

Extraction des courbes squelettes en faisant une etude comparative entre les objets voxels 3D et des objets 3D simples via une vue 2D en appliquant une nouvelle approche d'algorithme Thinning

[Extraction of curves skeletons making a comparative study between 3D voxel objects and simple 3D objects using 2D view by applying a new approach of Thinning algorithm]

Ilhame Agnaou^{1,2}, Abdelkrim MAARIR¹, and Belaid BOUIKHALENE¹

¹Equipe de Traitement de l'information et des télécommunications,
Université Sultan Moulay Slimane,
Beni Mellal, Morocco

²Equipe de Mathématiques et Applications,
Université Sultan Moulay Slimane,
Beni Mellal, Morocco

Copyright © 2014 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: To make an animation of a 3D model, it must be characterized by its shape by searching a hierarchical structure "skeleton" that best describes the shape of the object by describing the main joints and edges of the latter. So our idea developed in this paper is to use a new approach to algorithm "Thinning" applied to 3D objects in a 2D view that will facilitate the extraction of these skeletons from these objects and to compare them with 3D objects voxels to accurately describe the morphology of the objects used and facilitate the recognition of 3D objects from their skeletons.

KEYWORDS: Animation; The morphology; Thinning Algorithm; 3D Object; 3D voxels objects; skeleton; recognition.

RESUME: Afin de faire une animation d'un modèle 3D, on doit le caractériser par sa forme en cherchant une structure hiérarchique "squelette" qui décrit le mieux possible la forme de cet objet en décrivant les articulations et les arêtes principales de ce dernier.

Donc, notre idée développée dans cet article est d'utiliser une nouvelle approche de l'algorithme « Thinning » appliquée à des objets 3D en vue 2D qui va faciliter l'extraction de ces squelettes à partir de ces objets et de les comparer avec des objets 3D voxels pour bien décrire la morphologie des objets utilisés et faciliter la reconnaissance des objets 3D à partir de leurs squelettes.

MOTS-CLEFS: Animation; la morphologie; Algorithme Thinning; Objet 3D; Objet 3D voxels; Squelette; Reconnaissance.

1 INTRODUCTION

Les objets 3D sont courants dans de nombreuses disciplines, y compris la conception assistée par l'ordinateur, l'imagerie médicale, l'infographie, la visualisation scientifique, et la télédétection. Bien que la représentation 3D soit inestimable et de nombreuses applications nécessitent du rechange des représentations de ces modèles. Une telle représentation est une

représentation 1D ligne comme un bâton, qui est parfois appelé une «représentation du squelette » ou « courbe squelette » ce qu'est différent de la représentation du squelette d'une surface [1].

La technique courante pour l'animation d'un modèle 3D consiste à créer une structure comme on a dit hiérarchique et articulée qui est appelée un squelette (ou squelette IK), dont la déformation entraîne la déformation du modèle associé. L'emplacement et le déplacement des articulations du squelette dictent la façon dont le modèle se déplace. Un squelette attaché à un modèle 3D (généralement représenté comme une maille) peut être soit créé à la main ou calculée [2].

2 PROBLÈME POSÉ

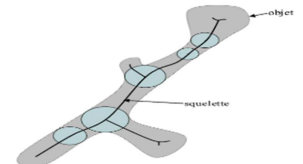
Pour faire une animation et plus généralement pour toute application qui nécessite de la caractérisation d'un modèle 3D par sa forme, on cherche une structure hiérarchique qui décrit le mieux possible la morphologie des objets. L'animation requiert un squelette ayant la structure d'une courbe décrivant les articulations et les arêtes principales d'un modèle quelconque. Ce squelette doit capturer au mieux la forme de l'objet, pour correspondre à un squelette au sens anatomique. Un tel squelette peut ensuite être utilisé pour animer l'objet mais aussi servir à trouver des propriétés de la forme 3D ou à la comparer à une autre en vue 2D par exemple : pour certaines applications, seule la topologie du squelette compte en animation une contrainte supplémentaire oblige à plonger le squelette, c'est-à-dire le positionner correctement par rapport à la forme 3D, tout comme un squelette anatomique est plongé dans un corps. Construire un squelette d'animation pour un modèle 3D est une tâche longue et fastidieuse où chaque articulation doit être placée manuellement. Une construction automatique ou guidée permettrait un gain de temps considérable [3]. Donc mon but est de fournir un algorithme « Thinning » simplifié qui est appliqué aux objets 3D via des caractéristiques 2D et aussi aux objets 3D volumineux ou voxels afin de conserver les propriétés importantes de l'objet telles que la connectivité et des composantes principales et qu'un animateur débutant obtient rapidement des résultats et les exploiter aux autres projets [4].

3 LE SQUELETTE ET L'ALGORITHME D'AMINCISSEMENT « THINNING »

Les squelettes sont des descripteurs de formes communes de la vision et des graphiques, et ils sont largement utilisés dans des applications telles que la segmentation d'objet, l'appariement et la récupération, et l'animation [2].

Un squelette est une abstraction de la forme utile qui capture la topologie essentielle d'un objet en deux et trois dimensions. Elle se réfère à une version amincie de l'objet original, qui conserve encore les propriétés de la forme de l'objet original. En 2D, le squelette est également désigné sous le nom de « axe médiane ». En 3D, le terme «squelette» a été utilisé pour décrire à la fois une médiane de la surface et une représentation plus linéaire.

Un squelette est le plongement dans R^3 d'un graphe des contours, C'est-à-dire l'association de coordonnées 3D à tout nœud du graphe. Le calcul d'un graphe des contours peut se faire en temps $\Rightarrow O(n \log n)$, avec n le nombre d'arêtes de la surface triangulée.



L'amincissement « thinning » est une approche classique pour calculer les squelettes. Son concept provient d'une définition qui illustre les axes médians, et une construction étroitement liée à des squelettes.

Les algorithmes « thinning » sont généralement développés sur les objets représentés comme des photos numériques simples et plates, constitué de points d'objets sur une grille spatiale. Les algorithmes traditionnels d'éclaircie considèrent le voisinage local de chaque point de la grille pour identifier les points critiques pour la préservation de la topologie ou la forme de l'objet. Bien que simple à mettre en œuvre, ces critères locaux sont très sensibles car elles ont des petites perturbations de frontière qui font produire facilement des squelettes avec des pièces fausses. Alors de plus les mesures globales peuvent être utilisées pour identifier des parties de squelette significatives lors de l'amincissement, et ces mesures sont généralement coûteuses à calculer.

Dans cet article, je viens d'introduire une amélioration d'algorithme d'amincissement « Thinning » que d'une part conserve la simplicité d'un algorithme d'amincissement numérique typique, et d'autre part, les rendements des squelettes seront stables et contrôlables que les caractéristiques globales de capture de forme. Cet algorithme est développé sur une représentation discrète d'objets 3D et 2D et on va faire une étude comparative entre les squelettes résultantes de ces objets et on va voir quel est le squelette extrait le plus exact et le plus proche au objet concernant.

4 ETAT DE L'ART

De nombreux algorithmes ont été proposés pour générer automatiquement des squelettes. Certains donnent des résultats non exploitables pour l'animation. [5] Par exemple la construction de l'Axe Médian [5] conduit à un squelette comportant des parties surfaciques, un prétraitement est nécessaire afin de les éliminer. De plus l'Axe Médian est très sensible au bruit et demande une étape de "pruning" afin d'éliminer les nombreuses petites branches qui en résulte [6].

Parmi les techniques fournissant un squelette dont la structure est un graphe, on peut citer celles utilisant une voxelisation [7]. Elles demandent un temps de calcul important, et la taille des caractéristiques prises en compte dans le résultat dépend de la taille des voxels.

Dans [8], un champ de forces répulsives est utilisé pour placer les nœuds du squelette. Les positions d'équilibre d'une particule chargée dans un champ électrique généré par une charge située à la surface du modèle donnent l'emplacement des nœuds. Cette méthode est lente et ne garantit pas que le résultat capture toutes les caractéristiques du modèle.

Le graphe de Reeb repose sur des propriétés mathématiques prouvant qu'il capture dans une certaine mesure la morphologie des formes 3D, son intérêt est présenté dans [9]. Les nœuds du graphe de Reeb correspondent aux points critiques d'une fonction définie sur la surface étudiée. Plusieurs fonctions peuvent être utilisées, le choix dépend essentiellement de l'application visée. Le graphe de Reeb trouve de nombreuses applications ([10], [11],[9], [12]). Il donne des critères permettant de classer les modèles 3D, par exemple dans une base de données.

Dans [13], Lazarus introduit le niveau de diagramme qui est une nouvelle structure topologique dont la construction est proche de celle du graphe de Reeb qui permet de calculer un squelette d'un modèle 3D. Cependant la fonction utilisée possède de nombreux extrema locaux ce qui conduit à un graphe bruité lorsque le maillage des surfaces est très fin.

Dans [14], la fonction utilisée est solution de l'équation de Laplace. Elle a la propriété de ne pas avoir de points critiques non désirés et permet donc de construire un graphe de Reeb non bruité quel que soit le modèle.

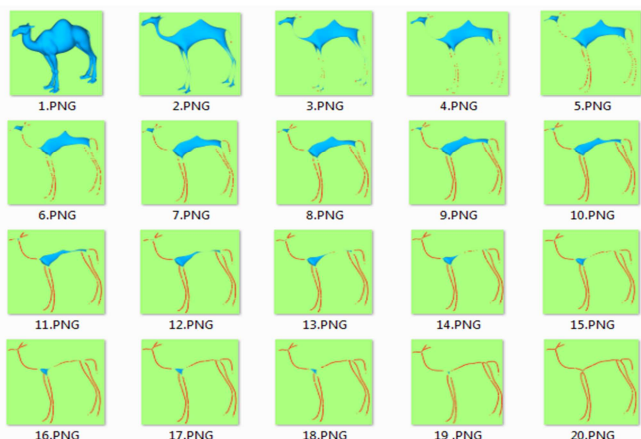


Fig. 1. Application de l'algorithme Thinning aux objets 3D « camel » après le passage par le filtre de Voronoi(20 iter)



Fig. 2. Même exemple de l'objet 3D « horse » après le processus d'amincissement itératif (10 iter)

5 L'AXE MÉDIAN : UN SQUELETTE 2D/3D

En 2D, l'axe médian d'une forme est défini comme le lieu des centres des disques maximaux inscrits, en d'autres termes, dans le cas continu, il est le lieu des points qui sont équidistants à partir d'au moins deux points sur la frontière de l'objet. L'axe médian d'une forme 2D est constitué d'un ensemble de courbes. En 3D, cependant, le problème devient plus compliqué. Ici, nous parlons d'une surface interne, défini en termes de centres de boules maximales inscrits, qui en plus d'un ensemble de courbes peuvent aussi contenir des éléments de surface. La figure(3) montre l'axe médian d'une forme 2D (un rectangle) et la face interne d'une forme en 3D (boîte). A noter que sur la figure(3) (b) uniquement le patch horizontal de la surface médiale est ombrée, mais en fait, la face interne se compose de neuf taches différentes déterminées par les lignes tracées en rouge et les bords du bloc. L'axe médian (2D) et la surface interne (3D) sont également connus comme le squelette [3].

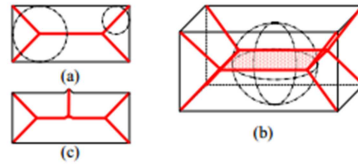


Fig. 3. L'axe médian en 2D (a et c) et de la surface médiane en 3D (b) et quelques exemples de disques inscrits (2D) et la boule (3D).

Si la surface interne est augmentée à chaque point le rayon de la boule maximale centrée sur ce point, une reconstruction complète et précise de l'objet d'origine est possible de la surface médiane seul, par des billes de croissance. Cette propriété a une application immédiate de la compression de la forme et de l'animation de volume.

Un inconvénient majeur de la surface médiane (axe) est sa sensibilité intrinsèque de petits changements à la surface de l'objet en raison de la façon dont il est défini. Un exemple illustratif en 2D est représenté sur la figure(3) (c) où il peut être observé comment un petit changement dans la forme de l'objet peut générer un grand changement dans l'axe médian.

Dans de nombreuses applications, cependant, une représentation concise des objets 3D avec des arcs de courbes ou de lignes droites est souhaitable en raison de sa simplicité. Par exemple l'animation utilise traditionnellement un IK (cinématique inverse) squelette composé d'un petit nombre de segments de ligne connectés représentant le torse, les bras et les jambes, pour les applications par exemple la navigation virtuelle, exigent également un ensemble de chemins de courbe pour la traversée. Cette représentation de la ligne en forme d'un objet 3D est également connu comme la ligne centrale ou du courbe squelette [22] et est une représentation simplifiée de 1D de son surface interne qui est composé uniquement de courbes [3].

6 LE PRINCIPE DE L'ALGORITHME THINNING POUR LES OBJETS VOXELS

Sans perte de généralité, et pour simplifier la discussion dans le reste de l'article, nous supposons qu'un objet 3D se réfère à une discrétisation 3D voxélisées. Les modèles polygonaux peuvent être convertis en objets volumétriques par voxélisation [20]. À l'application de l'algorithme thinning sur les objets voxels, l'ensemble de données 3D qui en résulte est un champ de vecteurs ou un tableau 3D où chaque voxel contient une valeur de vecteur et une fois nous calculons ce champ de vecteurs, nous utilisons ses caractéristiques topologiques [21] tels que les points critiques etc... pour extraire notre squelette hiérarchie. La méthodologie présentée a un certain nombre d'avantages significatifs par rapport aux méthodes précédentes (comme la méthode géométrique, Distance Field, Potentiel Field... [3]), à savoir: elle produit directement des squelettes connectés sans l'utilisation d'une étape de reconnexion (Voir la figure 3, 4, 5).

7 IMPLÉMENTATION DES OBJETS VOXEL

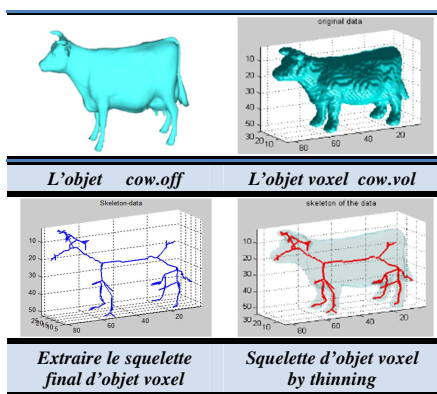


Fig. 4. la méthode thinning appliqué au voxel-temps d'exécution 152.508498 seconds

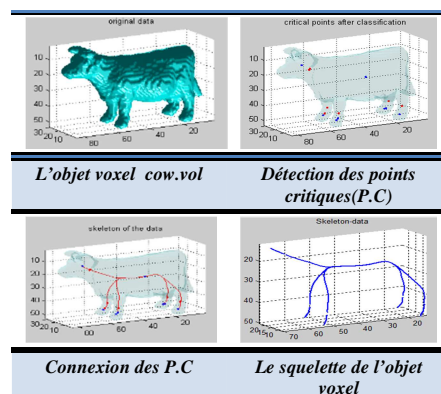


Fig. 5. la méthode répulsive potentielle field [3] appliqué au voxel

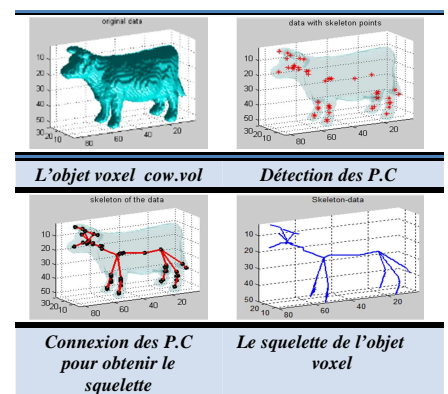


Fig. 6. la méthode Distance field[3] appliqué au voxel

8 OBSERVATIONS

On remarque qu'à partir des 3 exemples de méthodes d'extraction des squelettes, la seule méthode qui fait pas la connexion des points critiques c'est la méthode thinning et on observe qu'elle nous a donné un squelette précise et exact et trop proche au squelette anatomique de l'objet concerné (et c'est la chose qui nous intéresse pour comparer après ce squelette résultant par un objet voxel 3D par rapport un objet 3D dedans une image 2D), malgré qu'elle n'est pas lisse, mais en tous cas on peut reconnaître rapidement et facilement le type d'objet à partir de son squelette extraite, et d'autre part on voit que les deux dernières méthodes ont passé par l'étape de reconnexion des points critiques ce qui rend que les deux dernières méthodes ne génèrent pas une courbe squelette directement et les points de squelette résultant doivent être élagués puis connecté à obtenir une courbe squelette.

9 LA NOUVELLE APPROCHE DE L'ALGORITHME « THINNING » ET LA PROPAGATION DES BORDS

Cet article présente un algorithme d'amincissement des modèles numériques binaires qui est appliqué aux objets 3D à l'aide des vues 2D.

Cet algorithme produit une courbe de squelette qui élimine itérativement les points qui limitent l'objet 3D concerné commençant par les bords de ce dernier, et un seul point est un point qui peut être enlevée sans modification de la topologie de l'objet (voir [15] [16] [17] pour une revue complète de la topologie numérique).

Le processus général de cette méthode commence à partir de la limite de l'objet et continue vers l'intérieur jusqu'à ce que plus un seul point ne puisse être retiré, et à chaque itération, chaque objet 3D est testé par rapport à un ensemble de conditions et le maintien de la topologie peut être enlevé.

Les conditions sont généralement mis en œuvre sous forme de deux phases « phase 1 et phase 2 » ou plutôt « masque 1 et masque 2 » dont la taille est 3x3x3.

La première phase réduit l'épaisseur de l'objet 3D testé trop alternativement et adoucissant en supprimant les points de contour, et la seconde phase fait le réglage de la phase résultante de la première phase pour obtenir un axe centré de l'application qui est le squelette de l'objet 3D et ce processus en général s'intègre dans le principe de la propagation des bords.

De plus, des conditions supplémentaires sont utilisés pour empêcher le retrait de la surface à la fin de la courbe et de maintenir les propriétés géométriques des points de l'objet. La méthode directionnelle supprime les objets dans une direction particulière à chaque fois (par exemple, du Nord, du Sud, Haut, Bas) en utilisant des nombres différents de directives et conditions pour identifier les critères d'évaluation [15] [18] [19].

Par conséquent, ces méthodes directionnelles sont sensibles à l'ordre dans lequel les différentes directions sont traitées et les squelettes en résultent ne peuvent être centrées dans l'objet et pas de méthodes d'amincissement directionnels entièrement parallèles qui n'ont pas de désavantage entre ces méthodes, par contre notre algorithme actuel se base sur une méthode parallèlement non directionnelle testée sur les objets 3D, et les résultats obtenus montrent que l'algorithme de lissage produit des squelettes minces et centrée avec moins de distorsion et mieux formés que d'autres et d'une bonne connectivité spécifique.

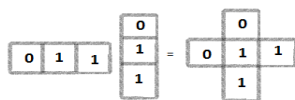


Fig.7. Masque 1

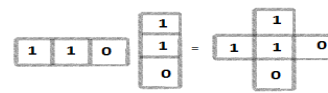


Fig.8. Masque 2

Les résultats vont montrer que l'algorithme d'adoucissement et d'effacement alterné produit des squelettes qui sont un peu adoucis, avec le moindre de distorsion et mieux formées que les autres.

10 RÉSULTATS

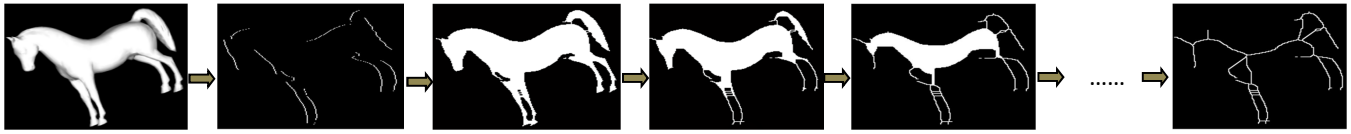


Fig. 9. Obtention du squelette d'un cheval après le passage par un nombre d'itérations passant par le masque 1et2

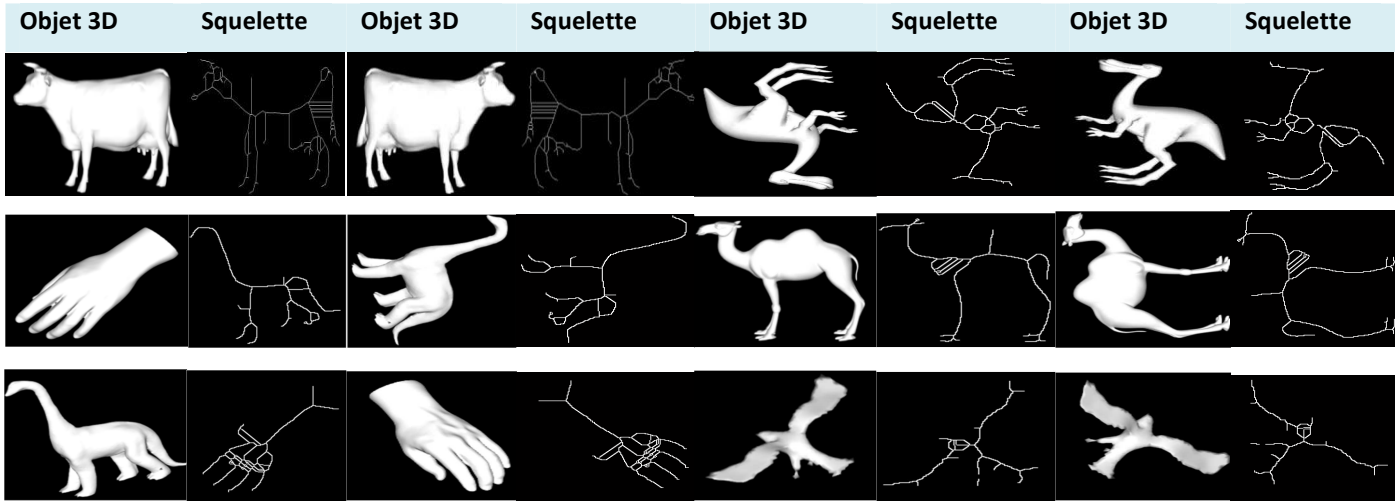


Fig. 10. Obtention des squelettes à partir des objets 3D en appliquant notre nouvelle approche

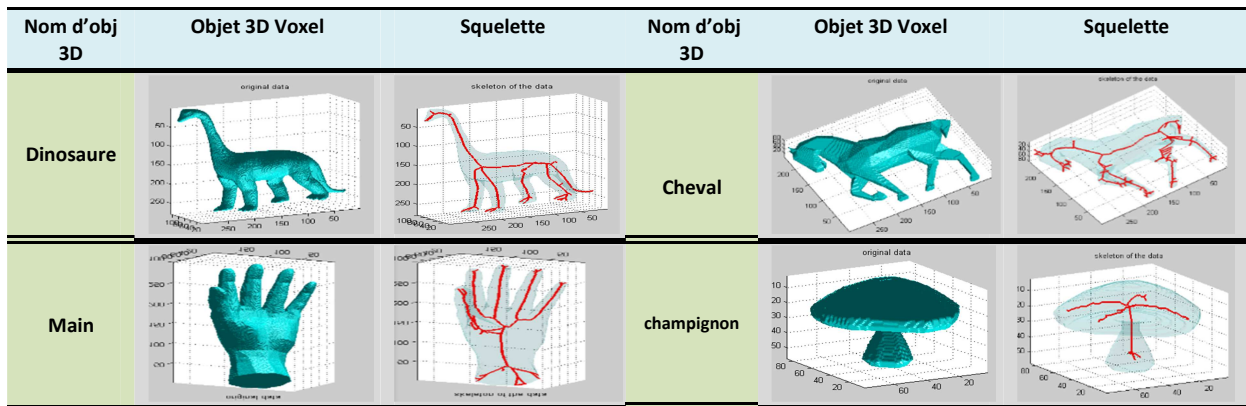


Fig. 11. Obtention des squelettes à partir des objets 3D voxels en appliquant l'algorithme « Thinning »

11 COMPARAISON ET DISCUSSION

Selon l'étude comparative entre quelques objets 3D voxels qui se ressemblent à des objets 3D comme : la vache, le cheval, le dinosaure et la main...etc., on voit que la détection des squelettes de ces derniers (objets 3D) est plus rapide par rapport aux objets voxels (voir le tableau 1), plus qu'elle est nette et continue dans des différentes vues 3D et ne contient pas beaucoup d'extrémités détaillées comme étant le cas du squelette extrait des objets voxels. Tant que les objets 3D voxel demandent un temps de calcul très important, et la taille de leurs caractéristiques prises en compte dont le résultat dépend de la taille des voxels. Et si on a seulement ces squelettes extraits sans savoir de quel objets s'agit-ils ! On peut faire facilement la reconnaissance de ces objets 3D concernant leurs squelettes présentés.

Table 1. Comparaison au niveau du temps d'exécution

Objet3D/Temps d'exécution	Objets 3D via vue 2D	Objets 3D voxels
Nom d'objet 3D	Temps d'exécution T(s)	Temps d'exécution T(s)
Cheval	59.35	92.24
Main	60.21	228.9
Dinosaure	50.3	70.8
Vache	50.8	152.5
Moyenne	55.165	136.11
Complexité d'algorithme	$O(n^2)$	$O(n^3)$

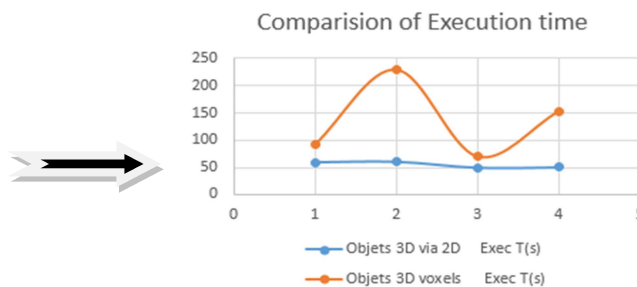


Fig. 12. Comparaison au niveau du temps D'exécution

Dans le tableau ci-dessus nous avons calculé la complexité de chaque algorithme et bien étudié leurs efficacité en comparant les deux algorithmes « thinning » appliqués aux objets voxels au niveau du temps d'exécution en raison de la complexité qui conduit à une classification des problèmes liés à la performance des algorithmes les plus connus que la résolution. A priori, nous ne pouvons pas toujours mesurer le temps de calcul sur toutes les entrées possibles d'un algorithme qui est pourquoi j'ai choisi de calculer la complexité en temps de notre approche et l'autre approche comparative et nous voyons que la complexité de notre algorithme $O(n^2)$ (une complexité quadratique) est plus petite que l'autre qui est $O(n^3)$ (une complexité cubique) appliquée sur l'algorithme « thinning » des objets voxels, ce qui nous montre que notre méthode est plus rapide pour donner de bons résultats que l'autre méthode comparable, et voir ci-dessous un tableau comparatif entre les deux complexités étudiées en général:

Table 2. Exemple de grandeur de la durée nécessaire pour exécuter un algorithme d'une sorte de complexité

Complexité	$O(n^2)$	$O(n^3)$
Temps pour n=x		
n=5	250 ns	1.25 μ s
n=10	1 μ s	10 μ s
n=20	4 μ s	80 μ s
N=50	25 μ s	1.25 ms
N=250	625 μ s	156 ms
N=1000	10 ms	10 s
N=10 000	1 s	2.7 heures
N=1 000 000	2.8 heures	316 ans

12 CONCLUSION

Il y eu de nombreux algorithmes de différents courbe-squelettisation proposés dans la littérature. Dans cet article notre travail concerne l'étude, le calcul et la simplification des squelettes d'objets 2D et 3D qui est utile pour la description et la reconnaissance de formes et des objets 3D, la quantification et la mise en correspondance, etc. Dans un premier temps, nous recensons les différentes techniques de calcul du squelette. La très grande majorité d'entre elles travaille sur des images binaires avec des outils de la géométrie discrète. Or, dernièrement, une nouvelle famille de méthodes, appelées méthodes continues a vu le jour. Le squelette est approché à l'aide du graphe de Voronoï d'un échantillonnage de la frontière, et se calcule par des moyens propres à la géométrie algorithmique. Notre intérêt s'est porté sur une nouvelle approche d'algorithme Thinning appliqué sur des objets 3D simple en vue 2D et comparé par des résultats d'un autre algorithme Thinning appliqué sur les objets 3D voxels .Et pour finir, nous avons réalisé une application pratique qui valide notre approche.

RÉFÉRENCES

- [1] G. Aujay, F. Hétroy ET F. Lazarus. Construction automatique d'un squelette. Journées de l'Association Francophone d'Informatique Graphique, Bordeaux, pour l'animation de personnages 2006.
- [2] Nicu D. Cornea, M. Fatih Demirci, Deborah Silver, Ali Shokoufandeh, Sven J. Dickinson, Paul B. Kantor, 3D Object Retrieval using Many-to-many Matching of Curve Skeletons. Proceedings of the International Conference on Shape Modeling and Applications (SMI'05) 0-7695-2379-X/05 \$20.00 © 2005 IEEE
- [3] Nicu D. Cornea, Deborah Silver, Patrick Min, "Curve-Skeleton Properties, Applications, and Algorithms," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 13, no. 3, pp. 530-548, May-June 2007, doi:10.1109/TVCG.2007.1002
- [4] Grégoire Aujay, Franck Hétroy, Francis Lazarus, Christine Depraz. Harmonic Skeleton for Realistic Character Animation, Eurographics/ ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation (2007).
- [5] H. Blum. A transformation for extracting new descriptors of shape. In Models for the Perception of Speech and Visual Form, pages 362–380, 1967.
- [6] D. Attali, G. Sanniti di Baja, and E. Thiel. Pruning discrete and semi continuous skeletons. Lecture Notes in Computer Science, 974:488, 1995.
- [7] Lawson Wade and Richard E. Parent. Automated generation of control skeletons for use in animation. The Visual Computer, 18(2):97–110, 2002. IEEE Computer Society, 2003.
- [8] Wan-Chun Ma, Fu-Che Wu, and Ming Ouhyoung. Skeleton extraction of 3D objects with radial basis functions. In Shape Modeling International, pages 207–215, 295
- [9] Silvia Biasotti, Simone Marini, Michela Mortara, and Giuseppe Patanè. An overview on properties and efficacy of topological skeletons in shape modelling. In Shape Modeling International, pages 245–256, 297. IEEE Computer Society, 2003.
- [10] Tony Tung, Francis Schmitt, "Augmented Reeb Graphs for Content-Based Retrieval of 3D Mesh Models," smi, pp.157-166, International Conference on Shape Modeling and Applications 2004 (SMI'04), 2004.
- [11] Julien Tierny, Mohamed Daoudi, and Jean-Philippe Vandeborre. Invariant highlevel reeb graphs of 3d polygonal meshes. Chapel Hill, North Carolina, USA, June 2006. 3rd IEEE International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission (3DPVT'06).
- [12] Masaki Hilaga, Yoshihisa Shinagawa, Taku Komura, and Toshiyasu L. Kunii. Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes. In SIGGRAPH, pages 203–212, 2001.
- [13] Francis Lazarus and Anne Verroust. Level set diagrams of polyhedral objects. In ACM Solid Modeling'99, Ann Arbor, Michigan, USA, June 1999.
- [14] Xinlai Ni, Michael Garland, and John C. Hart. Fair morse functions for extracting the topological structure of a surface mesh. SIGGRAPH ACM Transactions on Graphics, 23(3):613–622, August 2004.
- [15] G. Bertrand and Z. Aktouf. A three-dimensional thinning algorithm using subfields, Proc. SPIE 2356, Vision Geometry III, (4 January 1995).
- [16] T.Y. Kong, A. Rosenfeld. Digital topology: Introduction and survey. Comp. Vision, Graphics, and Image Proc., 48(3):357-393, 1989.
- [17] T.Y. Kong, A.W. Roscoe, A. Rosenfeld. Concepts of digital topology, Topology and its App., 46(3):219-262, Elsevier, 1992.
- [18] W. Gong and G. Bertrand. A simple parallel 3d thinning algorithm. Proc. IEEE Pattern Recognition, 188-190, 1990.
- [19] C. Lohou and G. Bertrand, A 3D 12-subiteration thinning algorithm based on P-simple points, Discrete Applied Mathematics 139:171-195, Elsevier, 2004.
- [20] Fang SU, ChenH (2000) Hardware Accelerated Voxelization. Computers and Graphics, 24(3):433-442.
- [21] Helman J-L, Hesselink L (1991) Visualizing Vector Field Topology Fluid Flows. IEEE Computer Graphics and applications.
- [22] S. Svensson, I. Nystrom and G.S. Di Baja. Curve-skeletonization of Surface-like Objects in 3D Images Guided by Voxel Classification, Pattern Recognition Letters, 1419-1426, 2002.