

Étude d'une nouvelle classe de contours actifs pour la détection de routes dans des images de télédétection

Marie ROCHERY, Ian JERMYN, Josiane ZERUBIA

ARIANA - Projet commun CNRS/INRIA/UNSA

2004 route des Lucioles, BP 93, 06902 Sophia Antipolis Cedex, France

Marie.Rochery@inria.fr, Ian.Jermyn@inria.fr, Josiane.Zerubia@inria.fr

Résumé – Nous proposons dans cet article d'étudier une nouvelle classe de contours actifs d'ordre supérieur. Nous utilisons une énergie quadratique sur l'espace des 1-chaînes afin d'introduire des contraintes globales sur la forme du contour. Cette énergie est proposée dans le cadre de l'extraction automatique de routes sur des images de télédétection.

Abstract – In this paper, we describe a new class of active contours. We propose an energy which is quadratic in the space of 1-chains, as opposed to classical energies which are linear, in order to introduce global constraints on the contour. This energy is applied to the automatic extraction of road networks in remote sensing images.

1 Introduction

Depuis que Kass *et al.* ont introduit les contours actifs dans [1], ces derniers ont été très utilisés pour la segmentation en traitement d'image. Dans leur formalisme originel, les contours actifs consistent en une énergie linéaire définie sur l'espace des 1-chaînes sur le domaine de l'image. Cette énergie est composée de deux termes: un premier terme de nature purement géométrique et un second terme qui reflète l'attache aux données. Les minima de cette énergie représentent des structures importantes de l'image. Cependant, en raison de la linéarité des énergies utilisées, nous pouvons remarquer que les contraintes géométriques standard introduites dans les modèles dépendent de la géométrie locale du contour et sont donc limitées. Il est difficile d'introduire des contraintes *a priori* fortes et spécifiques au type d'objet que l'on souhaite détecter.

C'est pourquoi, dans cet article, nous introduisons une nouvelle classe d'énergies, qui sont des énergies quadratiques sur l'espace des 1-chaînes. Ces énergies, qui s'expriment avec une double intégrale sur le contour, permettent d'introduire des contraintes géométriques globales sur ce dernier. En particulier, nous considérons une énergie capable de modéliser les caractéristiques du réseau routier.

La détection automatique de routes est un problème difficile en raison de leur grande variabilité. Deux catégories d'approches ont été développées: des méthodes semi-automatiques parmi lesquelles [2] qui utilise la programmation dynamique, [3] qui est fondée sur la théorie de l'information ou [4] dans le contexte des contours actifs. Parmi les méthodes entièrement automatiques, citons [5, 6] dans le contexte des contours actifs, [7] qui utilise un modèle stochastique géométrique et plus récemment [8] avec les processus ponctuels marqués.

Dans un premier temps, nous présentons les énergies classiquement utilisées pour les contours actifs en soulignant leur faiblesse quant à la modélisation géométrique qu'elles apportent.

Puis, nous introduisons les énergies quadratiques sur l'espace des 1-chaînes qui permettent d'introduire des contraintes *a priori* sur la géométrie des objets. Nous proposons ensuite un modèle pour l'extraction de réseaux routiers. Nous décrivons les algorithmes utilisés pour l'évolution du contour: nous choisissons d'utiliser la méthodologie par courbes de niveaux. En raison des forces non locales dérivées de l'énergie, nous sommes contraints d'étendre les algorithmes standard utilisés dans le cadre de cette approche. Enfin, nous présentons des premiers résultats de détection.

2 Les énergies linéaires

Les modèles utilisés jusqu'à présent font intervenir des énergies géométriques qui peuvent s'exprimer à l'aide d'une seule intégrale sur le contour. Ce type d'énergie ne permet de saisir qu'une information ponctuelle. C'est le cas par exemple de l'énergie géométrique proposée par Kass *et al.* dans [1] qui s'écrit de la manière suivante:

$$E_g(C) = \alpha \oint |\vec{t}(p)| dp + \beta \oint \kappa^2(p) |\vec{t}(p)| dp \quad (1)$$

où $C : \mathcal{S}^1 \rightarrow \mathbf{R}^2$, $p \rightarrow C(p)$ est une courbe plane fermée, $\vec{t}(p) = \frac{\partial C}{\partial p}(p)$ est le vecteur tangent à la courbe C en p et $\kappa(p)$ est la courbure au point p .

La force dérivée de cette énergie est fonction de quantités géométriques (comme la courbure par exemple) qui sont définies localement. Les contraintes géométriques que l'on peut introduire avec ce type d'énergie sont donc ponctuelles et ainsi réduites. Ces termes ne tiennent pas compte de la géométrie de l'objet que l'on souhaite détecter. Typiquement, le seul terme d'*a priori* utilisé dans ce type de modèle est un terme de régularisation qui minimise la longueur et la courbure du contour.

3 Les énergies quadratiques

Afin d'introduire des contraintes géométriques plus strictes dans le modèle, nous proposons d'introduire une nouvelle classe d'énergies quadratiques sur l'espace des 1-chaînes du type suivant:

$$E_g(C) = \oint \oint \vec{t}(p) \cdot \mathbf{F}(C(p), C(p')) \cdot \vec{t}(p') dp dp' \quad (2)$$

où \mathbf{F} est un tenseur covariant pondérant les interactions entre deux points de la courbe d'abscisses p et p' .

Le fait d'introduire une double intégrale sur le contour permet de modéliser des interactions complexes entre différents points de la courbe proches ou non. La non-localité de ce type d'énergie permet donc d'introduire des contraintes beaucoup plus fortes d'un point de vue géométrique.

En particulier, nous nous intéressons à un cas particulier de l'énergie quadratique précédente lorsque le tenseur \mathbf{F} est proportionnel à la matrice identité:

$$E_q(C) = - \oint \oint \vec{t} \cdot \vec{t}' \Psi(|C(p) - C(p')|) dp dp' \quad (3)$$

avec

$$\Psi(l) = \sinh^{-1}(1/l) + l - \sqrt{1 + l^2} \quad (4)$$

où $|C(p) - C(p')|$ représente la distance dans le plan entre les points d'abscisses p et p' . Les variables primées et non primées indiquent que les quantités ont été évaluées aux abscisses p' et p . La fonction Ψ est décroissante, a le même comportement que $1/2l$ quand $l \gg 1$ et devient moins singulière pour $l < 1$, elle se comporte alors en $\ln(2/l)$.

La dérivation de cette énergie donne une force non locale qui s'exprime avec une intégrale sur le contour, ce qui est nouveau par rapport aux énergies classiquement utilisées. La force normale au point de la courbe d'abscisse p qui permet au contour d'évoluer vers un minimum de l'énergie est la suivante:

$$F_q(p) = - \oint \frac{\vec{\mathbf{R}}}{|\mathbf{R}|} \cdot \vec{n}' (\sqrt{1 + (h/|\mathbf{R}|)^2} - 1) dp' \quad (5)$$

où $\vec{\mathbf{R}} = C(p) - C(p')$ représente le vecteur pointant du point d'abscisse p' vers le point d'abscisse p et \vec{n}' représente le vecteur normal extérieur à la courbe au point d'abscisse p' .

Le signe de la force d'interaction est tel que des vecteurs tangents anti-parallèles se repoussent. Ceci est mis en évidence sur la figure 1. Cette énergie purement géométrique favorise la formation de motifs labyrinthiques: un cercle évolue vers une forme à plusieurs bras dont les bords sont parallèles. La force d'interaction permet de créer des « bosses », qui ensuite s'étirent comme des « bras ». La façon dont les bras commencent à se former peut être expliquée de la façon suivante. Si l'on considère une forme soumise seulement à la contrainte de régularisation, alors si le coefficient de la courbure est positif, n'importe quelle forme initiale converge vers un cercle, puis disparaît. Si le coefficient était négatif, elle divergerait. C'est ce qui se produit localement et qui donne naissance à des bosses qui se transforment en bras. En effet, la force d'interaction pourrait s'écrire comme la somme de deux termes F_{long} et

F_{court} , qui correspondent à des interactions entre des points de la courbe plus ou moins proches, avec F_{court} égal à:

$$F_{court}(s) = -\beta \int_{- \epsilon}^{+ \epsilon} \frac{\vec{\mathbf{R}}}{|\mathbf{R}|} \cdot \vec{n}' [\sqrt{1 + (h/|\mathbf{R}|)^2} - 1] ds' \quad (6)$$

où ϵ est une borne appropriée. Si $\epsilon\kappa$ est petit (κ représentant la courbure au point s), alors on peut approcher la courbe par un arc de cercle sur le domaine $s - \epsilon \leq s' \leq s + \epsilon$. Dans ce cas, $|\mathbf{R}| \approx |s - s'|$ et $\frac{\vec{\mathbf{R}}}{|\mathbf{R}|} \cdot \vec{n}' \approx \kappa \frac{|s - s'|}{2}$. On trouve alors que $F_{court}(s) \propto \kappa$. Le coefficient effectif de la courbure peut alors devenir négatif et donner ainsi naissance à des bosses.

Ces contraintes modélisent la géométrie des réseaux routiers en prenant en compte le fait que la largeur d'une route est à peu près constante. Notons que cette énergie a été citée dans [9] pour illustrer la formation de motifs labyrinthiques dans le domaine biologique.

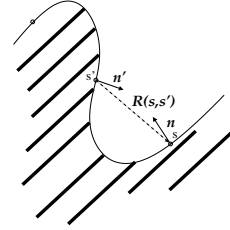


FIG. 1 – Influence de la force d'interaction

4 Modèle proposé

Pour la modélisation des réseaux routiers, nous proposons une énergie composée de deux termes qui prennent en compte deux aspects fondamentaux des routes à savoir les aspects géométriques (la largeur d'une route est à peu près constante et sa courbure est relativement faible) et les aspects radiométriques (les routes sont contrastées par rapport à leur environnement):

$$E(C) = E_g(C) + \lambda E_i(C) \quad (7)$$

où λ pondère l'importance du terme d'attache aux données par rapport au terme géométrique.

L'énergie géométrique totale que nous utilisons est composée de trois termes, le premier terme étant la longueur de la courbe (terme énergétique classique non quadratique de régularisation de la courbe), le second terme étant l'énergie d'interaction quadratique que nous avons décrite précédemment et le troisième terme étant un terme contrôlant l'extension des bras, proportionnel à l'aire $\mathcal{A}(C)$ de l'intérieur du contour.

L'énergie géométrique s'écrit donc:

$$E_g(C) = \oint |\vec{t}(p)| dp - \beta \oint \oint \vec{t}(p) \cdot \vec{t}(p') \Psi(R(p, p')) dp dp' + \Pi \mathcal{A}(C) \quad (8)$$

Nous considérons comme termes énergétiques d'attache aux données deux termes fonction du gradient de l'image: un premier terme linéaire classique qui attire le contour vers les zones de fort gradient et un second terme quadratique qui permet de renforcer les contraintes géométriques au niveau des points

dont les vecteurs gradients sont élevés et opposés, et les vecteurs tangents anti-parallèles:

$$E_i(C) = -\oint |\nabla I(C(p))|^2 |C'(p)| dp - \oint \oint \vec{t}(p) \cdot \vec{t}(p') \nabla I \cdot \nabla I' \Psi(R(p,p')) dp dp' \quad (9)$$

La minimisation de cette énergie donne l'équation d'évolution suivante:

$$\vec{n} \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = -\kappa - \Pi + \lambda |\nabla I|^2 \kappa - \lambda (\nabla(|\nabla I|^2) \cdot \vec{n}) - 2\lambda \oint (\nabla I' \cdot \nabla \nabla I \cdot \vec{n}') \Psi(R(p,p')) dp' - 2\lambda \oint \left(\frac{\vec{R}}{|\vec{R}|} \cdot \vec{n}' \right) (\beta + \lambda \nabla I \cdot \nabla I') \Psi'(R(p,p')) dp' \quad (10)$$

5 Évolution du contour

Pour faire évoluer le contour vers un minimum de l'énergie, nous avons choisi d'utiliser la méthodologie des courbes de niveau introduite par Osher et Sethian dans [10]. L'idée de cette méthode est de faire évoluer le contour à travers une fonction de dimension supérieure ϕ . Ainsi, au lieu de travailler directement sur le contour, nous utilisons une fonction définie comme la distance signée au contour.

La forme quadratique de l'énergie entraîne une force faisant intervenir une intégrale sur le contour dans l'équation d'évolution. Le calcul de cette force nécessite une attention particulière, car elle ne peut pas être calculée directement comme pour les forces classiques. En effet, si l'on devait calculer la force pour un point qui ne se trouve pas sur le contour, il faudrait extraire la courbe de niveau qui correspond à ce point pour calculer les interactions entre les différents points de la courbe de niveau.

Cette réflexion mène, dans un premier temps, à l'extraction du contour de manière explicite et précise. Pour interpoler le contour, nous utilisons une technique d'interpolation Essentiellement Non Oscillatoire (ENO) à l'ordre 2. L'algorithme utilisé est décrit de manière précise dans [11]. Une fois le contour extrait, la force d'interaction est calculée de manière précise. Les points du contour sont redistribués en points équidistants que l'on utilise pour calculer l'intégrale de manière discrète. Puis, nous utilisons une méthode d'extension de la force qui construit la force en tout point du domaine considéré à partir de la force au niveau zéro. Cette méthode d'extension se fonde sur la résolution d'une équation aux dérivées partielles. Nous voulons étendre une quantité q (la force) définie sur le contour $C(t)$. De façon naturelle, nous pouvons étendre cette quantité q de manière à ce qu'elle reste constante sur la normale à la courbe $C(t)$. Nous utilisons l'équation aux dérivées partielles suivante, proposée dans [12]:

$$q_\tau + \text{sign}(\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \cdot \nabla q = 0, \quad (11)$$

où $\text{sign}(\phi)$ représente la fonction signe.

La solution de cette équation vérifie $\nabla \phi \cdot \nabla q = 0$, ce qui signifie que la variation de q le long de la normale est nulle. Notons également que la force calculée au niveau du contour reste la même. En effet, pour un point du contour, $\text{sign}(\phi)$ est nul et donc $q_\tau = 0$.

Il est également possible d'utiliser la méthode de la « Vitesse étendue » (en anglais: *extension velocity*) décrite par Sethian dans [13] ou la méthode proposée par Gomes et Faugeras dans [14], mais la résolution de l'EDP précédente nous a paru être la méthode la plus précise.

Pendant l'évolution, il est nécessaire de stopper le calcul de la fonction de courbes de niveau et de reconstruire cette dernière comme étant la distance signée au niveau zéro. C'est l'étape de réinitialisation. Généralement, il est possible d'utiliser la méthode proposée par Sussman *et al.* dans [15]. Cette méthode est fondée sur la résolution de l'équation aux dérivées partielles suivante:

$$\psi_t = \text{sign}(\phi) (1 - |\nabla \psi|) \quad (12)$$

où ϕ est la fonction courbe de niveau courante. La fonction ψ est initialisée avec la fonction ϕ . Résoudre cette équation pour ψ donne une nouvelle valeur pour ϕ qui conserve la courbe de niveau zéro et telle que $|\nabla \phi| = 1$. Si l'étape de réinitialisation est réalisée assez souvent, la fonction ϕ initiale est souvent proche d'une distance signée et peu d'itérations sont nécessaires.

Cependant, l'énergie particulière que nous utilisons demande une précision plus grande. Il est donc nécessaire d'ajouter une contrainte de conservation de l'aire à cette équation pour éviter que le niveau zéro de ϕ se déplace. Cette amélioration est proposée dans [16] par Sussman et Fatemi.

6 Résultats

Dans un premier temps, nous montrons l'évolution d'un cercle soumis à une force purement géométrique (figure 2). Le cercle évolue vers une forme complexe à plusieurs bras connectés de largeur à peu près constante. Cette géométrie modélise celle des routes. Remarquons que l'énergie introduit des contraintes géométriques fortes, mais qui peuvent s'adapter à différents types de réseaux routiers avec des largeurs plus ou moins grandes et des intersections quelconques.

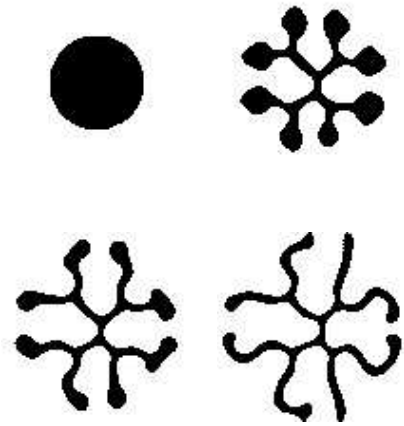


FIG. 2 – Exemple d'évolution purement géométrique.

Un premier résultat est montré sur une image réelle (figure 3). La route n'est pas évidente à détecter car l'image présente plusieurs zones où le gradient est élevé (bord des routes mais

aussi bord des champs), la route présente également une discontinuité au niveau du coin supérieur droit. L'initialisation du contour est faite par deux cercles centrés sur la route. Le terme énergétique quadratique permet la création de bras qui s'étendent le long de la route. Avec un terme non quadratique, la route n'aurait pas été détectée entièrement.

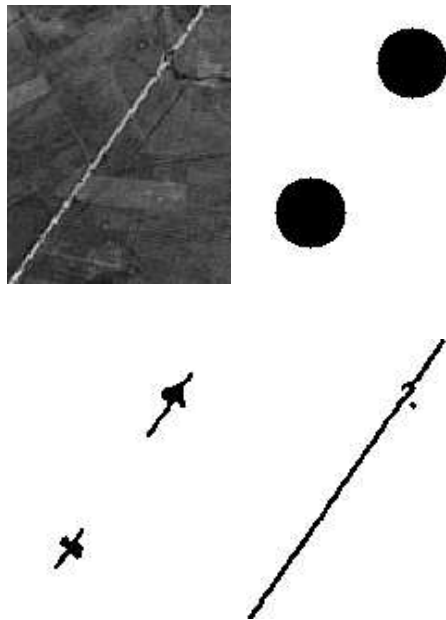


FIG. 3 – Exemple d'extraction d'une route - Différentes étapes de l'évolution.

7 Conclusion

Dans le cadre des contours actifs, nous introduisons des énergies quadratiques permettant une nouvelle modélisation. La nouveauté réside dans le fait que les énergies que nous proposons sont quadratiques sur l'espace des 1-chaînes, contrairement aux énergies classiquement utilisées qui sont linéaires. Le fait d'utiliser des énergies quadratiques permet d'introduire dans la modélisation une interaction entre les différents points du contour. Le terme géométrique de l'énergie permet donc de contrôler la forme globale du contour.

L'utilisation des énergies quadratiques présente en contrepartie de nouvelles difficultés. Ces énergies sont plus complexes à étudier. Leurs propriétés ne sont pas triviales et les minima locaux ne sont pas évidents à exhiber. D'un point de vue numérique, le calcul de la force non-locale, faisant intervenir une intégrale sur le contour, doit être réalisé avec précaution: le contour doit être extrait explicitement pour parvenir à un calcul précis. Ensuite, des techniques d'extension de la force doivent être utilisées pour calculer la force sur tout le domaine considéré. Nous avons donc étudié plusieurs méthodes pour pouvoir calculer la force sur le contour avec précision et l'étendre sur tout le domaine.

Les simulations permettent de montrer l'efficacité du terme géométrique, puisque la force contraint le contour à former des « bras » de largeur à peu près constante et connectés entre eux. Elles illustrent le fait que l'énergie quadratique permet

d'introduire des contraintes fortes sur la géométrie globale du contour. La simulation sur une image réelle montre le potentiel de l'énergie proposée pour une application à la détection de routes sur des images de télédétection.

Références

- [1] M. Kass, A. Witkin, et D. Terzopoulos. Snakes: Active contour models. *Int'l J. Comp. Vis.*, pages 321–331, 1988.
- [2] N. Merlet et J. Zerubia. New prospects in line detection by dynamic programming. *IEEE Trans. PAMI*, 18(4):426–431, 1996.
- [3] D. Geman et B. Jedynek. An active testing model for tracking roads in satellite images. *IEEE Trans. PAMI*, 18:1–14, 1996.
- [4] W. M. Neuenschwander, P. Fua, L. Iverson, G. Székely, et O. Kubler. Ziplock snakes. *Int'l J. Comp. Vis.*, 25(3):191–201, 1997.
- [5] P. Fua et Y. G. Leclerc. Model driven edge detection. *Mach. Vis. and Appl.*, 3:45–56, 1990.
- [6] H. Mayer, I. Laptev, H. Mayer, A. Baumgartner, et C. Steger. Automatic road extraction based on multi-scale modeling, context and snakes. *Int'l Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32:106–113, 1997.
- [7] M. Barzohar et D. B. Cooper. Automatic finding of main roads in aerial images by using geometric-stochastic models and estimation. *IEEE Trans. PAMI*, 18 - 2:707–721, 1996.
- [8] C. Lacoste, X. Descombes, J. Zerubia, et N. Baghdadi. Extraction de réseaux linéiques à partir d'images satellitaires par processus Markov objet. *GRETSI*, 2003.
- [9] R. E. Goldstein. Nonlinear dynamics of pattern formation in physics and biology. Dans *Pattern Formation in the Physical and Biological Sciences*. Addison Wesley Longman, 1997.
- [10] S. Osher et J. A. Sethian. Fronts propagating with curvature dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations. *J. Comp. Physics*, 79:12–49, 1988.
- [11] K. Siddiqi, B.B. Kimia, et Chi-Wang Shu. Geometric shock-capturing ENO schemes for subpixel interpolation, computation and curve evolution. *Graphical Models and Image Processing*, 59:278–301, 1997.
- [12] D. Peng, B. Merriman, S. Osher, H. Zhao, et M. Kang. A PDE-based fast local level set method. *J. Comp. Physics*, 155:410–438, 1999.
- [13] J. A. Sethian. *Level Set Methods and Fast Marching Methods: Evolving Interfaces in Geometry Fluid Mechanics, Computer Vision and Materials Science*. CUP, 1999.
- [14] J. Gomes et O. Faugeras. Reconciling distance functions and level sets. *LNCS*, 1682:70–81, 1999.
- [15] M. Sussman, P. Smereka, et S. Osher. A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow. *J. Comp. Physics*, 114:146–159, 1994.
- [16] M. Sussman et E. Fatemi. An efficient, interface-preserving level set redistancing algorithm and its application to interfacial incompressible fluid flow. *SIAM J. Sci. Comput.*, 20(4):1165–1191, 1997.