



HAL
open science

Réflexions sur la mise en place d'une vérité terrain pour la segmentation de maillages polygonaux 3D en parties significatives

Sébastien Delest, Romuald Boné, Hubert Cardot

► **To cite this version:**

Sébastien Delest, Romuald Boné, Hubert Cardot. Réflexions sur la mise en place d'une vérité terrain pour la segmentation de maillages polygonaux 3D en parties significatives. GTMG '08: Groupe de Travail en Modélisation Géométrique, Mar 2008, Mulhouse, France. pp.49-62. hal-00267213

HAL Id: hal-00267213

<https://hal.science/hal-00267213>

Submitted on 26 Mar 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Réflexions sur la mise en place d'une vérité terrain pour la segmentation de maillages polygonaux 3D en parties significatives

SÉBASTIEN DELEST, ROMUALD BONÉ ET HUBERT CARDOT

Laboratoire Informatique de l'Université François Rabelais de Tours
{sebastien.delest, romuald.bone, hubert.cardot}@univ-tours.fr

Résumé

La segmentation de maillages polygonaux 3D est un outil essentiel à de nombreuses applications. L'indexation, la reconnaissance des formes, la compression, la simplification ou encore les tatouages numériques sont quelques unes de ces applications. La segmentation de maillages polygonaux 3D se décline en deux familles : la segmentation en carreaux surfaciques (régions du maillage présentant certaines caractéristiques géométriques) et la segmentation en parties significatives. Cet article est axé sur la deuxième famille qui, à l'heure actuelle, ne dispose pas de mesure précise pour déterminer l'efficacité des méthodes de segmentation. La vérité terrain est généralement utilisée sur les images 2D afin de comparer la segmentation d'un expert à celle obtenue à partir d'un algorithme. Nous discutons ici de l'intérêt d'une vérité terrain pour la segmentation de maillages polygonaux 3D et de sa mise en œuvre.

Mots-clés : Vérité terrain, Segmentation, Maillages polygonaux 3D

1 Introduction

La segmentation en parties significatives concerne des applications où la sémantique des objets a une importance. La reconnaissance de forme et l'indexation [TZ06], l'animation et la déformation [LKA06, AHL06, MZP07] ou encore la conception d'objets réels à partir de modèles 3D [RGS04] nécessitent souvent la détection des parties significatives d'un objet 3D. La segmentation tend généralement à suivre le découpage qui pourrait être réalisé par la vision humaine. De nombreux travaux relatifs à la vision humaine indiquent que la reconnaissance et la compréhension des formes sont basées sur la décomposition structurelle de la forme en petites parties. Il existe deux principales familles de segmentation en parties significatives : les méthodes orientées « primitives » et les méthodes orientées « frontières ». Des états de l'art des différentes méthodes de segmentation en parties significatives ont été proposés récemment dans [Sha08, Del07, APP⁺07]. Une étude comparative de certaines de ces méthodes a été menée dans [AKM⁺06]. Les auteurs ont souligné la difficulté d'évaluation des différentes approches et proposent l'utilisation de modèles 3D populaires pour rendre la comparaison des méthodes de segmentation plus pertinente (voir figure 1).

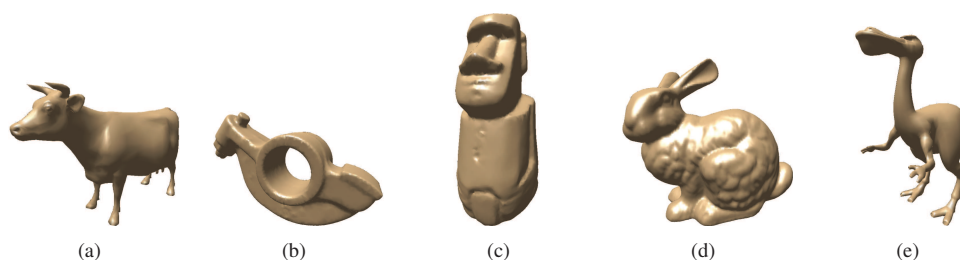


FIG. 1 – Exemples de modèles 3D souvent utilisés en segmentation de maillages 3D.

Il y a au moins trois domaines en vision par ordinateur où des problèmes similaires de segmentation et de partitionnement sont rencontrés : la segmentation d'images [CM02], les éléments finis pour la simulation de partitionnement de maillages [MK01] et la classification [Rob97]. Le problème de l'évaluation

des méthodes de segmentation est important pour les chercheurs et les utilisateurs. La comparaison d'un nouvel algorithme à ceux existants et le choix d'une méthode ainsi que les paramètres en fonction du problème à résoudre n'en deviennent que plus évidents. L'étude de [PFG06] concerne l'évaluation de la segmentation en régions sur les images. De nombreux outils d'évaluation sont décrits dont la plupart sont difficilement transposables dans le domaine des maillages polygonaux.

Les critères d'évaluation quantitative peuvent se regrouper en deux classes selon qu'on dispose ou non d'une « vérité terrain » qui constitue une segmentation de référence. Dans le cas des images, la vérité terrain est souvent définie par un expert du domaine. Il n'existe généralement pas de solution unique à la division d'une image en régions « pertinentes ». Cependant, plusieurs segmentations d'images réalisées à la main tendent à être cohérentes car elles correspondent à des raffinements mutuels les unes des autres [CCR05] et la principale différence correspond au niveau de détails.

Dans ce qui suit, nous discutons de la segmentation de maillages polygonaux 3D en parties significatives et des familles de méthode de segmentation utilisées. La section 3 présente les travaux menés sur l'évaluation de la segmentation d'images. La section 4 aborde l'adaptation et la mise en œuvre de certains de ces outils d'évaluation à la segmentation de maillages polygonaux 3D.

2 Problématique de la segmentation en parties significatives

2.1 Le système de perception humain

La vision humaine fait intervenir une multitude de récepteurs sensoriels ainsi qu'un très grand nombre de neurones dans le cerveau. Distinguer un objet par rapport à un arrière plan ou reconnaître un objet parmi d'autres sont des tâches simples pour un être humain mais correspondent à des problèmes très compliqués en vision par ordinateur. Hoffman et Richards [HR87] ont émis l'hypothèse que notre système de vision décompose une forme en plusieurs parties, ce qui souligne alors l'existence de lois pour définir les frontières de ces parties. Leurs travaux ont aboutis à la loi des minima qui correspond à la décomposition de la surface en parties le long des contours à tendances concaves. L'exemple de la figure 2 propose deux interprétations différentes selon le sens d'observation. Les auteurs montrent l'importance de considérer les discontinuités concaves et convexes. Un autre exemple est illustré à la figure 3 où plusieurs segmentations différentes peuvent avoir une interprétation correcte.

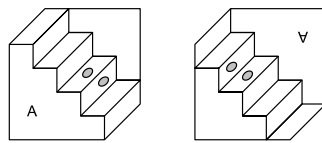


FIG. 2 – L'escalier de Schroder, proposé par H. Schroder en 1858, montre que la signification d'une frontière change lorsque la figure est retournée. Les deux points qui appartiennent à une même marche sur cette figure sont associés à des marches adjacentes lorsque la figure est retournée.

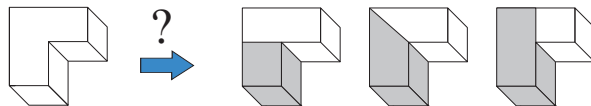


FIG. 3 – Forme en coude montrant plusieurs segmentations possibles.

Trois principaux outils pour la segmentation de surface sont abordés par les auteurs : la normale de surface, la courbure principale et les lignes de courbure. Le sens de la normale est important et, dans le cas d'une surface fermée, caractérise une normale comme interne ou externe. Le mathématicien suisse Leonhard Euler a découvert qu'en n'importe quel point d'une surface, il existe toujours une direction pour laquelle la courbure de la surface est la plus faible et une deuxième direction, orthogonale à la première, pour laquelle la courbure est la plus forte (la sphère et le plan sont des cas particuliers car ils

n'ont pas de variation de courbure). Ces deux directions en un point sont appelées directions principales en ce point et les courbures de surfaces correspondantes sont appelées courbures principales (Figure 4).

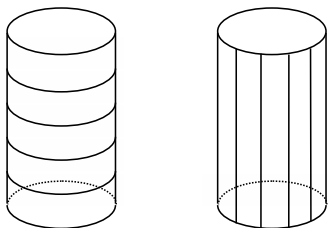


FIG. 4 – Lignes des plus fortes courbures à gauche, lignes des plus faibles à droite.

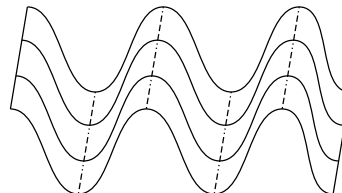


FIG. 5 – Cas où la courbure gaussienne sera nulle sur toute la surface.

Une discontinuité de type concave peut devenir un contour où, localement, la surface a la plus grande courbure négative. Hoffman et Richards ont proposé la loi des minima, qui consiste à diviser une surface en parties en tenant compte des minima négatifs de chaque courbure principale le long de ses lignes de courbures associées. Les auteurs traitent de la courbure gaussienne, qui est le produit des deux principales courbures, et donne l'exemple de la figure 5 où la courbure gaussienne sera inefficace pour caractériser les différentes parties d'une surface. Les formes peuvent avoir deux types de régions : des « régions positives » qui sont entourées par des extrema négatifs de la courbure principale et des « régions négatives » (les trous) qui sont entourées par des extrema positifs de la courbure principale.

Il existe plusieurs manières de segmenter un objet. On parlera de polyvalence pour définir la compatibilité d'un schéma de segmentation par rapport à plusieurs types d'objets. Cette contrainte de polyvalence est impliquée dans le choix entre deux principaux schémas de segmentation : la segmentation basée sur les frontières et la segmentation basée sur les primitives. La première approche définit des régions à partir des contours plus ou moins marqués de la surface de l'objet, la deuxième définit des régions par rapport à la forme de l'objet. L'approche basée sur les frontières offre une bonne polyvalence car elle est compatible avec tout type d'objet et décompose généralement la surface en de petits éléments de surface. La deuxième approche n'offre pas une grande polyvalence car elle se prête bien au partitionnement de modèles de type « humanoïde » ou « animal » par exemple mais est inappropriée pour segmenter un objet dont les caractéristiques principales sont localisées sur la surface, une voiture ou un visage en étant une bonne illustration. L'avantage de la segmentation basée frontière est qu'elle ne nécessite pas d'information *a priori* sur le type de la forme. Il est à souligner qu'il n'existe pas une segmentation unique d'un modèle mais plusieurs, chacune pouvant intervenir à un niveau de détail différent. On pourra par exemple simplement souhaiter dissocier le visage des cheveux sur une tête ou aller plus loin en repérant les détails du visage ; les échelles, ici, ne sont pas les mêmes. Hoffman et Richards définissent comme suffisantes les informations perçues par la rétine pour réaliser une segmentation.

Singh *et al.* [SSH99] ont proposé une nouvelle loi qui autorise un contraste entre les différentes parties en faisant intervenir l'information de la forme globale. La loi de la « coupe courte » (*short-cut rule*) spécifie que le système de vision humaine préfère connecter les points de segmentation qui sont proches pour former une partie comme le montrent les figures 6 et 7. Les auteurs proposent qu'en deux dimensions, la ligne qui sépare deux régions doit respecter les conditions suivantes :

- être droite,
- traverser un axe de symétrie locale,
- connecter deux points du contour de telle sorte qu'au moins un point ait une courbure minimale négative (figure 7).

La longueur d'une coupe influence la « saillance » d'une partie, qui peut s'interpréter comme le degré avec lequel la partie se sépare de l'objet. Plus une partie est saillante, plus elle sera facile à reconnaître. [HS97] ont ajouté trois informations importantes pour caractériser la saillance des parties : l'aire de la partie par rapport à la surface de l'objet, la force d'une frontière et le degré de « protrusion » de la partie. [DWW06] ont proposé des explications plus détaillées sur le sujet à partir d'une étude à grande échelle sur la manière dont la vision humaine réalise la segmentation d'objets en parties significatives. [Pag03] a réalisé une étude précise de la décomposition en parties des surfaces 3D à partir de concepts relatifs à la vision humaine. De nombreuses méthodes de segmentation en parties significatives tiennent compte

de la loi des minima.

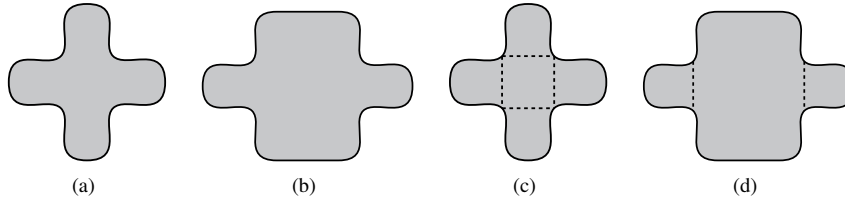


FIG. 6 – Limitation de la loi des minima. Les deux croix en (a) et en (b) ont le même nombre de minima négatifs et approximativement la même position. Leur partitionnement le plus naturel est cependant différent comme le montre (c) et (d).

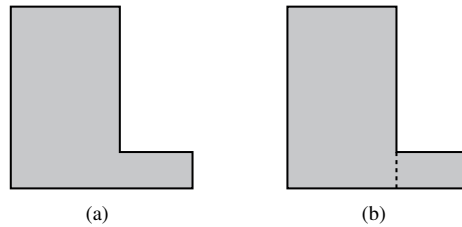


FIG. 7 – Une autre limitation de la loi des minima. Certains points de frontière n’ont pas de courbure négative.

2.2 Les méthodes de segmentation

Nous discutons dans cette section des principales méthodes de segmentation de maillages en parties significatives. Les approches sont plutôt variées ; on peut par exemple souhaiter extraire des parties ayant de fortes saillances (modèles de type humanoïde, tubulaire, animal, etc.) ou bien identifier les principales primitives (plan, cylindre, sphère, etc.) d’un modèle de C.A.O.

La **décomposition convexe** d’un maillage polygonal [WL97, CDST97, LA06] correspond à la décomposition d’un objet non convexe en petits objets convexes (figure 8). Certaines méthodes réalisent une décomposition approximative convexe en coupant le modèle 3D aux endroits les plus concaves.

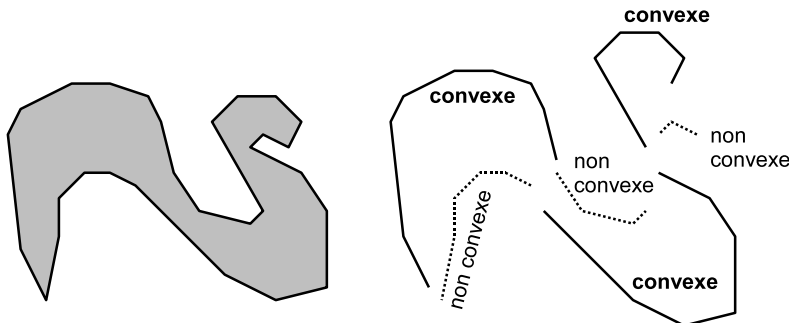


FIG. 8 – Décomposition d’un modèle en carreaux surfaciques convexes et non convexes.

Parmi les techniques utilisant la décomposition en carreaux convexes ou les coupes au niveau des zones concaves précédemment citées, on peut distinguer les méthodes basées sur la croissance de régions et la ligne de partage des eaux (LPE) [ZPK⁺02, PKA03, PAKZ03], le partitionnement itératif [KT03], l’analyse spectrale [LZ04, ZL05, LJZ06, LZ07] ainsi qu’une technique de positionnement de contours actifs aux endroits concaves du maillage [LLS⁺04, LLS⁺05].

Les **points critiques** sont des caractéristiques de saillance du maillage polygonal qui peuvent être utilisées pour distinguer les différentes protrusions du maillage. [ZH04] ont mis en place une méthode de détection de points critiques pour réaliser la décomposition du maillage. Le maillage est d'abord rééchantillonné pour permettre une décomposition plus précise. Le rééchantillonnage peut correspondre à la création de nouveaux vertex au milieu de certaines arêtes et à leurs connexions afin de créer de nouvelles faces. Un seuil sur la taille maximum des arêtes peut être utilisé pour stopper le processus de rééchantillonnage. Le procédé de détection des points critiques est initialisé à partir d'un vertex racine. La carte des distances et le graphe orienté appelé « arbre géodésique » sont ensuite construits. La labellisation des vertex (voir figure 9) est alors opérée pour déterminer :

- les extrema locaux : le vertex v est un extremum local si tous les voisins de v sont plus proches du vertex racine,
- les vertex réguliers : ces vertex possèdent des voisins dont la distance est plus proche et d'autres dont la distance est plus éloignée de la racine. La séquence des voisins correspond cependant à une seule alternance de voisins plus proches et de voisins plus éloignés,
- les vertex selles : si la séquence des voisins correspond à plus d'une alternance de voisins plus proches et plus éloignés, alors le vertex est un point selle.

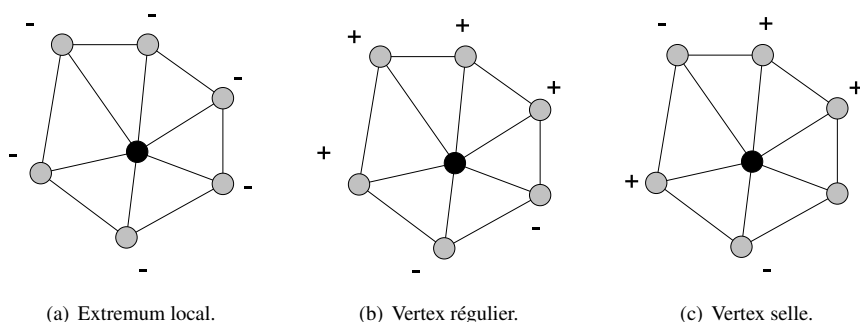


FIG. 9 – Classification des vertex par rapport à la distance géodésique. Les voisins positifs et négatifs sont respectivement plus éloignés et plus proches du vertex racine.

La segmentation est alors réalisée en utilisant une croissance de régions à partir de l'extremum local le plus éloigné. Cet extremum local donnera son label à tous les vertex parcourus par la croissance de régions qui sera stoppée dès lors qu'un vertex selle ou un vertex déjà labellisé sera rencontré. Ce procédé de labellisation se renouvellera avec chacun des extrema locaux.

De nombreuses méthodes utilisent la fonction de centricité [HSKK01] calculée à partir de la somme des distances géodésique d'un vertex à tous les autres. [VKS05] ont mis en place un algorithme de « conquête de protrusions » pour identifier les parties d'un modèle 3D.

[KLT05] ont proposé une méthode de segmentation basée sur les points caractéristiques et l'extraction de noyau. Pour déterminer les parties significatives, ils mettent en œuvre plusieurs traitements comme la simplification du maillage pour accélérer les calculs et réduire le bruit ou comme une invariance à la pose en transformant le maillage en une nouvelle représentation où les distances euclidiennes entre les points sont les mêmes que les distances géodésiques. La détection des points caractéristiques est réalisée à partir de la proéminence des points sur la nouvelle représentation. Une transformation « miroir sphérique » est utilisée pour générer une forme « miroir ». Les différentes parties du modèle pourront être identifiées en considérant la coque convexe de cette forme.

[YNBH06] déterminent les points critiques de type maximum et les connectent pour définir un graphe. Un algorithme de coupe de graphe sépare le maillage en deux. La bisection est réalisée à partir de l'analyse spectrale du graphe dont le poids des arcs correspond à l'indice de similarité entre les points critiques extrémités. L'ajustement de la segmentation est alors appliqué pour que toutes les régions contiennent au moins une caractéristique significative.

[LLL07] utilisent la caractérisation par saillance de parties à partir des critères de [HS97], à savoir la protrusion d'une partie, la taille de la partie par rapport à la surface de l'objet et la force d'une frontière. Les caractéristiques de saillance sont sélectionnées à partir des maxima locaux des protrusions

et permettent de calculer la position potentielle des frontières. La détermination du problème de flot maximum (coupe minimum) sur la zone potentielle de frontière permet de définir une frontière franche.

Les **descripteurs multi-échelles** peuvent être utilisés pour décrire un maillage et extraire ses composants. [MPS⁺04a] réalisent la segmentation d'un maillage à partir des descripteurs de formes à plusieurs échelles. En chaque point, l'intersection d'une sphère avec le maillage est mesurée. Le nombre d'intersections caractérise la forme du voisinage 3D autour du point à différentes échelles. Selon le nombre d'intersections, les sommets sont associés à une caractéristique équivalente à un pic, un trou, une montagne, une intersection, une jointure, etc. Une fois que les caractéristiques de tous les vertex ont été identifiées, une croissance de régions permet de regrouper les vertex par label par rapport à une échelle particulière. La méthode « Plumber » [MPS⁺04b, MPS06] est une spécialisation de l'approche précédente. Elle s'applique principalement aux modèles de type humanoïde, animal ou tubulaire.

Le **squelette** d'une forme est un outil intéressant pour en déduire les différentes parties. L'axe médian (*Medial Axis*), le diagramme de Voronoï, les graphes de chocs (*shock graphs*) et les graphes de Reeb sont souvent utilisés pour représenter le squelette d'une forme. Dans le cadre de la segmentation de maillages polygonaux 3D, certaines méthodes déterminent le squelette à partir du résultat de la décomposition [LA06, KT03], de la simplification du maillage [LTH01], de l'amincissement topologique [BB06, DBC07], des graphes de Reeb [TVD07], etc.

3 L'évaluation de la segmentation des images 2D

Avant d'aborder l'évaluation de la segmentation de maillages polygonaux 3D, nous pouvons nous attarder sur celle des images 2D. Il existe en effet des travaux assez poussés sur cette problématique alors que l'évaluation de la segmentation des maillages polygonaux n'est que très peu abordée dans la littérature.

[YS04] ont récemment proposé une classification des méthodes de segmentation d'images en deux principales familles : d'une part une approche « discriminative » qui envisage la segmentation comme un problème de regroupement des pixels en classes compactes et séparées et d'autre part une approche « générative » qui aborde la segmentation comme un problème de recherche d'un modèle générateur de données (*generative model*).

Lorsqu'une vérité terrain est disponible, l'évaluation des segmentations est réalisée à l'aide de critères comparant chaque segmentation avec l'image de référence. Il existe de nombreuses mesures pour la comparaison comme la mesure de [Vin91] qui s'appuie sur l'appariement biunivoque entre les régions des deux segmentations à comparer par rapport à un ensemble maximal commun de pixels, la mesure de [Mar03] qui définit la cohérence entre segmentations, la mesure de [YMB77] basée sur la position des pixels mal segmentés, la distance de [Bad92] qui prend en compte la position et l'intensité d'un pixel dans l'image, etc.

En l'absence de vérité terrain, des critères quantitatifs absolus ou des calculs de cohérence entre les différents résultats de segmentation peuvent être utilisés. D'après la classification des méthodes de segmentation proposée dans [YS04] ces critères se répartissent dans deux catégories : les critères de contraste et les critères d'adéquation à un modèle. Les premiers sont liés à une variabilité inter-région alors que les seconds concernent l'uniformité en intensité ou en couleur à l'intérieur des régions. [Cha05] a proposé récemment une étude des différentes mesures utilisées en segmentation d'images. Les méthodes développées dans le cadre de l'évaluation non supervisée sont basées sur l'adaptation du critère d'évaluation en fonction de l'image et sur la fusion de plusieurs critères par combinaison linéaire dont le poids et le choix des critères à fusionner sont déterminés par un algorithme génétique. Un état de l'art de la segmentation non supervisée d'images est disponible dans [ZFG08].

La qualité de la segmentation peut être évaluée à partir de méthodes employées en classification avec des critères géométriques tels que l'aire, le périmètre, des facteurs de formes comme la circularité, etc. La segmentation peut aussi être évaluée à partir de la qualité de la classification des objets extraits. Les classificateurs flous sont ainsi de bons indicateurs pour la qualité de la segmentation à partir du degré d'appartenance aux classes [HPF98].

4 L'évaluation de la segmentation des maillages polygonaux 3D

La segmentation des maillages polygonaux présente de nombreuses différences par rapport à celle des images. Le maillage est un objet à décomposer en sous-maillages. Les sous-maillages souhaités peuvent être très différents selon l'application (paramétrisation, reconnaissance de forme, etc.). Dans le cas de la segmentation en carreaux surfaciques, l'évaluation de la segmentation rentre dans le processus global d'évaluation des résultats de l'application (paramétrisation, métamorphose, etc.); dans le cas de la segmentation en parties significatives, il n'existe pas de base d'expérimentation pour comparer les sous-objets obtenus par segmentation. De nombreuses bases sont en revanche disponibles pour les images, notamment celle de Berkeley [MFTM01] qui met à disposition des images de références ainsi que les résultats de segmentation obtenus par un expert et par plusieurs algorithmes.

Les méthodes de segmentation sont généralement évaluées à partir de maillages issus de la base de données d'objets 3D AIM@SHAPE¹, la base de formes de l'université de Princeton [SMKF04] ou encore la base d'objets scannés de l'université de Stanford². Pour la segmentation au sens du mouvement de maillages dynamiques [MZP07], la base de test MPEG-4 AFX [MZPP06] peut être utilisée.

[AKM⁺06] ont souligné la difficulté à comparer les méthodes de segmentation et ont proposé plusieurs critères d'évaluation :

- a) **Le type de segmentation** : il s'agit de définir à quelle catégorie appartient la segmentation désirée (segmentation en carreaux surfaciques ou en parties significatives). L'application guidera fortement le type de segmentation retenue.
- b) **La création de régions correctes** : il est difficile de juger si une segmentation offre des régions correctes car cela dépend de l'application, des connaissances de l'environnement et de la perspective de l'observateur. L'œil humain reste pour l'instant le meilleur indicateur pour décider si la segmentation de maillages est correcte.
- c) **La création de frontières correctes** : décider si une frontière est correcte ou non relève de la même difficulté que l'évaluation des régions. Il est cependant possible de nuancer la qualité en étudiant les propriétés géométriques au niveau de leur linéarité [LLS⁺05], leur longueur ou leur position le long des concavités.
- d) **La segmentation hiérarchique / multi-échelle** : disposer de plusieurs niveaux de segmentation permet de décider lequel correspond le plus aux besoins de l'application. Les niveaux peuvent être construits par rapport à des segmentations de l'objet à des résolutions différentes ou bien en considérant le même objet et en utilisant un procédé de segmentation hiérarchique.
- e) **La sensibilité à la pose** : de nombreuses applications (métamorphose, reconnaissance de formes, etc.) nécessitent qu'un même objet puisse être segmenté de la même manière, peu importe la pose.
- f) **La complexité** : certaines contraintes (temps réel, place mémoire, etc.) peuvent faire intervenir des exigences qui ne sont pas compatibles avec certaines méthodes de segmentation. Les temps de calcul des algorithmes sont souvent utilisés pour définir l'efficacité des méthodes; ils nécessitent d'être accompagnés des informations concernant l'implémentation et la plateforme sur laquelle les programmes sont exécutés. La complexité d'un algorithme apparaît comme une information intéressante qui offre des indications sur le comportement de l'algorithme selon les situations (le pire des cas par exemple).
- g) **Les paramètres de contrôle** : les possibilités de réglages sont un critère indirect du procédé de segmentation. Ainsi, si le nombre de paramètres à régler est trop important, l'outil de segmentation est considéré comme compliqué à utiliser.

Les critères précédents sont très importants mais ne sont pas suffisants pour quantifier l'évaluation de la segmentation. L'évaluation de la segmentation en parties significatives de maillages polygonaux 3D est un vaste sujet. Nous ne discuterons pas ici des différentes approches d'évaluation; cette section est une réflexion sur la mise en place d'une vérité terrain pour l'évaluation de la segmentation obtenue à partir d'un algorithme, confrontée à celle réalisée par un expert.

¹<http://www.aimatshape.net>

²<http://www.graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/>

Contrairement à la segmentation en carreaux surfaciques où l'évaluation de la segmentation est assimilée à l'évaluation globale de l'application (compression, simplification, paramétrisation, etc.), la segmentation en parties significatives peut être évaluée directement à partir d'une vérité terrain. La mise en place d'une vérité terrain pour la segmentation de maillages soulève plusieurs questions :

- Combien et quelles segmentations proposer pour un même objet 3D ?
- Comment obtenir la vérité terrain d'un ou plusieurs experts ?
- Quelles distances utiliser pour mesurer la différence entre la vérité terrain et la segmentation réalisée par l'algorithme ?
- Quel format de données préconiser ?

Un modèle 3D peut généralement être segmenté selon plusieurs niveaux de détails. Le premier niveau peut délimiter le corps des parties périphériques ou bien isoler les principales primitives de l'objet. Les autres niveaux font intervenir plus de détails et délimiteront par exemple les doigts d'un modèle humanoïde. Il est également intéressant d'étudier le résultat de la segmentation d'un même modèle ayant des postures différentes (voir figure 10).

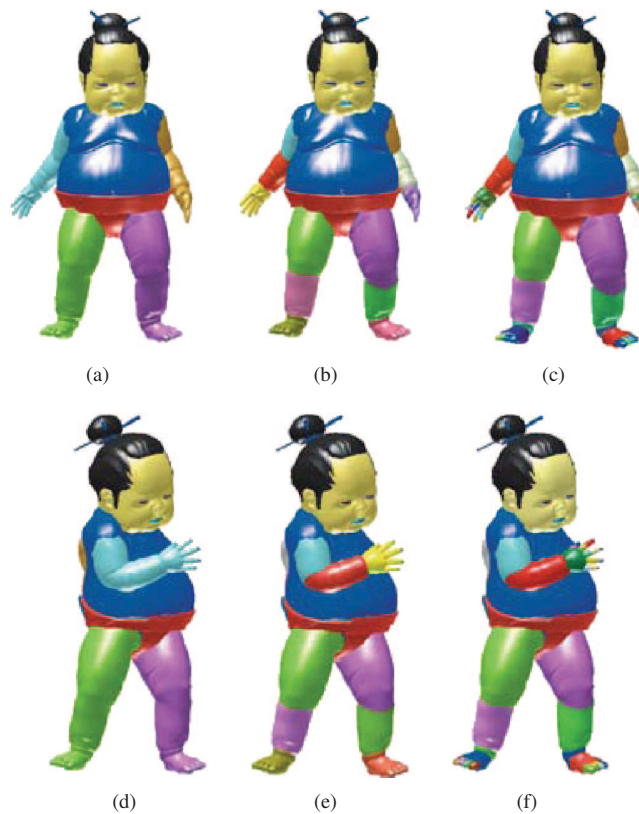


FIG. 10 – Modèle 3D segmenté à plusieurs niveaux de détails pour deux postures différentes (images tirées de [KLT05]).

On pourra donc associer à un même modèle plusieurs poses assez différentes et pour chacune d'elles plusieurs niveaux de segmentation. Le nombre de niveaux pourra être déterminé en fonction des détails pertinents qu'il est possible d'isoler (l'ongle d'un doigt par exemple).

De manière générale, la segmentation d'images associe chaque pixel de l'image à une région. Certains pixels peuvent n'appartenir à aucune région et être étiquetés comme « frontière ». La segmentation de maillages offre de nouvelles possibilités. Certaines applications autorisent la création de nouvelles faces du maillage pour rendre les frontières des régions plus lisses. Cette possibilité devra être prise en compte dans le procédé d'évaluation de la segmentation.

La segmentation de maillages polygonaux 3D est réalisée à partir d'un ensemble de sommets [MW99], de faces [DBC06] ou d'arêtes [ZTS02]. Dans tous les cas, le résultat final de la segmentation peut être

ramené à un maillage composés de faces étiquetées « région ». Les sommets séparant deux régions ou plus sont étiquetés « frontières ».

Des travaux existent sur la mise en place d'une vérité terrain sur les images à partir d'interfaces dédiées [GTSN07]. De tels interfaces pour les maillages 3D soulèvent des difficultés techniques supplémentaires par rapport aux images. Il faut en effet amener l'expert à étiqueter toutes les faces du maillage, ce qui nécessite en quelque sorte la mise en place d'une interface de « coloriage » d'objets 3D. Au delà des fonctions de bases (zoom, rotation, déplacement, type d'affichage et de rendu) qui permettent à l'utilisateur de définir la zone de coloriage du maillage, il serait intéressant de proposer des outils de coloriage comme le « pinceau » pour étiqueter les faces, la « plume » pour étiqueter les arêtes comme « frontières », la gomme pour rendre neutre des arêtes ou des faces, le « pot de peinture » pour remplir une zone délimitée par des frontières ou des régions, etc.

La vérité terrain peut être associée à un maillage de différentes façons. Les formats de données 3D les plus populaires dans le contexte de la segmentation de maillages 3D ont les extensions OBJ (*Wavefront*), OFF (*Object File Format*) et PLY (*Polygon File Format*). Le format Wavefront présente l'avantage de gérer facilement les groupes d'objets au sein d'un même fichier. La vérité de terrain peut ainsi être stockées dans un fichier de données 3D et représentée par les groupes d'objets. Elle peut également intervenir dans un fichier séparé du fichier de données de l'objet 3D en associant l'identifiant des faces à un label de région. L'avantage est que le fichier vérité terrain est exploitable avec les différents fichiers représentant le même objet ayant des postures différentes.

Pour mesurer la qualité de détection de frontières, il existe plusieurs approches. La plus intuitive consiste à mesurer l'écart entre les frontières obtenues et les théoriques. En ce qui concerne les images, la distance de Hausdorff représente une mesure de la distance spatiale des frontières I_F (issue de la segmentation) et I_{ref} (la vérité terrain) :

$$D_H(I_F, I_{ref}) = \max(f_d(I_F, I_{ref}), f_d(I_{ref}, I_F)) \quad (1)$$

avec f_d , la distance de Hausdorff relative (ou semi-distance de Hausdorff) définie par :

$$f_d(I_F, I_{ref}) = \max_{p \in I_F} d(p, I_{ref}) \quad (2)$$

où d correspond à la distance euclidienne pour les images et à la distance géodésique [KS98, Del07] quand il s'agit de maillages.

La qualité de la segmentation peut également être évaluée en terme de « région ». La mesure de dissimilarité entre un résultat de segmentation en régions/classes par rapport à un résultat de segmentation de référence intègre généralement la taille des zones mal classées ainsi que l'information spatiale des éléments qui constituent les régions. Soit S un ensemble de N éléments.

- Une région est un sous ensemble non vide de S .
- Une partition de S est un ensemble de régions qui s'excluent mutuellement (pas de recouvrement) et dont l'union forme S .
- Deux partitions P et Q de S sont identiques si et seulement si chaque région dans P est une région dans Q .
- Une partition de P est un raffinement de la partition R (P contient plus de détails que R) si et seulement si chaque région dans P est contenue dans une région de R .
- Une partition **nulle** correspond à une partition n'ayant qu'une seule région.
- Une partition **infinie** a N régions (chaque élément est associé à une région).

Afin de mesurer les différences entre deux partitions, [AF99] ont proposé la distance de partition. Différentes définitions ont été formulées [Gus02, CCR05]. On s'intéressera à la définition suivante adaptée aux maillages polygonaux :

Définition 1 Soit deux partitions P et Q de S . La distance de partition est la surface minimale induite par le nombre de faces à supprimer de S pour que deux partitions soient identiques (P et Q étant restreintes aux faces restantes).

La figure 11(c) montre la surface minimale qu'il est nécessaire d'enlever pour rendre le résultat de la segmentation (figure 11(a)) ainsi que la vérité terrain (figure 11(b)) identiques. Soit P , Q et R des partitions définies à partir de l'ensemble S composé de N éléments. A représente l'aire totale de la partition. La distance de partition d_{sym} a les propriétés suivantes :

1. $d_{sym}(Q, P) \geq 0$.
2. $d_{sym}(Q, P) = 0$ si et seulement si $Q = P$.
3. $d_{sym}(Q, P) = d_{sym}(P, Q)$.
4. $d_{sym}(Q, P) + d_{sym}(P, R) \geq d_{sym}(Q, R)$.
5. $d_{sym}(Q, \text{partition nulle}) = A - (\text{aire maximale d'une région dans } Q)$.
6. $d_{sym}(\text{partition nulle}, \text{partition infinie}) = A - (\text{aire minimale d'une face dans la partition infinie})$.
7. distance normalisée = $\frac{d_{sym}}{\text{distance maximale entre deux régions}} \approx \frac{d_{sym}}{A}$ car la plus petite région peut avoir une aire infinitésimale et la plus grande, appartenir à une partition nulle.
8. Soit S_1 et S_2 , deux ensembles disjoints. P_1 et Q_1 sont deux partitions de S_1 et P_2 et Q_2 , deux partitions de S_2 . Soit $P = P_1 \cup P_2$ et $Q = Q_1 \cup Q_2$, les partitions obtenues à partir de $S = S_1 \cup S_2$. Alors, $d_{sym}(P, Q) = d_{sym}(P_1, Q_1) + d_{sym}(P_2, Q_2)$.

La propriété suivante, définie pour le contexte des images, n'a pas directement d'équivalence sur les maillages où les tailles des régions dans une partition infinie ne sont pas connues.

$$d_{sym}(Q, \text{partition infinie}) = N - (\text{nombre de régions dans } Q) \quad (3)$$

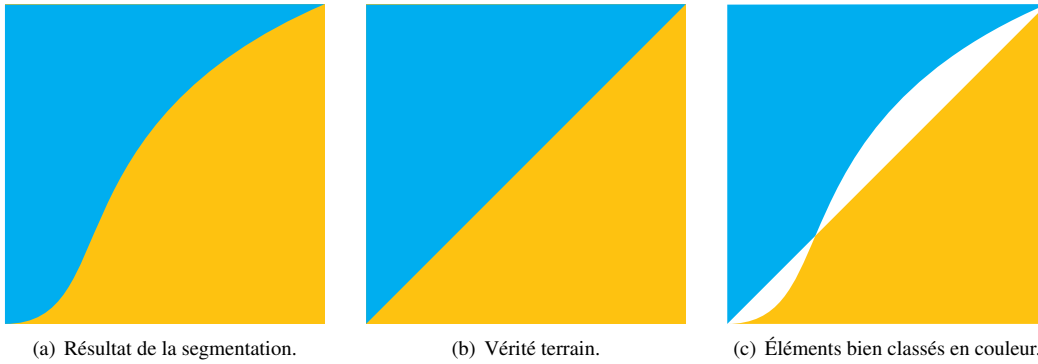


FIG. 11 – La distance de partition.

Les distances abordées dans cet article ne sont qu'un maigre échantillon des outils d'évaluation de la segmentation. Cette étude, qui n'en est qu'au stade de la réflexion, met l'accent sur la nécessité de disposer, comme c'est le cas pour les images, de mesures précises de la qualité de la segmentation.

5 Conclusion

La segmentation de maillages polygonaux 3D est un outil indispensable à de nombreuses applications. Deux principales familles de segmentation sont reconnues dans ce domaine : la segmentation en carreaux surfaciques et la segmentation en parties significatives. L'évaluation des méthodes de segmentation est délicate et fortement guidée par l'application. La première famille de segmentation verra l'évaluation de ses méthodes englobée dans le procédé d'évaluation de l'application (compression, simplification, etc.). La deuxième famille peut faire intervenir une évaluation directe de la segmentation. Cet article se place dans le cadre d'une évaluation supervisée avec une vérité terrain. Il n'existe pas à l'heure actuelle d'étude quantitative sur l'évaluation de la segmentation de maillages polygonaux 3D. Les chercheurs essaient de produire, par le biais d'algorithmes, la même segmentation que celle qui est réalisée naturellement par la perception humaine pour reconnaître les objets. Pour aider le chercheur à analyser ses résultats, une vérité terrain peut être produite par un expert. Nous avons proposé dans cet article une réflexion sur la mise en place d'une vérité terrain pour l'évaluation de la segmentation de maillages en parties significatives. Comme pour les images, il est nécessaire de proposer à un expert une interface dédiée à la réalisation de la vérité terrain. Il est également indispensable d'établir une distance pour mesurer la qualité de la segmentation par rapport à la vérité terrain. Nous avons étudié quelques

distances issues du domaine des images et les avons adaptées à la problématique des maillages. Cependant, les travaux à mener pour valider l'efficacité d'une distance, de même que ceux pour étudier l'évaluation (supervisée ou non) de la segmentation de maillages polygonaux 3D sont conséquents. Les études sur l'évaluation de la segmentation d'images représentent une véritable source d'inspiration et sont relativement proches de la problématique des maillages. Ces derniers font néanmoins apparaître des contraintes supplémentaires (distances géodésiques, posture différentes d'un même objet, frontières issues de la création de nouvelles arêtes, etc.) qu'il faudra intégrer à la démarche d'évaluation.

Références

- [AF99] Anthony Almudevar and Chris Field. Estimation of single-generation sibling relationships based on dna markers. *Journal of agricultural, biological, and environmental statistics*, 4(2) :136–165, June 1999.
- [AHL06] Grégoire Aujay, Franck Hetroy, and Francis Lazarus. Construction automatique d'un squelette pour l'animation de personnages. In *AFIG '06 : Les 19ème journées de l'Association Française d'Informatique Graphique et de l'Association Chapitre Français d'Eurographics*, 2006.
- [AKM⁺06] Marco Attene, Sagi Katz, Michela Mortara, Giuseppe Patané, Michela Spagnuolo, and Ayellet Tal. Mesh segmentation - a comparative study. In *SMI '06 : Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications*, pages 14–25, Matsushima, Japan, 2006. IEEE Computer Society.
- [APP⁺07] Alexander Agathos, Ioannis Pratikakis, Stavros Perantonis, Nikolaos Sapidis, and Philip Azariadis. 3D mesh segmentation methodologies for CAD applications. *Computer-Aided Design and Applications*, 4(6) :827–842, 2007.
- [Bad92] Adrian J. Baddeley. An error metric for binary images. In *Proceedings of the second International Workshop on Robust Computer Vision : Quality of Vision Algorithms*, pages 59–78, Karlsruhe, Germany, 1992.
- [BB06] David Brunner and Guido Brunnert. Inheriting thinning for skeleton-based mesh decomposition. In *International Conference on Curves and Surfaces*, pages 78–87, Avignon, France, June - July 2006. Nashboro Press.
- [CCR05] Jaime S. Cardoso and Luís Corte-Real. Toward a generic evaluation of image segmentation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 14(11) :1773–1782, November 2005.
- [CDST97] Bernard Chazelle, David P. Dobkin, Nadia Shouraboura, and Ayellet Tal. Strategies for polyhedral surface decomposition : an experimental study. *Computational Geometry : Theory and Applications*, 7(5-6) :327 – 342, April 1997.
- [Cha05] Sébastien Chabrier. *Contribution à l'évaluation de performances en segmentation d'images*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, Décembre 2005.
- [CM02] Dorin Comaniciu and Peter Meer. Mean shift : A robust approach toward feature space analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(5) :603–619, May 2002.
- [DBC06] Sébastien Delest, Romuald Boné, and Hubert Cardot. 3D watershed transformation based on connected faces structure. In *CompIMAGE '06 : Computational Modelling of Objects Represented in Images : fundamentals, methods and applications*, pages 159–163, Coimbra, Portugal, October 2006.
- [DBC07] Sébastien Delest, Romuald Boné, and Hubert Cardot. Automatically computed markers for the 3D watershed segmentation. In *ICIP '07 : Proceedings of the International Conference on Image Processing*, volume 6, San Antonio, Texas, USA, September 2007.
- [Del07] Sébastien Delest. *Segmentation de maillages 3D à l'aide de méthodes basées sur la ligne de partage des eaux*. Thèse de doctorat, Laboratoire Informatique de l'Université François Rabelais de Tours, Tours, France, Novembre 2007.
- [DWW06] Joeri De Winter and Johan Wagemans. Segmentation of object outlines into parts : A large-scale integrative study. *Cognition*, 99(3) :275–325, April 2006.

- [GTSN07] David Gavilan, Hiroki Takahashi, Suguru Saito, and Masayuki Nakajima. Sketch-based evaluation of image segmentation methods. *IEICE - Transactions on Information and Systems*, E90-D(1) :156–164, January 2007.
- [Gus02] Dan Gusfield. Partition-distance : A problem and class of perfect graphs arising in clustering. *Information Processing Letters*, 82(3) :159–164, May 2002.
- [HPF98] Florence Huet and Sylvie Philipp-Foliguet. Fusion of images interpreted by a new fuzzy classifier. *Pattern Analysis and Applications*, 1 :231–247, 1998.
- [HR87] Donald D. Hoffman and Whitman A. Richards. Parts of recognition. *Readings in Computer Vision : Issues, Problems, Principles and Paradigms*, pages 227–242, 1987.
- [HS97] Donald D. Hoffman and Manish Singh. Saliency of visual parts. *Cognition*, 63(1) :29–78, April 1997.
- [HSKK01] Masaki Hilaga, Yoshihisa Shinagawa, Taku Kohmura, and Toshiyasu L. Kunii. Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes. In *SIGGRAPH '01 : Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 203–212, New York, NY, USA, 2001. ACM Press.
- [KLT05] Sagi Katz, George Leifman, and Ayellet Tal. Mesh segmentation using feature point and core extraction. *The Visual Computer*, 21(8-10) :649–658, 2005.
- [KS98] Ron Kimmel and James A. Sethian. Computing geodesic paths on manifolds. In *Proceedings of the National Academy of Sciences*, volume 95, pages 8431–8435, 1998.
- [KT03] Sagi Katz and Ayellet Tal. Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts. *ACM Transactions on Graphics*, 22(3) :954–961, July 2003.
- [LA06] Jyh-Ming Lien and Nancy M. Amato. Approximate convex decomposition of polyhedra. Technical Report TR06-002, Parasol Laboratory, Department of Computer Science, Texas A&M University, January 2006.
- [LJZ06] Rong Liu, Varun Jain, and Hao Zhang. Sub-sampling for efficient spectral mesh processing. In *CGI '06 : Computer Graphics International*, pages 172–184. Springer Berlin / Heidelberg, September 2006.
- [LKA06] Jyh-Ming Lien, John Keyser, and Nancy M. Amato. Simultaneous shape decomposition and skeletonization. In *SPM '06 : Proceedings of the 2006 ACM symposium on Solid and Physical Modeling*, pages 219–228, New York, NY, USA, 2006. ACM Press.
- [LLL07] Hsueh-Yi Sean Lin, Hong-Yuan Mark Liao, and Ja-Chen Lin. Visual saliency-guided mesh decomposition. *IEEE Transactions on Multimedia*, 9(1) :46–57, January 2007.
- [LLS⁺04] Yunjin Lee, Seungyong Lee, Ariel Shamir, Daniel Cohen-Or, and Hans-Peter Seidel. Intelligent mesh scissoring using 3D snakes. In *PG '04 : Proceedings of the 12th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, pages 279–287, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
- [LLS⁺05] Yunjin Lee, Seungyong Lee, Ariel Shamir, Daniel Cohen-Or, and Hans-Peter Seidel. Mesh scissoring with minima rule and part saliency. *Computer Aided Geometric Design*, 22(5) :444–465, July 2005.
- [LTH01] Xuetao Li, Tong Wing Toon, and Zhiyong Huang. Decomposing polygon meshes for interactive applications. In *SI3D '01 : Proceedings of the 2001 Symposium on Interactive 3D graphics*, pages 35–42. ACM Press, 2001.
- [LZ04] Rong Liu and Hao Zhang. Segmentation of 3D meshes through spectral clustering. In *PG '04 : Proceedings of the 12th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, pages 298–305, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
- [LZ07] Rong Liu and Hao Zhang. Mesh segmentation via spectral embedding and contour analysis. *Computer Graphics Forum (Special Issue of Eurographics 2007)*, 26, 2007.
- [Mar03] David R. Martin. *An Empirical Approach to Grouping and Segmentation*. Thèse de doctorat, EECS Department, University of California, Berkeley, August 2003.
- [MFTM01] David R. Martin, Charless C. Fowlkes, Doron Tal, and Jitendra Malik. A database of human segmented natural images and its application to evaluating segmentation algorithms and measuring ecological statistics. In *International Conference on Computer Vision*, volume 2, pages 416–423, Vancouver, July 2001.

- [MK01] Irene Moulitsas and George Karypis. Multilevel algorithms for generating coarse grids for multigrid methods. In *Supercomputing '01 : Proceedings of the 2001 ACM/IEEE conference on Supercomputing (CDROM)*, pages 45–45, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [MPS⁺04a] Michela Mortara, Giuseppe Patané, Michela Spagnuolo, Bianca Falcidieno, and Jarek Rossignac. Blowing bubbles for multi-scale analysis and decomposition of triangle meshes. *Algorithmica, Special Issues on Shape Algorithms*, 38(1) :227–248, October 2004.
- [MPS⁺04b] Michela Mortara, Giuseppe Patané, Michela Spagnuolo, Bianca Falcidieno, and Jarek Rossignac. Plumber : A method for a multi-scale decomposition of 3d shapes into tubular primitives and bodies. In *ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, pages 139–158, 2004.
- [MPS06] Michela Mortara, Giuseppe Patané, and Michela Spagnuolo. From geometric to semantic human body models. *Computers and Graphics*, 30(2) :185–196, 2006.
- [MW99] Alan P. Mangan and Ross T. Whitaker. Partitioning 3d surface meshes using watershed segmentation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 5(4) :308–321, October–December 1999.
- [MZP07] Khaled Mamou, Titus B. Zaharia, and Françoise J. Prêteux. Segmentation au sens du mouvement de maillages dynamiques. In *GRETSI '07 : 21^e colloque GRETSI sur le Traitement du Signal et des Images*, pages 69–72, Troyes, Septembre 2007.
- [MZPP06] Khaled Mamou, Titus B. Zaharia, Marius Preda, and Françoise J. Prêteux. Results of evaluation experiment ee1 on static and animated 3d mesh coding : skinning-based dynamic mesh compression. Technical Report Standardization Report ISO/IEC JTC1/SC29/WG11, MPEG06/13888, Hangzhou, China, October 2006.
- [Pag03] David Lon Page. *Part decomposition of 3D surfaces*. PhD thesis, University of Tennessee, Knoxville, May 2003.
- [PAKZ03] David Lon Page, Mongi A. Abidi, Andreas Koschan, and Yan Zhang. Object representation using the minima rule and superquadrics for under vehicle inspection. In *Proceedings of the 1st IEEE Latin American Conf. on Robotics and Automation*, pages 91–97, Chile, November 2003.
- [PFG06] Sylvie Philipp-Foliguet and Laurent Guigues. Évaluation de la segmentation : état de l'art, nouveaux indices et comparaison. *Traitement du Signal*, 23(2) :109–125, 2006.
- [PKA03] David Lon Page, Andreas Koschan, and Mongi A. Abidi. Perception-based 3D triangle mesh segmentation using fast marching watersheds. In *CVPR '03 : Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, volume 2, pages 27–32, June 2003.
- [RGS04] Roni Raab, Craig Gotsman, and Alla Sheffer. Virtual woodwork : Making toys from geometric models. *International Journal on Shape Modeling*, 10(1) :1–30, 2004.
- [Rob97] Stephen J. Roberts. Parametric and non-parametric unsupervised cluster analysis. *Pattern Recognition*, 30(2) :261–272, 1997.
- [Sha08] Ariel Shamir. A survey on mesh segmentation techniques. *Computer Graphics Forum*, 2008.
- [SMKF04] Philip Shilane, Patrick Min, Michael Kazhdan, and Thomas Funkhouser. The princeton shape benchmark. In *SMI '04 : Proceedings of the International Conference on Shape Modeling and Applications*, pages 167–178, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
- [SSH99] Manish Singh, Gregory D. Seyranian, and Donald D. Hoffman. Parsing silhouettes : The short-cut rule. *Perception and Psychophysics*, 61(4) :636–660, 1999.
- [TVD07] Julien Tierny, Jean-Philippe Vandeborre, and Mohamed Daoudi. Topology driven 3D mesh hierarchical segmentation. In *SMI '07 : Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications*, pages 215–220, Lyon, France, June 2007.
- [TZ06] Ayellet Tal and Emanuel Zuckerberger. Mesh retrieval by components. In *GRAPP '06 : International Conference on Computer Graphics Theory and Applications*, pages 142–149, February 2006.

- [Vin91] Laurent Vinet. *Segmentation et mise en correspondance de régions de paires d'images stéréoscopiques*. Thèse de doctorat, Université Paris IX - Dauphine, Juillet 1991.
- [VKS05] Sébastien Valette, Ioannis Kompatsiaris, and Michael G. Strintzis. A polygonal mesh partitioning algorithm based on protrusion conquest for perceptual 3D shape description. In *SVE '05 : Workshop towards Semantic Virtual Environments*, pages 68–76, Villars, Switzerland, March 2005.
- [WL97] Kenong Wu and Martin D. Levine. 3D part segmentation using simulated electrical charge distributions. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19(11) :1223–1235, 1997.
- [YMB77] William A. Yasnoff, Jack K. Mui, and James W. Bacus. Error measures for scene segmentation. *Pattern Recognition*, 9(4) :217–231, 1977.
- [YNBH06] Ichitaro Yamazaki, Vijay Natarajan, Zhaojun Bai, and Bernd Hamann. Segmenting point sets. In *SMI '06 : Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications*, pages 4–13, Matsushima, Japan, 2006.
- [YS04] Stella X. Yu and Jianbo Shi. Segmentation given partial grouping constraints. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(2) :173–183, January 2004.
- [ZFG08] Hui Zhang, Jason E. Fritts, and Sally A. Goldman. Image segmentation evaluation : A survey of unsupervised methods. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008. (Accepted Manuscript).
- [ZH04] Yinan Zhou and Zhiyong Huang. Decomposing polygon meshes by means of critical points. In *MMM '04 : Proceedings of the 10th International Multimedia Modelling Conference*, page 187, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
- [ZL05] Hao Zhang and Rong Liu. Mesh segmentation via recursive and visually salient spectral cuts. In *VMV '05 : Vision, Modeling and Visualization*, pages 429–436, Erlangen, Germany, November 2005.
- [ZPK⁺02] Yan Zhang, Joon Ki Paik, Andreas Koschan, Mongi A. Abidi, and David Gorsich. A simple and efficient algorithm for part decomposition of 3D triangulated models based on curvature analysis. In *ICIP '02 : Proceedings of the International Conference on Image Processing*, volume 3, pages 273–276, Rochester, September 2002.
- [ZTS02] Emanuel Zuckerberger, Ayellet Tal, and Shymon Shlafman. Polyhedral surface decomposition with applications. *Computers and Graphics*, 26(5) :733–743, 2002.