

Filtrage adapté en temps réel appliqué à l'analyse de front d'onde et au comptage de photons

Fouad Fidouh

Observatoire de Paris - DASGAL
77, avenue Denfert Rochereau
75014 Paris

Laboratoire d'Électronique, Signaux, Images
ESPEO, Université d'Orléans
12, rue de Blois, BP 6744
45067 Orléans cedex 2

RÉSUMÉ

La mise en œuvre d'un analyseur de front d'onde de type Shack-Hartmann ainsi que l'exploitation d'une caméra à comptage de photons, nécessitent l'emploi de dispositifs électroniques appelés « centreurs ». Ces derniers sont soit entièrement câblés et donc figés, soit à base d'un logiciel et donc très lents.

Cette communication a donc pour but de présenter une nouvelle génération de centreurs à base de « convolveurs 2D » exploitant du filtrage adapté en temps réel et pouvant fonctionner à des fréquences élevées (≥ 10 Mégapixels/s). Ceci permet de traiter les images à une cadence plus rapide (50 à 100 trames/s), tout en obtenant les coordonnées des photocentres recherchés, avec une précision meilleure que le pixel.

1 Introduction

L'optique adaptative [1] et les méthodes par déconvolution [2] ont pour objectif de corriger les effets de la turbulence atmosphérique sur les images enregistrées au foyer des grands télescopes. Ces deux techniques exploitent un analyseur de front d'onde, généralement de type Shack-Hartmann. Celui-ci évalue globalement les perturbations de la turbulence atmosphérique afin de pouvoir agir sur le faisceau lumineux incident. Le traitement du flot considérable de données fournies par l'analyseur de front d'onde se fait en temps réel pour l'optique adaptative ou ultérieurement pour l'opération de déconvolution.

Ce traitement comprend le calcul d'écart entre les positions instantanées des barycentres de taches lumineuses produites par l'analyseur, et des positions de référence. Ce calcul est réalisé par des dispositifs électroniques, appelés « centreurs », à une cadence compatible avec les vitesses caractéristiques des déformations de la surface d'onde. La fréquence de fonctionnement de ces centreurs est déterminante dans l'évaluation du temps de réponse de la boucle d'asservissement d'une optique adaptative. La résolution temporelle des images traitées est de 20 ms du fait de l'utilisation de détecteurs fonctionnant aux normes TV.

ABSTRACT

The exploitation of a Shack-Hartmann wavefront sensor and a photon counting camera needs what are called "centroiding electronics". The typical models have often fixed designs or are not fast enough.

This paper presents a new generation of real time centroiding system, based on Digital Signal Processors: "2D convolvers". They use matched filtering at frequencies higher than 10 Megapixels/s. This allows to process images at rates between 50 and 100 frames/s, with more accurate localization of photo events (resolution below a physical pixel).

L'apparition de nouveaux CCDs rapides permet d'envisager de diminuer cette limite en « figeant » plus vite les effets de la turbulence atmosphérique. Ceci passerait alors par le développement de nouveaux centreurs mieux adaptés.

En outre, les caméras à comptage de photons [3] sont équipés généralement de dispositifs entièrement câblés. Ils sont prévus pour localiser des taches lumineuses, induites par la détection des photons, de taille limitée à (3x3) pixels physiques [4]. La possibilité de traiter des taches plus larges ou l'intégration des nouveaux CCDs dans les futures caméras à comptage de photons, nécessiteront également la mise en œuvre de centreurs appropriés.

2 Analyseur Shack-Hartmann

L'analyseur Shack-Hartmann est sensible aux pentes du front d'onde incident. Il est constitué d'une trame de microlentilles carrées, placée dans un plan conjugué du miroir primaire du télescope (figure 1). Le front d'onde, perturbé par la turbulence atmosphérique, produit dans le plan focal de chaque microlentille une tache de diffraction. Le déplacement de celle-ci par rapport à une position de référence, induite par une onde plane, est proportionnel à la pente locale du front d'onde. Une caméra CCD, placée au foyer des microlentilles,

échantillonne la matrice des taches « sous-pupillaires » (figure 2).

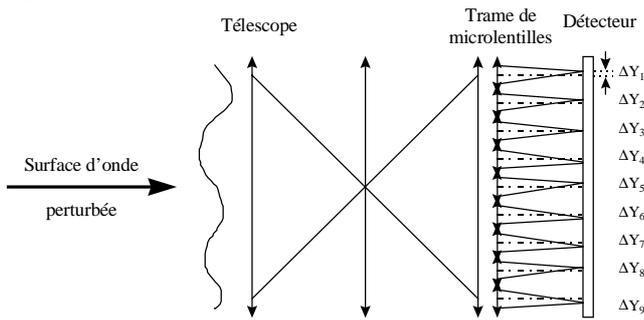


Figure 1 : Structure d'un analyseur Shack-Hartmann.

Le calcul des écarts de position ($\Delta x, \Delta y$) permet de déterminer les pentes locales du front puis de reconstituer la surface d'onde incidente [5] pour l'opération de déconvolution.

Pour que ce calcul de ($\Delta x, \Delta y$) soit exploité dans une boucle d'asservissement d'optique adaptative, il faudrait qu'il soit fait en temps réel. Ceci nécessiterait alors la détermination en temps réel du barycentre des photoévénements avec la meilleure précision possible.

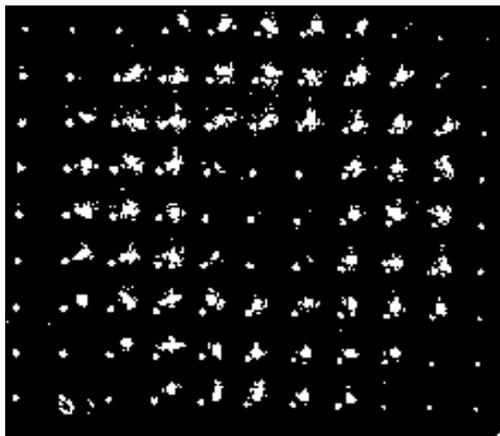


Figure 2 : Les points de référence, dus à l'effet d'une onde plane artificielle, sont ici superposés aux taches "sous-pupillaires", induites par le front d'onde perturbé par la turbulence atmosphérique.

La tache de diffraction produite par chacune des microlentilles est donnée par le diamètre D du premier anneau de la tache d'Airy :

$$D = \frac{2,44 \lambda f_\mu}{d}$$

avec λ , la longueur d'onde d'analyse, f_μ et d respectivement la focale et le diamètre de la microlentille.

Pour une détermination optimale de son barycentre, la tache doit couvrir un nombre optimal de pixels du détecteur, correspondant au moins à deux fois et demi la largeur à mi-hauteur de la tache.

Ces taches s'étalent généralement sur 3, 4 ou 5 pixels, en fonction des paramètres des microlentilles et de la taille des pixels du CCD.

Comme le profil des lobes principaux des taches lumineuses est souvent assimilé à celui d'une gaussienne

2D [6], la symétrie permet une recherche du photocentre indépendante dans les deux directions x et y .

3 Comptage de photons

Les observations astronomiques à faible flux lumineux nécessitent l'utilisation de dispositifs à comptage de photons. Ils sont généralement constitués d'un ou de deux intensificateurs de lumière couplés à un capteur de type CCD (figure 3).

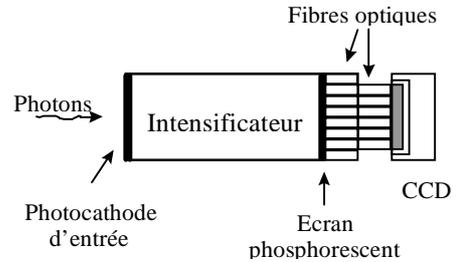


Figure 3 : Synoptique d'une caméra à comptage de photons.

Ces détecteurs exploitent la conversion photoélectrique des photons incidents puis l'intensification en énergie des électrons induits. Les collisions de ces derniers avec un écran phosphorescent produisent des taches lumineuses sur le CCD. Il faut ensuite calculer en temps réel les coordonnées du barycentre de chacune de ces taches, d'où le recours aux centreurs.

4 Principe du « centrage » utilisé

Il s'agit de déterminer en temps réel les coordonnées X_g et Y_g des barycentres de chaque tache lumineuse :

$$X_g = \frac{\sum_i x_i \times I_i}{\sum_i I_i} \quad \text{et} \quad Y_g = \frac{\sum_i y_i \times I_i}{\sum_i I_i} \quad (4.1)$$

L'opération de base de ce calcul peut être effectuée par un « convolveur » à 2 dimensions. Les coefficients x_i et y_i sont choisis pour maximiser un critère, en l'occurrence l'intercorrélacion entre l'intensité lumineuse $I_i(x)$ de la tache et le profil gaussien $P(x)$ attendu.

Il suffit donc de déterminer la position (suivant x par exemple) pour laquelle l'expression (4.2) passe par un maximum.

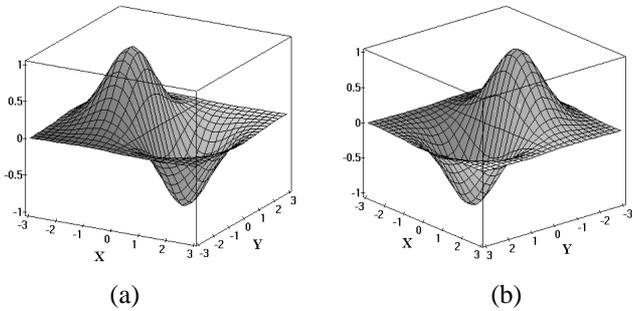
$$\int_{-\infty}^{+\infty} I(x)P(x - \tau) dx \quad (4.2)$$

Donc, il faut que : $\int_{-\infty}^{+\infty} I(x) \frac{\partial}{\partial \tau} P(x - \tau) dx = 0 \quad (4.3)$

En tirant profit de la symétrie du profil $P(x)$ (grossoirement assimilé à celui d'une gaussienne), l'expression (4.3) devient :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} I(x) \frac{\partial}{\partial \tau} P(\tau - x) dx = 0 \quad (4.4)$$

Ceci revient alors à effectuer la convolution de l'image des taches, en parallèle, suivant l'axe des x et l'axe des y, par deux matrices de coefficients représentant les dérivées du profil gaussien respectives en x et y (figures 4.a et 4.b). On détecte ensuite le passage par zéro des résultats. Cette démarche est analogue à celle qui se fait dans d'autres domaines tels que celui du radar [7].



Figures 4 : Les courbes (a) et (b) représentent respectivement l'allure des coefficients à implanter dans les opérations de convolution suivant x et suivant y.

5 Système réalisé

Le Dispositif de Localisation pour Analyseur de Surface d'onde (« DILAS ») réalisé [8], intègre 4 cartes montées en parallèle (figure 5), et équipées chacune du même processeur de traitement de signal spécialisé dans la convolution 2D : le PDSP 16488 de Plessey Semiconductors.

Ce processeur produit la somme pondérée de toutes les intensités des pixels I_i inclus dans une fenêtre de $(n \times n)$ éléments, balayant toute l'image au rythme de l'horloge pixel du CCD (figure 6) :

$$S = \sum_{i=1}^{n^2} c_i \times I_i \tag{5.1}$$

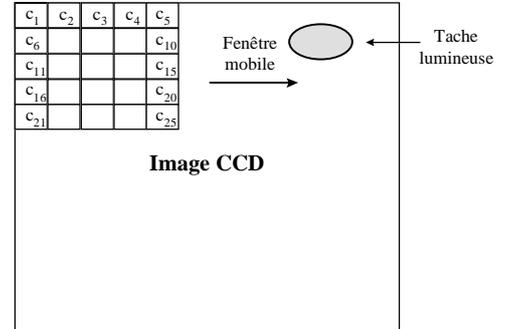


Figure 6 : Exemple de balayage de l'image du CCD par une fenêtre de (5x5) coefficients.

Deux cartes appelées DSP-X et DSP-Y réalisent en parallèle la convolution de l'image respectivement suivant l'axe des x et l'axe des y, tel qu'il a été décrit précédemment. Elles fournissent les numérateurs des formules de calcul des barycentres X_g et Y_g (4.1). Une troisième carte, DSP-I calcule leur dénominateur. Les coefficients associés à ce 3^{ème} « convolveur 2D » doivent avoir un profil gaussien pour respecter les pondérations introduites dans DSP-X et DSP-Y. Cette carte nous assure également la présence d'un minimum exploitable d'intensité lumineuse à l'intérieur de la fenêtre.

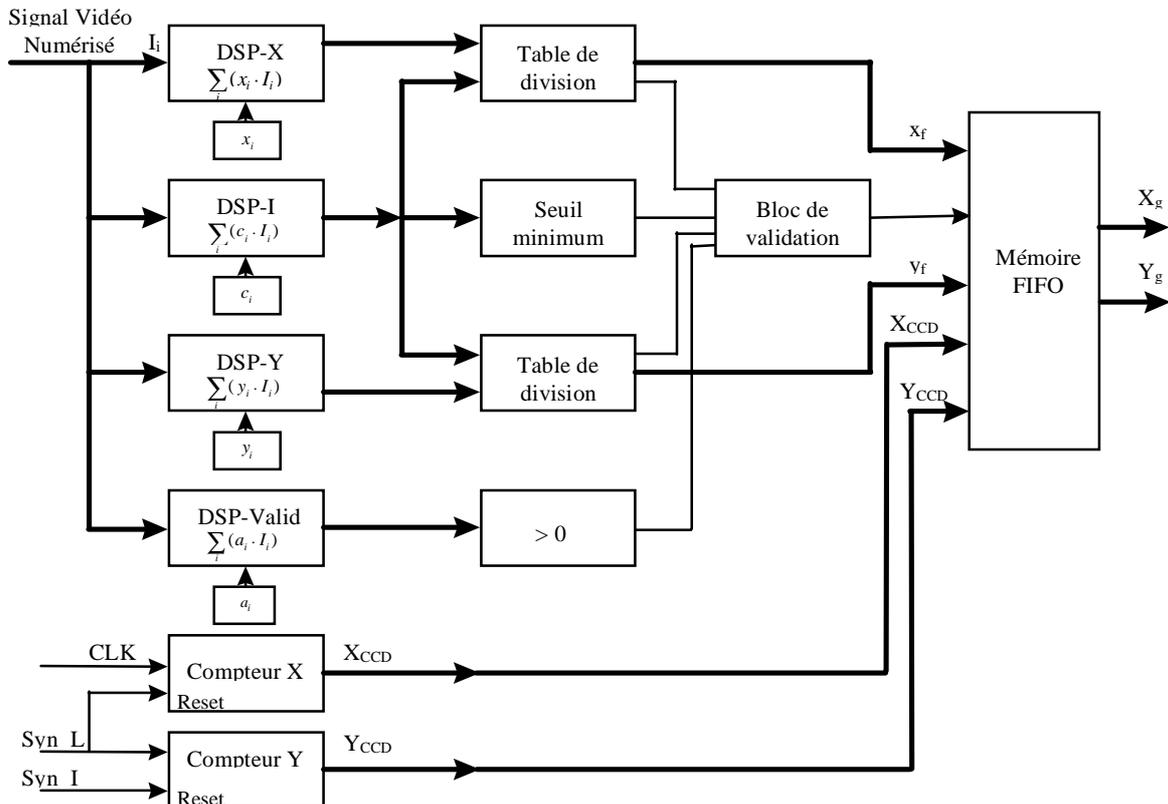


Figure 5 : Synoptique du dispositif réalisé.

La dernière carte, DSP-Valid, élimine les éventuelles fausses détections en s'assurant que la tache est bien centrée dans la fenêtre, à savoir que son énergie lumineuse moyenne étalée sur une zone centrale de la fenêtre, est bien supérieure à celle qui éclaire les pixels périphériques. La matrice de coefficients associée à ce dernier processeur, pondère fortement un carré central de (3x3) pixels à l'intérieur d'une fenêtre de (7x7) pixels. Le résultat doit alors être positif pour valider la suite des opérations.

En sortie des 3 premières cartes, des tables de division ont été disposées afin d'obtenir les coordonnées (x_i, y_i) des barycentres à la cadence souhaitée. Ces coordonnées sont déterminées par rapport au pixel central de la fenêtre mobile, la position de celle-ci (X_{CCD}, Y_{CCD}) étant obtenue par le comptage d'horloges pixels (CLK) pour l'abscisse, et de synchro-lignes (Syn_L) pour l'ordonnée.

Les résultats valides (X_g, Y_g) sont stockés dans une mémoire puis lus par le système informatique qui gère, en parallèle, l'acquisition des images dégradées par la turbulence atmosphérique. Ceci permet d'assurer la synchronisation des acquisitions des deux voies, « analyse de front d'onde » et « imagerie » qui fournissent respectivement, l'état du front d'onde incident, et les images perturbées.

6 Résultats et conclusion

Le système DILAS a été testé à 10 Mégapixels/s avec une taille des fenêtres de convolution utilisée de (7x7) pixels. Les tests, sur banc optique, ont permis de mesurer des déplacements de taches lumineuses au pas d'un pixel physique (16 μm), avec une lecture des positions de leurs barycentres d'une précision du quart de pixel. La version actuelle de l'instrument peut traiter aisément des images de 256 x 256 pixels à 50 trames/s.

La fréquence de travail peut être amenée à 20 Mégapixels/s, soit en mettant en œuvre sur chacune des 4 cartes 2 processeurs en parallèle, soit en réduisant la taille de la fenêtre à (3x3) pixels.

Par ailleurs, l'histogramme des décalages fournis par ce nouveau centreur $(\Delta x, \Delta y)$, permettrait également d'estimer sur le site d'observation le paramètre de Fried [9] qui caractérise le degré de perturbation de la surface d'onde [10]. Ceci constituera un atout important dans l'optimisation du choix des microlentilles de l'analyseur Shack-Hartmann lors d'observations destinées à des expériences d'opération de déconvolution.

Enfin, en comptage de photons, le système réalisé peut être exploité à la fréquence pixel d'un CCD classique. Il peut aussi évoluer afin d'équiper les futures générations de caméras à CCDs rapides et à sorties multiples [11]. En effet, ce système peut réduire le flot d'informations à traiter, en filtrant grossièrement les pixels constituant les taches lumineuses. D'autres DSPs prendraient le relais pour affiner le calcul des photocentres. Un tel centreur fonctionnerait alors à la cadence de l'occurrence des photoévénements et non plus au rythme de l'horloge pixel des CCDs.

7 Remerciements

Je tiens à remercier MM. A. Blazit et G. Lelièvre pour le soutien qu'ils ont apporté à ce travail.

8 Références

- [1] Pearson J. E. et Freeman R. H. "Adaptive optical techniques for wavefront correction", Applied Optics and Optical Engineering, vol. VII, pp. 245-340, 1979.
- [2] Fontanella J. C. "Analyse de surface d'onde, déconvolution et optique active", Journal of Optics (Paris), vol. 16, n°6, pp. 257-268, 1985.
- [3] Boksenberg A. "Performance of the University College London Photon Counting System", ESO/CERN Conference on "Auxiliary Instrumentation for Large Telescopes", proc. Ed. by S. Laustsen, A. Reitz, Geneva (2-5 May 1972).
- [4] Blazit A. "Comptage de photons bidimensionnel et applications astrophysiques", Thèse de Doctorat d'Etat de l'Université de Nice, 1987.
- [5] Primot J. "Application des techniques d'analyse de surface d'onde à la restauration d'images dégradées par la turbulence atmosphérique", Thèse de Doctorat de l'Université Paris XI, 1989.
- [6] Kern P. "Optique adaptative et grands télescopes", Thèse de Doctorat de l'Université Paris VII, 1990.
- [7] Whalen A. D. "Detection of signal in noise", Academic Press, 1971.
- [8] Fidouh F. "Développement d'un détecteur de photocentres de taches lumineuses à base de processeurs de traitement de signal. Applications à l'imagerie astronomique à haute résolution", Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 1993.
- [9] Fried D. L. "Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures", Journal of the Optical Society of America, vol. 56, n°10, pp.1372-1379, 1966.
- [10] Lelièvre G., Sebag J., Bauduin D., Fidouh F., Lebrun J. L., Servan B. "Wavefront sensors optimization in astronomical applications", Proceedings SPIE Specification and Measurement of Optical Systems, vol. 1781, pp. 224-231, Berlin, 14-18 September 1992.
- [11] Fidouh F., Blazit A., Lelièvre G. "Real time photo centroid detection for photon counting and wavefront sensing cameras", Proceedings SPIE Photoelectronic Detection and Imaging'93, vol. 1982, pp. 288-292, Peking, 17-20 May 1993.