

Formation de champ de déplacements à partir des signaux bruts. Application à l'imagerie ultrasonore en synthèse d'ouverture.

Pierre GUETH¹, Hervé LIEBGOTT², Philippe DELACHARTRE¹
CREATIS-LRMN - CNRS UMR 5220 - Inserm U630
Université de Lyon, ¹INSA-Lyon, ²Université Lyon 1
INSA - Bâtiment Blaise Pascal, 7 avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne CEDEX
pierre.gueth@creatis.insa-lyon.fr

Résumé – Dans cette étude, on cherche à estimer le champ de déplacements à partir de signaux ultrasonores d'un milieu en mouvement. Les signaux utilisés dans cette étude sont les signaux bruts de la sonde ultrasonore acquis en synthèse d'ouverture. La méthode décrite ici ne nécessite pas la reconstruction des images: elle estime directement le champ à partir des acquisitions brutes. La faisabilité de la méthode est validée en simulation et ses performances sont comparées à celle d'une technique classique de mise en correspondance de blocs.

Abstract – In this paper, we propose a method that estimates the displacement field between two sets of ultrasound signals acquired from a moving medium. In this paper, signals are raw synthetic aperture signals acquired using an ultrasound transducer. This method does not require to beamform images: it estimates directly fields from the raw acquisitions. The feasibility of the method is validated in simulation and its performances are compared with that of a classic block matching technique.

1 Introduction

Le problème d'estimation du déplacement est un problème récurrent dans de nombreux domaines du traitement du signal et de l'image. Les méthodes d'estimation du déplacement forment la base de nombreuses applications comme la compression vidéo ou le recalage d'images. L'application visée dans cette étude est l'estimation du déplacement pour l'imagerie ultrasonore.

L'approche classique consiste à estimer le déplacement à partir de blocs mis en correspondance dans des images d'un même milieu à différents instants. Dans le cadre de l'imagerie ultrasonore, ces images, formées à partir des signaux bruts, sont créées uniquement dans le but d'estimer le déplacement. Elles peuvent d'autre part être très lourdes à calculer. Nous proposons donc dans cette étude une méthode originale permettant d'estimer le déplacement directement à partir des signaux bruts fournis par le système d'imagerie. On évite ainsi l'étape de reconstruction des images et on dispose de toute l'information acquise par le système d'imagerie au lieu de se baser sur l'information plus synthétique des images formées. Le formalisme original de la méthode présentée ici permet une modélisation très souple du problème de l'estimation du déplacement sous une forme pouvant s'adapter à plusieurs types d'imagerie et à plusieurs séquences.

Nous nous focaliserons ici sur des signaux ultrasonore obtenus en synthèse d'ouverture [1, 2]. Les signaux bruts sont alors obtenus en excitant le milieu et en recevant les signaux avec chacun des éléments de la sonde ultrasonore indépendamment. Ce type d'imagerie offre une modélisation simple et une quantité d'information beaucoup plus importante que les séquences ultrasonores classiques. Plusieurs études ont été menées sur l'estimation de vitesses de flux à partir de données brutes. Elles viennent confirmer l'intérêt des méthodes d'estimation de déplacements basées sur les signaux bruts [3]. Cependant, au-

cune des méthodes de la littérature n'utilise des signaux bruts en synthèse d'ouverture. De plus, contrairement au formalisme décrit ici, le formalisme des méthodes de la littérature est souvent peu généralisable à d'autres séquences ou à d'autres modalités. Yu *et al.* ont récemment publié un article traitant des limitations des méthodes classiques d'estimation de déplacements dans le domaine de l'imagerie ultrasonore [4]. Les limitations en terme de précision et de robustesse mises en évidence dans cet article sont dépassées par notre méthode comme le montrent les résultats présentés à la fin de cette étude.

Dans la première partie de l'étude, on construit, à l'aide d'un modèle des signaux bruts et d'un modèle du mouvement, les fonctionnelles qui vont nous permettre de résoudre le problème. La seconde partie présente des résultats de simulation, ainsi qu'une quantification des performances de la méthode, comparées à celles d'une méthode de mise en correspondance de blocs [6].

2 Méthode

2.1 Signaux bruts

Un milieu, modélisé par un ensemble de diffuseurs ponctuels noté Ω , est imagé par un transducteur dont les éléments sont notés E_i . Chaque diffuseur est modélisé par sa position P_k et par sa réflectivité a_k . Après excitation, les contributions de chacun des diffuseurs se somment pour former les signaux bruts. Pour des raisons de simplicité on suppose que la contribution de chaque diffuseur dans chacun des signaux bruts ne varie que par un décalage temporel $\tau_{ij}(P_k)$ lié à la géométrie du problème et un gain lié à la réflectivité a_k du diffuseur considéré. L'indice ij correspond à l'indice du signal brut considéré. Dans le cas de l'imagerie en synthèse d'ouverture, le signal brut $s_{ij}(t)$ est le signal reçu sur l'élément E_j du transducteur, lorsque l'élément E_i transmet l'impulsion d'excitation (figure 1). Les

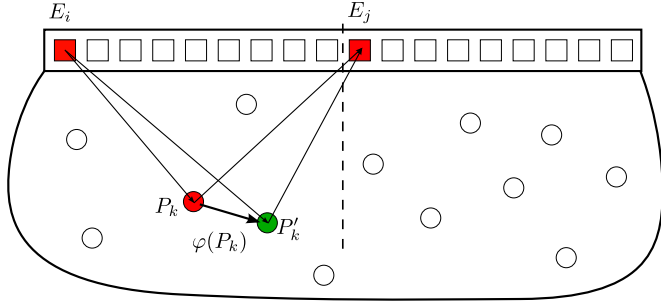


FIGURE 1 – Lorsqu'un point P_k du milieu se déplace, le temps de vol de l'onde varie et donne une information sur le déplacement de P_k en P'_k . Le trait pointillé représente l'axe du transducteur.

simplifications envisagées ici reviennent à considérer les éléments du transducteur comme ponctuels. L'équation (1) donne l'expression générale du modèle des signaux bruts où $h(t)$ représente la contribution d'un diffuseur.

$$s_{ij}(t) = \sum_{k \in \Omega} a_k \cdot h(t - \tau_{ij}(P_k)) \quad (1)$$

Si on suppose que la célérité de l'onde acoustique c est constante dans tout le milieu et que les éléments du transducteur sont ponctuels, alors l'expression du décalage temporel $\tau_{ij}(P_k)$ correspond au temps de vol de l'onde acoustique émise par E_i , réfléchi par P_k et reçue sur E_j . L'expression de $\tau_{ij}(P_k)$ pour une séquence de synthèse d'ouverture est alors donnée par (2). $\|\bullet\|$ représente la norme euclidienne.

$$\tau_{ij}(P_k) = \frac{\|E_i P_k\| + \|P_k E_j\|}{c} \quad (2)$$

$h(t)$ modélise la réponse électromécanique du système d'imagerie en émission/réception, convoluée par le signal d'excitation. Son expression dépend aussi du type de signaux que l'on cherche à modéliser. Pour modéliser des signaux radiofréquence, on choisira une expression comprenant une modulation ; pour modéliser des signaux enveloppes, on choisira une impulsion basse fréquence. Ici, on modélise des signaux enveloppes en donnant à $h(t)$ l'expression d'une impulsion gaussienne centrée. La durée de $h(t)$ représente la largeur de l'impulsion d'excitation du système d'imagerie. Dans cette étude, on prend une valeur de $0.3\mu s$, ce qui correspond à 3 périodes ou $460\mu m$ pour une fréquence de $10MHz$ et une célérité de $c = 1540m/s$.

Si on dispose de deux séquences acquises avant et après déplacement du milieu, la variation des décalages temporels va nous permettre d'accéder à une mesure locale du déplacement. La figure 1 schématise ce phénomène et reprend les notations introduites jusqu'ici. La formalisation de cette idée est détaillée dans la section suivante.

2.2 Déplacement

On dispose des signaux bruts $s_{ij}(t)$ pour un milieu au repos. Le milieu initial Ω est alors déformé en Ω' et on acquiert alors la séquence de signaux $s'_{ij}(t)$. Le diffuseur se trouvant initialement en P_k se déplace en $P'_k = P_k + \varphi(P_k)$. $\varphi(P)$ représente le déplacement du point P , c'est la grandeur que nous cherchons à estimer ici. Les signaux bruts après déplacement $s'_{ij}(t)$

peuvent se modéliser de la même manière que les signaux avant déplacement $s_{ij}(t)$. On suppose que chaque diffuseur garde la même réflectivité après application de la déformation. L'expression des signaux bruts après déplacement (3) est donc similaire à celle des signaux avant déplacement (1).

$$\begin{aligned} s'_{ij}(t) &= \sum_{\Omega} a_k \cdot h(t - \tau_{ij}(P'_k)) \\ &= \sum_{\Omega} a_k \cdot h(t - \tau_{ij}(P_k + \varphi(P_k))) \end{aligned} \quad (3)$$

Les expressions (1) et (3) diffèrent uniquement au niveau du décalage temporel des contributions. Cette variation de temps de vol est notée $d\tau_{ij}(P_k)$ et porte une information sur le déplacement de P_k . L'équation (4) définit $d\tau_{ij}(P_k)$.

$$d\tau_{ij}(P_k) = \tau_{ij}(P'_k) - \tau_{ij}(P_k) \quad (4)$$

En faisant l'hypothèse de petits déplacements, on peut linéariser cette expression sous la forme d'un produit scalaire entre le déplacement $\varphi(P_k)$ et un vecteur $n_{ij}(P_k)$. L'expression linéarisée de la variation de temps de vol, ainsi que la définition du vecteur normal sont données par l'équation (5). Cette hypothèse n'est pas fondamentale mais elle permet une interprétation plus aisée de $d\tau_{ij}(P_k)$ en fonction de $\varphi(P_k)$.

$$\begin{aligned} d\tau_{ij}(P_k) &\sim n_{ij}(P_k) \cdot \varphi(P_k) \\ n_{ij}(P_k) &= \left(\frac{E_i P_k}{\|E_i P_k\|} + \frac{E_j P_k}{\|E_j P_k\|} \right) \frac{1}{c} \end{aligned} \quad (5)$$

$n_{ij}(P_k)$ est appelé vecteur normal car il est perpendiculaire à l'ellipse passant par P_k ayant ses foyers en E_i et E_j . Cette ellipse représente le lieu des points P tel que $\tau_{ij}(P)$ est constant. C'est l'ensemble des points dont les contributions vont se sommer à un même instant dans le signal brut. La variation de temps de vol observée dans chaque signal n'est donc qu'une projection du déplacement réel $\varphi(P_k)$.

Si on prend P_k en face du transducteur, c'est à dire proche de l'axe du transducteur (figure 1), alors les deux vecteurs unitaires formant $n_{ij}(P_k)$ vont se sommer et donner une variation de temps de vol élevée facile à mesurer. Si au contraire on prend P_k sur le coté du transducteur, alors les deux vecteurs unitaires se compensent et la variation de temps de vol est beaucoup plus faible pour un même déplacement réel. L'estimation du déplacement sera d'autant plus précise que le point considéré sera proche de l'axe de la sonde. La norme de $n_{ij}(P_k)$ traduit donc la sensibilité de détection du déplacement pour le point et le signal brut considéré. Cette norme varie entre $2/c$ et 0.

Fixons la position de P_k et donc la valeur de $n_{ij}(P_k)$ et observons l'influence de la direction de $\varphi(P_k)$ sur $d\tau_{ij}(P_k)$. Si P'_k s'éloigne de l'ellipse (figure 2a) alors $d\tau_{ij}(P_k)$ a une valeur significative (figure 2b) et donne une information sur la norme du déplacement. Si P'_k reste proche de l'ellipse (figure 2c) alors $d\tau_{ij}(P_k)$ sera faible (figure 2d) et on aura une information sur la direction du déplacement. Dans tous les cas, la variation de temps de vol dans un signal brut ne nous donne accès qu'à une projection du déplacement. Il est donc nécessaire d'utiliser plusieurs signaux bruts pour estimer correctement le vrai déplacement.

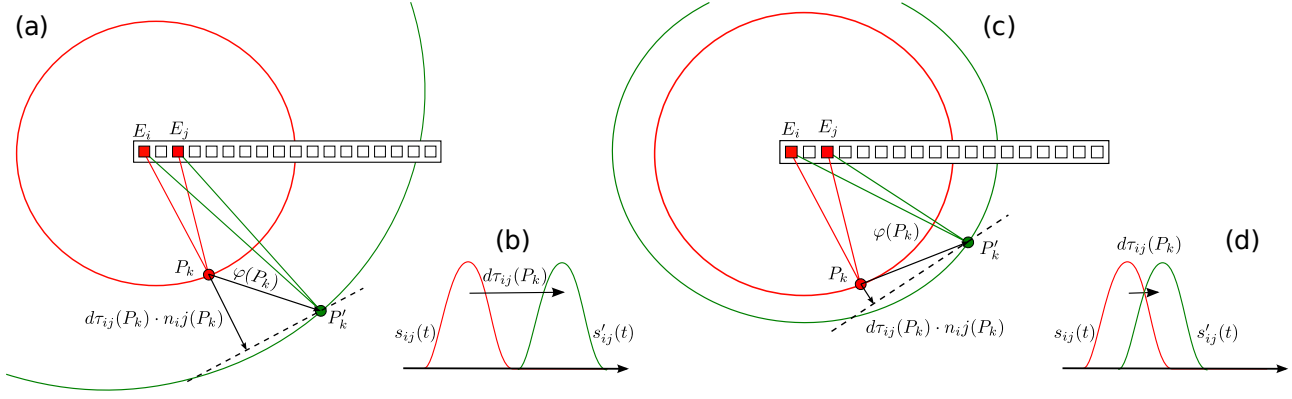


FIGURE 2 – Influence de la direction de $\varphi(P_k)$ sur la variation du décalage temporel $d\tau_{ij}(P_k)$ pour un déplacement dans la direction du vecteur normal (a) et dans la direction de l'ellipse (b). Incidence sur le décalage de la contribution dans le signal brut pour un déplacement dans la direction du vecteur normal (c) et dans la direction de l'ellipse (d).

2.3 Fonctionnelles

L'ensemble des variations de temps de vol suffit à estimer le déplacement d'un diffuseur, mais estimer le déplacement de chacun des diffuseurs n'est pas réalisable en pratique à cause de leur trop grand nombre. On va limiter notre mesure à K diffuseurs particuliers, appelés noeuds. Le problème résolu en pratique se limite à estimer le déplacement de ces noeuds.

Les diffuseurs étant en très grand nombre dans le milieu, on peut choisir la position des noeuds arbitrairement. On peut également considérer qu'un noeud représente l'ensemble des diffuseurs compris dans un voisinage de sa position en raison de la régularité spatiale du champ de déplacements et des réflectivités. La taille de ce voisinage est liée à la largeur de la réponse électromécanique de l'imageur $h(t)$. Ici, chaque noeud représente les diffuseurs situés à moins de $460\mu m$ de la position du noeud.

Pour estimer les déplacements, on formalise le problème sous la forme d'un problème d'optimisation. La fonctionnelle utilisée pour estimer les déplacements F_{dep} est donnée par l'équation (6) où $\tilde{s}_{ij}(t)$ et $\tilde{s}'_{ij}(t)$ sont les signaux bruts acquis avant et après le déplacement. Les contributions des diffuseurs trop éloignés des noeuds apparaissent comme du bruit dans les signaux acquis. Les expressions de $s_{ij}(t)$ et $s'_{ij}(t)$ sont données par (1) et (3).

$$F_{dep}(\varphi(P_0), \dots, \varphi(P_K)) = \sum_{ij} \|\tilde{s}'_{ij}(t) - s'_{ij}(t)\|^2$$

$$= \sum_{ij} \|\tilde{s}'_{ij}(t) - \sum_k a_k \cdot h(t - \tau_{ij}(P_k) - d\tau_{ij}(P_k))\|^2 \quad (6)$$

Lors de la minimisation de cette fonctionnelle, on ne fait varier que les estimations du déplacement $\varphi(P_k)$. Les amplitudes a_k intervenant dans F_{dep} ont été estimées en amont par une autre fonctionnelle F_{amp} dont l'expression ne dépend pas des déplacements. On peut noter que l'expression (7) de cette fonctionnelle est quadratique et donc que sa minimisation admet une solution linéaire [5].

$$F_{amp}(a_0, \dots, a_K) = \sum_{ij} \|\tilde{s}_{ij}(t) - s_{ij}(t)\|^2$$

$$= \sum_{ij} \|\tilde{s}_{ij}(t) - \sum_k a_k \cdot h(t - \tau_{ij}(P_k))\|^2 \quad (7)$$

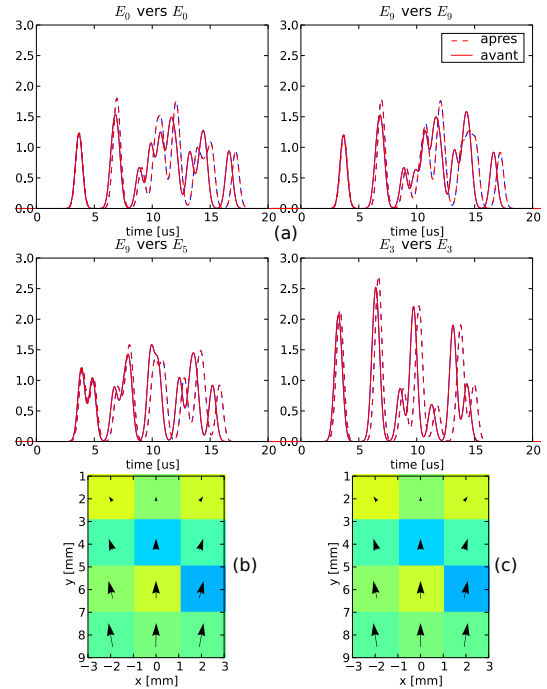


FIGURE 3 – Signaux bruts (a) estimation du déplacement et des amplitudes (b) déplacement et amplitudes réels (c) pour un transducteur linéaire de $10mm$ comportant 10 éléments ponctuels (55 signaux bruts)

La résolution du problème complet consistant à minimiser $F_{dep} + F_{amp}$ peut être approximée par une minimisation en deux passes. La première passe minimise F_{amp} et estime les réflectivités qui sont ensuite utilisées dans la minimisation de F_{dep} et l'estimation effective des déplacements. En pratique la première passe est résolue par une pseudo-inversion matricielle et la seconde est résolue en utilisant l'algorithme simplexe de Nelder-Mead. Le détail de ces méthodes peut être trouvé dans [5].

3 Résultats

On simule un milieu de $6mm$ par $8mm$ centré autour d'un transducteur linéaire de $10mm$ à une profondeur de $5mm$. Le transducteur dispose de 10 éléments permettant l'acquisition de

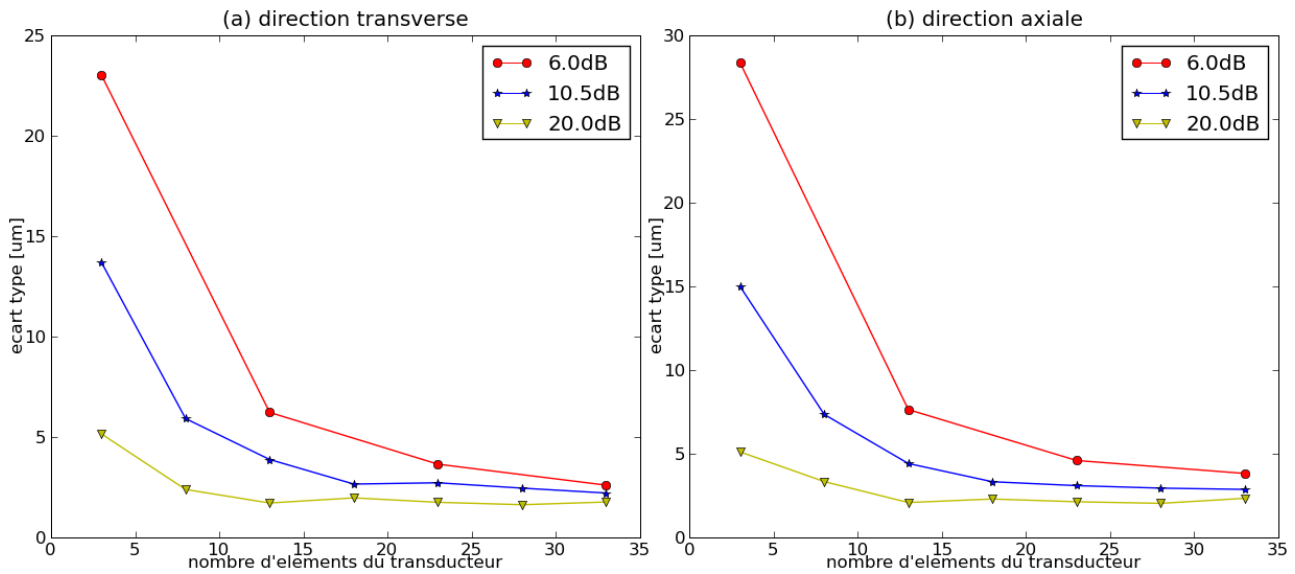


FIGURE 4 – Ecart-type de l’estimation dans la direction transverse (a) et axiale (b) en fonction du nombre d’éléments du transducteur pour différentes valeurs de rapport signal sur bruit

55 signaux bruts différents. Le champ de déplacements $\varphi(P)$ correspond à une compression de 1% et le milieu simulé est incompressible. C’est une déformation typique dans le domaine de l’élastographie. On choisit $K = 12$ noeuds sur une grille uniforme. La figure 3 montre les résultats de cette estimation ainsi que des exemples de signaux bruts. Dans un cas simple comme celui ci l’estimation est quasi parfaite : le champ et les amplitudes estimés sont très proches de ceux imposés par les paramètres de la simulation.

Les performances de la méthode d’estimation directe sont comparées à celle d’une méthode de mise en correspondance de blocs. Deux images ultrasonores conventionnelles mode B du milieu sont alors créées à partir des séquences de signaux bruts en translatant le milieu de $200\mu\text{m}$ dans la direction transverse et dans la direction axiale. Le déplacement est ensuite estimé en recherchant deux blocs de 1mm par 1mm correspondants à cette paire d’images.

On fait varier le nombre d’éléments du transducteur et le niveau de bruit dans les signaux bruts afin de comparer la robustesse et la précision des deux méthodes. La figure 4a montre l’écart-type de la composante transverse de l’erreur d’estimation pour la méthode d’estimation directe pour différent rapport signal sur bruit (voir légende). La figure 4b présente les mêmes résultats pour la composante axiale du déplacement. Chaque point est calculé à l’aide de 100 simulations.

La méthode de mise en correspondance de blocs estime les déplacements avec un écart-type d’environ $30\mu\text{m}$ dans la direction axiale et $40\mu\text{m}$ dans la direction transverse. La méthode d’estimation directe aboutit à un écart-type d’environ $5\mu\text{m}$ comme le montre les figures 4a et 4b, et ce même pour un nombre d’éléments actifs faible en présence de bruit. La méthode est donc environ 6 fois plus précise que la méthode standard.

4 Conclusion

Les simulations montrent que la méthode d’estimation directe du champs de déplacements donnent de bon résultats par rapport à une méthode classique, et ceci sans avoir besoin de

former d’images. Cette spécificité fait de cette méthode une méthode idéale pour une application en élastographie. Cependant le problème majeur de cette méthode est que sa complexité explose lorsqu’elle est confrontée à des signaux réels à cause de la dimension élevée des paramètres de la fonctionnelle à résoudre. Avant d’envisager une application réelle, il sera donc nécessaire de modifier la méthode. La principale piste envisagée pour cela est l’utilisation de faisceaux focalisés plutôt que l’utilisation directe des signaux en synthèse d’ouverture. Le but étant de découpler les paramètres de la fonctionnelle pour la rendre plus facile à résoudre.

Références

- [1] J. Jensen, S. Nikolov, K. Gammelmark, and M. Pedersen, “Synthetic aperture ultrasound imaging,” *Ultrasonics*, vol. 44, pp. e5–e15, 2006.
- [2] H. Liebgott, A. Basarab, D. Loizeau, J. Wilhelm, J. Jensen, and P. Delachartre, “Improved beamforming for lateral oscillations in elastography using synthetic aperture imaging,” in *IEEE Ultrasonics Symposium*, pp. 2168–2171, 2006.
- [3] S. Wang, M. Li, and P. Li, “Estimating the blood velocity vector using aperture domain data,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 54, no. 1, pp. 70–78, 2007.
- [4] W. Yu, P. Yan, A. Sinusas, K. Thiele, and J. Duncan, “Towards pointwise motion tracking in echocardiographic image sequences—comparing the reliability of different features for speckle tracking,” *Medical Image Analysis*, vol. 10, no. 4, pp. 495–508, 2006.
- [5] A. Tarantola, *Inverse Problem Theory and Model Parameter Estimation*. SIAM, 2005.
- [6] L. Bohs, B. Friemel, and G. Trahey, “Experimental velocity profiles and volumetric flow via two-dimensional speckle tracking,” *Ultrasound in medicine & biology*, vol. 21, no. 7, pp. 885–898, 1995.