



CONSTRUCTION ROBUSTE DU GRAPHE DES
PRIMITIVES SEGMENTS ASSOCIEES AU SQUELETTE

P.FABRE

E.S.I.E.E Département Informatique

Laboratoire Intelligence Artificielle et Analyse d'Images E.S.I.E.E B.P. 99 93162 Noisy-le-Grand Cedex

RESUME

De nombreuses formes que l'on analyse dans les images numériques, telles que les caractères manuscrits et beaucoup d'objets d'inspection automatique, peuvent être décrites par leur squelette. Pour être utilisable, le squelette doit être segmenté en primitives segments, et ces primitives structurées sous forme de graphe attribué. En présence de bruit et de déformations, ce graphe se trouve souvent fortement altéré ce qui est nuisible pour la phase de reconnaissance.

Nous présentons ici une méthode de construction du graphe des primitives segments associées au squelette, robuste vis-à-vis du bruit, qui utilise quatre règles. Ces règles ne portent que sur les noeuds et sont purement locales, ce qui permet une grande vitesse de traitement. Les résultats expérimentaux sur des images réelles montrent que le temps de traitement est remarquablement petit devant le temps de squelettisation. En réitérant l'application des règles, on obtient une simplification itérative du squelette, tout à fait compétitive par rapport aux méthodes agissant sur des contours lissés.

SUMMARY

Many patterns occurring in digital image processing, like handwritten characters and many objects in automatic visual inspection, can be described by their skeletons. Practically, the skeleton must then be decomposed into segments, and structured as an attributed graph. In a real image, due to noise and structural perturbations, the graph is often strongly disturbed.

We present here a robust method for the construction of the segment primitive graph, using four rules. These rules only involve nodes and are purely local, allowing thus a good computation speed. The experimental results on real images show that the computation time is remarkably short compared with the skeletonization time. The iterative application of the rules leads to a simplification method of the skeleton, which can compete with the methods dealing with smoothed contours.

1 Introduction

Il y a classiquement deux grandes familles de méthodes pour la reconnaissance des formes : les méthodes statistiques et les méthodes structurelles, de nombreux systèmes combinant d'ailleurs les deux approches. Une chaîne de reconnaissance des formes structurelle comprend généralement :

- l'acquisition et la mémorisation de l'image
- la segmentation en objets (définis comme des composantes connexes de l'image)
- l'extraction de la description des objets par le contour ou le squelette
- l'extraction des primitives pour chacun des objets identifiés
- la mise en correspondance de l'ensemble des primitives associé à chaque objet, *convenablement structuré*, avec l'ensemble des primitives d'un objet de référence (issu du modèle dans le cas de l'inspection automatique ou de la reconnaissance des caractères,

de l'autre vue dans le cas de la Vision Stéréo, d'une image prise à un autre instant dans le cas de la Vision du mouvement).

Le squelette est une description d'un objet dans une image, issue de l'axe médian [BLUM64], qui correspond intuitivement à la ligne médiane de l'objet, située à égalité de distance des bords. L'intérêt essentiel du squelette, par rapport au contour, est qu'il fait abstraction de la notion d'épaisseur. Il est donc directement applicable à des caractères, ou à des objets filiformes en général. L'axe médian *muni de sa fonction de distance* peut décrire un objet quelconque.

La représentation de l'axe médian par un graphe est délicate, car l'axe médian n'étant en général pas connexe, il faut gérer les composantes connexes. C'est pourquoi on a introduit la ligne médiane, qui elle est connexe. Comme il existe plusieurs définitions du squelette, suivant les auteurs, précisons que l'on va considérer un squelette qui vérifie les propriétés suivantes [DAVIES et PLUMMER] ¹ : *le squelette contient les points*



essentiels de l'axe médian, il est connexe, il est d'épaisseur 1. Cette dernière propriété doit être ajoutée pour faciliter le suivi du squelette.

On dispose aujourd'hui d'une vaste panoplie d'algorithmes de squelettisation (algorithmes d'amincissement séquentiel, algorithmes fondés sur la transformation en distance). Il existe également de nombreux algorithmes d'approximation par des segments, du type de ceux qui ont été développés pour les contours (RAMER, PAVLIDIS-HOROWITZ, WALL-DANIELSON). Il est bien connu que la présence de bruit sur le contour crée des branches parasites. On a construit des procédures d'élagage, fondées par exemple sur la pente de la transformée en distance (si de nombreuses publications montrent des résultats satisfaisants sans élagage des branches parasites, c'est que le contour des objets analysés est très lisse). D'autre part, il est souvent utile d'éliminer les trous dûs au bruit.

A côté de cette procédure générale, on trouve d'autres approches intéressantes :

- on peut effectuer l'approximation polygonale sur le contour de l'objet, puis squelettiser directement le polygone par un algorithme spécialisé. La méthode fonctionne assez bien malgré le problème délicat des jonctions.
- on peut dans certains cas se passer de l'approximation polygonale, et traiter le graphe en fusionnant les arcs et les noeuds suivant certains critères [BERTRAND87] précisés plus loin.

L'étape de construction du graphe des primitives segments, en tant que telle, a été assez peu abordée dans la littérature. Nous allons nous attacher ici à la construction robuste du graphe des primitives segments.

2 Création du graphe des primitives associées au squelette

Lorsque l'on traite un contour fermé, l'approximation par des primitives segments fournit un polygone et le graphe associé est un cycle. Dans le cas d'un squelette, Ce graphe est un arbre lorsque l'objet est sans trou² (simplement connexe) et n'a pas de propriétés particulières dans le cas contraire. La structure informatique de base est donc différente dans le cas des contours fermés et dans le cas des squelettes.

On considère dans la suite des objets simplement connexes.

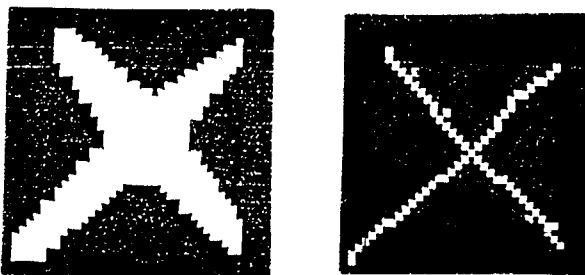


fig 1 : exemples du contour et du squelette d'un objet simplement connexe

L'extraction des primitives segments va être plus délicate dans le cas d'un squelette que d'un contour fermé, car la structure

d'arbre induit des points de branchement (pixels dont la connexité est strictement supérieure à 2). Le parcours de l'arbre dépend des choix effectués sur les points de branchement. On peut alors diriger le choix de manière à optimiser un critère sur les primitives segments obtenues, par exemple maximiser la longueur des primitives obtenues. Ce critère conduisant à un algorithme exponentiel difficile à mettre en oeuvre, on peut utiliser un algorithme de parcours heuristique de graphes qui maximise à chaque étape la longueur du segment construit [FABRE88]. Au niveau du graphe, cela oblige à gérer des points de jonction qui ne sont pas des extrémités. Autrement, on peut arrêter le segment courant chaque fois que l'on rencontre un point de branchement. C'est ce que l'on a fait ici.

Dans le cas des caractères latins ou des chiffres arabes peu bruités, les squelettes sont assez simples, et souvent parfaitement 8-connexes. Une méthode puissante ne se justifie pas. On s'intéresse plutôt dans cet article au cas d'objets complexes, du type de ceux que l'on rencontre en inspection automatique, aux caractères au graphisme compliqué, comme ceux des alphabets chinois ou japonais.

3 Traitement des points critiques

Choix des points critiques

Les points de segmentation sont a priori :

- les points de branchement
- les points de courbure maximum
- les points où l'erreur d'approximation dépasse le seuil fixé δ_{max}

Par analogie avec l'approximation polygonale, nous appellerons ces points de segmentation potentielle les *points critiques*. Dans le cas des formes complexes auxquelles nous nous intéressons (du type de celle de la figure 1), il y a de nombreux points critiques. Les prendre tous en compte conduirait à un graphe surabondant et à un manque de robustesse. L'étape suivante de la création du graphe est donc le traitement des points critiques.

L'élimination des segments courts est pratiquée dans la quasi-totalité des travaux présentés dans la littérature. Il y a essentiellement deux raisons :

- le bruit induit une perturbation sur le contour qui se traduit par des branches parasites au niveau du squelette. On peut éliminer certaines branches sur un critère de longueur.

- les segments courts n'ont pas un attribut d'orientation fiable.

Par exemple dans [LAM88], on élimine toutes les feuilles dont la longueur est inférieure à $\text{Min}(0.08 * (m + n), 4)$, où m et n sont les dimensions horizontale et verticale de l'image (on ne traite pas les primitives qui ne sont pas des feuilles). Notons que l'élimination d'un segment court qui n'est pas une feuille demande un traitement plus élaboré des noeuds, et qu'elle est rarement effectuée dans la littérature.

Pour construire le graphe de manière robuste, il faut aussi :

- reconstituer les véritables points de branchement malgré le bruit, qui, en déformant légèrement le "corps" du squelette, a tendance à éclater les points de branchement. Un remède pratique est de fusionner les noeuds suivant un critère de proximité.
- rattraper des erreurs dans l'approximation polygonale, et donc permettre la fusion de deux arcs après suppression d'une feuille parasite. C'est pourquoi on pourra autoriser la fusion de 2 arcs si leurs directions sont suffisamment proches. Dans [BERTRAND87], on effectue la fusion des noeuds si leur distance est inférieure à un seuil d_n et la fusion des arcs si leur écart angulaire est inférieur à un seuil donné (« compactage angulaire »).

Choix de la structure du graphe

Les noeuds du graphe sont les points critiques, munis de 4 attributs : l'abscisse, l'ordonnée, le nombre d'arcs connectés et la liste de leurs numéros. Les arcs sont les primitives segments munies de 4 attributs : l'abscisse x_i et l'ordonnée y_i du milieu du segment, la longueur l_i , l'angle avec l'horizontale θ_i et les numéros des noeuds extrémités. On aurait aussi bien pu choisir le graphe dual, mais cette description est plus proche de la réalité géométrique.

4 L'algorithme de construction robuste du graphe

Les différentes opérations vont donc être :

- la fusion des noeuds,
- la fusion des arcs,
- l'élimination des arcs dûs au bruit.

Puisque l'on a affaire à un arbre, l'application des règles de fusion des noeuds et de fusion des arcs implique un choix parmi les arcs adjacents. On adopte alors une stratégie à base de règles, qui sont appliquées séquentiellement à l'ensemble des noeuds du graphe :

On détermine d'abord le degré δ_i du noeud courant et on applique une procédure qui est fonction de ce degré :

- $\delta_i = 1$: on applique la règle d'élimination des extrémités courtes, puis la règle d'élagage des arcs parasites :

1. règle d'élimination des extrémités courtes ³ :
si le noeud courant est l'extrémité d'un arc (qui est donc ici nécessairement une feuille) de longueur inférieure à l_{min} , alors le noeud extrémité (de degré 1) est supprimé.

2. règle d'élagage des branches parasites
L'élagage se fait en calculant la pente moyenne de la transformée en distance et en éliminant l'extrémité de la branche si cette pente est supérieure à un seuil (cette règle est détaillée dans [CORDELLA86]).

L'utilisation de cette règle déclenche un module spécifique, qui n'est activé que dans ce cas. Le fait d'appliquer d'abord la règle d'élimination des extrémités courtes entraîne que l'on n'a pas besoin de tester l'élagage - assez coûteux - sur les segments parasites de longueur inférieure à l_{min} .

- $\delta_i = 2$: on applique la règle de suppression des noeuds :

3. règle de suppression des noeuds :
Un noeud est supprimé si l'angle relatif entre les deux arcs adjacents $\theta_i - \theta_j$ est inférieur à un seuil θ_{min} .

- $\delta_i \geq 2$: on applique d'abord la règle d'élimination des extrémités courtes, puis la règle de fusion des noeuds décrite ci-dessous pour tous les noeuds adjacents, puis la règle de suppression des noeuds :

4. règle de fusion des noeuds :
Deux noeuds s_i et s_j sont fusionnés si leur distance (dans notre description, la longueur de la primitive (s_i, s_j)) est inférieure à d_{min} .

le noeud s_i résultant est le milieu des 2 noeuds préexistants s_i et s_j ,

Cet ordre-d'application permet de récupérer une erreur de segmentation causée par l' algorithme de la corde.

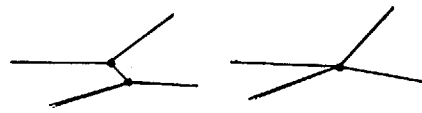


figure 2 : exemple de fusion des noeuds

5 Mise en oeuvre de l'algorithme de construction

→ on constate expérimentalement que l'ordre d'application des règles est important dans le traitement d'un noeud. Au lieu de traiter l'ensemble des noeuds en une seule passe comme c'est le cas dans l'algorithme présenté, on aurait pu traiter d'abord tous les noeuds extrémités ($\delta_i = 1$), puis les noeuds complexes ($\delta_i \geq 2$). L'avantage est que le nombre de règles à appliquer aux noeuds complexes est réduit à 2.

Les inconvénients sont le tri préalable des noeuds - peu coûteux - et surtout le fait que le traitement des noeuds extrémités ne peut pas être fait en une passe. En effet, la suppression d'un noeud par les règles 1 ou 2 diminue d'une unité le degré des arcs adjacents, qui peuvent alors devenir à leur tour des noeuds extrémités. Cela justifie le choix effectué.

→ On effectue une application itérative des règles. L'application de la règle de suppression des noeuds peut conduire à une modification des attributs d'un noeud déjà traité telle qu'une nouvelle règle doive lui être à nouveau appliquée:

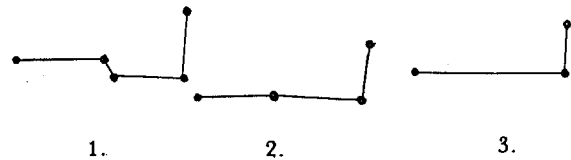


fig. 3 : exemples pour la règle de suppression des noeuds (a) et pour la règle de fusion (dans le cas d'un cycle)

→ Il y a trois valeurs de seuil à fixer : l_{min} , d_{min} , θ_{min} .

La longueur minimum des arcs à retenir est conditionnée par :

- la statistique du bruit, qui peut théoriquement fournir une mesure de la probabilité qu'un arc soit dû au bruit. Malheureusement, cette probabilité est difficile à estimer en pratique.
- la fiabilité de l'orientation θ_i . Un calcul permet de définir une longueur minimum compatible avec une précision donnée sur l'orientation. En prenant une précision de 10 degrés, on trouve $l_{min} = d_{min} = 6$. l'écart angulaire minimum est pris égal à 10 degrés, en accord avec les choix précédents.

→ Dans le cas d'un objet comportant des trous, on doit éliminer des cycles parasites.

Un exemple de résultat obtenu est montré sur les figures 4 et 5.



6 Simplification itérative

La méthode de construction du graphe présentée au paragraphe précédent peut être appliquée un certain nombre de fois, avec des paramètres de moins en moins fins, pour produire des graphes de plus en plus simples.

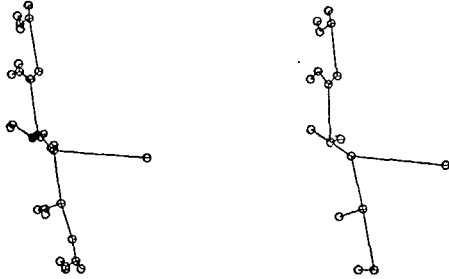


fig. 4a et 4b: graphe initial (image de gauche) et résultat de la première itération (image de droite)

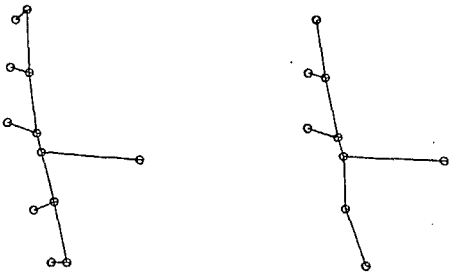


fig. 5a et 5b : résultats de la deuxième (image de gauche) et de la troisième itération (image de droite)

Cette approche de simplification itérative est voisine de la représentation multi-résolution qui a été développée récemment [DILL87], [PIZER87]. La différence essentielle se trouve dans la mise en oeuvre : on travaille ici sur le graphe des primitives au lieu de travailler sur l'objet lui-même. Pour un objet complexe, cela représente un gain de temps appréciable.

L'algorithme de construction du graphe a été programmé en PASCAL en utilisant des structures de données dynamiques. Nous donnons ici les temps de calcul sur APOLLO DN 3000 (mesurés à partir de l'instant où l'image se trouve sous forme de tableau en mémoire centrale).

opération	temps de traitement (en s)
cas de la croix (image binaire 64*64, 13 noeuds)	
squelettisation et approximation	: 1.17
création du graphe initial	: 0.06
construction robuste	: 0.05
cas de l'avion (image binaire 256*256, 30 noeuds dans le graphe initial)	
squelettisation et approximation	: 9.78
création du graphe initial	: 0.10
construction robuste du graphe	: 0.07

Conclusion

Nous avons étudié un algorithme général de construction du graphe des primitives segments associées au squelette d'un objet dans une image. Une fois déterminé un ensemble de points critiques potentiels, l'algorithme examine séquentiellement les noeuds du graphe en appliquant quatre règles : élimination des extrémités courtes, élagage des arcs parasites, suppression des noeuds, fusion des noeuds.

L'algorithme utilise des connaissances a priori sur la classe d'images et la classe d'objets analysés :

- le niveau de bruit dans l'image, qui permet de régler l_{min} et d_{min} .
- le nombre d'EULER, qui permet de fixer le paramètre de modification topologique et qui influe sur le comportement de l'algorithme. L'opérateur peut alors agir sur la complexité du graphe en ajustant d_{min} et θ_{min} .

En itérant l'algorithme, avec des paramètres l_{min} , d_{min} et θ_{min} croissants, on obtient une famille de graphes correspondant à une résolution variable sur la représentation.

remerciements

Nous remercions Fabrice ALBERT et Denis CHOULETTE, étudiants à l'ESIEE, pour leur collaboration active à ces travaux.

Bibliographie

[BLUM64] H. BLUM, " A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape " in *Proceedings of Symp. for Perception of Speech and Visual Form*, Cambridge, MA, MIT Press, 1964.

[DAVIES81] E.R. DAVIES, A. P. N. PLUMMER, «Thinking Algorithms : A Critique and a New Methodology », *Pattern Recognition*, vol. 14, pp. 53-63, 1981.

[BRADY84] M. BRADY, H. ASADA, « Smoothed Local Symmetries and Their Implementation », A.I. Lab., M.I.T., Cambridge, *Memo 757*, 1984.

[CORDELLA86] L. CORDELLA, A. MARCELLI, «Normalization and Decomposition of Thin Lines Representing Hand-printed Characters », in *Proceedings of the 8th ICPR conference, Paris, oct. 1986*.

[BERTRAND87] G. BERTRAND, C. GOBERT, A. MOR-ELLE, P. PIGEON, « Reconstitution de l'attitude d'un avion », *colloque MARI 87*, La Villette, Paris.

[DILL87] A.R. DILL, M.D. LEVINE, P.B. NOBLE, « Multiple Resolution Skeletons », *IEEE Trans. on PAMI*, vol. PAMI-9, no 4, juillet 1987.

[PIZER87] S.M. PIZER, W.R. OLIVER, S.H. BLOOMBERG, « Hierarchical Shape Description Via the Multiresolution Symmetric Axis Transform », *IEEE Trans. on PAMI*, vol. PAMI-9, no. 4, juillet 1987.

[FABRE88] P. FABRE, « Extraction Directe de Primitives Segments à Partir du Squelette », Actes du 2ème colloque TIPI, AUSOIS, FRANCE, avril 1988.

[SEKITA88] I. SEKITA, K. TORAICHI, R. MORI, K. YAMAMOTO, H. YAMADA, «Feature Extraction of Hand-written Japanese Characters by Spline Functions for Relaxation Matching », *Pattern Recognition*, vol. 21, no. 1, pp. 9-17, 1988.

[LAM88] L. LAM, C.Y. SUEN, «Structural Classification and Relaxation Matching of Totally Unconstrained Handwritten Zip-code Numbers », *Pattern Recognition*, vol. 21, no. 1, pp. 19-31, 1988.