

SYNTHÈSE D'UN CORRÉLATEUR OPTIMISÉ : APPLICATION À LA RECONNAISSANCE DES LETTRES

Ayman Al Falou

Institut Supérieur d'Electronique de Bretagne

ISEB, URL: <http://www.iseb.fr>

20 rue Cuirassé Bretagne, BP 50425, 29604 Brest Cedex, France

af@mailhost.iseb.fr

(Received 23 February 2001 Accepted 30 May 2002)

ABSTRACT

This article presents an experimental study of optical multichannel Vander Lugt based on the use of a Binary Phase Only Filter (BPOF) correlators. Several solutions are proposed. The solution chosen was the best suited to the design and the construction of a multichannel compact and reconfigurable optical correlator (multicorrelator). The important increase in the processing capacity was made possible thanks to the design of a suitable filter (the segmented composite filter). Initially, the study was oriented towards segmented filtering architectures, where the reconfiguration is done in the Fourier plane. Various references are superimposed in the Fourier plane with a different carrier for each. However this creates a saturation problem in the Fourier plane, which is worsened because a binarisation of the plane is also required. In order to optimize the use of the Fourier plane, the optimization of the segmented filter is proposed. This optimization is based on an optimal use of the bandwidth space product in the correlator. This filter allowed the increase in the number of correlations per second, and the initiation of sophisticated processes (the decision is made on several peaks simultaneously and not only by one pick). And finally it increases in a very significant way, the robustness of the correlator (phenomenon of local saturation in the Fourier plane).

Keywords: optical correlation, BPOF, segmented composite filter, Fourier plane

RESUME

Cet article s'intéresse à l'étude sous un angle expérimental d'un corrélateur multi-canaux de type Vander Lugt basé sur l'utilisation d'un filtre binaire de phase pure (BPOF). Différentes solutions ont été envisagées. La solution retenue est celle qui se prête le mieux à la réalisation d'un corrélateur optique multi-canaux compact et reconfigurable

(multicorrélateur). L'augmentation sensible de la capacité de traitement a été rendue possible grâce à la conception d'un filtre approprié (le filtre composite segmenté). Dans un premier temps l'étude s'est orientée vers les architectures du type filtres segmentés, où la reconfigurabilité est introduite dans le plan de Fourier. Différentes références se superposent dans ce dernier mais assorties d'une porteuse différente. Cela pose un problème de saturation dans le plan de Fourier, problème d'autant plus aigu que dans ce plan une binarisation est nécessaire. Pour optimiser l'utilisation de ce plan de Fourier, nous proposons une optimisation de ce filtre segmenté basée sur une utilisation optimale du produit espace bande passante disponible au niveau du corrélateur. Ce qui a permis d'augmenter le nombre de corrélations effectuées par seconde, de mettre en place des processus plus sophistiqués (la décision est prise sur plusieurs pics simultanément). Enfin cette amélioration a permis d'accroître de manière très sensible la robustesse du corrélateur (phénomène de saturation locale dans le plan de Fourier).

Mots clés: corrélation optique, BPOF, filtre segmenté optimisé, plan de Fourier

INTRODUCTION

Pour dépasser les limites d'une décision prise par simple détection d'un pic de corrélation, il est nécessaire d'utiliser des algorithmes de décision moins sommaires. Une combinaison modulable de résultats binaires peut permettre d'atteindre cet objectif. Ceci passe par la réalisation en parallèle de plusieurs corrélations, ce que l'on peut obtenir par des architectures multivoies rapidement reconfigurables.

PRINCIPE DE LA CORRELATION

Cette technique qui permet la reconnaissance des formes est basée sur la comparaison d'une bibliothèque d'objets « référents » avec l'objet à reconnaître (Goodman, 1972). Cet objet peut être un son particulier contenu dans un environnement sonore ou une forme donnée d'objet dans une scène, l'ensemble se présentant sous forme d'image.

Soit $s(x,y)$ et r_i respectivement une forme bidimensionnelle (image de l'objet à reconnaître) et un ensemble d'objets de référence. L'opération de corrélation entre ces différents objets sera notée : $s * r_i = c(x',y')$, (* : Représente l'opération de convolution), qui est également une image. Lorsque la référence r_i ressemble à l'objet s , cette fonction bidimensionnelle ou image de corrélation présente un pic de corrélation important (auto-corrélation) ; Lorsque r_i est différent de s , le pic disparaît (inter-corrélation).

La corrélation est une opération mathématique relativement complexe, mais elle s'exprime simplement par un produit dans le domaine de Fourier ou domaine des fréquences Figure 1.

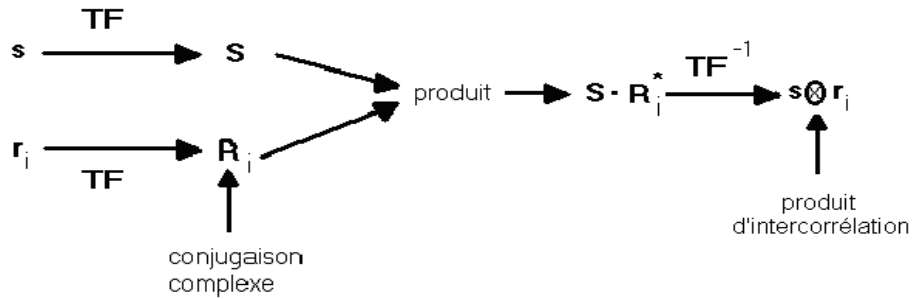


Figure 1. Schéma synoptique d'un corrélateur.

Filtrage « 4f » et corrélation

La fonction mathématique d'intercorrélation à deux dimensions de deux signaux réels $s(x,y)$ et r_i ($h = r_i^*$: conjugué de r_i) est donnée par l'équation suivante :

$$s \otimes h = \iint_{\infty} h(\vec{v} - \vec{\tau}) s(\vec{v}) d^2v \tag{1}$$

D'un point de vue numérique (existence d'algorithme « FFT : Fast Fourier Transform ») comme d'un point de vue optique, il est intéressant de passer par les TFs pour calculer cette quantité. Optiquement, cette quantité peut être déterminée en utilisant un montage de filtrage optique dit « 4f ». Le montage classique est donné sur la Figure 2.

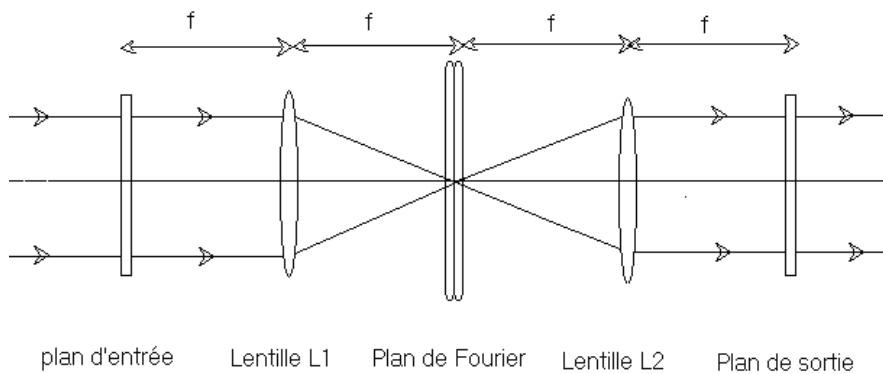


Figure 2. Montage optique dit « 4f » et son schéma synoptique.

L'objet s est éclairé par une onde plane monochromatique. Une lentille convergente forme $S = TF(s)$ sa transformée de Fourier dans son plan focal image (plan de Fourier ou plan spectral) où est placé un filtre H calculé en fonction du traitement désiré. Enfin une deuxième lentille effectue une seconde T.F dans le plan de sortie (plan de corrélation).

Le principe d'un filtrage consiste à agir sur le spectre de l'objet, donc dans le plan de Fourier, de façon à modifier la répartition spectrale de l'amplitude lumineuse. Le résultat est observé dans le plan de sortie.

Soit h la réponse impulsionnelle du filtre et H sa transformée de Fourier. L'amplitude du champ dans le plan de sortie est celle de l'objet dans le plan d'entrée convoluée par \tilde{h} , où \tilde{h} est l'image inversée de h . Donc l'amplitude dans le plan de sortie (plan image) s'écrira :

$$\Phi(x', y') = \int_{\mathbb{R}^2} s(x, y) \tilde{h}(x' - x, y' - y) dx dy = s \otimes h \quad (2)$$

Cette relation est bien une relation d'intercorrélation (équation 1) entre s et h . On retrouve la fonction de l'équation mathématique d'intercorrélation mais cette fois ci exprimée optiquement.

Le corrélateur optique « Vanderlugt » à filtre de phase pure monovoie (POF)

Depuis la publication du premier corrélateur optique par Vander Lugt (Vander Lugt, 1964) (basé sur l'utilisation du montage « 4f »), beaucoup de recherches ont été effectuées dans ce domaine pour le rendre plus performant (Honer, 1984; Al Falou, 1999 a).

Le corrélateur dit POF (Phase Only Filter) est un corrélateur de type Vander Lugt (Vander Lugt 64) dans lequel le filtre a subi un traitement particulier (réalisé via un algorithme de traitement non linéaire appliqué sur le filtre adapté (Al Falou, 1999 b). Ce filtre est souvent introduit pour augmenter le pouvoir de discrimination (Oppenheim, 1981; Honer, 1984; Honner, 1984; Tribillion, 1988) et pour des raisons de simplicité d'implantation par les composants optiques reconfigurables actuellement les plus rapides (SLM) (Barnes 92) (Wilkinson, 1995; Al Falou, 1999 a). Il requiert également un moindre volume d'information à manipuler et à mémoriser.

CORRELATEUR OPTIQUE MULTIDÉCISION

Lors d'une opération de reconnaissance des formes avec le corrélateur monovoie (Al Falou, 1999 a), décrit plus haut, on notera la faible fiabilité (pic erroné) du résultat, du fait qu'une très faible partie de l'information du plan de corrélation est utilisée (un seul point) pour décider. Pour cela, il nous a semblé très intéressant de baser la décision, non plus sur une seule corrélation mais sur un ensemble de corrélations élémentaires et de recourir à la multicorrélation (Gueguen, 1988; Weiss, 1990; Petillot, 1997).

Dans cet article nous proposons de revenir à l'architecture optique la plus simple et de transférer toute l'intelligence de la reconnaissance dans la détermination et la gestion de la base de filtres utilisée et ainsi de construire un nouveau filtre : le filtre segmenté (Al Falou, 1999 b).

Le filtre segmenté

Le filtre que nous cherchons à construire est un filtre permettant de reconnaître un ou plusieurs objets dans une scène. Afin de construire un tel filtre, nous adoptons une démarche qui est celle des filtres composites (réunir dans un seul filtre les informations sur plusieurs références) (Petillot, 1998). Dans l'approche filtre composite, chaque point du plan de Fourier participe à la corrélation d'une classe donnée à concurrence de l'intensité de son spectre en ce point. Ceci est évidemment gênant si plusieurs classes sollicitent un même point. La démarche proposée ici consiste à attribuer à chacun des points du plan de Fourier, une classe gagnante. Puis une porteuse est introduite au filtre afin de séparer les réponses du filtre dans le plan de sortie (à chaque classe on vient attribuer une porteuse différente). Pour éviter les zones de forte ambiguïté, il est possible de les neutraliser en ne leur attribuant pas de porteuses. Ceci est une façon de limiter la diaphotie. Cet étiquetage de tous les pixels du plan de Fourier réalise une segmentation du plan spectral. Il reste cependant à gérer la segmentation du plan de Fourier de façon à obtenir un certain équilibre entre toutes les classes.

Le critère utilisé jusqu'à maintenant est un simple critère d'énergie. Ce critère formulé dans le plan du spectre (Filtre) est défini par :

$$\frac{E_{ij}^k}{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N E_{ij}^k} \leq \begin{cases} \frac{E_{ij}^0}{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N E_{ij}^0} \\ \frac{E_{ij}^1}{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N E_{ij}^1} \\ \vdots \\ \frac{E_{ij}^{L-2}}{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N E_{ij}^{L-2}} \end{cases} \quad l = 0, \dots, L-2 \quad \text{avec} \quad l \neq k \quad (3)$$

où « L » est le nombre de voies, « N » la taille du plan du filtre et « E^l_{ij} » est l'énergie spectral de la classe « l » au pixel « (i,j) ». Puis le filtre résultant de cette comparaison est implanté optiquement sur le corrélateur comme étant un filtre de phase : filtre segmenté de

phase pure FSPP. Or ce critère n'est pas optimal de ce point de vue, car il ne tient pas compte de la phase mais seulement de son énergie, d'où la nécessité d'optimiser ce filtre.

Le filtre segmenté optimisé

Après avoir testé plusieurs critères (signal sur bruit, Maximum d'énergie, ...), le critère qui nous a semblé le mieux adapté à notre étude est un critère qui compare, non plus l'énergie de différentes classes $E_{ij}(k, l)$, mais l'énergie de la partie réelle de ces différentes classes. Il sera formulé comme suit :

$$\frac{(\rho_{ij}^k \cos(\varphi_{ij}^k))^2}{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N E_{ij}^k} \leq \begin{cases} \frac{(\rho_{ij}^0 \cos(\varphi_{ij}^0))^2}{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N E_{ij}^0} \\ \frac{(\rho_{ij}^1 \cos(\varphi_{ij}^1))^2}{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N E_{ij}^1} \\ \vdots \\ \frac{(\rho_{ij}^{L-2} \cos(\varphi_{ij}^{L-2}))^2}{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N E_{ij}^{L-2}} \end{cases} \quad l = 0, \dots, L-2 \quad \text{avec} \quad l \neq k \quad (4)$$

où « L » est le nombre de voies, « N » la taille du plan du filtre, « E_{ij}^l » est l'énergie spectrale de la classe « l » au pixel « (i,j) » et « $\rho_{ij}^l \cos(\varphi_{ij}^l)$ » est la partie réelle de la classe « l » au pixel « (i,j) ».

Le schéma synoptique de la synthèse du filtre composite segmenté optimisé est présenté Figure 3.

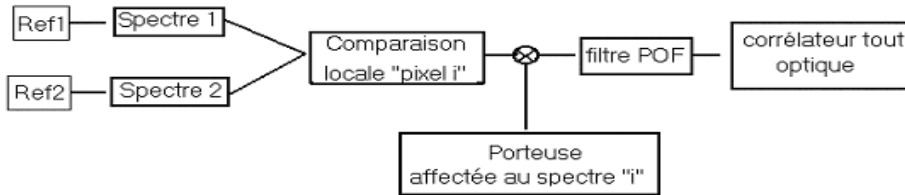


Figure 3. Schéma synoptique d'un corrélateur utilisant un filtre composite segmenté.

La porteuse est introduite au filtre afin de séparer les réponses du filtre dans le plan de sortie (à chaque classe on vient attribuer une porteuse différente).

Etude comparative par simulation entre les deux filtres

L'objectif est ici d'évaluer les performances observées avec le filtre composite segmenté optimisé et de les comparer avec celles obtenues avec le filtre segmenté (sans optimisation). On considère comme application, la reconnaissance des lettres issues de l'alphabet arabe. Par exemple, la Figure 4 représente la première lettre de l'alphabet arabe « alif ».



Figure 4. « alif » : est la première lettre de l'alphabet arabe.

La figure 5 présente respectivement, en (a) les plans d'entrées, en (b) on trouve un exemple du filtre segmenté (4 classes) puis nous trouvons en (c) les plans de corrélations correspondants.

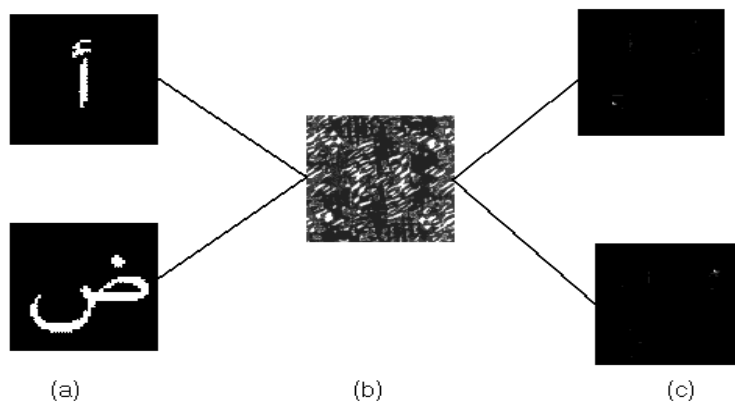


Figure 5. Exemples des plans d'entrées (a), du filtre segmenté (b) et des plans de corrélations (c).

Les plans de corrélation présentés en (5-c) maintiennent bien la présence d'un pic de corrélation dans le quadrant gauche bas, qui correspond à une corrélation entre la scène « alif » et le filtre segmenté, et dans le quadrant droit haut quand l'image « dad » est présentée à l'entrée.

L'ensemble des plans de corrélations observé démontre l'intérêt de la méthode proposée car il permet, avec un minimum de filtre, l'identification de l'objet présent dans la scène.

LA LIMITATION DU PRODUIT ESPACE BANDE SBWP (SPACE BANDWIDTH PRUDECT): INFLUENCE DU NOMBRE DE REFERENCES INTRODUITES DANS LE FILTRE SEGMENTE

Le paramètre que l'on a choisi pour débiter cette étude, est celui qui est susceptible d'affecter le plus les performances de cette architecture i.e., le nombre de corrélations simultanées.

Pour cela nous choisissons notre base d'apprentissage (dans notre cas elle est constituée de huit images : les 8 premières lettres de l'alphabet arabe), puis nous observons les performances de pic corrélation en fonction du nombre de corrélation.

Afin d'aller plus loin dans l'appréciation des performances des filtres, nous avons choisi comme critère le PCE (Peak to Correlation Energy):

$$PCE = \frac{\text{Energie du pic de corrélation}}{\text{Energie totale du plan de corrélation}} \quad (5)$$

Le Tableau 1 présente les résultats obtenus, par simulation, en introduisant dans le plan de Fourier dans un premier temps le filtre segmenté puis le filtre segmenté optimisé.

TABLEAU 1

Influence sur la Valeur du PCE des Différentes Méthodes de Calcul de Filtre

Nombre de corrélations	PCE : Filtre segmenté	PCE : filtre segmenté optimisé
1	1,79	1,79
2	0,993	1,09
3	0,576	0,825
4	0,543	0,753
5	0,532	0,768
6	0,468	0,737
7	0,49	0,7
8	0,46	0,668

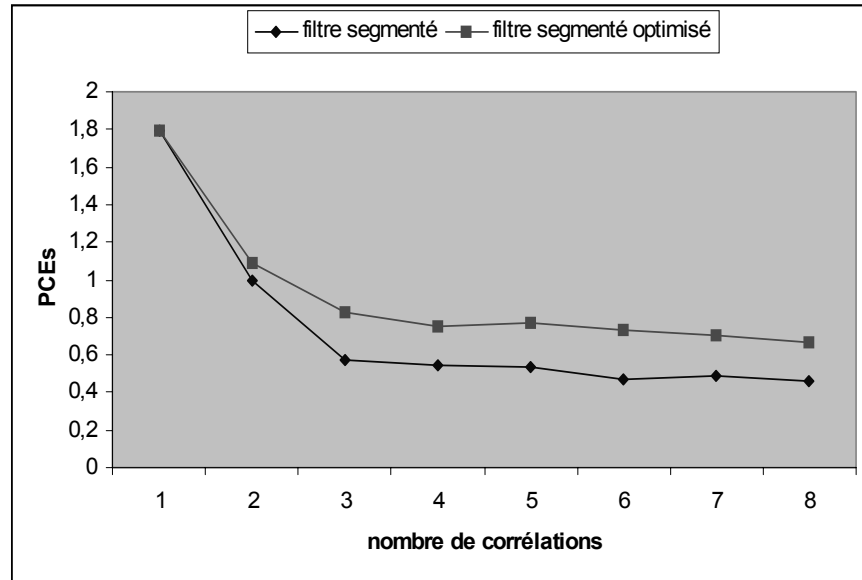


Figure 6. Comparaison de la variation du PCE en fonction du nombre de corrélations pour le filtre segmenté et le filtre segmenté optimisé.

Les résultats obtenus Tableau 1 et Figure 6 montrent la détérioration du PCE des pics de corrélation au fur et à mesure que l'on augmente le nombre de corrélations (saturation locale) pour les différents types de filtres.

CONCLUSION

En comparant les réponses obtenues avec les deux filtres étudiés, nous constatons la quasi impossibilité de reconnaître une lettre lorsqu'on a plus de 4 à 5 références tandis que le filtre segmenté nous offre la possibilité d'incorporer 8 références sans que le PCE ne subisse qu'une division d'un facteur d'environ 3 par rapport à sa valeur initiale.

Les différents résultats obtenus montrent que :

Il est tout à fait possible, de réaliser optiquement et simultanément plusieurs corrélations à l'aide d'un seul filtre introduit dans le plan de Fourier ;

L'optimisation du critère de segmentation permet d'améliorer les performances, par rapport à un filtre segmenté simple.

REFERENCES

- Al Falou, A., 1999 a. *Implantation optique de corrélateurs multivoies appliqués à la reconnaissance des formes*. PhD thesis, Université de Rennes I.
- Al Falou, A., Keryer, G. and De Bougrenet, J.L 10 octobre 1999 b, Optical implementation of segmented composite filtering. *Applied Optics*, 38(29): 6129-6135.
- Armitage, J.D and Lohmann, A.W. 1965. Character recognition by incoherent spatial filtering. *Applied Optics*, 4: 461-467.
- Barnes, T.H., Johnson, F.T.J., Eiju, T., Matsude, K. and Kokaji S. 1992. Optoelectronic determination of binary phase only filters for optical correlation. *Optical Engineering*, 31: 1936-1945.
- Goodman, J.W. 1972. *Introduction à l'optique de Fourier et à l'holographie*. Masson.
- Gueguen, A. et Nakache, J.P. 1988. Méthode de discrimination basée sur la construction d'un arbre de décision binaire. *Revue de statistique appliquée*, XXXVI: 19-38.
- Honer, J.L. and Gianino, P.D. 1984. Phase only matched filter. *Applied Optics*, 23: 812-816.
- Javidi, B. 15 juin 1989. Nonlinear joint power spectrum based optical correlation energy filters. *Applied Optics*, 28: 6123-6128.
- Oppenheim, A.V. 1981. The importance of phase signals. In Proceedings of the *IEEE*, 69: 529-541.
- Petillot, Y., Ibanez, R.C. and De Bougrenet, J.L. 1997. Optical inductive decision tree classification system based on multiple correlations. *Optics Engineering*, 1 126: 213-219.
- Petillot, Y. 1998. *Vers une implantation de corrélateurs optiques temps réel : Applications à divers problèmes de reconnaissance des formes*. PhD thesis, Université de Rennes I.
- Tribillon, J.L. 1998. *Traitement optique de l'information et reconnaissance des formes par voie optique*. Teknea.
- Vander Lugt, A. B. 1964. Signal detection by complex spatial filtering. *IEEE*, IT-10: 139-145.
- Weiss, S.M. and Kapouleas, I. 1990. An empirical comparison of pattern recognition neural nets and machine learning classification methods. *Machine Learning I*, 781-787.
- Wilkinson, T.D. 1995. *The binary phase only matched filter*. PhD thesis, Cambridge U. Engineering.