

RESTAURATION D'IMAGES DEGRADEES DE PROFILS METALLIQUES OBTENUES A L'AIDE DE CAPTEURS PLATS A COURANTS DE FOUCAULT

H. FENNIRI, A. MOINEAU, G. DELAUNAY

Laboratoire d'Applications de la Microélectronique - Faculté des Sciences
Moulin de la Housse - BP 347 - 51062 REIMS CEDEX

RÉSUMÉ

Nous présentons dans cette communication une application d'un capteur magnétique dont l'élément sensible est une bobine plate gravée sur un circuit imprimé. Cette application concerne la mise en oeuvre d'un dispositif capable de restituer des formes simples de profils métalliques. Nous présentons les différentes étapes de cette réalisation, ainsi que l'élaboration d'un algorithme de déconvolution permettant l'obtention d'un modèle du dispositif et son inversion pour la restauration des signaux d'entrées dégradés par celui-ci.

ABSTRACT

In this paper we present an application of a magnetic sensor in which the sensitive element is a flat coil engraved on a printed circuit. This application consists in designing a system which can reconstruct the true form of metallic profiles. We present the different steps of this realization and the development of a deconvolution algorithm. The latter allows to obtain a model of the device, and its inversion in order to restore us degraded input signals.

1. INTRODUCTION

La restauration d'un signal dégradé par un système linéaire a des applications nombreuses dans des domaines très variés. L'utilisation de cette technique dans le domaine du contrôle non destructif utilisant des capteurs à courants de Foucault est d'un grand intérêt comme en témoignent les travaux récemment publiés dans ce domaine [1] [2] [3] [4].

Cette restauration s'avère en fait compliquée dans le cas de capteurs plats. En effet, nous ne disposons pas d'un modèle physique du système. Celui-ci est complexe et difficile à appréhender [4] en raison notamment de l'épanouissement des lignes de champ qui confère un caractère fortement non linéaire au dispositif de mesure. La seule approche possible, consiste à réaliser une modélisation type "boîte noire" en appliquant au système des entrées connues. Ensuite, à partir de la mesure de la sortie bruitée et de la connaissance d'un modèle mathématique de la relation entrée-sortie du système, nous avons mis en oeuvre l'algorithme du gradient conjugué pour restaurer au mieux la forme du profil placé à l'entrée du système.

2. DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DU CAPTEUR

Le dispositif présenté ici permet de réaliser des mesures de distance entre un capteur magnétique plat de proximité et un objet métallique placé en regard afin d'en reconstituer le profil. On dispose à cet effet d'un capteur plat de proximité à courants de Foucault. Ce capteur est constitué d'une bobine (spirale de cuivre) gravée sur un circuit imprimé, conçue et réalisée au L.A.M. Ses avantages sont un faible coût et une réalisation aisée [5].

Le capteur est solidaire d'une platine mobile insérée dans un banc de mesure permettant le déplacement horizontal du capteur au-dessus de l'objet métallique dont on veut déterminer le profil. On effectue alors un balayage rectiligne au-dessus de cet objet, ce qui modifie l'impédance de la bobine plate lorsque le profil métallique se trouve dans la zone d'influence du capteur entraînant ainsi la modification de la fréquence de l'oscillateur dans lequel est introduite la bobine. La fréquence de celui-ci est relevée à des positions régulièrement espacées (tous les 0.5 mm). La variation de fréquence en fonction de la position du capteur fournit une image du profil métallique étudié. Ce



Le système est représenté par le schéma synoptique Fig. 1. Notons que le dispositif permet aussi le déplacement de l'objet métallique sur un tapis roulant disposé parallèlement au plan de la platine supportant le capteur, celle-ci restant alors fixe.

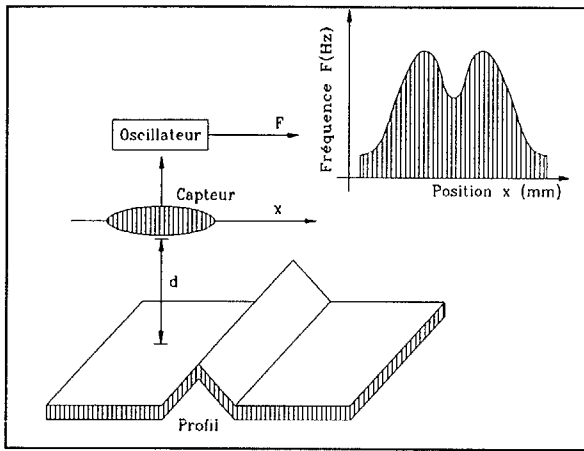


Fig.1 Schéma synoptique du dispositif

Le dispositif de commande et d'acquisition de mesure (Fig.2) est contrôlé par un système minimum construit autour d'un microprocesseur 6809. Celui-ci est interfacé à un micro-ordinateur IBM AT permettant le contrôle du dispositif et le traitement des données.

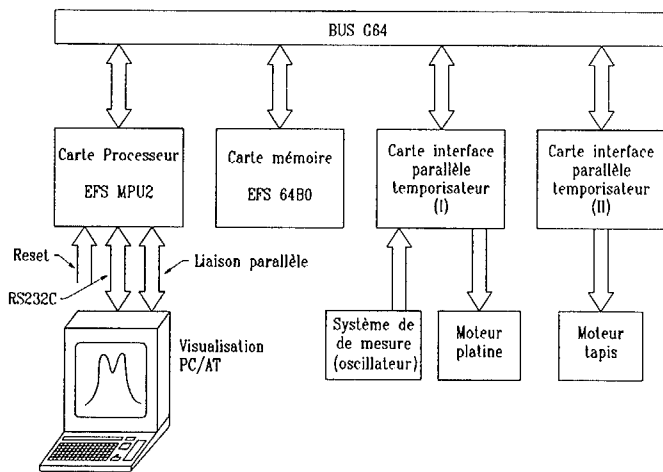


Fig.2 Synoptique de commande et d'acquisition de mesure

3. METHODOLOGIE

3-1 Caractéristique de linéarisation

En sortie de notre système, nous disposons d'un ensemble de mesures de fréquences; pour retrouver l'information de la distance, nous devons introduire une étape de linéarisation, afin d'avoir des données comparables en entrée et en sortie. La caractéristique est présentée Fig.3. Elle est obtenue en relevant la fréquence de l'oscillateur pour différentes distances

séparant le capteur d'un profil **plat**. Son allure traduit la non linéarité du système. Remarquons toutefois que l'allure de cette courbe dépend des caractéristiques géométriques du capteur et de la nature de la tôle en regard [5].

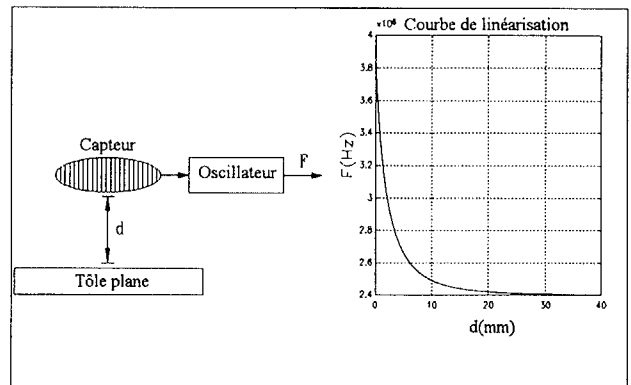


Fig.3 Caractéristique de linéarisation

La Fig.4 présente l'évolution des informations de sortie obtenues après l'étape de linéarisation, pour un profil triangulaire que l'on déplace parallèlement au plan du capteur et à différentes distances de celui-ci.

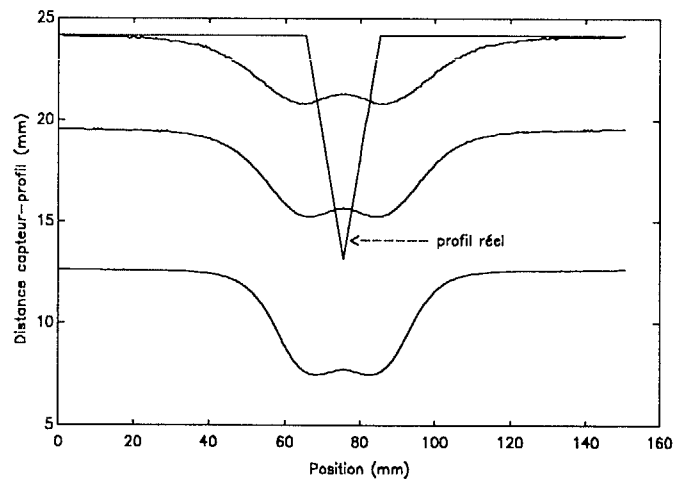


Fig.4 Comparaison des images obtenues pour un même profil situé à trois distances différentes du capteur

Comme nous pouvons le constater sur cette figure, l'image en sortie du système est très déformée, elle est très adoucie par rapport au profil réel, cette dégradation s'accroît lorsque la distance capteur-profil augmente.

3-2 Nécessité du modèle

De nombreuses méthodes ont été proposées dans la littérature pour réaliser la restauration d'un signal dégradé par un système linéaire ou non à partir de la mesure de sa sortie bruitée et de la connaissance du système et éventuellement des informations à priori sur le signal et sur le bruit. La restauration s'avère compliquée dans le cas de capteurs plats car nous ne disposons pas d'un modèle physique du système [4]. La

seule approche possible consiste alors à identifier tout d'abord sa réponse impulsionnelle à partir d'entrées connues afin d'obtenir un modèle du système étudié.

3-3 Identification / Déconvolution

Pour plus de simplicité nous avons utilisé un modèle localement linéaire. Le modèle sera valable pour de petites variations autour d'un point de fonctionnement. L'entrée du système est la distance réelle $E(x)$ séparant le capteur du profil. L'information fréquence en sortie du système est convertie en distance $S(x)$ en utilisant la caractéristique de linéarisation. Nous décomposons alors les signaux d'entrée et de sortie sous la forme:

$$\begin{cases} E(x) = E_0 + e(x) \\ S(x) = S_0 + s(x) \end{cases}$$

E_0 et S_0 représentant respectivement les composantes moyennes des signaux d'entrée et de sortie, $e(x)$ et $s(x)$ représentant les petites variations de ces signaux par rapport à ces composantes moyennes. La relation liant les variations $s(x)$ et $e(x)$ est modélisée par une équation de convolution:

$$s(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(E_0, x') \cdot e(x - x') \cdot dx'$$

$h(E_0, x')$ représente en théorie la réponse impulsionnelle du système, celle-ci va dépendre en pratique de la distance moyenne E_0 existant entre le capteur et le profil. L'utilisation des conditions de symétrie et de normalisation nous permet d'obtenir la relation suivante:

$$S(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(E_0, x') \cdot E(x - x') \cdot dx'$$

dont l'analogie discret sera:

$$S_n = \sum_{k=-N}^{k=+N} h_k \cdot E_{n-k}$$

C'est ce modèle du système qui sera utilisé pour l'identification et la déconvolution.

3-4 Algorithmes

Divers algorithmes ont permis l'identification de la réponse impulsionnelle:

⇒ Gradient à gain optimal

⇒ Estimateur à variance minimale de l'erreur d'entrée [1]

⇒ Gradient conjugué

Les meilleurs résultats sont obtenus avec la dernière méthode présentée ici.

L'idée de départ est de minimiser le critère $J(\hat{X}) = (S - A \cdot \hat{X})^T \cdot (S - A \cdot \hat{X})$, expression dans laquelle

S est un vecteur représentant le signal de sortie mesuré, X le signal recherché H (ou E) et A l'opérateur de convolution (Matrice de Toeplitz) constitué des éléments de E (ou H). On utilise alors le schéma

itératif $\hat{X}_{n+1} = \hat{X}_n + k_n \cdot D_n$, les paramètres k_n et D_n étant choisis de façon optimale. Ces considérations nous permettent d'établir que pour un nombre d'itérations n donné, les différentes étapes de l'algorithme peuvent être résumées de la manière suivante:

$$\hat{\varepsilon}_n = S - A \cdot \hat{X}_n$$

$$\beta_n = - \frac{D_{n-1}^T \cdot A^T \cdot A \cdot A^T \cdot \hat{\varepsilon}_n}{D_{n-1}^T \cdot A^T \cdot A \cdot D_{n-1}}$$

$$D_n = A^T \cdot \hat{\varepsilon}_n + \beta_n \cdot D_{n-1}$$

$$k_n = \frac{D_n^T \cdot A^T \cdot \hat{\varepsilon}_n}{D_n^T \cdot A^T \cdot A \cdot D_n}$$

$$\hat{X}_{n+1} = \hat{X}_n + k_n \cdot D_n$$

4. RESULTATS

Nous présentons Fig.5 le réseau de réponses impulsionnelles obtenu pour un profil donné et sa restauration obtenue à l'issue de 10 itérations pour trois distances capteur-profil différentes. Il apparaît que la réponse impulsionnelle dépend bien de la distance moyenne E_0 séparant le capteur du profil, nous obtenons alors un réseau de réponses permettant de couvrir la zone de sensibilité du capteur

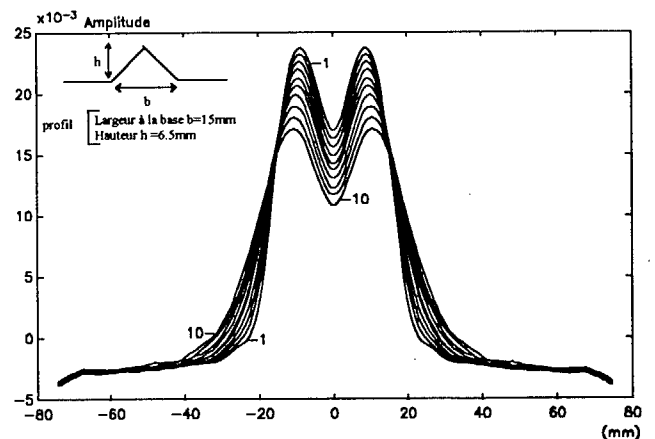


Fig.5-a Réseau de réponses impulsionnelles:
1- $d=8.5$ mm, 10- $d=20$ mm

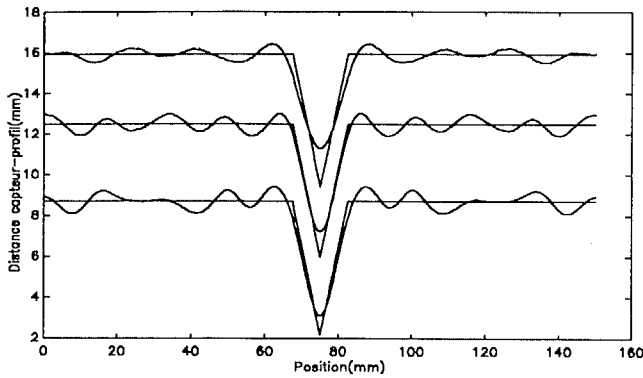


Fig.5-b Restauration du profil

La validité de cette identification peut être abordée en comparant, pour ce même profil, le signal de sortie réel et le signal de sortie calculé à l'aide de la réponse impulsionnelle appropriée. Nous observons Fig.6 que la concordance est excellente.

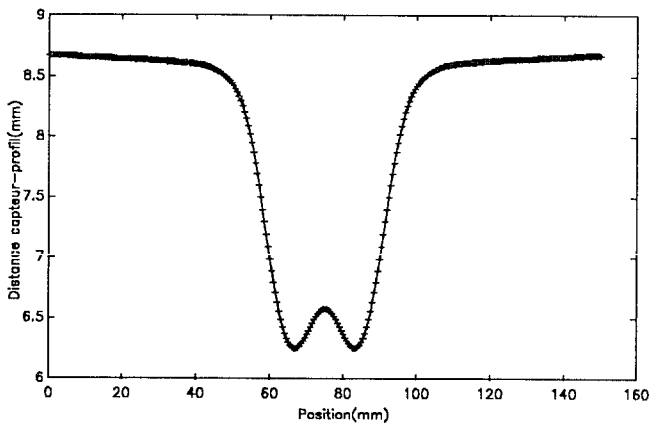


Fig.6 Comparaison sortie réelle (---) et sortie calculée(+++)

Nous donnons Fig.7 les caractéristiques géométriques du profil ayant servi à l'identification de la réponse impulsionnelle du système et celles du nouveau profil à reconnaître. A l'issue du même nombre d'itérations la concordance entre le profil d'entrée et l'image restaurée est moins bonne que précédemment mais l'approche réalisée ici permet de déterminer précisément la position du maximum du profil. Le désaccord observé porte donc essentiellement sur l'amplitude du signal de sortie dans le cas présent et sur les pentes du profil reconstitué. Cette propriété peut par contre être exploitée pour différencier divers profils notamment en contrôle non destructif. En effet l'approche adoptée ici peut s'appliquer à des profils de forme trapézoïdale comme des engrenages, ce qui permettrait alors de détecter des fractures de dents par exemple.

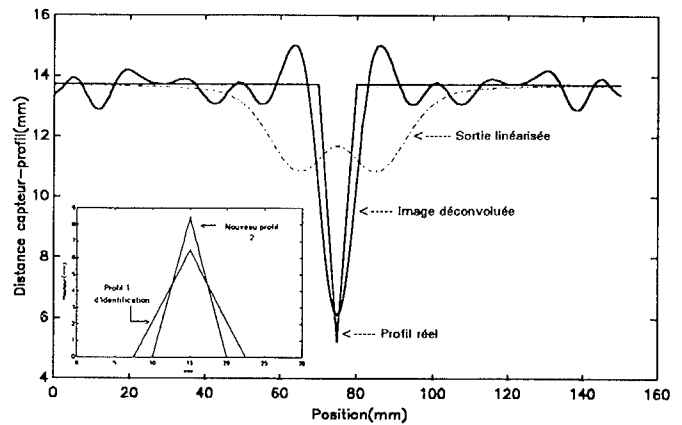


Fig.7 Comparaison du profil réel 2, de son image donnée par le capteur et de l'image déconvoluée obtenue avec le réseau de réponses impulsionnelles du profil 1

5. CONCLUSION

La restauration d'un profil est relativement concluante (Fig.5b) dans le cas de profils de forme triangulaire, sous réserve que la distance séparant le profil du capteur ne dépasse pas le diamètre de la bobine. La restauration s'avère très efficace lorsque le profil à restituer correspond à celui utilisé lors de l'identification du système. Pour les autres profils, les résultats obtenus sont moins bons, toutefois l'information obtenue nous apporte une bien meilleure représentation du profil que celle fournie directement par le système. Les performances obtenues ici permettent d'envisager des applications de ce capteur dans le domaine du contrôle non destructif.

[1] D. Placko, P. Aknin, H. Clergeot, Algorithme itératif séquentiel pour l'inversion d'un opérateur, application à la restauration des images fournies par un multicapteur à courants de Foucault. Trait. du sig., volume 7 - n° 6 - 1990.

[2] D. Jacob, Principe de la mesure simultanée de distance et d'épaisseur de dépôts métalliques par capteurs à courants de Foucault, Thèse de Docteur en sciences, Orsay (1988).

[3] D. Placko, Applications originales des capteurs inductifs pour le contrôle industriel, Revue pratique de contrôle industriel qualité n° 164.

[4] A. Billat, A. Lecler, J. C. Emond et G. Villerman-Lecolier, Etude d'un capteur électromagnétique plat de proximité, Revue Phys. Appl. 21 (1986) 443-450.

[5] P. Bitsindou, P. Guillaume, G. Delaunay, G. Villerman-Lecolier, Detection of holes, rivets or screws fixed on a metal sheet using a flat magnetic sensor, Sensors and Actuators A, 24 (1990) 181-186.