

Nouveaux filtres optimisés pour la détection de lignes de crêtes

S. VILLETTE¹, F. COINTAULT¹, B. CHOPINET¹, M. PAINDAVOINE²

¹ UP GAP, ENESAD, BP 87999, 21079 Dijon cedex, France

² LE2I, UMR CNRS 5158, Université de Bourgogne, BP 47870, 21078 Dijon cedex, France,

s.villette@enesad.fr

Résumé – Cet article présente deux nouveaux filtres linéaires de détection de lignes de crêtes. La synthèse de ces filtres a été dictée par les besoins d'une application concrète relevant du domaine des agroéquipements. Le premier filtre a une structure similaire à celle du filtre de Ziou et s'implémente de manière récursive à l'ordre 2. Le second filtre est construit selon la méthodologie de Canny pour la détection optimale d'un contour de type « exponentielle-lissée » dont le profil a été confronté à des mesures expérimentales directement liées à l'application cible. L'implémentation récursive de ce filtre s'effectue à l'ordre 4. Les résultats obtenus pour la détection de contours sur une image de synthèse et sur des images réelles montrent la supériorité des filtres proposés par rapport au filtre de Ziou pour l'application visée. Le second filtre proposé procure les meilleurs résultats dans le cas d'images bruitées.

Abstract – This paper introduces two new linear filters to detect ridge lines. These filters are designed to respond to the requirements of a particular practical application to improve the working quality of a farm implement. The first filter is similar to Ziou's filter and is implemented as a 2nd order recursive filter. The second filter is designed following Canny's methodology to optimally detect a "smoothed-exponential" edge whose profile is linked to experimental measurements relative to a practical application. The recursive implementation of this filter is of the 4th order. The edge detection results obtained with synthetic and real images demonstrate the superiority of the two filters presented in this paper with respect to Ziou's filter for the targeted application. The second filter provides the best results in the case of noisy images.

1. Introduction

Les filtres linéaires de détection de contours sont d'usage courant pour le pré-traitement et l'extraction des principaux attributs d'une image.

Pour les contours de type « marche », de nombreuses publications ont fait suite aux travaux de Canny [1] dans le but de concevoir des filtres optimaux de détection. Les auteurs ont notamment cherché à permettre l'implémentation récursive des filtres [2], à améliorer la définition des critères de performances [3], ou à améliorer la description du modèle de contour pour le rendre plus proche des transitions réellement observées dans une image [4]. En revanche, la détection des contours de type « ligne de crête » a suscité moins d'intérêt.

Pour répondre aux exigences d'une application spécifique, relative à la gestion d'un matériel agricole, nous avons défini deux nouveaux filtres linéaires de détection de lignes de crêtes.

Après avoir précisé le contexte de l'application, un premier filtre de détection de réponse impulsionnelle infinie (RII) sera proposé dans le prolongement des travaux de Ziou [5]. Un second filtre (RII) sera ensuite défini sur la base d'un modèle de contour en adéquation avec des mesures expérimentales.

2. Contexte de l'application

En agriculture, les engrais minéraux sont majoritairement épandus sur les parcelles cultivées au moyen de « distributeurs centrifuges ». Le principe de ces appareils consiste à faire subir à un flux de particules d'engrais (de quelques millimètres de diamètre) une accélération centrifuge au moyen d'un disque muni de pales et entraîné en rotation (700 à 1000 tr/min). A la périphérie du disque, les granulés sont éjectés à une vitesse de l'ordre de 100 à 200 km/h et sont ainsi dispersés sur une certaine largeur d'épandage.

La vitesse d'éjection des granulés est un paramètre qu'il est nécessaire de mesurer pour améliorer la qualité de la répartition des fertilisants dans le respect des préoccupations économiques et environnementales actuelles. Les techniques de vélocimétrie par image de particules (PIV) étant inenvisageables dans le cadre de l'application visée, une méthode spécifique et de faible coût a été développée. Dans cette approche, la vitesse est déduite de l'angle existant entre la direction de la trajectoire suivie après éjection et la tangente au disque [6]. Un système d'imagerie a été développé pour mesurer cet angle au moyen d'images acquises en filé qui permettent d'enregistrer les traces laissées par le mouvement des granulés pendant le temps d'intégration de la caméra [7].

Les images ainsi obtenues (fig. 1) sont qualifiées d'images d'épandage. La qualité de ces images est en pratique limitée par les conditions de prise de vue. Un traitement bas niveau a été choisi sous la forme d'un filtre linéaire de détection de contours pour obtenir une image binaire des axes des trajectoires en s'affranchissant des hétérogénéités dues à la présence de poussières, à l'éclairage et aux variations de réflexion de l'arrière plan (fig. 1). In fine, la précision de la mesure de vitesse est conditionnée par la précision de la localisation des axes des trajectoires. Ce prétraitement est utilisé en préalable à un algorithme d'identification des axes des trajectoires et de caractérisation de leur orientation par rapport au disque [7].

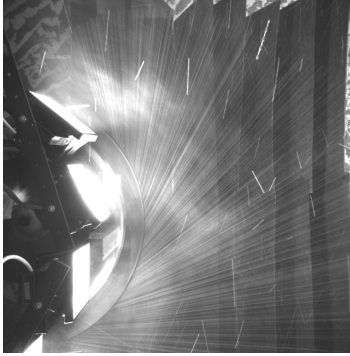


FIG. 1 : Image d'épandage montrant les traces laissées par le mouvement des granulés après leur éjection.

3. Variante du filtre de Ziou

Pour les transitions de forme triangulaire ou exponentielle ($C(x) = e^{-|x|}$), Ziou [5] propose un filtre de détection dont la réponse impulsionnelle échantillonnée est :

$$f(n) = (a \sin \omega |n| + b \cos \omega |n|) e^{-\alpha |n|} \quad (1)$$

L'auteur choisit a et b en imposant $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 0$ ce qui le conduit à l'expression suivante du filtre de détection :

$$f_0(n) = c_0 (-\alpha \sin \omega |n| + \omega \cos \omega |n|) e^{-\alpha |n|} \quad (2)$$

Ziou étend l'application de son filtre à une image en deux dimensions en le considérant comme séparable et en lui associant un filtre de régularisation.

En pratique, sur des images d'épandage, l'application de ce filtre f_0 ne s'est pas révélée satisfaisante du fait des hétérogénéités de l'image et de l'impossibilité d'obtenir dans le domaine discret une réponse nulle à une entrée constante. Ce problème peut être facilement résolu en déterminant les coefficients a et b de manière à obtenir $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} f(n) = 0$. L'expression du filtre est alors :

$$f_1(n) = c_1 ((e^{-2\alpha} - 1) \sin \omega |n| + 2e^{-\alpha} \sin \omega \cos \omega |n|) e^{-\alpha |n|} \quad (3)$$

La fonction $f_1(x)$ étant paire, la fonction de régularisation $g_1(x)$ est choisie telle que $g_1''(x) = -f_1(x)$. La forme échantillonnée du filtre de régularisation est alors :

$$g_1(n) = (A \sin \omega |n| + B \cos \omega |n|) e^{-\alpha |n|} \quad (4)$$

$$A = -\frac{a(\alpha^2 - \omega^2) - 2\alpha\omega b}{(\alpha^2 + \omega^2)^2}; \quad B = -\frac{b(\alpha^2 - \omega^2) + 2\alpha\omega a}{(\alpha^2 + \omega^2)^2};$$

$$a = c(e^{-2\alpha} - 1); \quad b = 2ce^{-\alpha} \sin \omega.$$

Le coefficient c_1 est défini de manière à vérifier

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} g_1(n) = 1 \text{ d'où : } c_1 = \frac{(1 - 2e^{-\alpha} \cos \omega + e^{-2\alpha})(\alpha^2 + \omega^2)^2}{8\alpha\omega e^{-2\alpha} \sin^2 \omega + 2\alpha\omega(e^{-2\alpha} - 1)^2}$$

4. Définition d'un filtre spécifique

4.1. Modèle de contour

Une seconde approche nous a conduit à concevoir un filtre de détection prenant davantage en considération le profil réel des contours attendus dans les images d'épandage. Ces transitions diffèrent en effet d'une forme triangulaire ou exponentielle pure (*i.e.* $C(x) = e^{-|x|}$).

Pour différents granulés d'engrais et pour les conditions géométriques usuelles de la prise de vue, des images de grains d'engrais ont été acquises afin d'estimer expérimentalement l'allure du profil de contour correspondant aux traces laissées par ces granulés lorsqu'ils sont en mouvement.

La fonction retenue pour modéliser ce contour est :

$$C_2(x) = \frac{m^2 - d^2}{2d} \left(\frac{e^{-(m-d)|x|}}{(m-d)} - \frac{e^{-(m+d)|x|}}{(m+d)} \right); \quad m > d > 0 \quad (5)$$

La figure 2 illustre l'ajustement de ce modèle, de type « exponentielle lissée », à un exemple de profil de contour obtenu expérimentalement pour un granulé d'engrais.

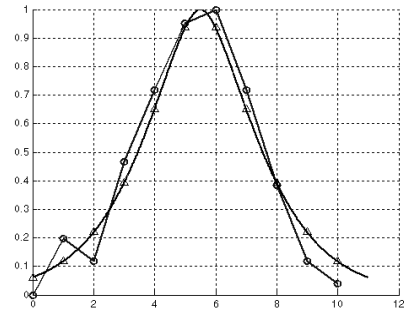


FIG. 2 : Superposition de l'allure d'un contour mesuré expérimentalement (o) et du modèle de contour (Δ).

4.2. Filtre optimal de détection

Le filtre f_2 de détection du contour $C_2(x)$ est recherché de manière optimale au sens des critères de Canny [3]. Pour $C_2(x)$, les expressions de bonne détection Σ , de bonne localisation Λ et de faible multiplicité des réponses x_m sont :

$$\Sigma = \sqrt{2} \left| \int_{-\infty}^0 \frac{sp}{p-s} \left(\frac{e^{s|x|}}{s} - \frac{e^{p|x|}}{p} \right) f_2(x) dx \right| \left/ \sqrt{\int_{-\infty}^0 f_2^2(x) dx} \right.$$

$$\Lambda = \sqrt{2} \left| \int_{-\infty}^0 \frac{sp}{p-s} (se^{s|x|} - pe^{p|x|}) f_2(x) dx \right| \sqrt{\int_{-\infty}^0 f_2'^2(x) dx}$$

$$x_m = 2\pi \sqrt{\int_{-\infty}^0 f_2'^2(x) dx} / \sqrt{\int_{-\infty}^0 f_2''^2(x) dx}$$

avec : $s = m - d$ et $p = m + d$.

La fonction f_2 est recherchée de façon à maximiser le produit $\Sigma \cdot \Lambda$ sous la contrainte x_m , ce qui revient à minimiser $\int_{-\infty}^0 f_2^2(x) dx$ sous les contraintes suivantes :

$$\int_{-\infty}^0 f_2'^2(x) dx = C_1 ; \int_{-\infty}^0 \left(\frac{e^{s|x|}}{s} - \frac{e^{p|x|}}{p} \right) f_2(x) dx = C_3 ;$$

$$\int_{-\infty}^0 f_2''^2(x) dx = C_2 ; \int_{-\infty}^0 (se^{s|x|} - pe^{p|x|}) f_2(x) dx = C_4 .$$

Sur $] -\infty ; 0]$ l'équation différentielle que doit vérifier la fonction $f(x)$ recherchée est :

$$2f_2(x) - 2\lambda_1 f_2''(x) + 2\lambda_2 f_2''''(x) = - \left(\frac{\lambda_3}{s} + \lambda_4 s \right) e^{sx} + \left(\frac{\lambda_3}{p} + \lambda_4 p \right) e^{px}$$

En imposant la parité du filtre ($f_2(x) = f_2(-x)$), la forme générale de la solution sur $] -\infty +\infty [$ est :

$$f_2(x) = (a_1 \sin \omega|x| + a_2 \cos \omega|x|) e^{\alpha|x|} + (a_3 \sin \omega|x| + a_4 \cos \omega|x|) e^{-\alpha|x|} + a_5 e^{-s|x|} + a_6 e^{-p|x|}$$

Pour garantir la stabilité du filtre ($f_2(+\infty) = f_2(-\infty) = 0$), on est conduit à retenir :

$$f_2(x) = (a_3 \sin \omega|x| + a_4 \cos \omega|x|) e^{-\alpha|x|} + a_5 e^{-s|x|} + a_6 e^{-p|x|} \quad (6)$$

La stabilité est assurée lorsque α , s et p sont strictement positifs. En pratique, les valeurs de s et p (ou m et d) sont choisies en fonction de l'allure attendue pour le profil de contour dans l'image. Les valeurs de α et ω sont choisies sur la base de l'allure des critères discrets de performance [8] et de manière à vérifier $f_2''(0) < 0$.

4.3. Filtre de régularisation

La fonction de lissage est définie telle que $g_2''(x) = -f_2(x)$. Ce qui conduit à l'expression suivante pour la forme échantillonnée du filtre de régularisation :

$$g(n) = -(a_7 \sin \omega|n| + a_8 \cos \omega|n|) e^{-\alpha|n|} - \frac{a_5}{s^2} e^{-s|n|} - \frac{a_6}{p^2} e^{-p|n|} \quad (7)$$

$$a_7 = \frac{a_3(\alpha^2 - \omega^2) - 2a_4\alpha\omega}{(\alpha^2 + \omega^2)^2} ; a_8 = \frac{a_4(\alpha^2 - \omega^2) + 2a_3\alpha\omega}{(\alpha^2 + \omega^2)^2}$$

Les coefficients a_3 , a_4 , a_5 et a_6 sont déterminés afin de vérifier $f_2'(0) = 0$, $\sum_{k=-\infty}^{+\infty} f_2(k) = 0$ et $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} g_2(n) = 1$.

5. Mise en oeuvre 2D sur une image

L'application des filtres sur une image en deux dimensions s'effectue en supposant les filtres séparables.

L'image de la norme du gradient est calculée à partir des gradients horizontaux et verticaux. Le gradient horizontal est calculé par combinaison d'un lissage vertical et d'une dérivation horizontale, tandis que le gradient vertical est calculé par combinaison d'un lissage horizontal et d'une dérivation verticale.

L'expression des transformées en Z des filtres conduit à une implémentation récursive de 2nd ordre pour les filtres proposés par Ziou ainsi que pour les filtres f_1 et g_1 , et de 4^{ème} ordre pour les filtres f_2 et g_2 .

Pour les images d'épandage, le traitement est complété par l'extraction des maxima locaux de la norme du gradient et un seuillage hystérésis.

L'application des filtres sous la forme séparable leur confère un caractère anisotrope. Néanmoins, en pratique, sur des images d'épandage bruitées, la détection des trajectoires obliques s'est révélée satisfaisante.

Un filtrage adaptatif pourrait être envisagé sur la base de l'information a priori déduite de l'analyse mécanique du système permettant de borner la plage des valeurs probables pour l'orientation des trajectoires en chaque point de l'image [6,7].

6. Evaluation des performances

Les performances des filtres de détection f_0 , f_1 et f_2 ont été comparées au moyen de l'indice de Pratt sur une image de synthèse (fig. 3) reproduisant une ligne de crête verticale de type « exponentielle lissée » d'amplitude $A = 10$ additionnée à un fond dont le niveau de gris évolue verticalement de 0 à 200. Cette image est ensuite dégradée par addition d'un bruit blanc gaussien. Pour réaliser une comparaison objective des résultats obtenus par chaque filtre, les paramètres ont été choisis de manière à ce que les réponses fréquentielles de chacun des filtres dans le domaine discret admettent leur maximum pour une même valeur de fréquence. D'autre part, la valeur de seuil utilisée pour binariser chaque image de gradient a été déterminée de manière à être optimale (au sens de l'indice) pour chaque filtre.

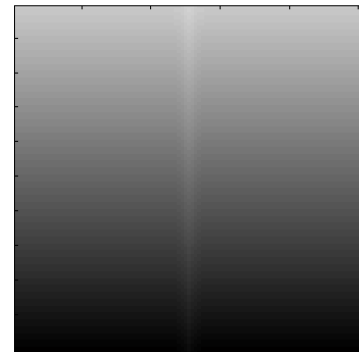


FIG. 3 : Illustration de l'image de synthèse

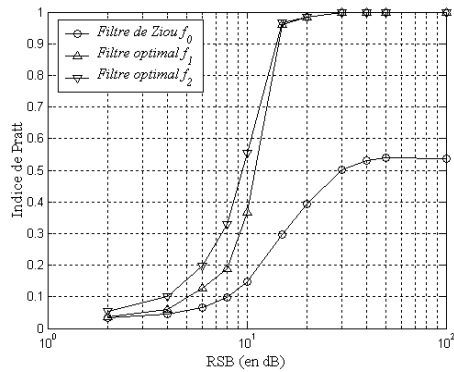
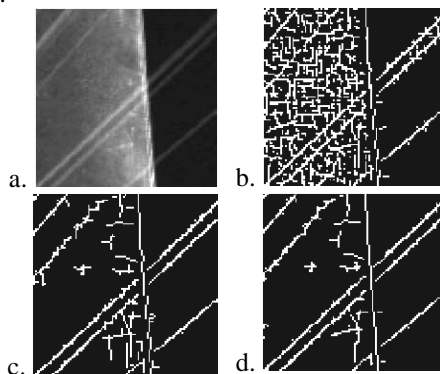
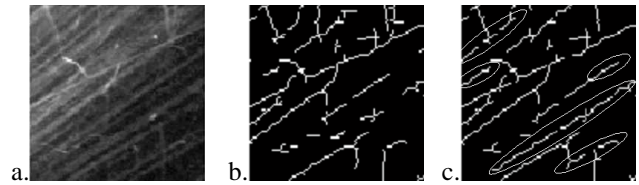


FIG. 4 : Comparaison des performances

Sur l'image de synthèse, les résultats obtenus avec les filtres f_1 et f_2 sont nettement supérieurs (fig. 4) à ceux obtenus avec le filtre de Ziou. Ce dernier ne permet pas d'extraire le contour sur toute sa longueur au moyen d'un seuil unique lors de la binarisation de l'image de gradient (du fait de la variation du niveau de gris du fond de l'image). Le filtre f_2 , construit pour la détection d'un contour de type « exponentielle lissée », donne des résultats supérieurs à ceux obtenus par le filtre f_1 dans le cas d'images bruitées. L'amélioration constatée sur l'indice de Pratt entre l'utilisation des filtres f_1 et f_2 est par exemple de 75% pour un RSB de 8 dB.

Dans le cas d'une image d'épandage de bonne qualité mais présentant de fortes variations de niveau de gris du fait de l'arrière plan (fig. 5), les filtres f_1 et f_2 permettent d'obtenir de meilleurs résultats que le filtre de Ziou. En effet, ces filtres permettent d'obtenir une détection peu influencée par la réflexion de l'arrière plan, alors que le filtre de Ziou ne donne un résultat satisfaisant que dans les zones où l'arrière plan est sombre. Sur les images de bonne qualité, le second filtre f_2 semble fournir des contours légèrement moins bruités que le filtre f_1 , mais la différence reste peu perceptible.

En revanche, dans le cas d'images d'épandage dégradées (fig. 6), le filtre f_2 permet d'améliorer la détection des contours (*i.e.* trajectoires) par rapport au filtre f_1 . Les résultats obtenus sur les images d'épandage confirment ainsi de manière concrète les comportements mis en évidence par les tests pratiqués sur l'image de synthèse.

FIG. 5 : Extrait d'une image d'épandage (a) et contours obtenus avec le filtre de Ziou (b), f_1 (c) et f_2 (d).FIG. 6 : Extrait d'une image d'épandage (a) et contours obtenus avec les filtres f_1 (b) et f_2 (c). Les ellipses indiquent des trajectoires mieux détectées par le second filtre f_2 .

7. Conclusion

Cet article propose deux nouveaux filtres optimisés pour la détection de lignes de crêtes dont la supériorité est mise en évidence par rapport à un filtre de référence de la littérature.

L'un des filtres proposés a été spécifiquement construit pour la détection de contour dont le profil approche l'allure mesurée expérimentalement. Ce filtre est le plus performant pour la détection de trajectoires de granulés dans les images d'épandage et répond aux besoins de l'application ciblée.

Références

- [1] J. F. Canny. *A computational approach to edge detection*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **8**(6), 679-698, 1986.
- [2] R. Deriche. *Using Canny's criteria to derive a recursively implemented optimal edge detector*. International Journal of Computer Vision, **1**, 167-187, 1987.
- [3] S. Sarkar, K. L. Boyer. *On optimal infinite impulse response edge detection filters*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **13**(11), 1154-1171, 1991.
- [4] E. Bourennane, M. Paindavoine, F. Truchetet. *Amélioration du filtre de Canny-Deriche pour la détection des contours sous forme de rampe*. Journal de Traitement du Signal et des Images, **10**(4), 297-310, 1993.
- [5] D. Ziou. *Line detection using an optimal IIR filter*. Pattern Recognition, **24**(6), 465-478, 1991.
- [6] S. Villette, F. Cointault, E. Piron, B. Chopinet. *Centrifugal spreading : an analytical model for the motion of fertiliser particles on a spinning disc*. Biosystems Engineering, **92**(2), 157-164, 2005.
- [7] S. Villette, F. Cointault, B. Chopinet, M. Paindavoine. *Optimizing Hough transform for fertiliser spreading optical control*. Optical Engineering, **45**(2), Article n° 027006, 11 pages, 2006.
- [8] D. Demigny, F. G. Lorca, T. Kamlé, L. Kessal. *Critères de Canny discrets pour la comparaison de filtres détecteurs de contours*. 15^{ème} Colloque GRETSI, Juan-les-Pins, 18-21 septembre 1995.