

Les graphes comme outil de mise en œuvre de méthodes de segmentation hiérarchique d'images

François Angot, Marinette Revenu, Abderrahim Elmoataz, Régis Clouard

GREYC - UPRESA CNRS 6072 - ISMRA, 6 B^d Maréchal Juin, 14050 Caen cedex
Francois.Angot@greyc.ismra.fr

RÉSUMÉ

La segmentation d'images consiste souvent à extraire des objets afin de les caractériser et d'interpréter les images. Parmi les différentes stratégies utilisées pour arriver à un tel résultat, une des plus prometteuses est la segmentation hiérarchique qui analyse les images selon un degré croissant de résolution. Celle-ci fait alors intervenir des entités reliées entre elles par différentes relations. Par définition, les graphes sont susceptibles de représenter toutes ces relations, plus ou moins explicitées lors des traitements. Afin d'utiliser aisément les graphes lorsque cela est opportun, nous avons développé une bibliothèque d'opérateurs de traitement d'images, incluant une structure générale de graphe permettant de représenter des images 2D et 3D. Cette bibliothèque comporte également des opérateurs de traitement de ces graphes en tant qu'outils de segmentation. Nous présentons ici cette bibliothèque d'opérateurs ainsi qu'une application faisant intervenir les graphes dans la résolution d'un problème de quantification d'images biomédicales.

Introduction

Dans un grand nombre de problèmes de traitement et d'analyse d'images, un des objectifs est de localiser une population d'objets. Que ces objets graphiques correspondent ou non à des objets physiques, la segmentation d'images consiste à les extraire afin de les caractériser et de les interpréter. Pour arriver à un tel résultat, plusieurs stratégies sont couramment utilisées, dont la segmentation hiérarchique qui analyse les images selon un degré croissant de résolution.

La segmentation hiérarchique d'images fait intervenir des entités reliées entre elles par différentes relations. Par définition, les graphes sont susceptibles de représenter toutes ces relations, plus ou moins explicitées lors des traitements.

Afin d'utiliser aisément les graphes lorsque cela est opportun, nous avons développé une bibliothèque d'opérateurs de traitement d'images, incluant une structure générale de graphe permettant de représenter des images 2D ou 3D. Nous avons également réalisé des opérateurs de traitement de ces graphes en tant qu'outils de segmentation.

Nous étudions d'abord dans quelles mesures la structure de graphe permet de représenter les relations intervenant au cours d'une segmentation hiérarchique. Nous présentons ensuite les choix faits quant à l'implantation d'une bibliothèque d'opérateurs de traitement d'images incluant ces graphes. Nous détaillons enfin un exemple de problème

ABSTRACT

Image segmentation usually consists in extracting objects from images for characterization and interpretation purposes. Among the various strategies used to achieve this goal, one of the most promising ones is hierarchical segmentation which analyses images according to an increasing resolution level. Such a strategy brings into play entities linked together by several kinds of relations. According to their mathematical definition, graphs are good candidates for representing all kinds of relations, whether they are made explicit or not during the segmentation process. In order to provide a convenient means to handle graphs, we have developed a library of image processing operators based on a general graph structure that allows to represent 2D and 3D images. This library includes graph processing operators that can be used as segmentation tools. Here is this library described and used in an application where graphs help giving a smart solution to the quantifying of biomedical images.

pour lequel la résolution est faite en utilisant les graphes de voisinage.

1 Segmentation hiérarchique

La segmentation d'une image peut être qualifiée de hiérarchique quand elle fait intervenir plusieurs phases successives de traitements, à différentes échelles [1]. Les niveaux de segmentation correspondent alors à différentes images d'objets, entre lesquels existent des relations de dépendance. Par exemple, dans le cas d'images bidimensionnelles, la structure de quadrees [2] définit des relations de dépendance : dans une image I_n , un carré correspond à quatre carrés plus petits dans l'image I_{n+1} . Deux stratégies de résolution de problèmes se distinguent dans l'approche hiérarchique :

- Traiter une image en adoptant une stratégie de segmentation ascendante consiste en général à réaliser une sur-segmentation de l'image, puis à regrouper les objets ainsi obtenus. Entre un état de la segmentation et l'état suivant, des régions de l'image sont fusionnées et des relations existent entre ces régions.
- Lorsqu'une image est segmentée avec une stratégie descendante, la précision de la segmentation croît avec le nombre d'étapes. Le passage d'un état à un état suivant se fait par la décomposition des régions en sous-régions. Il peut être utile de disposer d'une

description des relations qui lient une région et les régions qui en sont déduites à l'étape suivante.

Dans les deux cas, les graphes permettent de modéliser l'historique du traitement, et de représenter les relations entre les objets segmentés. Parmi les méthodes de fusion et de division de régions, l'approche par pyramides de graphes [2] est un exemple d'utilisation de ces relations de voisinage.

2 Outil graphe

Un graphe est un objet mathématique constitué d'un ensemble de sommets et d'un ensemble d'arêtes reliant certains de ces sommets [3]. Les graphes sont donc particulièrement adaptés à la représentation de relations entre les éléments d'une ou plusieurs images.

2.1 Relations « intra-image »

A toutes les étapes de la résolution d'un problème, l'image présente une population d'objets (régions), organisés selon une certaine géométrie. Il est particulièrement intéressant de modéliser cette population à l'aide d'un graphe dont les sommets correspondent aux objets et sont valués par des grandeurs intrinsèques à ces objets : niveau de gris moyen, surface, etc. Par ailleurs, la répartition spatiale des objets induit des relations de proximité (partition de Voronoï de l'espace et graphe de Delaunay), qui sont représentées par les arêtes du graphe, pondérées par plusieurs types de distance entre les extrémités : distance euclidienne minimale entre les objets, différence de niveau de gris moyen ou d'orientation, etc.

2.2 Relations « inter-images »

Lors de chaque opération élémentaire impliquée dans la résolution d'un problème, l'image (ou sa représentation) est modifiée par le traitement. Une relation est alors instaurée entre les données et les résultats de l'opérateur de traitement : la relation « faire partie de ». Les sommets d'un graphe sont associés aux objets des images et les arêtes modélisent les liens entre les objets d'entrée et les objets de sortie de l'opérateur [4].

Grâce à la modélisation d'une image par un graphe valué et pondéré, un certain nombre d'opérations (notamment la fusion et division de régions) peuvent être simplifiées en les appliquant sur des données structurées et moins volumineuses que des images.

Les graphes permettent ainsi de représenter plusieurs niveaux de segmentation (figure 1). Au sein d'une même image, les arêtes du graphe correspondent aux relations de voisinage entre des objets à regrouper. Entre plusieurs images, la structure obtenue représente les fusions ou les divisions successives.

3 Environnement de développement

Afin de résoudre un problème de traitement d'images, l'utilisation d'une bibliothèque d'opérateurs est particulièrement efficace : elle permet de réaliser et de tester rapidement différentes séquences de traitements. Nous avons

développé la bibliothèque PANDORE [5] dans laquelle chaque opérateur correspond à une opération élémentaire.

- Il est accessible sous forme d'une commande UNIX. La syntaxe d'utilisation étant standardisée, l'interfaçage de la bibliothèque avec des systèmes automatiques a été rendu possible.
- Il traite plusieurs types de données (images d'entiers, de réels, cartes de régions, graphes). Ce polymorphisme libère l'utilisateur des contraintes liées au choix d'un opérateur en fonction du type de la donnée à traiter.
- Il peut être enchaîné avec d'autres pour réaliser une application, résolvant un problème spécifique. Le système d'exploitation UNIX offre en particulier la possibilité de rediriger les entrées et les sorties des commandes, et facilite ainsi l'enchaînement des opérateurs.

Nous avons développé une structure de graphes valués et pondérés sous la forme d'un objet C++. Nous lui avons associé des opérateurs généralisant les opérations de traitement des images de pixels : binarisation, érosion, croissance de composantes (sous-graphes au lieu de régions), etc.

Le développement de ces opérateurs s'est accompagné de la mise en place d'une stratégie permettant de résoudre certains sous-problèmes par l'intermédiaire d'un graphe : transformation d'une image en graphe, valuation et pondération du graphe, opérations de segmentation du graphe, reconstruction d'une image à partir du graphe obtenu.

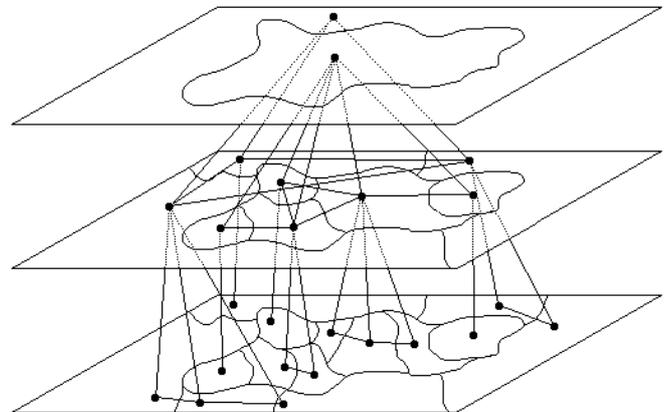


Figure 1 : représentation de plusieurs niveaux de segmentation.

4 Exemple de résolution de problème

Sur une image tridimensionnelle de cellules de culture, acquise au microscope confocal à balayage laser, nous souhaitons quantifier les contacts focaux des cellules avec leur support. Ce travail est actuellement mené en collaboration avec le Centre François Baclesse, Centre Régional de Lutte Contre le Cancer de Caen. Pour cela, des protéines caractéristiques de ces structures sont mises en évidence par immunofluorescence. Elles apparaissent comme des taches claires à la périphérie des cellules. L'obtention d'une mesure rapportée à chaque cellule passe par l'exploitation des relations d'appartenance d'un contact focal

à une cellule. Nous allons illustrer comment la flexibilité des graphes permet d'atteindre cet objectif.

4.1 Analyse du problème

L'image est composée d'une vingtaine de plans de 256x256 pixels. Grâce à la forme des cellules posées sur la lamelle (figure 2), deux zones de l'image sont extraites afin de fournir deux types d'informations : contacts focaux dans les plans inférieurs de l'image 3D (figure 3), et position des noyaux des cellules dans les plans supérieurs. Nous utilisons donc la forme tridimensionnelle des objets pour créer deux images 2D à partir de l'image initiale.

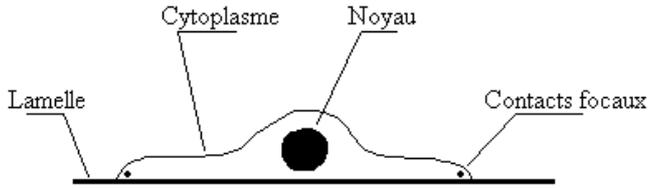


Figure 2 : coupe schématique d'une cellule cultivée sur une lamelle.

4.2 Segmentation morphologique

Les opérateurs de morphologie mathématique (ouverture, chapeau haut-de-forme) permettent progressivement de décomposer la première image : (1) distinction entre le fond et les objets, (2) localisation du bord des cellules (figure 4), (3) localisation des petits objets, (4) localisation des contacts focaux près du bord des cellules (figure 5).

Cependant, les opérateurs de type morphologique sont sensibles à la taille des éléments que nous voulons détecter et nous avons été amené à imposer la résolution des images : voxels de $0.4 \times 0.4 \times 0.4 \mu\text{m}^3$.

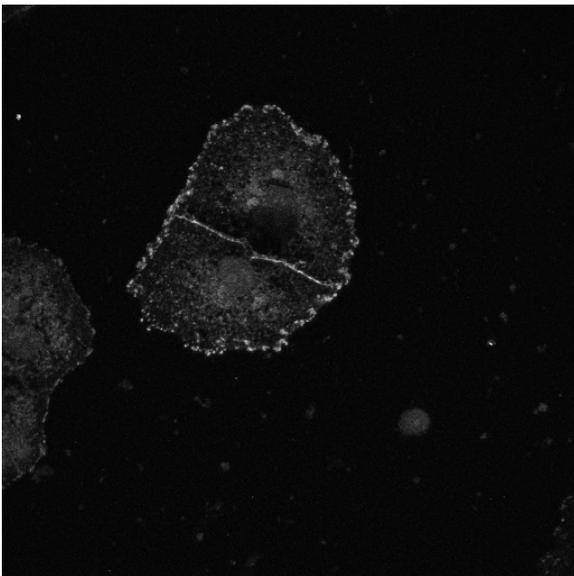


Figure 3 : projection des plans inférieurs de l'acquisition.

Nous pouvons alors calculer plusieurs grandeurs globales concernant l'image : la surface des objets détectés, le niveau de gris moyen de ces objets, la taille du bord des cellules.

Pour l'image présentée, les contacts focaux représentent 1275 pixels, le niveau de gris moyen de ces pixels est environ 117 et le bord des cellules compte 3999 pixels.

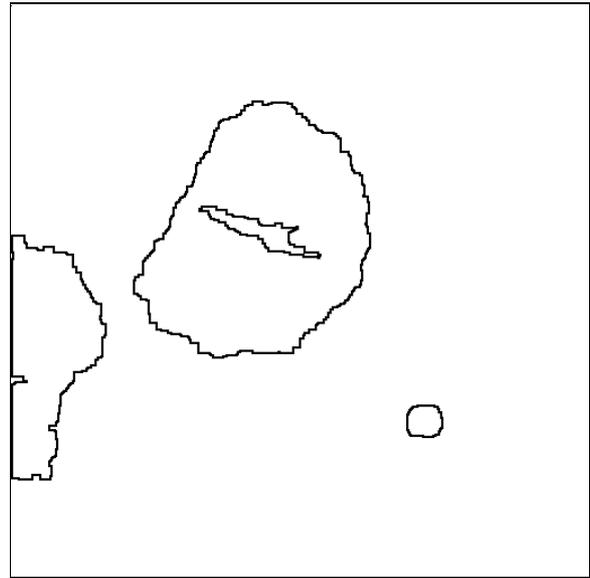


Figure 4 : délimitation des cellules.

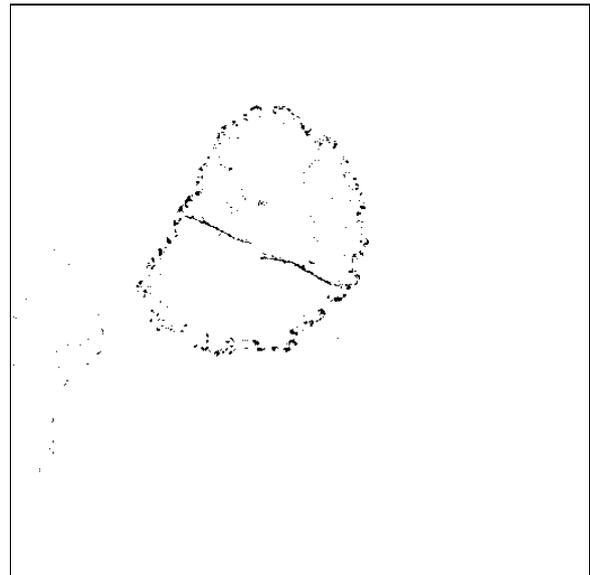


Figure 5 : localisation des contacts focaux.

En complément de ces résultats, les opérateurs de morphologie mathématique permettent de localiser les noyaux des cellules à partir de la seconde partie de l'image 3D.

4.3 Représentation par graphes

A partir des deux populations d'objets, les noyaux de cellules et les contacts focaux (figure 6), nous pouvons calculer la partition de Voronoï de l'image 2D et déduire le graphe de Delaunay associé (figure 7). Ce graphe peut alors être utilisé selon deux points de vue : en tant qu'outil de représentation des informations et en tant qu'objet à segmenter.

D'une part, le graphe sert à représenter les relations de proximité entre les contacts focaux et les noyaux de cellules (figure 7). Il permet également de modéliser le regroupement des contacts focaux en paquets relatifs à une même cellule

(figure 8). Sur l'exemple, les objets se rassemblent en trois groupes correspondant aux trois cellules présentes dans l'image.

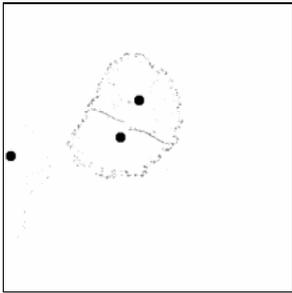


Figure 6 : ensemble des deux populations.

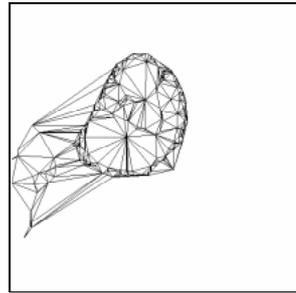


Figure 7 : graphe de Delaunay correspondant.

D'autre part, le graphe permet de tenir compte de la nature de l'objet (noyau ou contact focal) grâce à la valuation des sommets, et de la distance entre les objets grâce à la pondération des arêtes. Nous utilisons ces informations pour distinguer les arêtes à couper et les arêtes à conserver. Nous obtenons ainsi un ensemble de sous-graphes (figure 8).

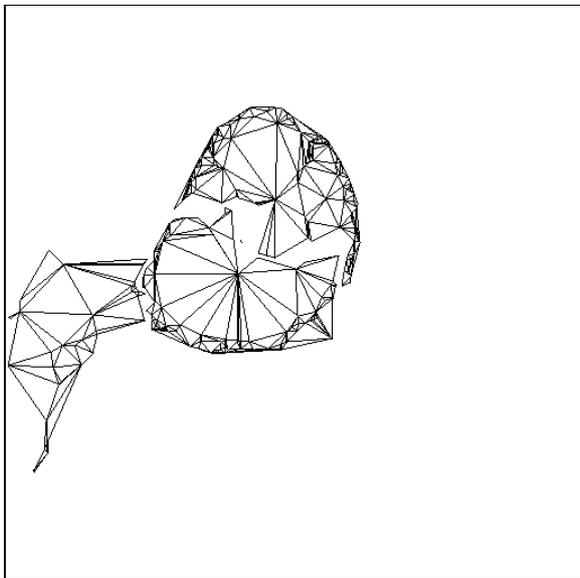


Figure 8 : dépendances des contacts focaux vis-à-vis des noyaux.

Une fois les contacts focaux répartis en groupes relatifs aux cellules, nous avons la possibilité de calculer des grandeurs relatives à chacun de ces groupes (nombre de pixels, niveau de gris moyen de ces pixels). Il reste cependant à distinguer différentes parties dans l'ensemble des pixels correspondant aux bords des cellules.

5 Conclusion

Au cours de la résolution d'un problème de segmentation, nous montrons donc que les graphes ont un intérêt à deux niveaux. Pour une population d'objets, ils sont un outil de modélisation, permettant de simplifier des opérations de fusion et de division. Pour une suite d'opérations, les graphes

fournissent un support afin de représenter les liens entre les différents états de résolution d'un problème.

L'utilisation des graphes de voisinage au sein de la bibliothèque Pandore a déjà permis d'aborder la localisation de massifs de cellules tumorales dans des images 2D de coupes histologiques [6], [7]. Enfin, l'indépendance des graphes vis-à-vis de la dimension des images permet de les impliquer facilement dans le traitement d'images 3D. Nous utilisons actuellement cette propriété dans l'analyse d'images tridimensionnelles de tissus biologiques. Nous voulons représenter et analyser la répartition des cellules qui y sont présentes.

Remerciements

Ce travail a été mené dans le cadre du Pôle « Traitement et Analyse d'Images » de Basse-Normandie. Une allocation de recherche est accordée à François Angot par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Sont également remerciés Séverine Cruet et François Sichel du Centre François Baclesse, pour la part qu'ils ont pris dans l'acquisition des images et pour les connaissances qu'ils ont apportées à propos du contenu de ces images.

Références

- [1] A. Toet. « Hierarchical clustering through morphological graph transformation », *Pattern Recognition Letters*, 12 ; pp. 391-399 ; 1991.
- [2] J.-P. Cocquerez, S. Philipp, « Analyse d'images : filtrage et segmentation », Enseignement de la Physique, Traitement du signal, Masson, Paris, 1995.
- [3] J.-E. Mazille. « Analyse de structures complexes par la théorie des graphes », *La Revue de Métallurgie - CIT / Science et Génie des Matériaux*, n°2 ; pp. 223-232 ; Février 1994.
- [4] E. Bertin. *Diagrammes de Voronoï 2D et 3D : applications en analyse d'images*, thèse de doctorat de l'Université J. Fournier, Grenoble, 1994.
- [5] R. Clouard, A. Elmoataz, F. Angot. « PANDORE : une bibliothèque et un environnement de programmation d'opérateurs de traitement d'images », *Rapport interne du GREYC, ISMRA de Caen*, 1997.
- [6] F. Angot, R. Clouard, A. Elmoataz, R. Revenu. « Neighborhood graphs and image processing », *European Symposium on « Lasers, Optics, and Vision for Productivity in Manufacturing »*, Besançon, France ; SPIE Vol. 2785 ; pp. 12-23, June 1996.
- [7] F. Angot, A. Elmoataz, M. Revenu, P. Herlin. « Analysis of cellular microscopy images by means of neighborhood graphs », *Microscopy, Microanalysis, Microstructure*, à paraître.