

Métriques de distorsion pour l'analyse comparative de schémas de filigranage 3D

Patrice RONDAO ALFACE, Mathieu DE CRAENE, Benoît MACQ

Université catholique de Louvain
Laboratoire de Télécommunications et Télédétection
Place du Levant 2, B-1348 Louvain-La-Neuve, Belgique
rondao@tele.ucl.ac.be, decraene@tele.ucl.ac.be, macq@tele.ucl.ac.be

Résumé – Dans cet article, nous traitons de la problématique de la mesure de distorsion des maillages 3D dans le cadre de l'analyse comparative de schémas de filigranage. Cette mesure est nécessaire afin de classifier les types de déformations acceptables et de déterminer des seuils de tolérance. Nous proposons dans cette optique deux approches distinctes et complémentaires. La première consiste en une métrique perceptive globale basée sur l'analyse des différences entre les vues 2D correspondantes de l'objet 3D et de sa version déformée. Nous montrons par nos résultats que le choix de l'information mutuelle comme critère de comparaison de ces vues projetées permet de mieux détecter de faibles distorsions à la limite de l'imperceptibilité, courantes dans le cadre du filigranage. La deuxième approche complète la première en analysant les différences locales entre maillages via l'estimation de l'énergie de déformation. Cette stratégie trouve ses fondements notamment dans le calcul de la paramétrisation planaire ou sphérique des surfaces maillées. Cette étude se conclut par la comparaison des résultats de ces méthodes et des métriques 3D de l'état de l'art.

Abstract – Three-dimensional image quality assessment causes new challenges for a wide set of applications and particularly for emerging 3-D watermarking schemes. New metrics have to be drawn for the distortion measurement from an original 3-D surface to its deformed version. Such metrics are necessary namely in the case of a watermarking scheme to determine whether a distortion is acceptable or not. We propose two complementary strategies to tackle this issue. First, we propose a global perceptive metric based on the analysis of the differences between correspondent 2D views of the original and deformed versions of the 3D model. We show that the mutual information criterion better captures slightly perceptible distortions to which watermarking schemes must resist. Secondly, we focus on local deformations by estimating the distortion energy, extending works on distortion minimization for planar and spherical parameterizations. Finally results of both methods are discussed and compared to the state of the art.

1 Introduction

Estimer la différence ou la similarité entre deux surfaces maillées 3D reste un problème ouvert et encore relativement peu exploré. L'importance de cette estimation s'avère néanmoins capitale dans de nombreuses applications telles la compression, la transmission progressive, l'indexation, ou le filigranage. Les premières métriques de distorsion ont été développées dans deux directions différentes mais complémentaires. La première est motivée par la nécessité de mesurer l'impact des déformations *globales* causées par les algorithmes de compression 3D[6]. La seconde direction de recherche, à l'inverse, s'est concentrée sur les déformations *locales* dans le cadre des schémas de simplification des maillages 3D[7]. Les outils issus de ces approches distinctes partagent néanmoins les mêmes fondements et se basent en général sur une estimation de la distance euclidienne. Si ce choix permet de développer des algorithmes simples et rapides, il ne permet cependant pas de capturer la distorsion perceptive, exigence plus forte du domaine du filigranage. En effet, dans le cadre du benchmark de schémas de filigranage 3D, il est nécessaire de capturer la différence perçue par l'utilisateur entre le maillage original et sa version déformée. Etant donné le manque actuel d'outils performants de mesure de distorsion en 3D, la comparaison de schémas de filigranage demeure ardue et donc peu populaire.

Nous proposons en ce sens deux stratégies complémentaires. La première approche vise la mesure des différences (globales) de rendu entre version altérée et originale l'objet, essentielle dans de nombreuses applications où l'utilisation principale de l'objet 3D passe par sa visualisation 2D. La comparaison, via un critère basé sur l'information mutuelle, de nombreuses vues 2D sélectionnées automatiquement dans des conditions de rendu standard, permet de dessiner une métrique globale qui capture les légères modifications peu perceptibles auxquelles sont confrontés les schémas de filigranage. La deuxième approche, quant à elle, consiste en l'estimation de l'énergie de déformation pour étudier localement les distorsions apportées par les attaques courantes dans le domaine du filigranage.

Il est en outre important de souligner que cet article se concentre sur la mesure de la distorsion entre un *maillage original* et sa *version déformée* et non sur la mesure de qualité du maillage lui-même après traitement comme réalisé par Corsini et al. [4].

Cet article est organisé comme suit. La première section fait le point sur les métriques existantes et leurs limitations. Les sections 3 et 4 présentent nos contributions. Tout d'abord une métrique basée sur la mesure de la distorsion entre de mul-

tiples paires de vues 2D correspondantes et ensuite une autre métrique qui complète la première par l'analyse des déformations locales, basée sur l'estimation de l'énergie de distorsion 3D. Nos résultats sont illustrés et commentés en section 5.

2 Etat de l'art

Les premières métriques 3D ont vu le jour dans le domaine de la simplification des maillages, outil de base notamment des célèbres schémas de multirésolution [6, 7]. Ces métriques ont été développées dans le souci de déterminer localement la distorsion provoquée par l'extraction d'un point ou d'une arête du maillage. Les métriques les plus usuelles dans ce cadre sont la très célèbre distance de Hausdorff[3, 8], les différences de volume[1], les différences locales de courbure[11] et les fonctions d'erreur locale quadratiques QEM[7]. Dans le cas particulier des schémas de compression sans modification de la connectivité, le PSNR et le Laplacien géométrique[10] se basent sur une somme normalisée des distances euclidiennes entre points correspondants des deux maillages à comparer ainsi que sur un critère de régularité de la surface. Parallèlement à ces travaux, Reddy[13] a proposé une mesure basée sur le modèle de vision humaine et défini un schéma de simplification qui dépend du point de vue, les zones visibles gardant plus de détails que les autres. Cependant, il n'existe encore à l'heure actuelle aucune mesure psycho-visuelle permettant d'estimer le caractère imperceptible des attaques et de l'insertion d'un filigrane.

Afin de permettre un benchmark efficace de schémas de filigrane, il convient de développer un outil qui mesure la distorsion subie par l'entièreté du maillage tout en assurant un contrôle local de la distorsion. Nous proposons d'allier deux stratégies différentes pour résoudre ces deux contraintes. La première est une métrique globale et est basée sur la visualisation de l'objet 3D, la seconde est de type locale et basée sur l'estimation de l'énergie de distorsion.

3 Distorsion visuelle dans le rendu

Dans cette section, nous étudions les distorsions des surfaces maillées 3D par la comparaison de projections 2D de la surface maillée par de multiples points de vue. En pratique, nous discrétisons de manière régulière la sphère de rayon minimal circonscrite au maillage et positionnons la caméra en ces points. Dans le cadre de nos expériences, nous avons testé plusieurs nombres de vues et avons déterminé un intervalle de confiance de 64 à 256 vues. Les conditions d'illumination sont choisies de manière standard par rapport à la position de la caméra. Cette méthode a été initialement explorée par Lindstrom et al [12] pour la simplification des maillages. Cependant, les auteurs n'utilisent qu'un critère de moindres carrés sur des images de luminance et utilisent cette technique pour déterminer des distorsions locales. Nous étendons cette étude en proposant un critère plus adapté à de faibles distorsions et à une possible extension de la méthode à des conditions de rendu différentes pour comparer les vues correspondantes des deux surfaces maillées : l'information mutuelle [15]. Ce critère mesure la dépendance statistique entre chaque paire d'images correspondantes. De

plus, l'information mutuelle permet de re-synchroniser les vues entre elles si l'on n'a pas effectué une étape préliminaire de co-registation des deux maillages 3D à comparer. La section 5 expose nos résultats et les compare aux autres métriques, celle de Lindstrom et al., le PSNR, le Laplacien géométrique et la distance de Hausdorff pour quelques attaques typiques de filigrane.

4 Energie de déformation

Les premières études sur l'énergie de déformation des surfaces maillées sont apparues avec le problème de la paramétrisation et du placage de texture [5]. Paramétrer un maillage 3D revient à le projeter sur le plan 2D en minimisant les distorsions qui sont mesurées par les différences d'angles, de longueurs ou d'aires des triangles de ce maillage. Diverses mesures de distorsion ont été proposées : énergie harmonique (préservation des propriétés globales), conforme (préservation des angles uniquement), authalique (préservation des aires uniquement), énergie de stretch etc. L'extension à la mesure de distorsion entre deux maillages tous deux plongés dans l'espace 3D exige quelques modifications. En effet, il faut tout d'abord partitionner la surface en sous-maillages de connectivité identique pour ensuite calculer l'application bijective d'énergie minimale pour chaque paire de sous-maillages correspondants. Le travail pionnier de Schreiner et al.[14] utilise des points caractéristiques choisis à la main pour réaliser cette partition à des fins de morphing entre objets 3D différents. Obtenant un maillage de base de faible résolution, qu'ils développent ensuite en *progressive meshes*, les auteurs calculent l'énergie de *stretch* et en dérivent une métrique symétrique. L'application obtenue en minimisant l'énergie non-linéaire de stretch requiert un difficile et long processus d'optimisations locales successives pour chaque résolution successive des sous-maillages. Nous proposons de simplifier le calcul de cette métrique en choisissant l'énergie harmonique et en remaillant les sous-maillages correspondants avec une connectivité régulière de subdivision par la méthode des *Normal Meshes* [9].

4.1 Remaillage

Le remaillage se construit de la manière suivante. En commençant par un triangle de base, on subdivise celui-ci en trouvant pour le milieu de chacune de ses arêtes, l'intersection entre la normale du triangle partant de ce point et la surface maillée de départ. En cas d'intersections multiples, nous choisissons automatiquement la plus proche au sens euclidien. L'absence d'intersection ne se présente que dans le cas de sous-maillages comportant des trous topologiques, ce que nous évitons par construction de la partition initiale. En pratique, à l'issue du remaillage chaque sous-maillage possède un nombre de points supérieur au nombre de points original. Ce remaillage, s'il est assez fin pour que chaque triangle de départ contienne au moins un point du remaillé, se justifie dans le cadre de l'application bijective harmonique qui est continue et linéaire par morceaux sur les triangles du maillage.

4.2 Energie harmonique

Notons A et B deux sous-maillages correspondants. L'énergie harmonique de déformation de l'application de A dans B est donnée par :

$$H_{AB} = \frac{1}{2} \sum_{(i,j) \in A} (\cot \alpha_{A_{i,j}} + \cot \beta_{A_{i,j}}) (B(i) - B(j))^2, \quad (1)$$

où (i, j) est une arête dans A et B , $\alpha_{A_{i,j}}$ et $\beta_{A_{i,j}}$ sont les angles qui voient l'arête (i, j) dans A et $B(i)$ et $B(j)$ sont les images des points 3D i et j de A dans B . Pour obtenir une métrique symétrique, nous posons $H(A, B) = \max(H_{AB}, H_{BA})$. L'énergie ici quadratique est aisément minimisée par la résolution d'un système linéaire contrairement aux optimisations locales de l'énergie de stretch. Nous montrons en outre qu'elle permet de déterminer localement les distorsions apportées par des transformations 3D. Les résultats sont illustrés et commentés à la section 5.

5 Résultats

Cette section présente nos résultats empiriques pour les deux métriques proposées dans cet article. Les figures 1, 2 et 3 comparent notre métrique basée sur les projections 2D avec les métriques usuelles de l'état de l'art pour quelques attaques typiques de filigranage : addition de bruit gaussien, lissage et décimation. Ces résultats montrent que l'information mutuelle capture mieux de petites variations de l'objet (ce qui est le cas de figure du filigranage) que le critère de moindres carrés proposé dans [12]. Intuitivement, ceci s'explique par l'allure de la courbe de l'information mutuelle en fonction de l'intensité des attaques. Celle-ci est fortement décroissante et de courbure positive pour des intensités d'attaque faibles, contrairement à la courbure généralement négative des moindres carrés. L'impact des conditions de rendu sur la métrique doit cependant être étudié plus en détails et comparé notamment avec le rendu de Phong moins courant mais de meilleure qualité[2]. La distorsion visuelle du modèle *bunny* peut être perçue dans les figures 4 et 5 pour les attaques testées. Enfin, la figure 6 illustre nos résultats préliminaires pour la détection de distorsion locale basée sur l'estimation de l'énergie de déformation. On peut y voir le résultat du remaillage par subdivision d'un sous-maillage triangulaire sur le modèle *head* ainsi que l'énergie de distorsion pour une attaque de lissage Laplacien.

6 Conclusions

Nous avons proposé deux nouvelles métriques pour l'application du benchmark de schémas de filigranage 3D. Les résultats expérimentaux sont probants mais nécessitent encore de nombreux tests. La suite des travaux concernera l'étude de l'impact des conditions de rendu sur notre métrique basée sur les projections et l'étude de bornes sur l'approximation du calcul de l'énergie harmonique en fonction de la finesse du remaillage.

7 Remerciements

Les deux premiers auteurs sont financés par la bourse FRIA de la Communauté Française de Belgique. Nous remercions également l'Action de Recherches Concertées CRYPTOMARK de la Région Wallonne.

Références

- [1] P. Alliez and F. Schmitt, *Mesh Approximation Using a Volume-Based Metric*, In Proc. of Pacific Graphics, pp. 292-301, 1999.
- [2] G. Bishop and D.M. Weimer, *Fast Phong Shading*, Proc. of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp. 103-106, 1986.
- [3] P. Cignoni, C. Rocchini and R. Scopigno, *Metro : Measuring Error On Simplified Surfaces*, Computer Graphics Forum, Vol. 17, No. 2, pp. 167-174, 1998.
- [4] M. Corsini, E. Drelie Gelasca and T. Ebrahimi, *A Multi-Scale Roughness Metric For 3D Watermarking Quality Assessment*, in Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services, April 13-15, Montreux, Switzerland, 2005.
- [5] M. Desbrun, M. Meyer and P. Alliez, *Intrinsic Parameterizations Of Surface Meshes*, Computer Graphics Forum. 17(2), pp. 167-174, 2002.
- [6] M. Eck, T. De Rose, T. Duchamp, H. Hoppe, M. Lounsbery and W. Suetzle, *Multiresolution Analysis Of Arbitrary Meshes*, ACM SIGGRAPH, pp. 173-182, 1995.
- [7] M. Garland, *Quadric-Based Polygonal Surface Simplification*, Ph.D. dissertation, Computer Science Department, Carnegie Mellon University, CMU-CS-99-105, May 1999.
- [8] A. Guezic, *Meshsweeper : Dynamic Point-To-Polygonal-Mesh Distance And Applications*, IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, pp. 47-61, 2001.
- [9] I. Guskov, K. Vidimce, W. Sweldens and P. Schröder, *Normal Meshes*, Computer Graphics Proc. (SIGGRAPH 2000), pp. 95-102, 2000.
- [10] Z. Karni and C. Gotsman, *Spectral Compression Of Mesh Geometry*, Computer Graphics (Proc. of SIGGRAPH), pp. 279-286, 2000.
- [11] S. J. Kim, S.J. Kim and C. H. Kim, *Discrete Differential Error Metric For Surface Simplification*, In Proc. of Pacific Graphics, pp. 276-283, 2002.
- [12] P. Lindstrom and G. Turk, *Image-Driven Simplification*, ACM Transactions on Graphics, Vol. 19, No. 3, pp. 204-241, 2000.
- [13] M. Reddy, *Perceptually Optimized 3D Graphics*, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 21, No. 5, pp. 68-75, 2001.
- [14] J. Schreiner, A. Asirvatham, E. Praun and H. Hoppe, *Inter-Surface Mapping*, ACM SIGGRAPH, 2004, to appear.
- [15] P. Viola and W. M. Wells, *Alignment By Maximization Of Mutual Information*, Fifth Int. Conf. On Computer Vision, pp. 16-23, 1995.

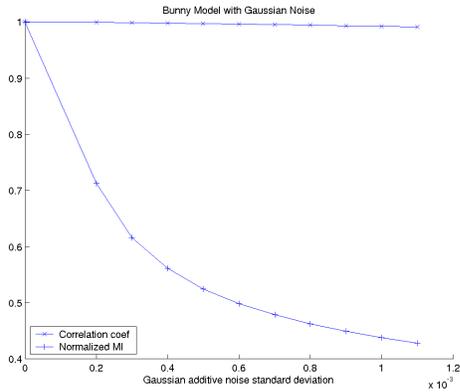


FIG. 1 – Attaque par bruit gaussien en fonction du paramètre α pour le modèle *bunny*. Les métriques de similarité ont été calculées par les moindres carrés et l'information mutuelle.

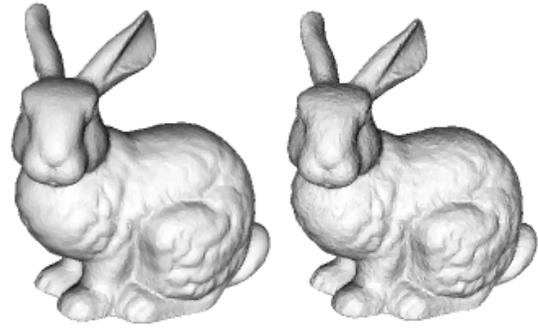


FIG. 4 – Modèle *bunny* représenté pour l'attaque de bruit gaussien avec des valeurs du coefficient α égales à $\alpha = .0005$ et $.001$ respectivement.

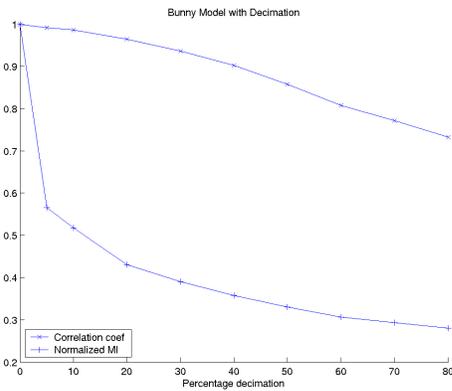


FIG. 2 – Attaque par décimation en fonction du pourcentage de points restant pour le modèle *bunny*. Les métriques de similarité ont été calculées par les moindres carrés et l'information mutuelle.

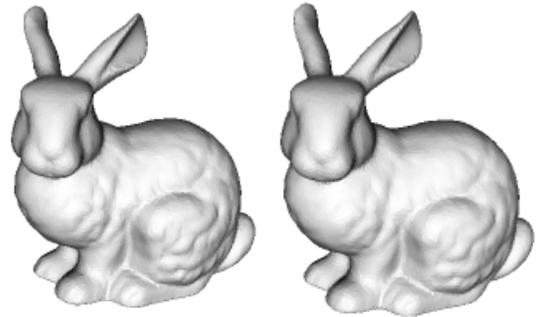


FIG. 5 – Modèle *bunny* représenté pour l'attaque de lissage laplacien avec 70 et 110 itérations respectivement.

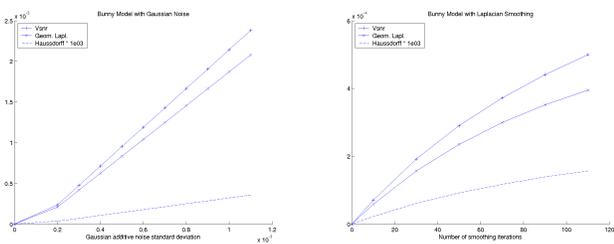


FIG. 3 – A gauche, attaque par bruit gaussien additif et à droite par lissage Laplacien pour le modèle *bunny*. Les métriques de distorsion 3D représentées sont le PSNR, le Laplacien géométrique et la distance de Hausdorff.

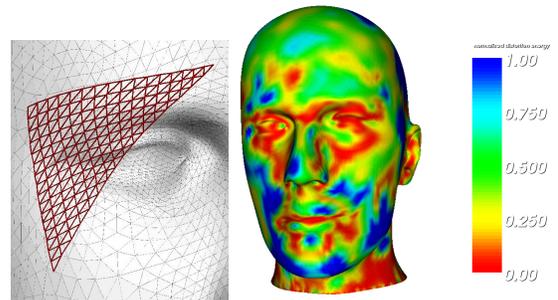


FIG. 6 – A gauche détail du processus de remaillage et à droite énergie de déformation harmonique locale pour le modèle *head* et sa version lissée avec 200 itérations.