

# Indexation d'objets 3D par Graphe de Reeb Multirésolution Augmenté

Tony Tung<sup>1</sup>

Francis Schmitt<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications

Département TSI, CNRS UMR 5141  
46, rue Barrault, 75634 Paris Cedex 13 - France

{tony.tung, francis.schmitt}@enst.fr

## Résumé

*Nous présentons dans cet article une méthode d'indexation d'objets 3D dans des bases de données avec requête par similarité de forme et d'aspect. L'approche repose sur une extension de l'appariement de graphes de Reeb multirésolution présentés dans [1]. La méthode originale ne prend en compte que l'information topologique, ce qui est souvent insuffisant pour obtenir des appariements précis. C'est pourquoi nous proposons d'enrichir le graphe à l'aide d'attributs géométriques 3D et visuels 2D pour améliorer l'appariement et l'estimation de la similarité des modèles. Ces attributs peuvent être pondérés afin de s'adapter aux requêtes. Une condition de cohérence topologique a été ajoutée pour améliorer la robustesse des appariements. Nous obtenons une représentation souple, multi-critère et multirésolution appelée Graphe de Reeb Multirésolution Augmenté (aMRG). Les résultats préliminaires obtenus dans une recherche par similarité de forme s'avèrent de meilleure qualité que ceux obtenus avec des méthodes fondées sur des mesures statistiques.*

## Mots clefs

Indexation 3D, graphe de Reeb, multirésolution.

## 1 Introduction

Avec la progression permanente des technologies numériques, le développement de nouvelles applications 3D est devenu beaucoup plus aisé et se généralise. Les bases de données d'objets 3D commencent à proliférer aussi bien pour les applications multimédia [14] que pour celles plus industrielles comme en CAO. L'indexation des objets 3D et la recherche par leur contenu apparaissent donc comme une réponse naturelle pour qui veut naviguer dans ces vastes bases et il devient nécessaire d'adapter les requêtes à ce nouveau type de données. La littérature scientifique n'a présenté que peu de méthodes en ce qui concerne les requêtes par similarité de forme. Les approches comme les histogrammes de courbure [7] ou les EGI (Extended Gaussian Image) [8] décrivent de manière trop locale la géométrie des objets. De plus elles ne gardent aucune information topologique (connectivité du

maillage) et sont sensibles aux modifications du maillage (bruit sur les sommets, décimation, etc). Inversement les approches globales comme les histogrammes de cordes [4] ou les distributions de forme [5] décrivent les objets 3D de manière trop grossière pour être des outils de recherche pertinents, de même pour les descripteurs basés sur la transformée de Fourier ou les calculs de moments [3, 6]. Pour obtenir une description intuitive et garder l'aspect topologique des formes, il s'avère intéressant d'employer une représentation par squelette ou graphe. Malheureusement, la faiblesse de ces approches réside dans l'extraction du squelette qui est souvent coûteuse, trop sensible aux perturbations sur la surface de l'objet, ou nécessite un point source privilégiant une direction. Par ailleurs, la plupart n'offrent pas de procédure de comparaison [9, 10] ou de représentation multirésolution [11, 12, 13] adaptée à la recherche dans de grandes bases de données. L'utilisation des Graphes de Reeb Multirésolution (MRG) [1] semble être une solution très prometteuse. Profitant des avantages de la représentation multirésolution que procure la structure des MRG, nous allons injecter des informations topologiques, géométriques et visuelles (couleur, texture) dans les noeuds des graphes, afin d'obtenir une description hiérarchique des modèles, tant locale que globale, appelée Graphe de Reeb Multirésolution Augmenté (aMRG). L'indexation des objets 3D consistera donc à coder l'ensemble des informations contenues dans les noeuds des graphes de Reeb. Les tests ont été réalisés sur une base de données de modèles 3D haute résolution [14, 15].

## 2 Graphe de Reeb multirésolution

D'après la théorie de Morse, une fonction continue définie sur une surface fermée caractérise la topologie de la surface en ses points critiques [2]. Le graphe de Reeb est obtenu à partir d'une fonction  $\mu$  définie sur la surface d'un objet 3D. L'aspect multirésolution provient de la discrétisation dichotomique des valeurs de la fonction et du regroupement hiérarchique des graphes de Reeb obtenus à chaque résolution.

## 2.1 La fonction $\mu$

La fonction  $\mu$  a été choisie pour sa propriété d'indépendance à l'orientation de l'objet. Les objets sont des maillages 3D triangulés dont les sommets sont localisés dans un repère cartésien  $\mathcal{R}(x, y, z)$ . En considérant un point  $\mathbf{v}$  sur la surface  $S$  d'un objet, la fonction  $\mu$  est définie comme la somme des distances géodésiques  $g(\mathbf{v}, \mathbf{p})$  de  $\mathbf{v}$  aux autres points  $\{\mathbf{p} | \mathbf{p} \in S\}$  :  $\mu(\mathbf{v}) = \int_{\mathbf{p} \in S} g(\mathbf{v}, \mathbf{p}) dS$ . Les auteurs [1] ont choisi de normaliser la fonction avec au dénominateur  $\max_{\mathbf{p} \in S} \mu(\mathbf{p})$ . Mais afin de profiter d'une meilleure dynamique de  $\mu(\mathbf{v})$  sur  $[0, 1]$ , nous avons normalisé la fonction avec ses valeurs  $\min$  et  $\max$  :

$$\mu_N(\mathbf{v}) = \frac{\mu(\mathbf{v}) - \min_{\mathbf{p} \in S} \mu(\mathbf{p})}{\max_{\mathbf{p} \in S} \mu(\mathbf{p}) - \min_{\mathbf{p} \in S} \mu(\mathbf{p})}.$$

Le graphe de Reeb correspondant est obtenu en partitionnant itérativement l'objet suivant des intervalles réguliers de valeurs de  $\mu$ , et en reliant les régions connexes entre-elles. Pour chaque intervalle, on considère les différents ensembles connexes de triangles et on affecte un noeud à chacun d'entre eux.

## 2.2 Aspect multirésolution

Pour construire un graphe de Reeb à  $R$  niveaux de résolution,  $\mu_N$  est subdivisé en  $2^R$  intervalles à partir desquels la surface de l'objet est partitionnée. La construction d'un MRG s'effectue de manière hiérarchique, le passage à un graphe de résolution inférieur se faisant par fusion des intervalles deux par deux [1]. Un noeud parent est associé à chaque ensemble connexe de chaque nouvel intervalle obtenu. Un noeud parent est relié à  $n$  noeuds fils ( $n \geq 1$ ) appartenant au niveau de résolution immédiatement supérieur (cf. Figure 1).

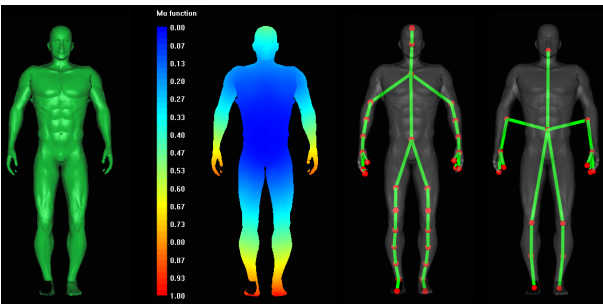


Figure 1 – Graphe de Reeb : modèle 3D (gauche), fonction  $\mu_N$  (centre), graphe de Reeb à la résolution  $r=3$ , graphe de Reeb à la résolution  $r=2$  obtenu par fusion des noeuds au niveau supérieur ; arêtes en vert ; noeuds en rouge (droite).

## 3 Comparaison de Graphes de Reeb Multirésolution Augmentés

La stratégie de comparaison de deux MRG consiste à appairer entre deux graphes tous les noeuds ayant une configuration topologique similaire en terme de connexions avec

les voisins et de relations parent/fils entre les niveaux de résolutions successifs. Dans un premier temps, on détecte les paires de noeuds respectant un ensemble de critères de cohérence topologique prédéfinis. Puis, à l'aide d'une fonction de perte, on retient parmi ces paires de noeuds ceux qui serviront à estimer la similarité des deux MRG. Afin de parvenir à des appariements plus optimaux, nous avons enrichi les MRG d'attributs géométriques.

### 3.1 Critère topologique supplémentaire

Soient deux objets  $M$  et  $N$  dont on souhaite comparer les graphes. Les critères de cohérence topologique permettent de sélectionner les paires de noeuds  $(m, n)$  d'un même niveau de résolution, avec  $m \in \text{MRG}(M)$  et  $n \in \text{MRG}(N)$ , qui seront éventuellement appariées dans la suite du processus. Les noeuds  $m$  et  $n$  sont cohérents topologiquement si :

- les parents de  $m$  et  $n$  ont été appariés ensemble au niveau de résolution précédent,
- $m$  et  $n$  correspondent au même intervalle de  $\mu_N$ ,
- lorsque deux noeuds sont appariés, une même marque leur est attribuée et est propagée parallèlement dans les deux graphes à leurs voisins connexes en suivant monotonement deux directions de propagation ( $\mu$  croissants et décroissants)[1]. Ainsi, si les noeuds  $m$  et  $n$  font chacun partie d'une "branche" de graphe dont des noeuds ont été appariés, alors ils doivent avoir reçu les mêmes marques pour être appariés à leur tour.

Cependant le simple énoncé de ces critères est insuffisant pour assurer que deux branches restent en correspondance lorsqu'on passe à un niveau de résolution plus fin. En effet, l'information d'appartenance à une branche (la marque) n'étant pas transmise aux fils, il se peut donc que deux branches qui avaient été mises en correspondance, ne le soient plus lorsque l'on change de niveau de résolution (cf. Figure 2). On ajoute donc un critère supplémentaire d'héritage : on appairera deux noeuds si les parents de leurs voisins ont déjà été appariés ensemble au niveau inférieur. Par ailleurs, la procédure autorise aussi l'appariement entre un noeud  $m$  et un groupe de noeuds  $\{n\}$  lorsque  $m$  est cohérent topologiquement à tous les noeuds de  $\{n\}$  [1].

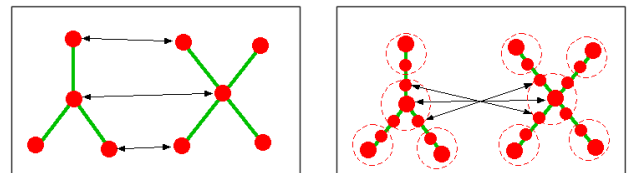


Figure 2 – Gauche : branches initialement appariées. Droite : si, au niveau suivant, des noeuds fils sur des branches différentes sont appariés par erreur, les branches ne seront plus appariées. Il est donc nécessaire de vérifier l'appariement des parents des noeuds voisins.

### 3.2 Attributs géométriques

Du point de vue topologique, on pourrait être satisfait par les appariements de graphes obtenus. Mais dans le cadre de notre étude ces mises en correspondance sont inadaptées car, par exemple, topologiquement un bras équivaut à une jambe, alors que l'on souhaiterait obtenir des appariements plus précis pour pouvoir comparer efficacement les modèles 3D. Les critères de cohérence topologique sont tels que si deux noeuds ne sont pas mis en correspondance à un niveau de résolution grossier alors qu'ils auraient dû l'être, leurs fils ne pourraient jamais l'être à un niveau plus fin. Il est donc crucial que les noeuds soient appariés au mieux dès les premiers tests de cohérence. Pour cela nous proposons d'apporter des informations de localisation aux noeuds. Un noeud  $m$  correspond à un ensemble de triangles connexes, et peut donc être localisé au barycentre de ces triangles en coordonnées sphérique  $(r, \theta, \varphi)$ . Il devient donc impératif que les objets soient bien orientés. Ainsi on peut utiliser les axes naturels des objets ou appliquer une technique d'alignement spatial comme l'ACP [3].

### 3.3 La fonction de perte

La fonction de perte *loss* permet de choisir les noeuds à appairer. Elle est appliquée sur tous les ensembles de noeuds topologiquement cohérents, et est minimale pour les noeuds les plus similaires (selon les critères choisis) :  $loss(m, n) = \sum_i \alpha_i |f_i(m) - f_i(n)|$ ,  $f_i=0..4$  étant les fonctions normalisées  $a, l, r, \theta$  et  $\varphi$ .  $a$  est l'aire relative de l'ensemble des triangles associés à un noeud, et  $l$  représente la complexité associée à un noeud qui est liée au nombre de ses fils, comme décrit dans [1]. Les constantes  $\alpha_i$  permettent de pondérer l'influence de chaque attribut selon le type de requête désiré ce qui procure beaucoup de liberté dans l'appariement des noeuds. On peut également remplacer les valeurs absolues des différences par d'autres fonctions ad-hoc qui permettraient d'accentuer les différences ou les similitudes entre les noeuds.

## 4 Calcul de similarité

Après avoir obtenu la liste des noeuds appariés, des fonctions de similarités vont permettre de préciser le processus de reconnaissance des formes entre graphes.

### 4.1 Fonction de similarité de noeuds

Le calcul de la fonction de similarité entre deux noeuds  $m$  et  $n$  est défini dans [1] :

$$sim(m, n) = \alpha_s \cdot \min(a(m), a(n)) + \beta_s \cdot \min(l(m), l(n)).$$

Dans le but d'augmenter les possibilités de requêtes par similarité de formes, nous avons introduit des propriétés géométriques globales et locales, et des propriétés visuelles extraites de chaque section de l'objet associée en chaque noeud  $m$  et à chaque résolution :

- $v(m)$  correspond au volume relatif associé à  $m$ ,
- $cord(m)$  est une mesure statistique de l'étendue de la section,

- $courb_m(m)$  et  $courb_g(m)$ , une statistique des courbures moyennes et gaussiennes estimées sur la surface triangulée associée à  $m$ ,
- $color_{R,G,B}(m)$  est une statistique de la couleur/texte associée au noeud.

### 4.2 Calcul du volume

On définit le volume relatif  $v(m) = \frac{1}{R} \cdot \frac{vol(m)}{vol(S)}$  où  $vol(S)$  représente le volume total du modèle, et  $vol(m)$  le volume correspondant à la section de  $m$ . Le facteur  $\frac{1}{R}$  correspond aux  $R$  niveaux de résolution de aMRG( $M$ ), et on note que l'on a bien  $\sum_{m \in M} v(m) = 1$ . Une caractérisation supplémentaire de la section de l'objet associée au noeud  $m$  pourrait être la mesure du rapport sans dimension  $\frac{a(m)^3}{v(m)^2}$ .

### 4.3 Mesures des cordes

Appliqué à un noeud  $n$  du niveau de résolution le plus fin, l'histogramme  $cord(n)$  est constitué des distances entre les centres des triangles associés au noeud  $n$  et la position du noeud  $n$  localisé au barycentre des triangles. Chaque contribution à l'histogramme est pondérée par l'aire du triangle associé à la corde. C'est pourquoi l'histogramme est normalisé par le facteur  $\frac{1}{R} \cdot \frac{1}{aire(S)}$  où  $aire(S)$  est la surface totale de l'objet. L'histogramme  $cord(m)$  d'un noeud parent  $m$  à une résolution inférieure est l'histogramme des cordes au barycentre du noeud  $m$  obtenu à l'aide des barycentres des fils de  $m$ . Au plus bas niveau de résolution  $r = 0$ , l'histogramme  $cord(m)$  est équivalent à l'approche de [4] appliquée au maillage entier.

### 4.4 Mesure des courbures

Les objets possèdent localement des informations sur la courbure utiles pour caractériser les variations géométriques de la surface. La courbure locale de la surface est représentée par les histogrammes de courbures moyenne et gaussienne. Les calculs sont effectués pour chaque noeud à la résolution la plus fine et les résultats sont propagés aux parents :  $courb_*(m) = \sum_{n \in \{fils\ de\ m\}} courb_*(n)$ , où  $*$  représente  $m$  ou  $g$  et  $courb_*(n)$  est l'histogramme des courbures de la surface des triangles associée à  $n$  et normalisé par  $\frac{1}{R} \cdot \frac{1}{aire(S)}$ . Notons que l'on pourrait utiliser un seul histogramme (cf. l'index de forme de Koenderink [7]).

### 4.5 Quantification des couleurs

L'alliance de la forme et de la couleur est un critère hautement discriminant et encore peu exploitée en 3D. Notre caractérisation de la texture est effectuée au moyen de trois histogrammes sur  $(R, G, B)$  normalisés. On précise que la quantification de la texture est effectuée localement, pour chacun des noeuds du aMRG et de manière hiérarchique et globale pour tous les niveaux de résolution :  $color(m) = \sum_{n \in \{fils\ de\ m\}} color(n)$ , où  $*$  représente  $R, G$ , ou  $B$  et  $color_*(n)$  est l'histogramme de couleur de  $n$  normalisé comme en 4.3 et 4.4.

## 4.6 Similarité d'objets

Soient deux objets  $M$  et  $N$ , la fonction permettant de calculer leur similarité s'obtient en sommant la fonction de similarité des paires de noeuds  $\{m, n\}$  appariés :  $SIM(M, N) = \sum_{\{m, n\}} sim(m, n)$ . La fonction  $SIM$  est maximale pour deux objets identiques. Les nouveaux attributs sont introduits dans la fonction  $sim(m, n)$ , avec des facteurs de pondération  $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4)$  :

$$sim(m, n) = \alpha_s \cdot \min(a(m), a(n)) + \beta_s \cdot \min(l(m), l(n)) + \lambda_1 \cdot \min(v(m), v(n)) + \lambda_2 \cdot \min(cord(m), cord(n)) + \lambda_3 \cdot \min(curv_*(m), curv_*(n)) + \lambda_4 \cdot \min(color_*(m), color_*(n)).$$

On définit le  $\min$  de deux histogrammes  $hist(m)$  et  $hist(n)$  par :

$$\min(hist(m), hist(n)) = \sum_{i=1}^B \min(hist_i(m), hist_i(n))$$

où  $B$  est la taille des histogrammes et  $hist_i$  est la  $i^{eme}$  valeur de  $hist$ .

## 5 Résultats

Pour mettre en évidence les atouts des aMRG, nous avons effectué des tests de comparaison entre 50 modèles 3D [14, 15] répartis en 8 classes différentes, mais qui peuvent être facilement confondues : vases avec et sans anses, modèles humains, pièces d'échecs, statuettes. Il ressort que la méthode des aMRG est beaucoup plus efficace pour retrouver les classes d'objets (cf. Figure 3), les autres méthodes testées ayant plus de mal à discerner les classes. Les plus performantes comme Hough 3D [7] ont réussi à discerner les vases des modèles humains mais cependant, elles restent peu efficaces lorsqu'il s'agit de distinguer différents types de vases contrairement aux aMRG. Les tests ont été réalisés avec  $R = 4$  et  $\alpha_0 = 0.3$ ,  $\alpha_1 = 0.15$ ,  $\alpha_2 = 0.15$ ,  $\alpha_3 = 0.2$  et  $\alpha_4 = 0.2$  pour  $loss$ , et  $\alpha_s = 0.25$ ,  $\beta_s = 0.2$ ,  $\lambda_1 = 0.2$ ,  $\lambda_2 = 0.25$  et  $\lambda_3 = 0.05$  pour  $sim$ .

## 6 Conclusion

Notre étude nous a amenée à enrichir l'approche présentée dans [1] afin de répondre à la problématique d'indexation et de recherche par le contenu d'objets 3D texturés. Des attributs géométriques et colorimétriques ont été ajoutés aux critères topologiques que l'on a aussi étendus. La fonction de calcul de perte a été modifiée en conséquence, et la fonction de calcul de similarité a été améliorée en fusionnant différentes caractéristiques géométriques et visuelles. On obtient ainsi un descripteur de forme multirésolution et multicritère. Les résultats démontrent la puissance des aMRG à retrouver des classes d'objets similaires dans une base de données. Cependant, il semble que cette méthode reste mal adaptée pour les objets compacts comme les bustes. Notre méthode vise l'interactivité et la souplesse, mais fait intervenir beaucoup de termes de pondération pour les différentes mesures. Il serait donc intéressant d'appliquer des techniques d'optimisation de paramètres ou des outils d'aide pour définir des valeurs par défaut.

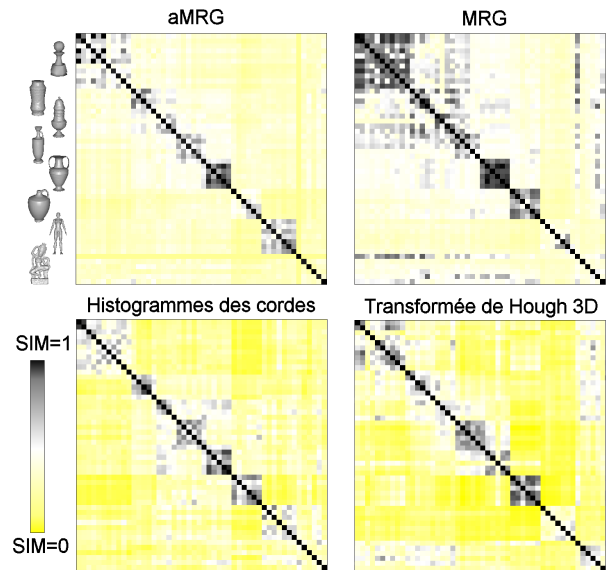


Figure 3 – Résultats du calcul de similarité entre 50 objets 3D. La méthode aMRG apparaît plus discriminante que les autres méthodes testées.

## Remerciements

Ce travail a été partiellement financé par le projet Européen SCULPTEUR IST-2001-35372. Nous remercions P.A. Pont pour la programmation de l'algorithme de [1] et le critère de cohérence topologique qu'il a ajouté.

## Références

- [1] M. Hilaga, Y. Shinagawa, T. Kohmura, T. L. Kunii. Topology Matching for Fully Automatic Similarity Estimation of 3D Shapes, *ACM SIGGRAPH*, Los Angeles, CA, USA, pp.203-212, Août 2001.
- [2] Y. Shinagawa, T.L. Kunii and Y.L. Kergosien. Surface Coding Based on Morse Theory, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.11, No.5, pp.66-78, Sept. 1991.
- [3] D.V. Vranic, D. Saupe and J.Richter. Tools for 3D-object retrieval : Kahrunen-Loeve Transform and spherical harmonics, *IEEE Workshop Multimedia Signal Processing*, Cannes, France, pp.293-298, Oct. 2001.
- [4] E. Paquet and M. Rioux. Nefertiti : a Query by Content Software for Three-Dimensional Models Databases Management, *3-D Digital Imaginig and Modeling*, Proc. Int. Conf. on Recent Advances, pp.345-352, 1997.
- [5] R. Osada, T. Funkhouser, B. Chazelle, and D. Dobkin. Shape Distributions, *ACM Trans. on Graphics*, 21(4), pp.807-832, Oct. 2002.
- [6] K. Kazhdan and T. Funkhouser. Harmonic 3D Shape Matching, *SIGGRAPH Technical Sketches*, p.191, Juin. 2002.
- [7] T. Zaharia, F. Prêteux. Indexation de maillages 3D par descripteurs de forme, *RFIA*, Angers, France, pp.48-57, Jan. 2002.
- [8] S. B. Kang, K. Ikeuchi. The complex EGI : a new representation for 3D pose determination, *IEEE Trans on PAMI*, Vol.16, No.3, pp.249-258, Mars 1994.
- [9] F. Leymarie and B. Kimia. The Shock Scaffold for Representing 3D Shape, *Visual Form*, Springer-Verlag, Lecture Notes in Computer Science, no.2059, pp.216-229, 2001.
- [10] A. Verroust, F. Lazarus. Extracting Skeletal Curves from 3D Scattered Data, *The Visual Computer*, Springer, 16(1), pp.15-25, 2000.
- [11] H. Sundar, D. Silver, N. Gagvani, S. Dickinson. Skeleton Based Shape Matching and Retrieval, *Shape Modeling International*, Seoul, Korea, pp.130-142, Mai 2003.
- [12] S. Biasotti, S. Marini, M. Mortara, G. Patanè, M. Spagnuolo, B. Falcidieno. 3D Shape Matching through Topological Structures, *11th Discrete Geometry for Computer Imagery conference*, Springer-Verlag, Lecture Notes in Computer Science, no.2886, 2003.
- [13] J.W.H. Tangelder and R.C. Velkamp. Polyhedral Model Comparison Using Weighted Point Sets, *Shape Modeling International*, Seoul, Korea, pp.119-129, May 2003.
- [14] <http://www.3dcafe.com>
- [15] <http://www.tsi.enst.fr/3dmodels>