DECOMPOSITION DE COURBES DIGITALISEES EN SEGMENTS DE DROITES (POUR LE SUIVI DES RESEAUX LINEAIRES SUR LES IMAGES SPOT)

Isabelle DESTIVAL - Hervé Le MEN

RESUME

Reconnaître si un arc digital est ou non la représentation exacte d'une droite de l'espace continu ou effectuer la décomposition d'un arc en segments de droites sont des problèmes quotidiens pour les habitués de l'analyse d'image.

Après avoir rappelé l'intérêt de ce problème dans diverses applications, et plus spécifiquement pour l'étude des réseaux linéaires sur des images SPOT, nous ferons un petit historique bibliographique des recherches sur le sujet. Nous indiquerons les procédés habituellement utilisés en production (basés sur la propriété de la corde), avec leurs limitations.

Puis, nous présenterons les propriétés permettant de caractériser une droite à partir du codage de la chaîne et de l'explicitation des critères de Freeman et nous indiquerons un algorithme correspondant.

En conclusion, nous donnerons les raisons pour lesquelles nous avons choisi cette procédure et les perspectives d'application de cette méthode.

I. INTRODUCTION

Les méthodes d'analyse des images de télédétection se rapprochent aujourd'hui des méthodes utilisées dans d'autres domaines comme la robotique ou l'analyse de scène. En effet, avec les hautes résolutions, nous n'étudions plus seulement des pixels (en analysant leur radiométrie); nous sommes amenés à définir des ensembles de pixels qui ont une signification thématique. Ces ensembles peuvent être identifiés par la caractérisation de leur structure ou de leur forme et l'on procède alors à une élévation symbolique de l'information.

En télédétection comme dans d'autres applications, il y a deux types d'objets qui nécessitent des méthodes d'analyse différentes : les objets surfaciques et les objets linéaires.

Dans le second cas, il est clair que l'on manipule rapidement des chaînes (listes de points). Pour effectuer un suivi de réseau routier ou ferroviaire à partir d'une image SPOT, on utilise les données provenant de la chaîne de traitement suivante: image originale → image des lignes de crête de la fonction de gris → image seuillée → squelette → suivi d'arcs (passage en mode vecteur) Æ décomposition des arcs en "segments" de droites →

définition des objets "arcs" portant les attributs :

longueur
direction moyenne
nombre de segments
liste des longueurs des segments
liste des directions

On a donc besoin d'effectuer la décomposition d'un arc en segments de droites.

En ce qui concerne l'analyse des surfaces après une segmentation d'image, on caractérise souvent un objet par son contour et l'analyse de la forme peut passer par la représentation du contour en mode vecteur puis en liste de segments de droites.

II. HISTORIQUE

En 1970, Freeman formula trois propriétés devant être vérifiées par une droite digitale [FREEMAN 70] , [PAVLIDIS 77] :

- **C1**: Il existe au plus deux directions de base (directions de la trame) et elles sont **consécutives** (leurs codes, au sens défini en 4.1 , diffèrent seulement de 1 modulo 8).
- **C2**: L'une de ces deux valeurs apparaît toujours seule.
- **C3**: Les apparitions successives de cette valeur **isolée** sont réparties de la façon la plus uniforme possible.

Ce troisième critère est quelque peu flou, et toutes ces propriétés nécessitent une preuve mathématique.

En 1974, Rosenfeld démontre qu'un arc digital est un segment de droite si et seulement si il possède la propriété de la corde [ROSENFELD 74]. Il prouve alors les deux premiers critères de Freeman et des propriétés de régularité sur la chaîne codée donnant une description du troisième critère de Freeman. Ces propriétés avaient aussi la forme d'un modèle "consécutif-isolé" (en Anglais: "consecutive-singly pattern").

Brons, en 1974, puis Arcelli et Massarotti, en 1975 et 1978, se limitèrent au cas d'une droite de pente rationnelle. Brons montra que les droites digitales ont une structure hiérarchique.

En 1980, Wu donna une expression exacte au troisième critère en étendant le modèle "consécutif-isolé" à tous les niveaux de la hiérarchie, ceci pour des pentes même irrationnelles [WU 80]. En 1982, il prouva que les trois critères constituent aussi une condition suffisante pour la présence d'une droite et donna un algorithme simple pour reconnaître une droite par le code de sa chaîne [WU 82].

En 1985, Hung donna une nouvelle condition nécessaire et suffisante que nous appellerons en Français "absence d'irrégularités" ("absence of unevenness") et donna un algorithme pour la détection de "segments irréguliers" ("uneven segments"), ceci nécessitant seulement l'examen du premier niveau de la hiérarchie [HUNG 85].

En 1986, Wu a démontré que l'ensemble des codes de chaînes représentant des droites digitales (langage sur {0,1,2,3,4,5,6,7}) est un langage dépendant du contexte ("context-sensitive language") [WU 86].

III. ALGORITHMES COURAMMENT UTILISES (PROPRIETE DE LA CORDE)

III.1. Quelques définitions

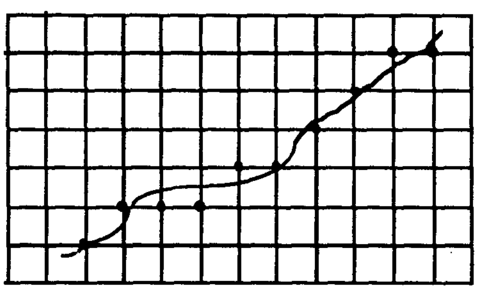


Fig. 1.a

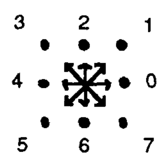


Fig. 1.b

- *Digitalisation (ou numérisation) d'une courbe* (fig.1.a): si l'on superpose à la courbe continue la grille de la trame, lorsque la courbe intersecte soit une ligne soit une colonne, on conserve alors le point de la grille le plus proche. s'il y a deux points à égale distance, on conserve celui de plus faible valeur.

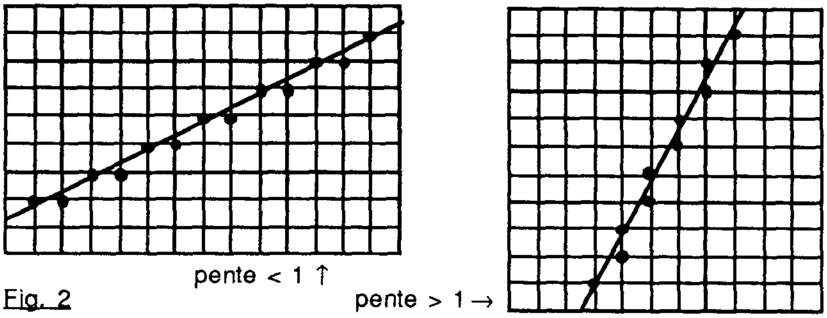


Fig. 2

- *Cas particulier: digitalisation d'une droite*: on distingue deux cas selon que la pente est inférieure ou supérieure à 1 (fig.2): on définit la suite de points (x_i, y_i) de i=1 à L par:

$$\text{si } |a| \leq 1 : \begin{cases} X_i = i \\ Y_i = \text{Nint}(a.x_i + b) \end{cases}$$

$$\text{et} \quad \text{si } |a| > 1 : \begin{cases} X_i = \text{Nint}\left(\frac{Y_i - b}{a}\right) \\ Y_i = i \end{cases}$$

- *Un arc (digital)* est donc une suite $(M_i)_{i \in I}$ de couples de N^2, avec I intervalle de N, tels que $d(M_i, M_{i+1}) = 1$ (d: distance du sup.).
- *Un segment* est une sous-suite $(M_k)_{k \in K}$ avec K intervalle de N inclus dans I.
- *Un arc (resp. un segment) sera dit rectiligne* s'il correspond à la numérisation d'une droite.
- *Un segment unitaire* est constitué par deux points successifs d'un arc digital.
- *longueur d'un arc*: c'est le nombre de segments unitaires.

III.2. Propriété de la corde

La propriété de la corde s'exprime comme suit :Un arc digital A possède la propriété de la corde si

$\forall\, c,d \in A,\ \forall\, p=(x,y) \in \overline{cd},\ \exists\, e=(h,k) \in A : \max\{|x-h|, |y-k|\} < 1$, où $\overline{cd}$ est le segment de droite compris entre les points c et d.

- ♦ La propriété rigoureuse de la corde ne permet pas une implémentation pratique raisonnable. On en applique en général des approximations heuristiques qui visent à vérifier que tous les points de l'arc digital ne s'éloignent pas trop de la corde qui joint les pixels extrémités de l'arc.

Soit L la longueur de l'arc A; A sera considéré comme un segment de droite si les points M_2 à M_{L-1} sont "proches" de la droite réelle joignant les points M_1 et M_L.

Si on entend par "proche" une distance inférieure ou égale à 0.5, alors la condition est suffisante mais non nécessaire. Pour une distance plus grande, la condition n'est plus suffisante.

- ♦ Le problème de la décomposition consiste à trouver la plus grande valeur d telle que les points M_1 à M_d soient alignés; puis recommencer à partir du point M_d jusqu'à épuisement des deux points. Ceci peut s'envisager de deux manières:

- la recherche en avant:

Si le segment [1,n] correspond à une droite, alors tester si le point n+1 appartient à cette droite. Avec cette méthode, il est nécessaire d'utiliser une distance au moins égale à 1, sinon, on ne trouve comme droites que les axes et les diagonales principaux. Mais une distance de 1 n'est pas assez sélective.

- la recherche en arrière:

On trace la droite entre les points 1 et L (si L est la longueur de l'arc); s'il existe un point s'en écartant de plus de 1 pixel, on essaie la droite [1,(L-1)], etc...jusqu'à ce que l'on tombe sur une droite et on a alors le premier segment. On recommence alors à partir du point suivant ce segment pour trouver le deuxième, etc...Lorsque le premier segment est court, ou lorsque les segments sont nombreux, cette méthode est très longue car on aura balayé presque tous les points de l'arc pour trouver le premier segment et ainsi de suite. On a donc recours a un moyen classique pour accélérer l'algorithme: *La recherche en arrière par dichotomies successives*: comme précédemment, on part de [1,L], mais s'il y a échec sur une droite, au lieu de prendre [1,L-1], on prend [1,L/2]. S'il y a à nouveau échec (dans ce cas, on a gagné du temps à ne pas examiner tous les points intermédiaires : L-1, L-2, ... , (L/2)+1), on passe à L/4. Si au contraire on trouve une droite, c'est qu'on a dépassé l'extrêmité du premier segment et on retourne en 3L/4 (d'où le compromis du choix de L/2).

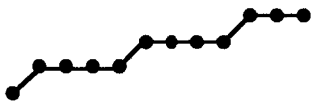
IV. CODAGE DE CHAINES ET CRITERES DE FREEMAN

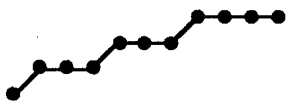
IV.1. Définition

- *Codage de chaîne (ou codage de Freeman)*: c'est la liste des directions (codées selon fig.1.b) des segments unitaires.

Exemples:

Arc :





Codage : 1 000 1 000 1 00   1 00 1 001 000

On a supposé que les arcs étaient orientés de la gauche vers la droite; dans le cas contraire, on a : 4 4 5 4 4 4 5 4 4 4 5 et 4 4 4 5 4 4 5 4 4 5 .

IV.2. Critère de Wu

On doit d'abord définir l'opération de dérivation de chaînes qui, appliquée de façon itérative, va constituer la hiérarchie que nous avons déjà mentionnée (§ 2.).

Pour pouvoir définir cette dérivée, il faut que la chaîne vérifie les deux premiers critères de Freeman C1 et C2 (modèle consécutif-isolé). On dérive alors la chaîne en laissant tomber le motif isolé et en remplaçant les suites de l'autre motif par leur longueur. On obtient alors une nouvelle chaîne constituée de nouveaux motifs. Si cette chaîne vérifie le modèle consécutif-isolé, on pourra elle aussi la dériver, etc...

nota: dans le calcul, on pourra toujours ramener une chaîne vérifiant le modèle consécutif-isolé à une chaîne de 0 et de 1 en remplaçant par convention le motif isolé par 1 et l'autre par 0 (ce qui revient à une rotation et/ou symétrisation de l'arc).

Exemple:

chaîne codée 1 00 1 0 1 0 1 0 1 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 0 1 0 1 0 1 0 0

1^{er} niveau 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 2

$2^{ème}$ niveau 3 3 2

$3^{ème}$ niveau 2

Critère de Wu: Si le modèle consécutif-isolé est vérifié à tous les niveaux de la hiérarchie, alors l'arc est rectiligne. (c'est le cas dans l'exemple précédent).

On peut aussi le formuler ainsi:
Si la chaîne est infiniment dérivable, alors l'arc est rectiligne.
Cette condition est suffisante mais pas encore nécessaire : la chaîne suivante ne la vérifie pas, et pourtant, il s'agit bien d'une droite (on pourra le vérifier par le critère de Hung, Cf. 4.3):

1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 1 0

2 2 1 1 : pas de motif isolé.

Ce problème ne se pose que lorsque, à un certain niveau de la hiérarchie, l'un des deux bouts correspond au minimum strict des deux longueurs présentes sur le motif non isolé; ici, ceci se produit dès la chaîne de départ:

1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 1 0

Pour régler ce cas, Wu a modifié légèrement le calcul de la dérivée: il suffit de traiter les bords en supprimant ceux qui sont dans ce cas avant dérivation.

Le critère de Wu devient alors une condition nécessaire et suffisante. On présente l'algorithme correspondant en 4.4.

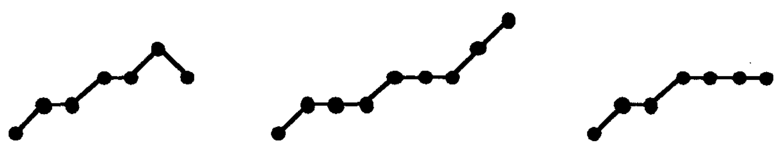
IV.3. Critère de Hung

C'est la propriété d' "absence d'irrégularités". On doit ici définir les segments irréguliers.

On appelle somme d'un segment la somme des valeurs de ses symboles (les symboles étant les codes de Freeman). Par exemple, le segment 2 3 2 a pour somme 7.

On dit alors que deux segments de longueurs égales sont irréguliers si leurs sommes diffèrent d'au moins 2; on parle alors aussi de paire irrégulière : "uneven pair".

Exemple:



1 01 0 1 7	1 0 0 1 0 01 1	1 0 1 0 0 0
paire irrégulière de longueur 1	paire irrégulière de longueur 2	paire irrégulière de longueur 3

On voit aisément que la présence de paires irrégulières minimales de longueur 1 correspond à la violation du premier critère de Freeman ("consécutif"); pour la longueur 2, c'est le non respect du deuxième critère ("isolé"), les longueurs 3 et 4 correspondent respectivement aux deux critères sur la première dérivée, puis ce seront les deux critères dans les dérivées suivantes...

Critère de Hung: un arc digital est rectiligne si et seulement si le code de la chaîne ne comporte aucune paire irrégulière.

L'examen des paires irrégulières à toutes les longueurs remplace ici la construction d'une hiérarchie. Si nous nous reportons à la figure 3, nous constatons qu'il est impossible de construire une paire irrégulière sur la chaîne d'origine. Il s'agit donc d'une droite.

IV.4. Algorithme

Donnons d'abord les raisons pour lesquelles nous avons choisi le critère de Wu:

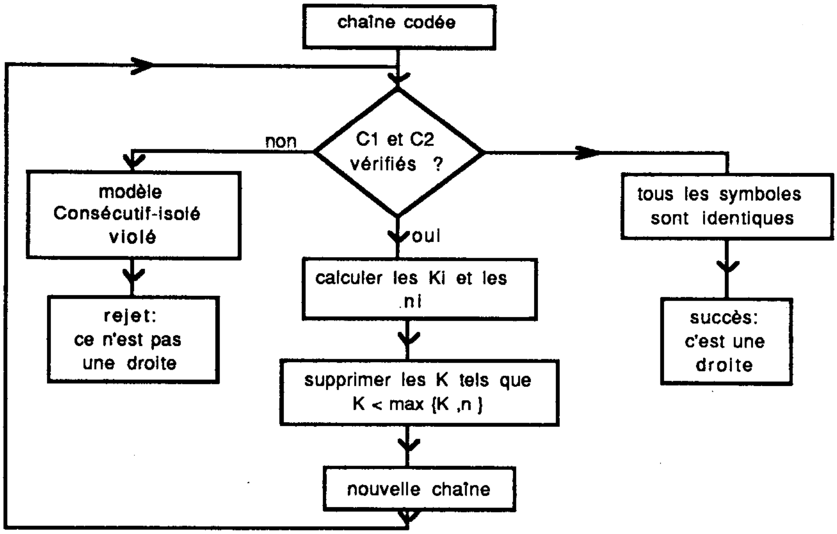
- il est plus performant que celui de Hung qui est proche de $O(n^2)$, alors que celui de Wu est en $O(n)$,
- il est plus rigoureux que les approximations de la corde : il y a séparation entre la généralisation et la projection.
- pour la décomposition d'un arc en segments de droites: en cas ambiguïté sur l'appartenance des points pivots à un segment ou à l'autre, le Critère de Wu permet une gestion heuristique plus aisée.
- Au paragraphe 3, on a formulé une condition parfois suffisante pour qu'un arc soit la représentation exacte de la droite joignant le centre de ses deux pixels extrémités, M_1 et M_L. Cependant, il existe des cas où un arc est la digitalisation d'une droite qui ne passe pas par les centres de ses extrémités. Ces propriétés rejetteront un tel arc rectiligne alors que le critère de Wu le reconnaît.

l'algorithme:

Définissons d'abord les symboles K_i et n_i qui vont servir à la dérivation. Ce sont les résultats de comptage des paquets du symbole non isolé.

Une chaîne dérivable peut donc s'écrire de la façon suivante:

$$\underbrace{0\ldots0}_{K_1},1,\underbrace{0\ldots0}_{n_1},1,\underbrace{0\ldots0}_{n_2},1,\ \ldots\ ,1,\underbrace{0\ldots0}_{n_p},1,\underbrace{0\ldots0}_{K_2}$$



V. CONCLUSION, PERSPECTIVES

Les éléments linéaires sont les éléments de base pour l'interprétation automatique d'un réseau (routier par exemple), i.e. ce sont eux qui portent les premiers éléments d'*information topologique*.

La décomposition en segments de droites est indispensable pour le chaînage d'arcs détectés : pour le suivi des routes, on a besoin de connaître les dernières portions rectilignes d'un arc afin d'établir des critères de *prolongation* "intelligents" (dépendant du contexte); pour les frontières de zones, on en a besoin lors des opérations de *fermeture* de zones. Cette décomposition permet également de reconnaître les *ormes* usuelles du parcellaire agricole (les parcelles sont des unions de convexes à côtés parallèles).

On voit donc que cette phase est le prélude à une élévation du niveau de complexité des objets manipulés: ceci est utile à trois niveaux:

- pour l'interprétation automatique
- pour la reconnaissance automatique
- pour la généralisation automatique.

(En cartographie, on appelle généralisation tout problème obéissant à des règles pré-définies et faisant intervenir des décisions, comme: des déplacements d'objets pour une meilleure lisibilité, des sélections à opérer lors de changement d'échelle, etc...).

La décomposition en segments de droites est donc un préalable indispensable pour l'introduction dans un système expert.

VI. BIBLIOGRAPHIE

FREEMAN H., "Boundary encoding and processing". Picture Processing and Psychopictorics, B.S. Lipkin and A. Rosenfeld, Eds. New York: Academic, 1970, pp. 241-266.[FREEMAN 70]

ROSENFELD A., "Digital straight line segments". IEEE Trans. Computer, vol. C-23, pp.1264-1269, 1974.[ROSENFELD 74]

PAVLIDIS T., "Structural Pattern Recognition". New York: Springer-Verlag, 1977.[PAVLIDIS 77]

WU L., "On the Freeman's conjecture about the chain code of a line". Proc. 6th Int. Conf. Pattern Recognition, Miami 1980, pp.32-34.[WU 80]

WU L., "On the chain code of a line". IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. PAMI-4, pp. 347-353.[WU 82]

HUNG S., "On the straightness of digital arcs". IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. PAMI-7, pp. 203-215.[HUNG 85]

WU L., WENG F., "Chain code for a line segment and formal language". Proc. 8th Int. Conf. Pattern Recognition, Paris 1986, p.1124.[WU 86]