

SUIVI DU CONTOUR DU VENTRICULE GAUCHE DU COEUR DANS UNE SÉQUENCE D'IMAGES ÉCHOCARDIOGRAPHIQUES

Christophe LEGER et Jacques THIEL

Laboratoire d'Electronique, Signaux, Images (LESI) et GdR 134 du CNRS
ESPEO, Université d'Orléans, BP 6744, 45067 Orléans Cedex 2
Tél : 38 41 71 71. E-mail : leger@lesi.univ-orleans.fr

1. INTRODUCTION

Un des objectifs majeurs des recherches actuelles en échocardiographie est de restituer en temps réel l'évolution spatio-temporelle du ventricule gauche (VG) du coeur. Pour cela, bon nombre d'études requièrent de localiser précisément la paroi du VG dans une séquence d'images, afin d'en représenter le volume à partir de plusieurs coupes, analogues à celle de la figure 1. Nous exposons ici les résultats préliminaires d'une méthode récurrente de suivi automatique d'un contour du VG dans une séquence d'images échocardiographiques acquises à la cadence vidéo.

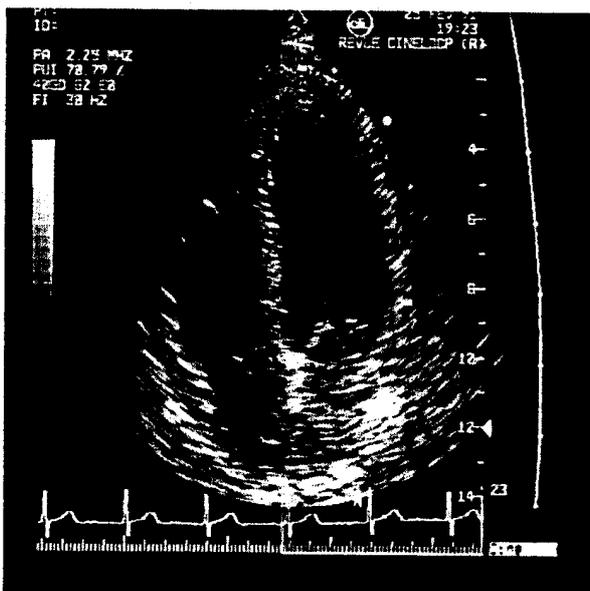


Figure 1 : Coupe tomographique apicale quatre cavités.

2. PRINCIPE DE LA MÉTHODE

Sur une image initiale, on trace manuellement un contour continu du VG et on localise le centre d'inertie I de ce contour. On prélève alors 32 échantillons angulairement équirépartis autour de I , qui définissent le contour à mieux de 1 % d'erreur radiale moyenne d'interpolation circulaire de Shannon entre les échantillons [1]. La méthode consiste à déterminer le contour d'une image courante I_C , à partir de celui de l'image précédente I_P , en deux temps : les déplacements radiaux des 32 échantillons sont tout d'abord estimés isolément, puis tous les déplacements sont analysés globalement.

Pour chaque échantillon indicé n ($0 \leq n < 32$) du contour connu, on relève sur I_P la distance ρ_n^P de l'échantillon à I , ainsi que la ligne de niveau de gris (LNG) $\{g_{i,n}^P\}$ en fonction de la distance $\rho_i = i \, d\rho$ à I , où $d\rho$ est le pas d'échantillonnage du rayon incliné de l'angle θ_n par rapport aux lignes de l'image (figure 2). Sur I_C , on relève 32 nouvelles LNG radiales $\{g_{i,n}^C\}$ le long des mêmes rayons $\{n\}$ et à partir du même centre I . Puis on estime les 32 fonctions d'intercorrélation :

$$r(k,n) = \sum_i g_{i,n}^P g_{i-k,n}^C \quad (1)$$

On localise ensuite, sur chaque fonction $r(k,n)$, le maximum principal par son décalage $D\rho_n = k_n \, d\rho$ qui est un estimateur du déplacement radial de l'échantillon n : $\rho_n^C = \rho_n^P + D\rho_n$.

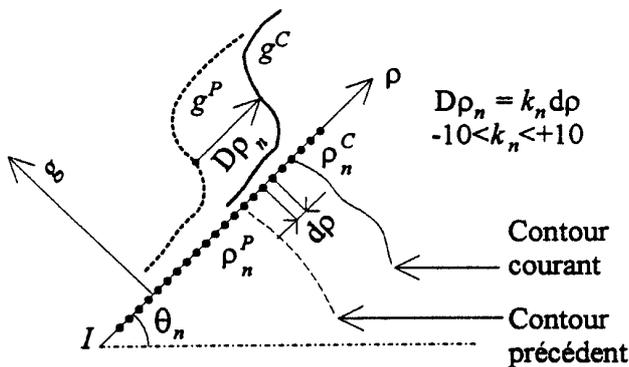


Figure 2 : Principe de la méthode de suivi du contour du VG.

3. MISE EN OEUVRE DE LA MÉTHODE

L'estimation du déplacement d'un échantillon du contour est mise en oeuvre de la manière suivante (figure 3).

3.1. Lissage

A cause du *speckle* des images échocardiographiques, on obtient des LNG très bruitées si l'on affecte à chaque point $\rho_i = i \, d\rho$ d'un rayon le niveau de gris le plus proche de ce rayon. Pour réduire le bruit, on peut retenir la moyenne des niveaux de gris des pixels contenus dans des surfaces centrées sur les points ρ_i . Mais ceci fait perdre en résolution le long du rayon où l'on cherche à détecter un décalage de LNG avec une précision meilleure que la distance inter-pixels. C'est pourquoi chaque niveau de gris le long d'une LNG radiale est remplacé par le niveau de gris moyen d'un segment, centré sur la LNG, et parallèle à la tangente au contour sur I_p . Pratiquement, la direction de la tangente a été assimilée à celle de la sécante qui passe par les deux échantillons, voisins de celui qui définit le rayon. Dans ce contexte, on définit un ordre de lissage donné par le nombre de pixels que l'on considère de part et d'autre du rayon, dans la direction de la tangente, pour calculer la moyenne des niveaux de gris en chaque point de la LNG.

3.2. Décrémentation

Après lissage, les LNG sont décrémentées, en retranchant à chaque niveau de gris moyen le niveau moyen précédent pour les rendre

quasi-stationnaires. Cette opération est justifiée pour l'étude des contours où il est habituel de considérer les gradients de niveaux de gris plutôt que leur valeur absolue ; elle l'est également pour l'étude de l'intercorrélation puisque celle-ci n'est définie en toute rigueur que pour des signaux stationnaires.

3.3. Apodisation

Pour limiter la zone de mesure au voisinage du contour, les niveaux de gris décrémentés sont ensuite apodisés par une fenêtre $\{w_i\}$ centrée sur l'échantillon du contour sur I_p . En pondérant ainsi chaque niveau de gris, on majore la contribution des niveaux proches de l'échantillon du contour. Ce sont en effet les plus sensibles au déplacement, puisque celui-ci n'est que de quelques distances inter-pixels dans le cas d'une cadence d'acquisition proche de la cadence vidéo. Pratiquement, on choisit une classique fenêtre de Von Hann (caractérisée par sa largeur totale), pour annuler les contributions des niveaux à ses extrémités.

3.4. Normalisation

Pour finir, les deux courbes de niveaux de gris apodisées sont centrées puis réduites en divisant les niveaux par leur écart-type. De la sorte, la valeur de la fonction d'intercorrélation au décalage nul, $r(0, n)$, est égale au coefficient de corrélation δ_n qui est un indicateur de la qualité de la mesure du déplacement relatif $D\rho_n$. Par extension, l'amplitude du maximum de la fonction d'intercorrélation $r_n = r(k_n, n)$ est une mesure de la corrélation des deux lignes de niveaux de gris recalées.

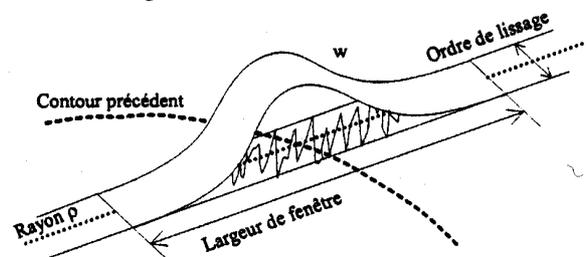


Figure 3 : Mise en oeuvre de la méthode de suivi.

La figure 4 présente deux fonctions de corrélation

estimées sur le rayon n°1 repéré sur les contours dessinés en 4a ; ces deux contours C^P et C^C ont été relevés manuellement sur deux images successives d'une séquence. La partie gauche de la figure 4b présente, de bas en haut, les LNG $g_{i,1}^P$ et $g_{i,1}^C$ relevées respectivement sur les images précédente et courante, puis leur fonction d'intercorrrelation. Celle-ci présente un maximum principal à partir duquel on déduit un déplacement $D\rho_1$ de l'échantillon du contour opposé au déplacement donné par les contours manuels.

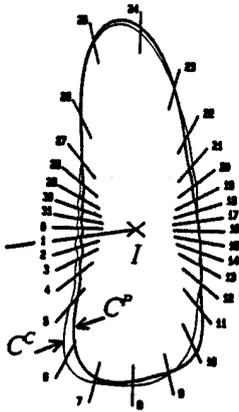


Figure 4a : Contours relevés manuellement sur deux images successives d'une séquence d'images acquises à la cadence vidéo.

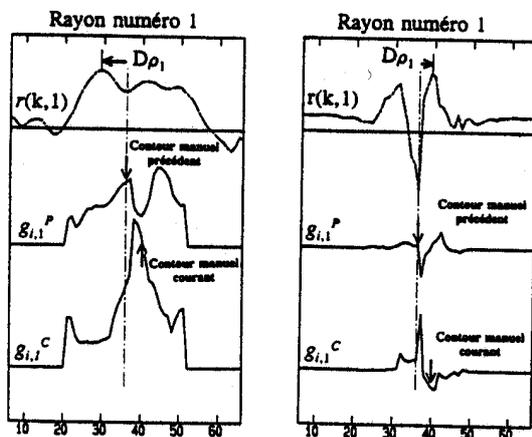


Figure 4b : Courbes de niveaux de gris $\{g_{i,1}^{P,C}\}$ et fonction d'intercorrrelation $r(k,1)$ le long du rayon 1, sans (partie gauche) et avec (partie droite) pré-traitement.

Après lissage, décrémentation, apodisation et normalisation (partie droite de la figure 4b), la valeur estimée de $D\rho_1$ est conforme au

déplacement relevé sur les contours manuels, ce qui montre l'efficacité du pré-traitement réalisé. Des résultats similaires ont été obtenus sur d'autres échantillons et sur d'autres images de la même séquence.

4. ANALYSE GLOBALE DES DÉPLACEMENTS MESURÉS

A partir des 32 déplacements relatifs $\epsilon_n = D\rho_n/\rho_n - 1$ radiaux estimés des échantillons du contour précédent et des coefficients de corrélation r_n , il faut déduire le contour de l'image courante.

4.1. Analyse non pondérée

Dans une première approche globale, on peut ignorer les coefficients r_n , ce qui revient à considérer que tous les déplacements mesurés ϵ_n ont la même qualité de mesure. Pour garantir des déplacements ϵ_n cohérents entre eux, on réalise un lissage par moindres carrés en tronquant leur série de Fourier [2]. Une telle analyse harmonique des déplacements relatifs a l'avantage de donner une signification physique à chacun des coefficients de Fourier. Le premier coefficient C_0 rend compte de l'isotropie de la déformation du contour. Il est la moyenne des déplacements relatifs des échantillons ; ne considérer que lui revient à égaliser tous ces déplacements. Ceci correspond à un mouvement centripète ou centrifuge du contour, relativement au centre d'inertie immobile. Le second coefficient C_1 donne exclusivement le déplacement du centre d'inertie, aussi bien en importance qu'en direction (amplitude et phase de C_1), et donc le déplacement global du contour. Le module du troisième coefficient C_2 rend compte en amplitude de l'allongement ou du tassement du contour, dans une direction donnée par la phase de C_2 . L'analyse globale des coefficients de Fourier des déplacements relatifs des échantillons fournit donc directement des indications sur la déformation du contour, par décomposition en déformations élémentaires. Une troncature de la série de Fourier des déplacements relatifs, c'est-à-dire un lissage par moindres carrés, revient à ne prendre en compte que quelques unes de ces déformations

élémentaires.

4.2. Analyse pondérée

Pratiquement, on tient compte des coefficients r_n en éliminant les mesures de décalage ϵ_n qui ont un coefficient trop faible, c'est-à-dire lorsque les deux LNG ne sont pas corrélées. C'est le cas lorsque la portion considérée du contour est complètement noyée dans le bruit de l'image, ou lorsqu'elle n'existe pas, lorsque par exemple les valves mitrales sont ouvertes sur des coupes apicales quatre cavités. De plus, l'élimination des déplacements trop différents de leurs voisins immédiats assure une certaine rigidité de la déformation, puisque les déplacements qui rompent la continuité spatiale sont considérés comme des mesures aberrantes. L'élimination progressive de ces mesures aberrantes est habituellement réalisée par lissage moindres carrés itératif en affectant aux déplacements, à chaque itération, des poids proportionnels à une puissance négative de leurs éloignements à la courbe lissée courante. Mais une telle procédure est incompatible avec une analyse rapide. Aussi, pour tenir compte à la fois des corrélations et des aberrations, on ne retient que les déplacements ϵ_n ayant un coefficient r_n supérieur à un certain seuil, et ceux dont l'amplitude est inférieure à un certain pourcentage du rayon.

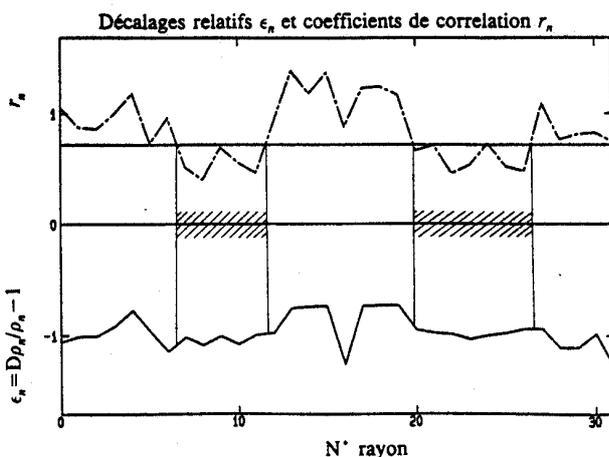


Figure 5 : Décalages ϵ_n et amplitudes r_n des maxima des fonctions d'intercorrélation des LNG le long de 32 rayons de deux images successives.

La figure 5 présente les déplacements ϵ_n et les coefficients r_n des maxima des fonctions d'intercorrélation des LNG relevées le long de 32 rayons de deux images successives d'une séquence. Sur cet exemple, on rejette les décalages qui correspondent à $r_n < 0,7$. Après une telle élimination des résultats sans signification physique, on dispose donc d'un ensemble incomplet de déplacements relatifs, que l'on complète par modélisation de Fourier à 3 coefficients [3], et à partir duquel on déduit le contour reconstitué de l'image courante.

5. CONCLUSION

Dans le cadre d'une étude de faisabilité, nous avons démontré qu'il est possible de suivre les déplacements du contour du VG dans une séquence d'images, même dans des cas difficiles. Les algorithmes mis en oeuvre, robustes, fournissent des résultats préliminaires qui seront complétés ultérieurement pour exploiter toute l'information spatiale et temporelle des séquences. Il faut en effet considérer le problème dans sa globalité en introduisant une rigidité spatiale et temporelle dans la forme des contours. Le déplacement de chaque nouvel échantillon doit être comparé d'une part au déplacement des échantillons voisins dans l'image, et d'autre part au déplacement des échantillons identiques des images précédentes. Enfin, pour améliorer la convergence des résultats, nous tiendrons compte de l'électrocardiogramme qui donne une indication sur la contraction ou la dilatation du VG.

MOTS CLEFS : Echocardiographie, Suivi de contour, Ventricule gauche.

- [1] C. Léger, J. Thiel, R. Lédée, J. Fantini, G. Lamarque, C. Bonciu, *Caractérisation d'une surface fermée convexe par interpolation de Shannon circulaire*, 4^{èmes} journées ORASIS, p 178-181, 1993.
- [2] C. Léger, J. Thiel, R. Lédée, F. Patat, L. Pourcelot, *Left ventricle modeling by discrete polar Fourier transform*, 14th Annual Conference of the IEEE in Medicine and Biology Society, p 410-411, 1992.
- [3] C. Léger, R. Lédée, J. Thiel, L. Pourcelot, F. Patat, *Restitution complète d'un contour non fermé du VG par le modèle SFDP*, Echocardiographie et analyse d'images ventriculaires, p 87-92, Dijon, 1993.