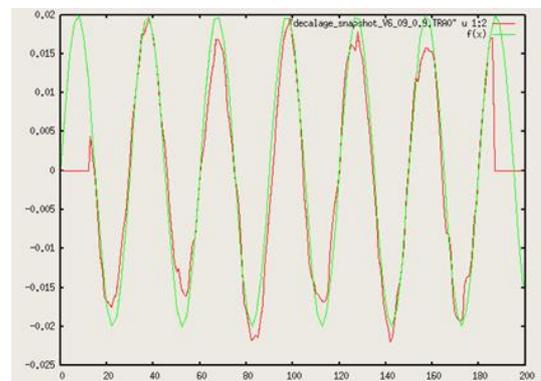


Figure 3 : Exemple vibration #1 - amplitude 280 nrad - 20cm, 25Hz période 300m (en vert, la perturbation insérée ; en rouge la perturbation mesurée)

Cette série d'exemples montre qu'avec des images où la corrélation fonctionne correctement (cf. figure 1, zone urbaine), les vibrations peuvent être retrouvées jusqu'à une certaine limite :

- Si la période d'une vibration est supérieure ou égale à 150mètres soit 50Hz, elle pourra être correctement restituée pour une hypothèse de mission THR spatiale (30cm). Cette valeur dépend de la fréquence de coupure de la corrélation (taille de la fenêtre de la corrélation) et de la résolution du SSTE.
- Si l'amplitude d'une vibration est supérieure ou égale à 40nrad, elle pourra être restituée. Au-dessous de 10cm l'amplitude mesurée d'une vibration est moins bien

restituée mais la perturbation trouvée améliore quand même la restitution d'attitude comme le montrent les exemples 3 et 4.

- En doublant la focale du SSTE soit 785 mm, on pourra restituer des fréquences de 100 Hz et des amplitudes de 20 nrad environ.

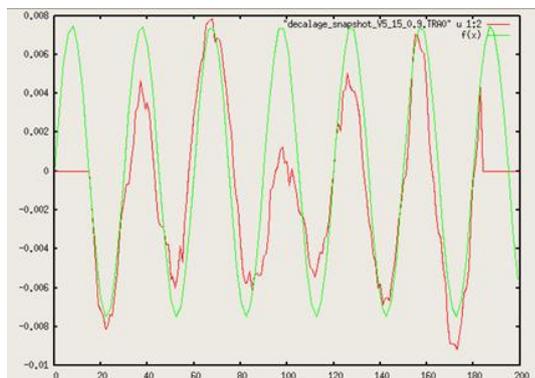


Figure 4 : Exemple vibration #2 - amplitude 110 nrad - 7.5cm, 25 Hz période 300m (en vert, la perturbation insérée ; en rouge la perturbation mesurée)

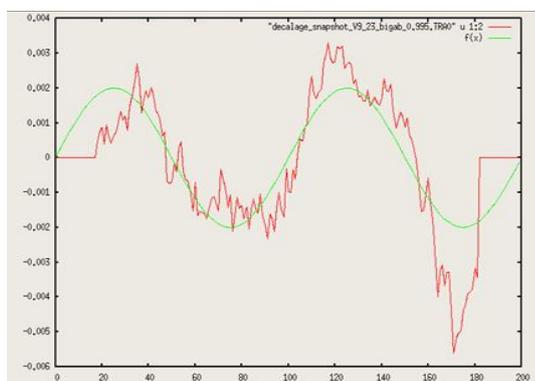


Figure 5 : Exemple vibration #3 - amplitude 35 nrad - 2.5cm, 7 Hz période 1000m (en vert, la perturbation insérée ; en rouge la perturbation mesurée)

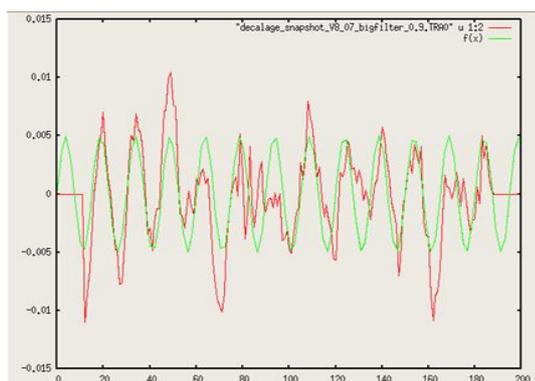


Figure 6 : Exemple vibration #4 - amplitude 71 nrad - 5cm, 50 Hz période 150m (en vert, la perturbation insérée ; en rouge la perturbation mesurée)

5 Conclusions

Au travers de ces simulations, on a montré que les perturbations subies par une image spatiale très résolue à

30cm [3], peuvent être très bien analysées si l'on s'appuie sur l'acquisition d'un senseur stellaire terrestre « SSTE » à une résolution de 10m. En effet, la restitution d'un biais, d'un grandissement ou d'une dérive dans nos exemples est précise avec une erreur maximale de l'ordre de 3 centimètres. De même, on constate qu'il est tout à fait envisageable de retrouver les caractéristiques de vibrations relativement fines ou des informations statiques de type résidus de cartographie du plan focal. En résumé le concept présenté améliore la restitution d'attitude de la mission principale :

- En biais (localisation a posteriori)

L'écart entre le repère SST et le repère de visée est réduit à quelques centimètres

- En dérive (cohérence interne de l'image)
- En vibrations (Modélisation Moyennes et Hautes Fréquences). Le SSTE étend la bande passante SCAO jusqu'à 50Hz ou 100Hz (selon la focale) avec des vibrations d'amplitudes quelques dizaine de nrad (0.1 pixel de la mission principale).

La qualité du recalage sur SSTE dépend de la connaissance du modèle géométrique de la partie senseur Terre : il faudra évaluer la précision nécessaire sur la distorsion de la caméra grand champ, et les conséquences sur le plan de développement (caractérisation sol) et la recette en vol (étalonnage dédié ?).

Ce concept est également applicable à de l'imagerie drone ou autre, combinant avantageusement des acquisitions matricielles et pushbroom.

6 Références

- [1] Greslou et al., 2013. Pléiades-HR 1A&1B image quality commissioning: innovative geometric calibration methods and results. Proc. SPIE 8866, Earth Observing Systems XVIII, 886611.
- [2] Cournet et al., 2016, 2D Sub-Pixel Disparity Measurement Using QPEC / Medicis. Proc. of ISPRS.
- [3] Costes et al., "Active optics for next generation space telescopes", ICSO, Biarritz, 2016
- [4] Patent WO2014140129 - Method of measuring the direction of a line of sight of an imaging device.
- [5] Valorge et al., Satellite Imagery from Acquisition Principles to Processing of Optical Images for Observing the Earth, Cépaduès, 2012.
- [6] Hirschmüller H., Scharstein D. Evaluation of Stereo Matching Costs on Images with Radiometric Differences. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, vol.31, no. 9, pp. 1582-1599, 2009.