

CFA/VISHNO 2016

Imagerie rapide par focalisation en tout point pour le contrôle non destructif par ultrasons

E. Carcreff^a, R. Lallement^b, G. Dao^b et S. Bourguignon^c

^aThe Phased Array Company, 9 rue du marché commun, 44300 Nantes, France

^bAOS, 8044 Montgomery Road 700, Cincinnati, 45236, USA

^cIRCCyN, Ecole Centrale de Nantes, 1 rue de la Noë, 44321 Nantes, France

ewen.carcreff@thephasedarraycompany.com



LE MANS

L'imagerie par ultrasons est un outil courant pour contrôler les matériaux industriels de façon non destructive ou pour l'auscultation médicale. Dans le cas du contrôle non destructif, elle permet le cas échéant de visualiser les défauts contenus dans les pièces inspectées. L'imagerie par focalisation en tout point est une méthode efficace par rapport aux approches conventionnelles car elle permet de focaliser en chaque point de la zone de reconstruction. Le principe est dans un premier temps d'acquérir les réponses impulsionnelles de chaque paire émetteur-récepteur d'un réseau de transducteurs ultrasonores. Ensuite, l'image est reconstruite par post-traitement en appliquant les lois de retard adaptées pour chaque point de calcul. Cette méthode est néanmoins gourmande en temps d'inspection et en temps de calcul, ce qui la rend difficilement applicable pour des inspections réelles. Dans ce travail, nous présentons des accélérations de la méthode de focalisation en tout point pour des applications industrielles et médicales. Tout d'abord, nous présentons une technique de parallélisation sur cartes graphiques, chaque pixel pouvant être calculé en parallèle. Cette approche est directe et peut s'appliquer à de nombreuses configurations d'inspection (en contact, avec sabot, pulse-echo, pitch-catch, etc.). Dans un second temps, nous présentons l'imagerie par migration qui consiste à formuler le problème inverse dans le domaine des nombres d'ondes. Cette approche permet d'augmenter significativement le rapport signal à bruit et d'augmenter la résolution des réflecteurs. Elle est seulement utilisable pour des objets plats et des configurations avec incidence normale, en contact ou en immersion. Nous montrons que ces deux méthodes permettent une accélération significative de l'imagerie et tendent vers le temps-réel suivant les configurations. Nous illustrons ces résultats à partir de mesures réelles réalisées avec des blocs en aluminium contenant des défauts artificiels.

1 Introduction

L'imagerie par ultrasons est une méthode courante en contrôle non destructif et en imagerie médicale. La méthode conventionnelle consiste à afficher directement les données acquises après avoir réalisé une focalisation du faisceau ultrasonore en plusieurs points spatiaux. Les méthodes d'imagerie avancées comme la focalisation en tout point (FTP) effectuent l'imagerie en deux temps. Tout d'abord, une acquisition à l'aide d'une émission défocalisée est réalisée. L'image est ensuite obtenue par post-traitement en réalisant une focalisation pour chaque point de la zone de reconstruction [1]. Cette méthode offre des images de meilleure qualité par rapport à l'imagerie conventionnelle en termes de rapport signal à bruit et de résolution [2]. Néanmoins, le temps de calcul s'avère prohibitif pour des applications temps réel.

Nous proposons dans un premier temps une approche par calcul parallèle sur carte graphique (GPU) [3]. Chaque pixel est alors calculé en parallèle dans un GPU ayant quelques centaines de cœurs.

Nous proposons ensuite une méthode de focalisation en tout point qui fonctionne par migration [4, 5]. Issu de la géophysique, le principe est de transposer le problème dans le domaine des nombres d'onde.

Dans cet article, nous présentons tout d'abord la méthode classique de focalisation en tout point, pour des inspections en contact. Ensuite, nous proposons des implémentations rapides utilisant le calcul parallèle sur GPU dans la section 3. La section 4 présente la méthode de migration et montre des résultats expérimentaux. La dernière partie donne nos conclusions de ce travail.

2 Méthode temporelle de focalisation en tout point

Les méthodes d'imagerie conventionnelles consistent à afficher directement les données en respectant la géométrie de l'inspection. Elles offrent l'avantage de la rapidité de rafraîchissement mais manquent de résolution. Nous présentons ici des méthodes d'imagerie par focalisation en tout point (FTP) ou *total focusing method* (TFM) qui

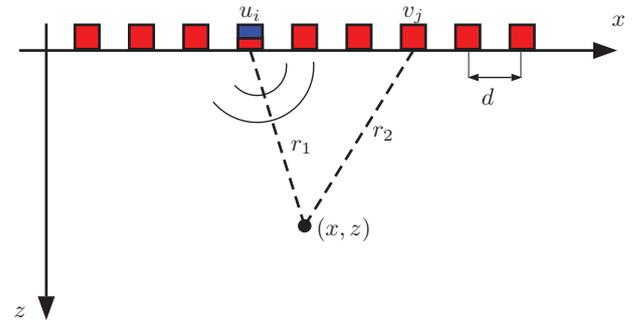


FIGURE 1 – Schéma de l'acquisition pour l'imagerie focalisation en tout point en contact avec l'objet à inspecter. La transmission est réalisée par l'élément i en bleu et la réception est effectuée par tous les éléments en rouge. Cette étape est répétée pour tous les éléments émetteurs.

fonctionnent en deux temps : une étape d'acquisition des données et une étape de reconstruction de l'image. L'étape d'acquisition consiste à successivement transmettre les ondes ultrasonores avec un seul élément et de recevoir les signaux avec tous les éléments.

L'inspection est le plus souvent réalisée en contact, c'est à dire en plaçant directement la sonde ultrasonore sur la pièce à ausculter. Il faut néanmoins veiller à placer un gel de couplage entre la sonde et la pièce pour réaliser l'adaptation d'impédance. La Figure 1 présente le principe d'acquisition pour l'imagerie FTP pour ce type d'inspection. Nous considérons un réseau de N_{el} transducteurs.

On obtient dans ce cas une matrice de données $y(t, u, v)$ où t est un vecteur temporel, u est la position de l'émetteur et v est la position du récepteur. La reconstruction de l'image en chaque point de coordonnées spatiales (x, z) s'effectue en focalisant les données en ce point :

$$o(x, z) = \sum_{i=1}^{N_{el}} \sum_{j=1}^{N_{el}} y \left(\frac{\sqrt{(x - u_i)^2 + z^2} + \sqrt{(x - v_j)^2 + z^2}}{c}, u_i, v_j \right) \quad (1)$$

où c est la vitesse des ondes supposée constante. Ce principe peut donc être appliqué aux ondes longitudinales ou transversales. Pour chaque point de calcul, le temps de vol adapté est arrondi pour prendre la valeur du signal la plus

proche. L'intérêt de cette démarche de post-traitement est de pouvoir définir librement la grille spatiale de reconstruction.

Ce type d'imagerie est transposable pour des inspections en immersion ou avec sabot. Le principe de l'acquisition reste identique. Pour la partie reconstruction, avant la sommation, une optimisation est nécessaire pour retrouver le temps de vol adéquat à travers les deux milieux de propagation.

3 Calcul massivement parallèle sur carte graphique

Les cartes graphiques (*graphics processing unit* : GPU), initialement prévues pour faire des calculs d'affichage, permettent aujourd'hui de faire du calcul parallèle en général grâce à leurs nombreux cœurs intégrés. Lorsqu'un processeur (CPU) contient quelques unités de calcul en parallèle (2, 4, 8 voire 16), une carte graphique peut en posséder plusieurs milliers (quelques milliers pour les plus performantes). L'avantages du calcul sur GPU est bien évidemment la rapidité lorsque le nombre de points est significatif. Néanmoins, il faut tenir compte de l'accès mémoire qui est plus lent que pour des traitements sur processeur.

Nous implémentons le calcul de focalisation en tout point de façon parallèle. Chaque point de la zone spatiale de reconstruction (x, z) étant indépendant, chaque point est calculé en parallèle. Nous présentons un exemple de comparaison entre un temps de calcul sur processeur et sur carte graphique. Les calculs sont réalisés sur un ordinateur portable standard. Le processeur est un Intel Core i7-4910MQ de fréquence 2.90 GHz et le GPU est une carte Nvidia Quadro K2100M ayant 576 cœurs. Dans cet exemple, la sonde a $N_{el} = 64$ éléments et le nombre de points temporels est 1500. La matrice de données \mathbf{Y} est donc de taille $1500 \times 64 \times 64$, soit 4096 A-scans.

Nous présentons sur la Figure 2 les temps de calcul de focalisation en tout en fonction de la taille de l'image à reconstruire. Le temps de calcul est fortement réduit grâce au calcul parallèle. Sur la Figure 2, nous traçons également l'accélération du calcul sur GPU par rapport à celui sur CPU. Nous observons que celle-ci devient intéressante pour des tailles d'images conséquentes, supérieures à plusieurs dizaines de milliers de points. Pour de petites images, la quantité de parallélisation devient insuffisante par rapport au temps de transfert des données vers et depuis le GPU.

Ce type d'implémentation sur carte graphique permet de réaliser une imagerie temps réel [3, 6], ce qui n'est pratiquement pas envisageable avec une implémentation sur processeur.

4 Méthode de focalisation en tout point par migration

4.1 Principe

La méthode de migration vient de la communauté géophysique [4]. Dans le domaine du CND, elle a tout d'abord été adaptée à la typologie mono-statique (*i.e. synthetic aperture focusing technique* : SAFT) par Stepinski [7]. Elle a ensuite été appliquée à la focalisation

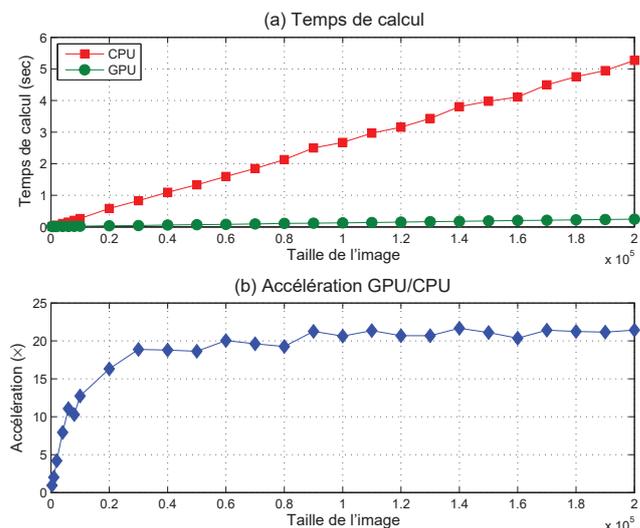


FIGURE 2 – (a) Temps de calcul en fonction de la taille de l'image à reconstruire pour une implémentation sur CPU et GPU. (b) Accélération du calcul sur GPU par rapport au calcul sur CPU.

en tout point par Hunter *et al.* [5]. Elle fonctionne toujours pour des milieux homogènes ayant une vitesse constante. Le principe est de transposer le problème inverse dans le domaine des nombres d'onde [8]. La procédure est la suivante pour obtenir l'image spatiale finale $o(x, z)$:

$$y(t, u, v) \implies Y(f, k_u, k_v) \implies O(k_x, k_z) \implies o(x, z). \quad (2)$$

L'étape de migration s'effectue dans le domaine de Fourier en effectuant les changements de variables relatifs à la configuration d'inspection :

$$\begin{cases} k_x = k_u + k_v \\ k_z = \sqrt{\frac{f^2}{c^2} - k_u^2} + \sqrt{\frac{f^2}{c^2} - k_v^2} \end{cases} \quad (3)$$

Cette étape étant sensible aux erreurs d'approximation, il est préférable de réaliser une interpolation [9]. Pour tenir compte du cadre multi-statique, les images pour chaque k_u donné (*i.e.* $O(k_x, k_z | k_u)$) sont sommées pour obtenir $O(k_x, k_z)$:

$$O(k_x, k_z) = \sum_i O(k_x, k_z | k_u(i)). \quad (4)$$

L'image finale spatiale $o(x, z)$ est obtenue par transformée de Fourier 2D inverse de $O(k_x, k_z)$. Le nombre de points des nombres d'onde doit respecter le théorème de Shannon. Pour avoir un nombre de points plus important, on peut réaliser une interpolation.

4.2 Résultats expérimentaux

Les expériences sont réalisées avec le système d'acquisition OEM-PA d'AOS NDT [10]. Il permet l'acquisition rapide des signaux pour réaliser l'imagerie FTP en temps réel. La pièce inspectée est un bloc d'aluminium contenant des trous percés par le coté (*side drilled holes* : SDH). L'instrument électronique 64 voies et le bloc inspecté sont représentés sur la Figure 3. Nous utilisons une sonde contenant 64 éléments et travaillant autour de 5 MHz. Les données représentent donc 4096 A-scans de 1500 points.

Les résultats FTP par la méthode temporelle et par migration sont représentés sur la Figure 4. Pour chaque



FIGURE 3 – (a) Instrument d'acquisition multi-éléments d'AOS NDT. (b) Bloc d'aluminium avec des trous SDH de diamètre 1mm.

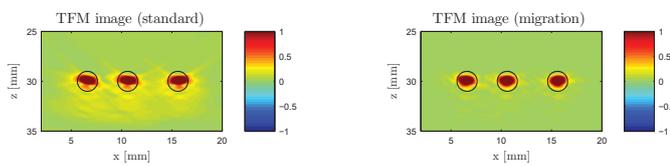


FIGURE 5 – Imagerie par focalisation en tout point, par méthode temporelle et par migration (agrandissement sur les trois SDH proches).

colonne des images obtenues, l'enveloppe est calculée de façon à éliminer les oscillations dues aux phénomènes ondulatoires et à obtenir des valeurs positives. Tout d'abord, la méthode de migration élimine significativement les artefacts de diffraction près de la surface de la pièce et autour des trous. Ensuite, elle augmente le rapport signal à bruit de façon importante, environ 30 dB visibles sur la 6. Si on agrandit l'image autour des trois trous proches, comme illustré sur les Figure 5 et 6, cela permet d'observer la meilleure résolution de la méthode de migration et la suppression des artefacts de diffraction. Outre les avantages évidents en termes de qualité de reconstruction, la méthode de migration s'applique seulement à des configurations planes, c'est à dire des sondes planes et des objets plats.

Les temps de calcul CPU en fonction de la taille de l'image à reconstruire sont présentés dans le tableau 1. On remarque que le temps CPU est significativement réduit pour la méthode de migration. Le temps CPU de cette méthode reste à peu près constant car le nombre de points des nombres d'onde reste constant de façon à respecter le théorème de Shannon. Il faut préciser qu'une implémentation sur GPU de la méthode classique est plus rapide que la méthode par migration. Une perspective intéressante serait de développer la méthode de migration sur GPU.

TABLEAU 1 – Temps de calcul CPU pour les méthodes standard et par migration.

Taille (N. pts.)	standard	migration
0.19 M	91.3	12.3
0.38 M	177.8	12.2
0.77 M	353.3	12.6
1.54 M	719.1	14.0

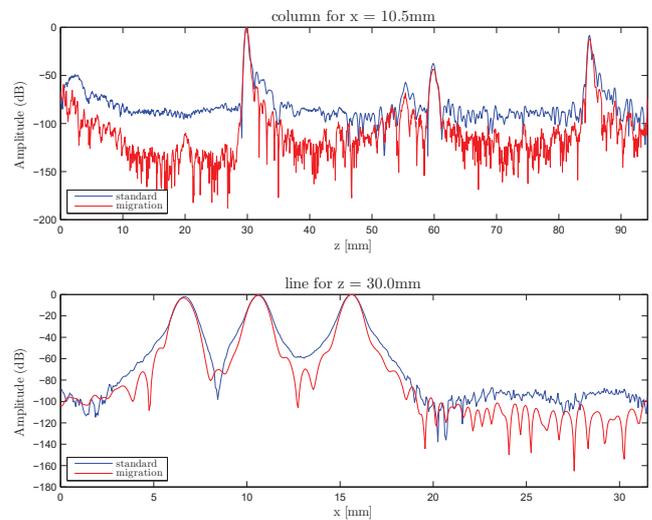


FIGURE 6 – Lignes et colonnes des images FTP pour $x = 10.5$ mm et $z = 30.0$ mm.

5 Conclusions

Dans cette communication, nous avons présenté deux façons d'accélérer la reconstruction par focalisation en tout point pour le contrôle non destructif par ultrasons. Tout d'abord, nous mettons en évidence l'intérêt d'utiliser une carte graphique pour réaliser ce type de calcul. En effet, la FTP est totalement parallélisable. Les résultats sont significatifs si la taille des images reconstruites est au moins de quelques dizaines de milliers de points. Nous avons ensuite présenté la méthode de migration, qui permet d'obtenir des images de meilleure qualité en termes de rapport signal à bruit, résolution des réflecteurs et artefacts de diffraction. Cette méthode permet également un temps CPU réduit par rapport à la méthode temporelle. Elle n'est cependant applicable qu'à des configurations d'inspection planes.

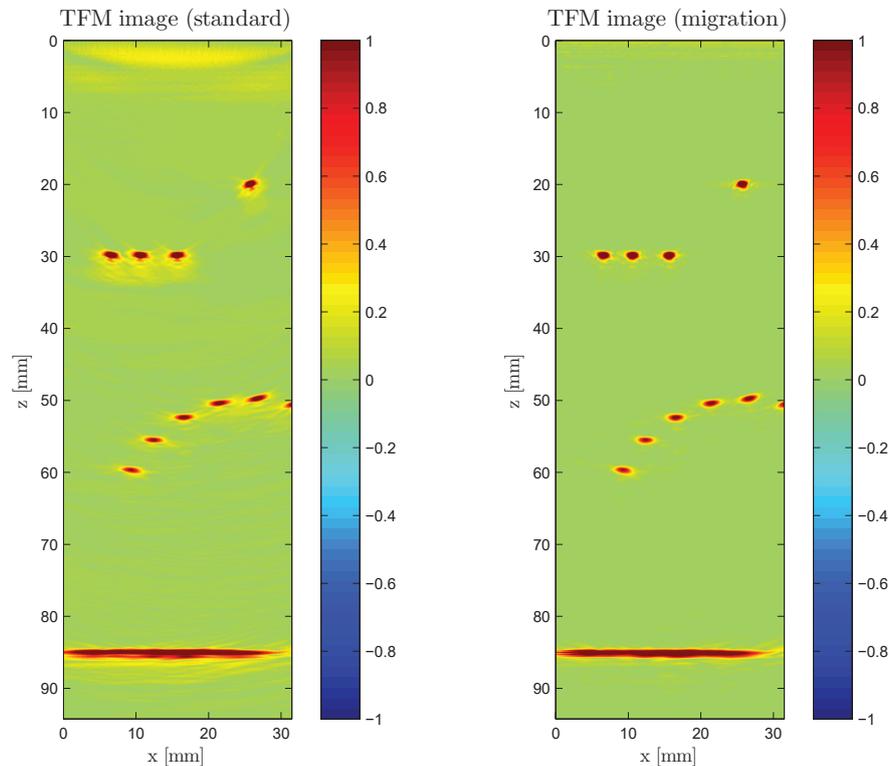


FIGURE 4 – Imagerie par focalisation en tout point, par méthode temporelle et par migration. La taille des images est 512×1500 . Les images sont saturées de façon à mieux observer le rapport signal à bruit et la résolution des réflecteurs.

Références

- [1] M. Karaman, P.-C. Li, and M. O'Donnell. Synthetic aperture imaging for small scale systems. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 42(3) :429–442, Mai 1995.
- [2] C. Holmes, B. W. Drinkwater, and P. D. Wilcox. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation. *NDT&E International*, 38(8) :701–711, Décembre 2005.
- [3] M. Sutcliffe, M. Weston, B. Dutton, P. Charlton, and K. Donne. Real-time full matrix capture for ultrasonic non-destructive testing with acceleration of post-processing through graphic hardware. *NDT&E International*, 51(0) :16–23, 2012.
- [4] R. H. Stolt. Migration by Fourier transform. *Geophysics*, 43(1) :23–48, 1978.
- [5] A. J. Hunter, B. W. Drinkwater, and P. D. Wilcox. The wavenumber algorithm for full-matrix imaging using an ultrasonic array. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 55(11) :2450–2462, Novembre 2008.
- [6] E. Carcreff, D. Braconnier, and G. Dao. Fast total focusing method for ultrasonic imaging. In *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, pages 1–2, Octobre 2015.
- [7] T. Stepinski. An implementation of synthetic aperture focusing technique in frequency domain. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 54(7) :1399–1408, Juillet 2007.
- [8] E. Carcreff, G. Dao, and D. Braconnier. Total focusing method for flaw characterization in homogeneous media. In *14th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials*, Marina Del Rey, USA, Juin 2015.
- [9] R. Hanssen and R. Bamler. Evaluation of interpolation kernels for SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1) :318–321, Janvier 1999.
- [10] G. Dao, D. Braconnier, and M. Gruber. Full matrix capture with a customizable phased array instrument. In *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Boise, USA, Juillet 2014.