

La Transformée de Fourier fenêtrée 2D en holographie numérique: Etude, analyse des performances et implémentation sous GPU

Silvio MONTRÉSOR¹, Florent CARLIER², Pascal PICART^{1,3}

¹Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine (LAUM), UMR CNRS 6613,
Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans Cedex 9, France

²Centre de Recherche en Education de Nantes, EA2660, 44000 Nantes, France

³Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans, Rue Aristote, 72085 Le Mans Cedex 9, France
silvio.montresor@univ-lemans.fr, florent.carlier@univ-lemans.fr,
pascal.picart@univ-lemans.fr

Résumé – La transformée de Fourier fenêtrée bidimensionnelle constitue le coeur d'un algorithme considéré aujourd'hui comme l'état de l'art en holographie numérique en ce qui concerne la réduction du bruit de speckle. Cet article décrit son implémentation dans un environnement GPU afin d'améliorer sa vitesse de calcul. L'holographie numérique est une technique optique utilisant de la lumière cohérente. Elle est très répandue dans le domaine de la mesure de champ de déplacements et de formes. Cette technique est sujette à un phénomène de décorrélation de speckle qui se traduit par l'ajout d'un bruit de haute fréquence spatiale qui altère le signal utile. Parmi les traitements envisagés dans la littérature pour en atténuer la portée, la méthode proposée par Qian Kemao en 2007 est sans conteste la plus efficace. Elle repose sur le calcul d'une représentation des cartes de phases par une transformée de Fourier 2D spatialement localisée à l'aide d'une fenêtre gaussienne. La réduction du bruit est opérée par un seuillage appliqué sur les composantes de la représentation. Dans cet article nous rappelons tout d'abord les éléments relatifs à l'holographie numérique et au bruit de speckle, puis nous présentons l'algorithme de traitement du bruit à base de transformée de Fourier fenêtrée puis l'analyse de ses performances en comparaison d'autres algorithmes de débruitage. Nous décrivons ensuite l'implémentation de cet algorithme sous environnement GPU. Enfin nous présentons une comparaison des temps de calcul de cet algorithme sous différents environnements de programmation CPU et GPU incluant les langages Matlab, C et TensorFlow.

Abstract – The two-dimensional windowed Fourier transform constitutes the core of an algorithm considered today as the state of the art in digital holography with regard to the reduction of speckle noise. In this article we describe the implementation of this algorithm in a GPU environment in order to improve its performance in computing speed. Speckle Interferometry (IS) is an optical technique using coherent light. It is very widespread in the field of measurement of field of displacements and forms. This technique is subject to a phenomenon of decorrelation of speckle which results in the addition of a high spatial frequency noise that alters the useful signal. Among the treatments envisaged in the literature to attenuate its scope, the method proposed by Qian Kemao in 2007 is undoubtedly the most effective treatment of speckle decorrelation. This method relies on the computation of a representation of the phase maps using a two-dimensional Fourier transform spatially located using a gaussian window. The reduction of the noise is effected by a threshold applied on the components of the representation. In this paper, we first recall the elements related to digital holography and speckle noise, and then we present the windowed Fourier transform noise processing algorithm and its performances compared to eleven other denoising algorithms. We then describe the implementation of this algorithm under GPU environment. Finally, we present a comparison of the computing time performance of this algorithm under different CPU and GPU programming environments, including Matlab, C and TensorFlow.

1 Introduction

L'holographie numérique est une méthode non conventionnelle d'imagerie cohérente. Elle est très répandue dans le domaine de la microscopie et des mesures de champs des déplacements ou de formes de surfaces. Son principal avantage réside en ce qu'elle permet la caractérisation sans contact de surfaces rugueuses d'objets avec une grande sensibilité et une haute précision. L'hologramme numérique possède des propriétés particulières liées à la nature même des ondes optiques mises en jeu à l'enregistrement. Ainsi, le codage de l'information est lié au champ de speckle produit par l'onde issue de la surface

de l'objet. Il vient alors que le champ optique reconstruit possède également une microstructure de type speckle, c'est-à-dire avec une granularité aléatoire sur son amplitude et sa phase. Cette phase aléatoire est la clé pour la mesure sans contact : on s'intéresse alors à la corrélation de phase qui existe entre plusieurs états de l'objet. Lorsque l'objet est déformé sous l'action d'une sollicitation quelconque, qui peut être d'origine mécanique, acoustique, thermique, pneumatique, etc..., il apparaît un phénomène de décorrélation de speckle entre deux instants considérés. Cette décorrélation ajoute un bruit haute fréquence spatiale au signal utile, dont la largeur de corrélation spatiale est liée à la taille du grain de speckle observable sur l'image

d'amplitude [1, 2, 3]. Ainsi la carte de phase nécessite un filtrage pour être correctement exploitée en vue d'une confrontation avec un modèle physique de l'objet étudié. Le bruit de speckle peut être de fort niveau, et dépend directement du nombre de franges générées par le mouvement en surface de l'objet, il est alors nécessaire d'appliquer un filtrage spatial avant d'envisager le déroulement de phase. Différentes méthodes ont été appliquées pour lisser ces franges numériques mais elles n'ont eu qu'un succès partiel. Nous avons récemment classifié les méthodes de débruitage appliquées aux phases obtenues en holographie numériques [4] et nous avons montré que la transformée de Fourier fenêtrée bidimensionnelle constitue l'état de l'art de ce type de filtrage. Dans le cas de mesure en holographie ultra-rapide, des enregistrements à 125kHz doivent être réalisés. Pour 1s de film, on a donc 125000 images à traiter. La chaîne de traitement inclut le calcul des hologrammes par diffraction de Fresnel, l'extraction des différences de phase, le filtrage des phases, leur déroulement puis le calcul du champ des déplacements. La chaîne de traitement étant complexe et de longue durée (plusieurs heures typiquement), une implémentation des différents blocs doit être réalisée sous GPU pour accélérer le calcul. Dans cet article, nous présentons l'implémentation sous GPU de la méthode de transformée de Fourier fenêtrée 2D. Cet article est organisé comme suit : la section 2 présente l'algorithme de filtrage, les sections 3 et 4 présentent l'analyse de ses performances en comparaison de onze autres algorithmes. Enfin la section 5 présente l'implémentation sous GPU ainsi que la comparaison des temps de calcul de cet algorithme sous différents environnements de programmation CPU et GPU incluant les langages Matlab, C et TensorFlow.

2 Filtrage par transformée de Fourier 2D fenêtrée

Le filtrage par transformée de Fourier 2-D fenêtrée (WFT2F) est une méthode basée sur une TF (Transformée de Fourier) locale [6, 7] qui prend en compte la non-stationnarité du bruit de speckle. Les composantes fréquentielles des franges d'interférences sont ainsi extraites du bruit plus efficacement qu'avec une TF calculée sur l'ensemble de la carte de phase comme dans le cas du filtre de Wiener. D'une façon analogue aux transformées en ondelettes mais adaptée au cas des représentations complexes, le filtrage consiste à appliquer un seuil sur le module des coefficients de Fourier 2D locaux laissant la phase inchangée. Une TF 2D fenêtrée inverse (IWFT2F) appliquée sur les composantes fréquentielles filtrées permet d'obtenir modulo 2π les franges d'interférences débruitées. La WFT2F peut être interprétée comme la projection des cartes de phase sur une base de fonctions 2D périodiques $G_{\mu,\nu,\xi,\eta}(x,y)$ localisées dans les domaines spatial et fréquentiel conjointement. Soit $s(x,y)$ la carte de phase en entrée, nous avons :

$$WFT_s(\mu, \nu, \xi, \eta) = \int \int s(x, y) G_{\mu,\nu,\xi,\eta}^*(x, y) dx dy. \quad (1)$$

Dans cette équation, le symbole $*$ représente l'opération complexe conjuguée. Les fonctions G constituent les atomes de la représentation qui sont générés à partir des translations spatiales (variables μ et ν) et modulation (variables ξ et η) d'une fonction fenêtre $g(x, y)$:

$$G_{\mu,\nu,\xi,\eta}(x, y) = g(x - \mu, y - \nu) \exp(j(\xi x + \eta y)), \quad (2)$$

qui est une gaussienne normalisée définie par :

$$g(x, y) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\right). \quad (3)$$

Les variables σ_x and σ_y sont les écarts-types de la gaussienne selon les directions x et y . Le processus de filtrage est obtenue par un seuillage dur [5] appliqué sur les coefficients de la WFT2F. Soit $W = WFT_s(\mu, \nu, \xi, \eta)$ les coefficients WFT2F et \overline{W} les coefficients seuillés, nous avons :

$$\overline{W} = \begin{cases} W & \text{if } |W| \geq T \\ W = 0 & \text{if } |W| < T \end{cases} \quad (4)$$

T est le seuil dont la valeur est réglée de manière à rejeter les composantes de bruit. La barre de module sur les coefficient WFT2F désigne le processus de seuillage qui modifie les coefficients en entrée. Finalement une IWFT2F est appliquée sur les coefficients filtrés \overline{W} afin d'obtenir l'image débruitée,

$$d(x, y) = \int \int \int \int \overline{W} G_{\mu,\nu,\xi,\eta}(x, y) d\mu d\nu d\xi d\eta. \quad (5)$$

La phase est alors extraite de l'image de sortie $d(x, y)$ par une opération arctangente modulo 2π . La version discrétisée de cet algorithme conduit au réglage de huit paramètres qui définissent la taille de la fenêtre, la valeur du seuil et six paramètres pour la discrétisation des axes fréquentiels. Pour le travail présenté nous avons gardé les valeurs proposées par les auteurs [7] qui semblent bien adaptées au traitement des franges d'interférences.

3 Base de données, méthodes et critères de performance

La base de données pour cette évaluation est constituée de cartes de phase simulées dans lesquelles les franges d'interférences ainsi que le niveau et la statistique du bruit sont contrôlés. La base de données et le principe de simulation ont été publiés dans de précédents articles [4, 8] aussi nous en rappelons brièvement ici les principales caractéristiques. L'utilisation de plusieurs motifs permet une diversité de structures de franges de façon à établir des statistiques plus robustes. Ainsi, cinq motifs sont choisis ainsi que cinq valeurs de RSB (Rapport Signal sur Bruit) par modification de la longueur d'onde dans le simulateur. Nous obtenons 25 cartes de phases bruitées avec des RSB en cosinus échelonnés entre 3dB et 12dB. Les indices utilisés pour cette évaluation sont l'erreur de phase σ_ϕ calculée à partir de la différence de phase enroulée modulo 2π

de la phase débruitée et de la phase bruitée [4]. Le second est constitué par l'erreur méthode $\sigma_{\phi_{meth}}$ calculée à partir de la différence de phase enroulée modulo 2π de la phase débruitée et de la phase pure débruitée par la méthode [8]. Cette erreur rend compte du biais introduit par la méthode seule indépendamment du bruit. Enfin le troisième indice est l'erreur d'estimation $\sigma_{\phi_{est}} - \sigma_{\phi_{input}}$ qui est la différence entre le niveau du bruit en entrée estimé par la méthode et le niveau de bruit en entrée réel [8]. Les performances de la WFT2F ont été comparées avec d'autres méthodes de débruitage sélectionnées pour leur efficacité démontrées en traitement d'images holographiques [4]. Les méthodes sont : Les ondelettes discrètes stationnaires (notées Daub4, Daub8, Sym4 et Sym8 sur les figures), les curvelets et les contourlets, le filtre de Wiener, deux filtres médians, la méthode de diffusion anisotropique (Diffaniso) et la méthode BM3D qui constitue l'état de l'art actuel pour les images naturelles.

4 Résultats et analyses

La Figure 1 illustre les performances de la méthode WFT2F ainsi que onze autres algorithmes de débruitage au regard des trois indices précédemment présentés. En terme d'erreur sur la phase, la méthode WFT2F se révèle la meilleure avec une valeur de 0.035rad. soit environ la moitié de l'erreur obtenue avec les curvelets qui occupent la seconde place de ce classement. En terme d'erreur méthode la WFT2F se situe en troisième position avec 0.01rad. soit derrière BM3D et le filtre median d'ordre 5 qui occupe la première place, malgré tout le compromis reste favorable ici à la WFT2F vue son erreur globale très faible devant celle du médian d'ordre 5. La connaissance de l'erreur méthode est d'importance pour l'utilisation des cartes de phases en métrologie en particulier afin de borner les erreurs obtenues sur les grandeurs estimées, par exemple la mesure d'un déplacement pour l'étude d'un matériau sous contraintes. Concernant l'erreur d'estimation, la WFT2F occupe le second rang après les contourlets avec 0.005rad. La connaissance précise du niveau du bruit est d'importance en holographie numérique car elle peut renseigner sur le défaut de focalisation du faisceau laser sur l'objet d'étude [9]. Ici encore le compromis est très favorable à la WFT2F étant donnée la valeur de son erreur de phase devant celle de la méthode contourlets. La Figure 2 montre l'évolution des trois indices en fonction du niveau de bruit pour la seule méthode WFT2F. On relève une très faible erreur d'estimation et une faible erreur méthode, toutes deux pratiquement indépendantes du niveau de bruit en entrée et inférieures en tout point à l'erreur de phase de tendance logarithmiquement croissante. La figure 3 illustre le résultat d'application de la WFT2F sur les cartes de phases simulées de la base de données.

5 Implémentation GPU de la WFT2F

5.1 Conditions de mesure

Les tests pour l'expérimentation sont réalisés 50 fois en exécutant le code sur une carte graphique NVIDIA GTX 1080 (génération Pascal) et sur un PC quadcore Intel Core i7-6700K à 4.00GHz. La carte GPU dispose de 2560 cœurs CUDA et de 8Go de mémoire GDDR5X interfacées avec un bus de 256 bits, assurant ainsi une bande passante de 320Go/s. Le temps de calcul mesuré inclut les temps de transfert des données $s(x, y)$ et de retour du résultat WFT2F entre la mémoire centrale du PC et la carte graphique.

5.2 Expérimentations

Les paramètres initialisés pour l'algorithme WFT2F sont de 0,1 pour le pas fréquentiel dans les directions x et y avec des limites min et max fixées à -1 et 1. Le niveau du seuil est de 6 et les valeurs de σ_x et σ_y sont égales à 10 pour la fenêtre gaussienne. Le tableau 1 présente les résultats de Matlab (Double précision) et en séquentiel C pris comme référence dans l'article de Gao and al. [10]. L'architecture fortement parallèle de la GPU [11] montre des résultats équivalents quelque soit la taille de l'image.

TABLE 1 – Temps d'exécution avec différentes tailles d'images des cartes de phase pour l'algorithme WFT2F

Algorithme	MATLAB (sec)	C (sec)	GPU (sec)
WFT2F(256x256)	30.75	13.77	5.61
WFT2F(512x512)	125.70	54.46	5.62
WFT2F(1024x1024)	459.25	279.14	5.64

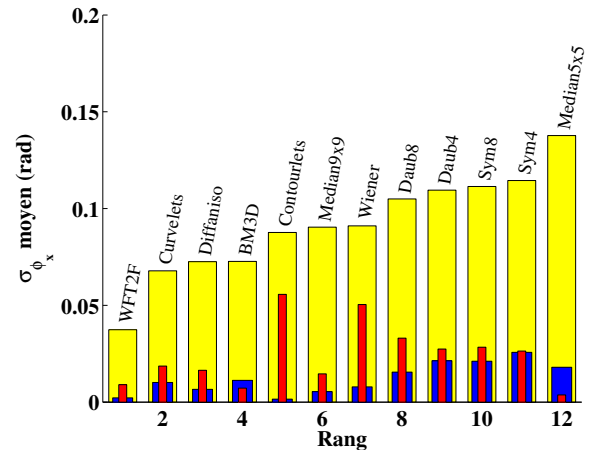


FIGURE 1 – Classement de différentes méthodes de débruitage selon les trois types d'erreur : en jaune, l'erreur moyenne sur la phase, en rouge l'erreur méthode, en bleu l'erreur d'estimation

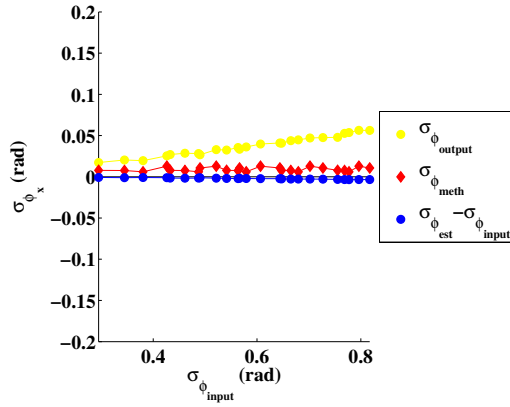


FIGURE 2 – Evolution des trois types d'erreur en fonction du niveau de bruit en entrée pour la méthode WFT2F : l'erreur moyenne sur la phase (jaune), l'erreur méthode (rouge), l'erreur d'estimation (bleu)

6 Conclusion

Dans cet article, nous avons discuté des performances de l'algorithme WFT2F considéré comme l'état de l'art pour le traitement du bruit de speckle en holographie numérique. Cette méthode repose sur la représentation des cartes de phases à l'aide d'une TF 2D spatialement localisée par une fenêtre gaussienne. Le débruitage est réalisé par un seuil appliqué sur les composantes de la représentation. Les performances de la méthode WFT2F sont comparées à onze autres algorithmes de débruitage. Enfin nous décrivons son implémentation sous environnement GPU et présentons une comparaison de ses temps de calcul sous différents environnements de programmation CPU et GPU incluant les langages Matlab, C et TensorFlow.

Les auteurs tiennent à remercier Alexis Louis, étudiant à l'ENSIM qui a contribué à la réalisation de l'implémentation sous GPU pour son projet de 5^{ème} année. Ce travail est financé par les moyens alloués au projet HONEFI3D du programme ANR-14-ASTR-0005-02.

Références

- [1] P. Owner-Petersen, *Decorrelation and fringe visibility : on the limiting behavior of various electronic speckle-pattern correlation interferometers*. J Opt Soc Am A 8 :1082-1089. 1991.
- [2] M. Lehmann, *Decorrelation-induced phase errors in Phase Shifting Speckle Interferometry*. Appl Opt 36 :3657-3667. 1997.
- [3] J. C. Dainty, A. E. Ennos, M. Françon, J. W. Goodman, T. S. McKechnie, G. Parry *Laser Speckle and Related Phenomena*. ISBN : 978-3-540-07498-4. Berlin 1975.

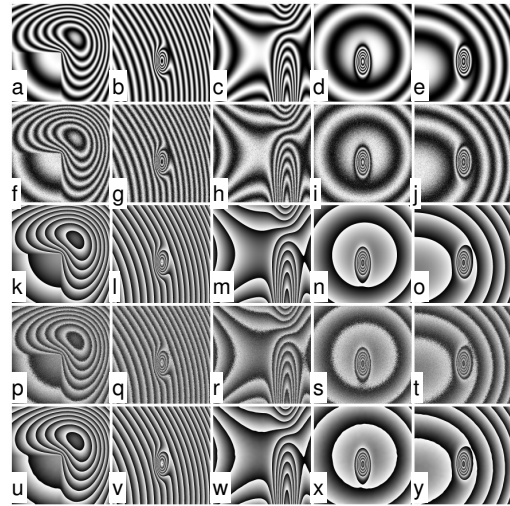


FIGURE 3 – Débruitages par la méthode WFT2F. Chaque colonne représente de haut en bas respectivement pour un motif donné : le cosinus, le cosinus bruité, la phase, la phase bruitée et la phase débruitée.

- [4] S. Montresor and P. Picart, *Quantitative appraisal for noise reduction in digital holographic phase imaging*, Opt. Express, vol. 24, no. 13, pp. 14322-14343, 2016.
- [5] S. G. Mallat, *A wavelet tour of signal processing*. Academic Press, San Diego, 1999.
- [6] Q. Kemao, *Two-dimensional windowed fourier transform for fringe pattern analysis : Principles, applications and implementations*, Opt. & Las. Eng., vol. 45, no. 12, pp. 1146-1192, 2007.
- [7] Q. Kemao, L. Nam, L. Feng, and S. Soon, *Comparative analysis on some filters for wrapped phase maps*, Appl. Opt., vol. 46, no. 12, pp. 7412-7418, 2007.
- [8] S. Montrésor, P. Picart, O. Sakharuk, and L. Muravsky, *Error analysis for noise reduction in 3D deformation measurement with digital color holography*, Journal of the Optical Society of America, vol. 34, no. 5, pp. B9-B15, 2017.
- [9] P. Picart, S. Montrésor, O. Sakharuk, and L. Muravsky, *Refocus criterion based on maximization of the coherence factor in digital three-wavelength holographic interferometry*, Optics Letters, vol. 42, Issue 2, pp. 275-278, 2017.
- [10] W. Gao, N. T. T. Huyen, H. S. Loi, and Q. Kemao, *Real-time 2D parallel windowed Fourier transform for fringe pattern analysis using Graphics Processing Unit*, Opt. Express vol. 25, pp. 23147-23152, 2009.
- [11] D. Houzet, *Calcul généraliste sur carte graphique, Du rendu au calcul massivement parallèle*, Journal Techniques de l'ingénieur Architectures matérielles, vol. TIB308DUO, no. te5990, 2016.