

Transformée de Radon lissée et utilisation dans une procédure de détection en contrôle non destructif

P. AKNIN¹ – P. SIMARD² – H. CYGAN¹

¹Laboratoire LTN – INRETS, 2 Av. du Gal. Malleret-Joinville, 94114 Arcueil Cedex, France

²Laboratoire HEUDIASYC UMR CNRS 6599 – UTC - BP 20529, 60205 Compiègne Cedex, France

patrice.aknin@inrets.fr, patrice.simard@utc.fr

Résumé – Cet article introduit une variante de la transformée de Radon qui autorise la mise en œuvre d'une procédure de détection rapide non pénalisée par la rotation du segment recherché dans une image à horizon glissant. Cette transformée de Radon dite lissée utilise une fonction de voisinage sur lequel s'effectue l'intégration au lieu de la projection standard sur droite pivotante. Elle généralise la transformée de Radon et permet l'introduction de connaissances a priori sur la structure de l'image à traiter et la nature des bruits qui la dégrade. Son application à une procédure de contrôle non destructif de rail par ultrasons en mode B-Scan est présentée en fin d'article.

Abstract – This article introduces a modified Radon transform that allows real time detection of segment in image without drawbacks due to its rotation inside the sliding window. This Radon transform, called Smoothed Radon Transform, uses a neighborhood domain instead of the 1D integration line (the rotating axis of the Radon Transform). It extends the Radon Transform and allows the induction of a priori knowledge about the image and noise structures. The problem of non destructive evaluation of rail with ultrasonic technology in B-Scan mode illustrates the end of the article.

1. Le contrôle ultrasonore en mode B-Scan

Dans le cadre du contrôle non destructif par ultrasons (US), la représentation A-Scan est la plus répandue [1]. Celle-ci présente l'amplitude du signal d'écho US en fonction de son temps de vol. Une inhomogénéité dans une cible se traduit alors par un pic sur la courbe A-Scan.

Dans les représentations B-Scan [2], la sonde est déplacée parallèlement à la surface de la cible et la « bufferisation » des vecteurs A-Scan fournit la représentation matricielle B-Scan (cf. figure 1).

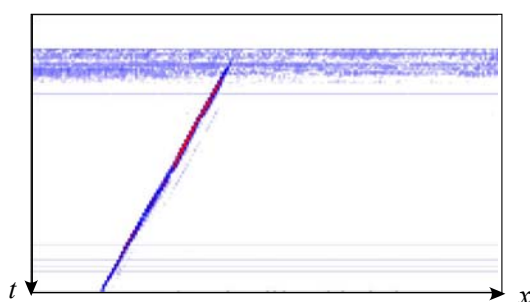


Fig. 1 – Image B-Scan d'une fissure

Cette représentation présente un intérêt particulier dans la mesure où elle permet de mettre en lumière la cohérence spatiale des défauts.

Sur ce type de représentation, les défauts détectés apparaissent en effet toujours comme des segments de droite. L'alignement spatial des pics des A-Scans successifs est dû à la direction privilégiée d'émission de la sonde qui agit également en réception. Le défaut n'étant pas ponctuel, si un écho apparaît dans plusieurs A-Scans successifs, c'est que

l'orientation du défaut dans la cible reste perpendiculaire à la direction principale d'émission du faisceau. L'orientation angulaire β du segment dans l'image B-Scan dépend de trois paramètres : le pas d'échantillonnage spatial (entre les colonnes de la matrice), le pas d'échantillonnage temporel (entre les lignes de la matrice), et la direction du faisceau US.

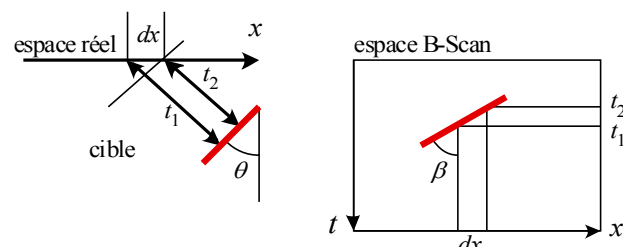


Fig 2 – lien entre l'espace réel et l'espace B-Scan

Si l'angulation de la fissure dans la cible à contrôler est notée θ (cf. figure 2), la direction de propagation des ondes US dans la cible doit être complémentaire (et elle reste constante pour une sonde donnée). Dans le plan B-Scan, l'angulation de l'image de la fissure est donnée par :

$$\tan \beta = \frac{1}{\cos \theta}$$

Si de plus, on introduit une fréquence d'échantillonnage spatial F_x pour l'avancement sur la cible, et une fréquence F_t pour la digitalisation en profondeur, on obtient :

$$\tan \beta = \frac{F_t}{F_x} \frac{1}{\cos \theta}$$

2. La détection par transformée de Radon

2.1 Formulation et implémentation

Pour résoudre la problématique de détection de segment dans ce type d'image, la transformée de Radon (TR) -et son corollaire la transformée de Hough- est couramment utilisée [3], [4], [5]. Celle-ci opère une projection orthogonale des pixels de l'image sur un axe tournant passant au centre de l'image :

$$\rho = x \cos \alpha + y \sin \alpha \quad (\alpha=0 \text{ pour un axe horizontal})$$

La TR d'une image $I(x,y)$ s'écrit ainsi classiquement :

$$TR(\rho, \alpha) \Big|_I = \iint I(x, y) \delta(\rho - x \cos \alpha - y \sin \alpha) dx dy$$

L'allure d'une telle transformée est donnée figure 3. Beaucoup de travaux de recherche ont concerné son implémentation rapide [6], [7], [8]. Les travaux présentés ici sont focalisés sur la réduction de la complexité par l'injection de connaissances a priori fortes sur les images. En effet, le segment de la figure 1 apparaît principalement concentré en un point à l'abscisse $\alpha_0=180^\circ-\beta_0$ de la TR (α_0 est l'angle complémentaire de la fissure assurant une projection perpendiculaire de celle-ci sur l'axe tournant). Son ordonnée est fonction de la position horizontale de la fissure dans la fenêtre glissante sur laquelle est calculée la TR. Lorsque la fissure se projette sur le centre de l'image, le point de concentration est obtenu pour l'ordonnée $\rho=0$.

Ces propriétés sont utilement mises à profit pour les implémentations en ligne de procédures de détection, puisque la connaissance a priori de la direction angulaire des segments dans l'image permet de se contenter du seul calcul $TR(0, \alpha_0)$. L'utilisation de cette unique transformée de Radon bloquée dans la direction α_0 et centrée en $\rho=0$ réduit drastiquement le volume des calculs. La décision est prise par simple seuillage qui s'active lorsque la projection du segment glissant passe sur le centre de l'image. Cette méthode s'avère très efficace si l'image B-Scan du défaut se présente bien sous la forme d'un segment aligné dans la direction voulue. Si cela n'est pas le cas, il est nécessaire d'observer la TR à d'autres valeurs angulaires et l'implémentation temps réel devient plus délicate.

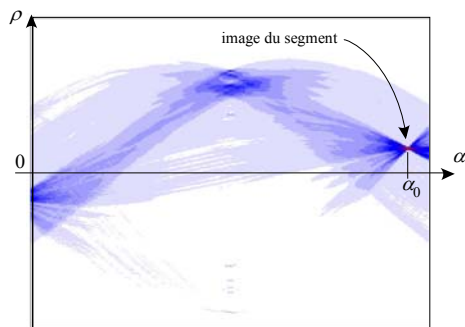


Fig. 3 – TR de l'image B-Scan présentée figure 1

2.2 Limitation pour la détection

Si les trois paramètres qui conditionnent la valeur de β peuvent être considérés comme constants au premier ordre lors d'essais en laboratoire, ils s'avèrent par contre plus

fluctuants en conditions de terrain [5], [9]. La connaissance a priori injectée dans la procédure de détection est alors faussée et dégrade immédiatement le contraste obtenu lors de la phase de décision. La figure 4 compare 3 transformées bloquées $TR(0,15^\circ)$ calculées en fonction de l'avancement du contrôle sur la cible : la première pour un segment orienté à 14° (a), un deuxième à 15° (b) et un troisième à 16° (c). On conçoit aisément qu'il devienne plus difficile de régler le seuil de détection dans les situations (a) et (c) que pour (b).

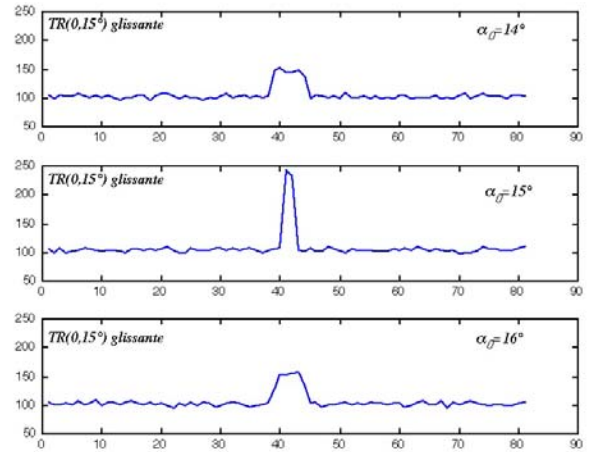


Fig. 4 – Effet des variations angulaires du segment sur le signal de détection

3. La transformée de Radon lissée

Pour solutionner ce problème, nous proposons de généraliser la TR sous la forme,

$$TRL(\rho, \alpha) \Big|_I = \iint I(x, y) V(x, y, \rho, \alpha) dx dy$$

dans laquelle $V(x,y,\rho,\alpha)$ est un masque de voisinage (ou de lissage) à valeurs dans $[0,1]$ qui permet de gérer l'incertitude sur la direction attendue de détection. Par exemple, on peut fixer un voisinage sous la forme d'une bande parallèle à la direction de détection souhaitée (figure 5b), où sous la forme d'un cône (figure 5a). La décroissance dans la direction perpendiculaire à l'axe central peut être choisie gaussienne ou triangulaire, voire uniforme selon l'application. L'expression d'un voisinage cône gaussien est la suivante :

$$V(x, y, \rho, \alpha) = e^{-a^2/\sigma^2} \quad \text{avec}$$

$$a = \text{Atan} \left(\frac{x \cdot \cos \alpha + y \cdot \sin \alpha - \rho}{x \cdot \sin \alpha - y \cdot \cos \alpha} \right)$$

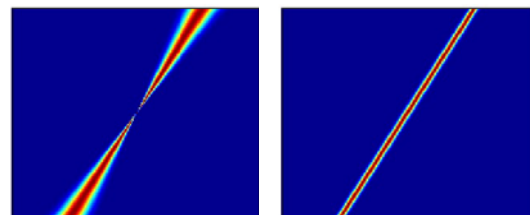


Fig. 5 – masques cône gaussien (a), bande gaussien (b)

Cette formulation est à rapprocher des approches de type fusion de décision où quelques TR simples sont mises en compétition pour la génération de la décision finale [10].

4. Résultats

4.1 Contraste de détection

La figure 6 montre les résultats de contraste obtenu lorsque l'orientation du segment varie de $\beta_p = \pm 5^\circ$ autour de la position de référence de 15° . L'image utilisée est une image synthétique de 400×200 pixels avec un segment unique et homogène de longueur 100 centré dans l'image. Dans le cas de la TR, le contraste s'atténue très rapidement de part et d'autre de l'orientation de référence (40% à $\pm 5^\circ$), alors qu'il reste relativement élevé dans le cas de la TRL (85% à $\pm 5^\circ$)

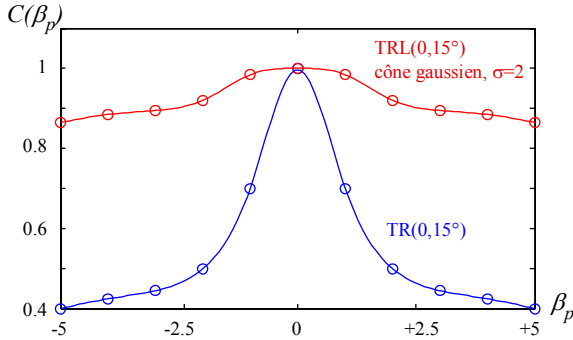


Fig. 6 – Effet des variations angulaires du segment en position centrée sur le signal de détection (max normalisé)

Il est évident qu'un compromis doit être réalisé entre l'obtention d'un contraste important et un étalement trop pénalisant rendant le détecteur sensible à la présence de tous les segments. Ce compromis est à réaliser à l'aide d'une estimation des variations angulaires attendues.

4.2 Cas particulier d'un segment oscillant

L'application traitée concerne la détection de fissure interne de rail [9]. Au cours des inspections automatisées effectuées par les réseaux ferroviaires, les sondes sont plaquées sur le dessus du rail et solidaires d'un sabot qui glisse à des vitesses pouvant atteindre 50km/h. Les sondes visent avec un angle donné dans le champignon du rail (cf. figure 7) de sorte à obtenir des échos importants pour les fissures dont les directions de propagation sont privilégiées par les contraintes de roulement.

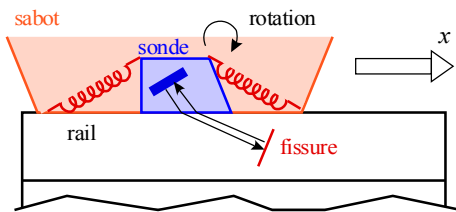


Fig. 7 – Montage d'une sonde oblique et rotation défavorable

Les raisons pouvant conduire à une variation d'angle des segments dans les images B-Scan sont multiples :

- tangage du montage mécanique de maintien des sondes (cf. figure 7)
- existence de fissures en « escalier » présentant un faciès angulaire complexe

- erreur d'estimation de la vitesse du véhicule et donc fréquence d'échantillonnage F_x non constante
- fréquence d'échantillonnage F_t non constante à cause des variations de la température extérieure qui modifient la célérité des ondes US
- incertitude sur l'angle d'émission des sondes (erreur de construction)

Afin de quantifier l'apport de la TRL pour le premier cas, nous supposons que le montage mécanique possède un mode propre en rotation indésirable et que son angle relativement au plan du rail suit une loi sinusoïdale ; on supposera que l'angle équivalent dans le plan B-Scan est d'amplitude 5° et suit la loi :

$$\beta = 15^\circ + \beta_p = 15^\circ + 5 \sin(\omega t)$$

On montre aisément que sur l'excursion $\pm 5^\circ$, la densité de probabilité de l'angle instantané (cf. figure 8) et sa fonction de répartition valent :

$$f(\beta_p) = \frac{1}{\pi \sqrt{5^2 - \beta_p^2}} \quad F(\beta_p) = \frac{1}{\pi} \text{Arcsin} \left(\frac{\beta_p}{5} \right)$$

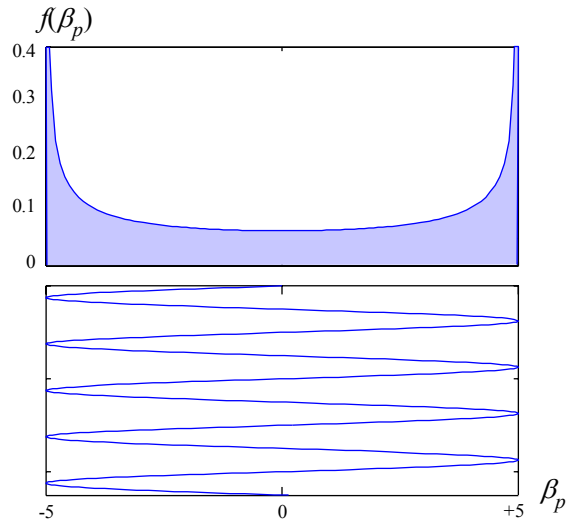


Fig. 8 – densité de probabilité de l'angle d'un segment oscillant sinusoïdalement

4.3 Courbe COR

Compte tenu de la connaissance de l'évolution de la TR et de la TRL présentée figure 6, on est capable d'estimer la probabilité de bonne détection d'un tel segment en intégrant, pour une valeur de seuil donné, la densité de probabilité entre les deux valeurs d'angle intercepté (ou deux fois la surface d'un seul côté puisque le contraste $C(\beta_p)$ est symétrique).

Si s_{TR} désigne le seuil de détection pour l'utilisation de la TR simple et s_{TRL} celui pour la TRL,

$$P_{BD}(s) = 2.F(\beta_1) \text{ avec}$$

$$s_{TR} = C_{TR}(\beta_1) \quad \text{et} \quad s_{TRL} = C_{TRL}(\beta_1)$$

La figure 10 présente l'évolution de ces seuils en fonction de P_{BD} . On constate qu'il n'est pas nécessaire de trop baisser le seuil de détection de la TRL pour obtenir une probabilité de bonne détection maximale, alors que celui de la TR doit

être inférieur à 0,4. Cet abaissement du seuil sera bien sûr pénalisant vis-à-vis du taux de fausses alarmes.

Si l'on choisit un modèle de bruit uniformément réparti entre $[0,1]$ dans l'espace de Radon sur le support $[-5^\circ, +5^\circ]$, la probabilité de fausse alarme s'exprime simplement par :

$$P_{FA} = 1 - s_{TR} \quad \text{pour la TR et}$$

$$P_{FA} = 1 - s_{TRL} \quad \text{pour la TRL}$$

La courbe COR est bien clairement plus favorable à la TRL (cf. figure 11).

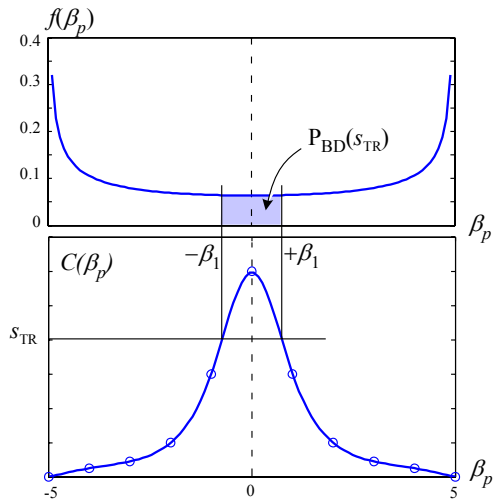


Fig. 9 – estimation de la probabilité de bonne détection

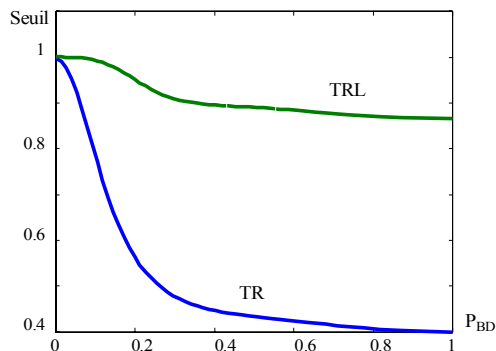


Fig. 10 – évolution du seuil de détection fonction de la probabilité de bonne détection d'un segment oscillant

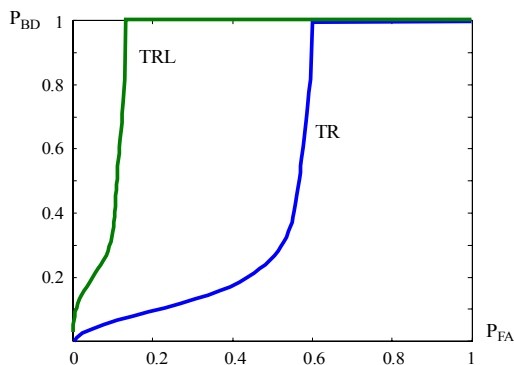


Fig. 11 – Courbes COR pour le traitement TR et TRL

5. Conclusion

L'article a présenté une extension de la transformée de Radon pour une utilisation en contexte détection. Lorsque l'on recherche des segments à orientation prédéfinie dans une image à horizon glissant, le calcul d'une seule TR bloquée sur l'angle complémentaire du segment recherché et estimée au centre de l'image suffit. Cependant, une imprécision sur la connaissance a priori de l'orientation des segments entraîne immédiatement des non-détections.

Afin de rendre possible la détection de tels segments « mal » orientés, une extension de la transformée de Radon, dénommée Transformée de Radon Lissée, a été introduite. Celle-ci effectue un calcul par intégration sur un domaine et non sur un chemin. Ce voisinage ou masque est placé sur l'image et on montre que la sommation sur ce domaine constitue un détecteur de bon contraste.

Une estimation théorique de la courbe COR obtenue par cette méthode est produite dans le cas d'un segment oscillant dans l'image et d'un bruit uniforme. Des validations sont en cours sur une application de détection temps réel de fissure de rails par méthode ultrasonore en mode B-Scan. Une optimisation de l'adéquation de la forme du voisinage avec les excursions angulaires des segments est également à l'étude.

D'une façon générale, et moyennant un choix raisonnable des paramètres du voisinage, on dispose d'une approche simple, peu coûteuse en temps de calcul, et robuste, permettant d'intégrer les connaissances a priori sur la physique du système de mesure dans la procédure de détection.

Références

- [1] H. Krautkramer J. Krautkramer. *Ultrasonic Testing of materials*. Springer-Verlag, 1990.
- [2] J. Blitz, G. Simpson. *Ultrasonic methods of non destructive testing*. Chapman & Hall, 1996
- [3] S.R. Deans. *Hough transform from the radon transform*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 3(2), 2004.
- [4] R.O. Duda P.E. Hart. *Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures*. Comm.ACM., 15(1), 1972
- [5] P. Akin H. Cygan. *Improving the detection of rail cracks by using recursive radon transform*. Railway Engineering, London, 2004.
- [6] K. Murakami, T. Naruse. *High speed line detection by Hough transform in local area*. ICPR'00. 2000
- [7] C. Galambos, J. Matas, J. Kittler. *Progressive probabilistic Hough transform for line detection*. CVPR'99. 1999
- [8] L. Xiu, E. Oja. *Randomized Hough transform : basic mechanisms, algorithms and computational complexities*. CVGIP Image Understanding vol 57-2. 1993
- [9] H. Cygan P. Akin P. Simard L. Girardi. *B-scan ultrasonic image analysis for internal rail defect detection*. WCRR. Edinburg, 2003.
- [10] P. Toft. *The Radon transform, Theory and implementations*. PhD thesis, 1996.