

Analyse en ondelettes orthogonales pour la détection de défauts sur des produits manufacturés

O. LALIGANT, F. TRUCHETET
(Membres du GT2 du GDR 134)

Laboratoire GERE, Université de Bourgogne,
I.U.T., 12 rue de la Fonderie, 71200 LE CREUSOT

RÉSUMÉ

Nous présentons une application de l'analyse multirésolution en ondelettes orthogonales au contrôle qualité par vision artificielle de filets de bouchons en polyéthylène. A partir du signal monodimensionnel, issu d'une caméra linéaire visant l'intérieur du bouchon, nous calculons les coefficients des trois premiers niveaux de résolution. Les densités d'énergie des coefficients, observés sur une zone contenant le filet, fournissent trois paramètres discriminants pour la distinction entre filet correct et filet défectueux et alimentent un classifieur non supervisé après une phase d'apprentissage.

ABSTRACT

We present an application of multiresolution analysis with orthonormal wavelets of 1D signal to quality control by artificial vision. The purpose of the control is to check the thread of a polyethylen bottle stopper. Using a section picture of the stopper provided by a linear CCD camera, we calculate the wavelets coefficients of the first three levels of resolution. The energy densities of these coefficients calculated on a given area, provide three discriminant parameters which permit to distinguish correctly between the two classes (defectless, defective) according to a classifying method which can run without supervision after a training period.

I. Problème posé

Notre étude a pour but de repérer des malfaçons dans le filetage interne de bouchons plastiques. Ces défauts sont de plusieurs types: arrachement partiel ou total du filet, écrasement ou absence de filet. Le défaut de filet est critique pour l'étanchéité du bouchon. Industriellement, les bouchons défilent à la cadence de un toutes les trois secondes devant le dispositif de contrôle. Pour l'analyse de son périmètre interne, le bouchon est mis en rotation à la cadence de 1 tour par seconde. Ces bouchons ont une hauteur de 20mm et un diamètre de 16mm. 50 images par tour de bouchons permettent de détecter des défauts tous les 5/10ème de millimètre environ pour un défaut critique de l'ordre de 2 millimètres.

II. Système de prise de vue

Nos essais ont été effectués avec le dispositif expérimental suivant comprenant: une caméra linéaire, un éclairage annulaire et un ordinateur de type AT386 (figure 1).

Afin de distinguer toute la zone dans laquelle peut évoluer le filet, la caméra est inclinée d'un angle de 30° (figure 2). L'allure du signal issu de la caméra est présentée en figures 3 et 4.

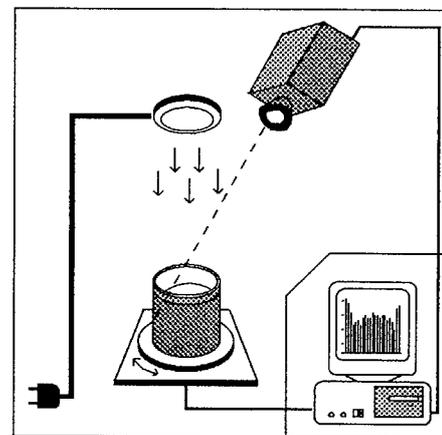


Figure 1: Système de prise de vue

Le filetage est donc situé dans une zone connue de l'image, par contre sa taille varie au cours de la rotation du bouchon.

III. Traitement du signal

A. Introduction

Nous devons extraire des signaux issus du système d'acquisition, des paramètres suffisamment discriminants

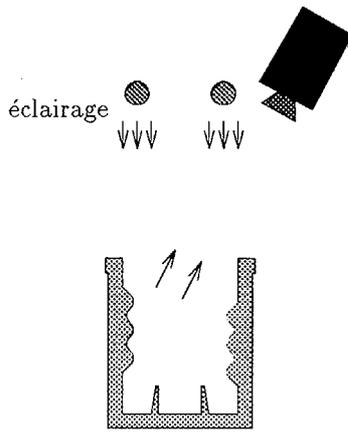


Figure 2: Vue en coupe du bouchon

et robustes. Une méthode appropriée nous permettra ensuite de classer chaque échantillon dans la classe des bons filets ou dans celle des défectueux. Les défauts sur le filet se traduisent par des déformations locales et globales qui induisent des composantes supplémentaires au spectre fréquentiel du signal dans des gammes étendues. Les méthodes simples comme l'analyse de luminance, le seuillage multifenêtre sur le gradient ou le calcul de la fonction d'intercorrélation avec une image de référence ne permettent pas de résoudre le problème de façon satisfaisante. La nature des défauts nous a conduit vers les méthodes d'analyse multi-résolution qui permettent une analyse spectrale locale efficace. Après un essai encourageant mais un peu lourd en charge de calcul avec les ondelettes de Malvar, nous nous sommes orientés vers la décomposition en ondelettes orthogonales suivant l'algorithme pyramidal de Mallat. Nous rappelons rapidement les principes de la décomposition en ondelettes et de l'analyse multirésolution avant d'en présenter l'application à notre problème.

B. La transformée en ondelettes orthogonales

La transformée en ondelettes permet une analyse spatio-fréquentielle des signaux, et en fournit une représentation localisée en espace et en fréquence, de résolution variable. On définit les ondelettes discrètes par la famille de fonctions suivante:

$$\psi_{j,n \in \mathbb{Z}}(x) = 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j x - n) \quad (j: \text{niveau de résolution})$$

Meyer [3] a prouvé l'existence de fonctions ψ constituant une base orthonormale de $L^2(\mathbf{R})$, nous utiliserons une telle base.

Les coefficients d'ondelettes de la transformée sont calculés par:

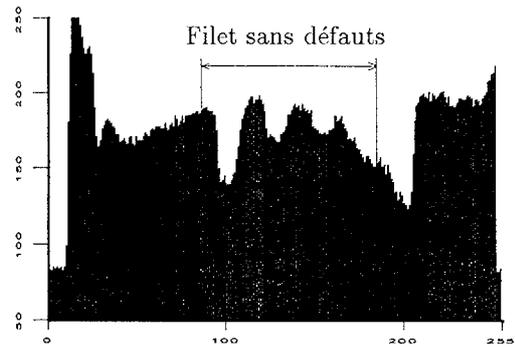


Figure 3: Exemple de signal pour un filet sans défauts

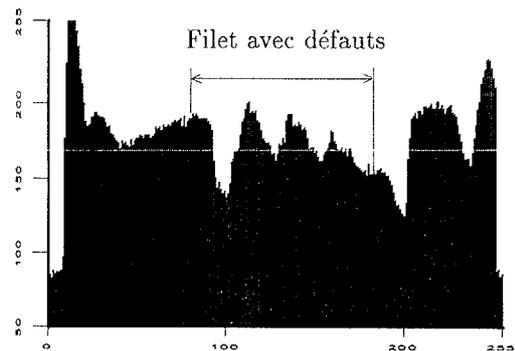


Figure 4: Exemple pour un filet avec défauts

$$W_{j,n \in \mathbb{Z}} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{j,n}(x) dx$$

La notion de multirésolution est introduite par une base orthogonale, famille de fonctions d'approximation, dites fonctions d'échelles [1] telles que:

$$\phi_{j,n \in \mathbb{Z}}(x) = 2^{\frac{j}{2}} \phi(2^j x - n)$$

Par la projection d'un signal sur cette base à l'échelle 2^j (résolution j), on obtient le signal approximé à la résolution $(j - 1)$. A cette base correspond celle des fonctions d'ondelettes telle que:

$$\psi(x) = \sum_n (-1)^n C_{n+1} \phi(2x + n)$$

où ϕ peut s'écrire :

$$\phi(x) = \sum_n C_n \phi(2x - n)$$

La projection sur la base d'ondelette à la résolution j donne le signal différence entre le signal approximé et le signal avant approximation. Avec la croissance du facteur d'échelle, on obtient une structure pyramidale de décompo-

sition. Le signal approximé correspond à une vue de plus en plus grossière du signal, et les coefficients d'ondelettes correspondent aux détails de plus en plus importants.

C. Algorithme multirésolution

Nous avons choisi une implémentation de l'analyse multirésolution basée sur les fonctions splines d'ordre 3 de Battle [4] et Lemarié [5]. Les fonctions d'échelle et d'ondelette mères sont symétriques (pour la linéarité en phase) et à support non compact. Elles sont présentées en figure 5.

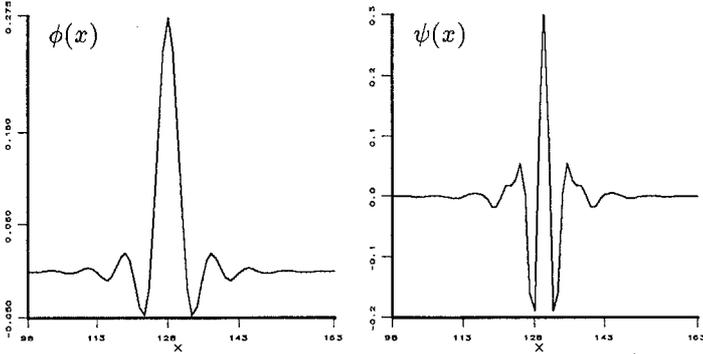


Figure 5: Fonctions mères

Les projections sur les deux bases s'écrivent:

$$f_{j,n} = \langle f(u), \phi_{2^j}(u - 2^{-j}n) \rangle$$

$$d_{j,n} = \langle f(u), \psi_{2^j}(u - 2^{-j}n) \rangle$$

avec f_n coefficients de la fonction approximée et d_n coefficients d'ondelettes, pour le niveau de résolution j .

Mallat [2] a montré que la projection sur chacune des familles revenait à une convolution par un filtre unique. On a alors les relations suivantes entre deux niveaux de résolution consécutifs ($j+1$ vers j):

$$f_{j,n} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \tilde{h}(2n-k) f_{j+1,k}$$

où $\tilde{h}(k) = h(-k)$
 et $h(k) = \langle \phi_{2^{-1}}(u), \phi(u-k) \rangle$

$$d_{j,n} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \tilde{g}(2n-k) f_{j+1,k}$$

où $\tilde{g}(k) = g(-k)$
 et $g(k) = \langle \psi_{2^{-1}}(u), \psi(u-k) \rangle$

Les réponses impulsionnelles de ces deux filtres sont données en figure 6, h est le filtre de fonction d'échelle, et g le filtre de fonction d'ondelette. Les filtres numériques correspondants ont environ 32 coefficients significatifs pour assurer la robustesse de la reconstruction. L'algorithme de décomposition est conforme au schéma de la figure 7. Le filtrage est suivi d'un sous-échantillonnage. Nous avons

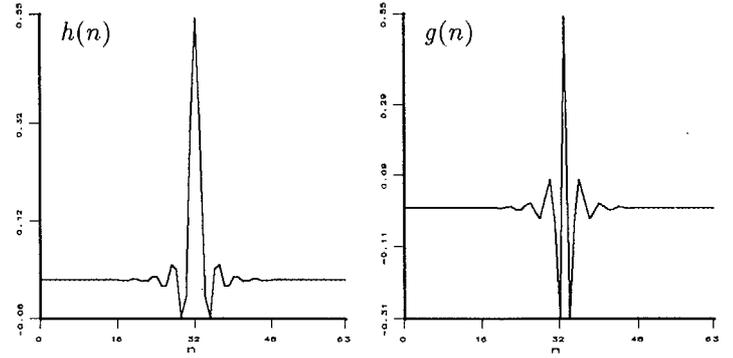


Figure 6: Filtres de multirésolution

été conduits pour des raisons de temps de calcul à effectuer le filtrage et le sous-échantillonnage dans l'espace de Fourier. L'algorithme dans Fourier consiste en un filtrage passe-bas (h) et un filtrage quasi passe-haut (g) complémentaires, avec une fréquence de coupure au milieu du demi-spectre. Si T est la période d'échantillonnage du signal original, la fréquence maximale des composantes harmoniques analysées est $\frac{1}{2T}$. Les coefficients d'ondelettes représentent donc des signaux de périodes T_i s'échelonnant entre $\left\{ \begin{array}{l} 2T < T_i \leq 4T \text{ pour la résolution } -1 \\ 4T < T_i \leq 8T \text{ pour la résolution } -2 \\ 8T < T_i \leq 16T \text{ pour la résolution } -3 \end{array} \right.$. Puisque la demi-période du filet est de l'ordre de $19T$, on constate bien ici qu'il est inutile de descendre en deçà de la troisième résolution puisque les harmoniques, approchant et dépassant les dimensions du filet, ne peuvent induire les déformations observées dans l'allure du filet.

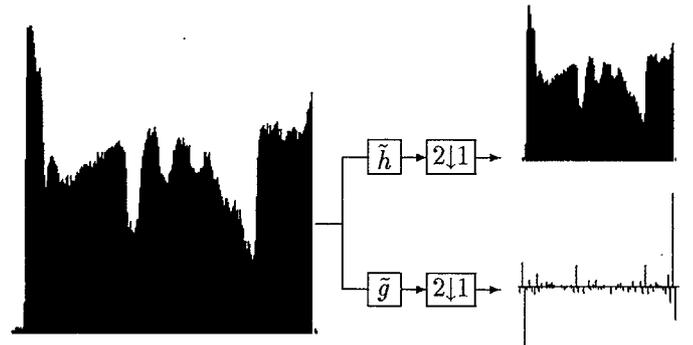


Figure 7: Algorithme de décomposition pour signal mono-dimensionnel

IV. Mesures et classement

Nous appliquons la décomposition sur les signaux de 256 points issus du système d'acquisition. Un exemple des coefficients d'ondelettes obtenus pour le niveau de résolution -2 (64 points) est donné en figure 8. On remarque une distri-



bution plus fournie pour la région du filet défectueux. Pour

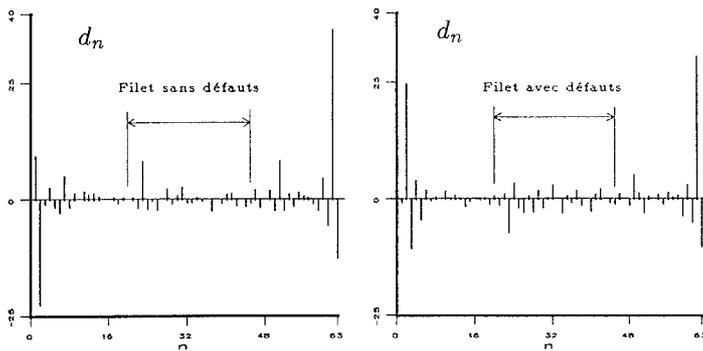


Figure 8: Coefficients d'ondelettes à la résolution 64 points

pallier la non invariance par translation de la transformée en ondelette, et puisque la localisation précise du défaut dans le filet ne nous importe pas, nous avons choisi comme paramètres la densité d'énergie des coefficients d'ondelettes pour chaque niveau de résolution. Cette densité est calculée dans une fenêtre restreinte et fixe de l'image totale. Cette fenêtre est suffisamment large pour inclure la zone du filet quelque soit sa position exacte. Une analyse en composantes principales des deux classes (tables 1 et 2) nous a encore conduit à ne retenir que les trois premières résolutions (128, 64 et 32 points) les plus décorréelées.

résolutions	128	64	32
128	1.000	0.220	-0.007
64		1.000	-0.001
32			1.000

Table 1: Intercorrélation pour la classe des filets corrects

résolutions	128	64	32
128	1.000	0.617	0.278
64		1.000	0.199
32			1.000

Table 2: Intercorrélation pour la classe des défauts

Sur la figure 9 on trouve un exemple de distribution pour les résolutions 64 ($j = -2$) et 32 ($j = -3$). La classe des bons filets correspond aux carrés. Les paramètres ainsi extraits alimentent un classifieur géométrique par polytopes de contraintes [6] qui, après une phase d'apprentissage, permet un tri correct des signaux acquis. Le taux d'erreur de classement est inférieur à 10% ce qui est largement suffisant compte tenu du fait que chaque bouchon donne lieu à une cinquantaine de mesures. Le taux de fausses détections final est inférieur à 1% pour un taux de non détection pratiquement nul.

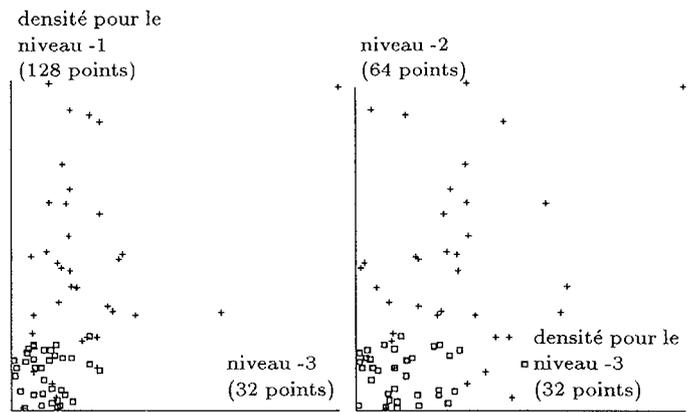


Figure 9: Distributions pour les couples de résolutions 128 – 32 et 64 – 32, la classe des défauts correspond aux croix

V. Conclusion

Nous avons proposé une méthode simple de classification de structures périodiques basée sur un outil puissant qu'est la transformée en ondelettes. La classe des ondelettes orthogonales garantit au mieux la décorrélation des informations obtenues dans les différents niveaux de résolution. Nous avons implémenté l'algorithme de décomposition de Mallat dans Fourier, ce qui nous apporte un gain en temps de calcul d'un facteur 4 par rapport à la méthode spatiale habituelle. Cette méthode permet d'envisager l'utilisation de la décomposition en ondelettes orthogonales en temps réel à partir de circuits DSP pour d'autres applications. L'analyse en composantes principale nous a permis de retenir les informations les plus discriminantes. Enfin la phase de décision du système de contrôle étudié fait appel à un système sous-optimal mais rapide. Cette étude, grâce à la réalisation d'un prototype de laboratoire, nous a permis de démontrer la faisabilité et de déterminer les performances du système de contrôle automatique envisagé.

Références

- [1] I. Daubechies, "Ten lectures on wavelets", *CBMS-NSF Series Appl. Math. SIAM*, 1992.
- [2] S. Mallat, "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition The Wavelet Representation", *IEEE Trans. Patter Anal. Machine Intell.*, vol. 11, n°7, pp. 674-693, July 1989.
- [3] Y. Meyer, "Ondelettes et opérateurs I", *HERMANN*, Paris, 1990.
- [4] G. Battle, "A block spin construction of ondelettes, Part 1: Lemarié functions", *Commun. Math. Phys.*, vol. 110, pp. 601-615, 1987.
- [5] P.G. Lemarié, "Ondelettes à localisation exponentielle", *J. Math. Pures et Appl.*, to be published.
- [6] Y. Gour, P. Gorria, J.F. Midol-Monnet, "Classification géométrique par polytopes de contraintes", *11 ème Colloque G.R.E.T.S.I.*, Juan-Les-Pins, pp. 1129-1132, 16-20 Sept. 1991.