

Métrique de qualité perceptuelle des maillages 3D fondée sur les tenseurs de courbure

Fakhri TORKHANI, Kai WANG, Jean-Marc CHASSERY

GIPSA-lab - Grenoble INP - CNRS - UMR5216

11 rue des Mathématiques, BP46, F-38402, Grenoble Cedex, France

fakhri.torkhani@gipsa-lab.grenoble-inp.fr, kai.wang@gipsa-lab.grenoble-inp.fr,
jean-marc.chassery@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Résumé – La qualité perceptuelle des maillages 3D est cruciale pour plusieurs applications. Bien qu’il existe des métriques objectives de distances géométriques entre deux maillages, elles ne permettent pas la prédiction de la qualité perceptuelle et n’intègrent pas les propriétés du système visuel humain. Dans ce papier on présente une nouvelle méthode pour l’évaluation de la qualité perceptuelle des maillages 3D. Notre approche est fondée sur la distance entre les tenseurs de courbure en utilisant aussi bien les directions principales que les amplitudes de courbure. Nous validons expérimentalement notre métrique sur trois bases de données subjectives et nous présentons une application pour notre approche à la mesure de la distorsion perceptuelle introduite par le tatouage.

Abstract – 3D mesh perceptual quality is crucial for many applications. Although there exist some objective geometric metrics for measuring distances between meshes, they do not integrate the characteristics of human visual system and thus are unable to faithfully predict the visual quality. In this paper, we introduce a perceptual quality metric for 3D meshes. The proposed metric combines curvature directions with curvature amplitudes to derive a distance between curvature tensors. In order to verify its efficacy, we tested our approach on three subjectively-rated databases and put our metric into practice with an application to perceptual quality evaluation of watermarked meshes.

1 Introduction

La représentation 3D des objets sous forme de maillages est utilisée à travers plusieurs applications : animations 3D, imagerie médicale, conception assistée par ordinateur, etc. Il est fréquent que ces maillages subissent différents types de traitements (compression, tatouage, remaillage, etc.) qui risquent d’altérer la qualité visuelle. L’évaluation de la qualité perceptuelle des maillages vise à mesurer avec fidélité la qualité visuelle et à répondre aux demandes des applications [1]. Afin de mesurer une distance entre deux maillages, il est possible d’utiliser l’une des métriques purement géométriques fondées sur le calcul des distances entre les sommets du maillage de référence et du maillage à comparer. Parmi ces mesures géométriques, on cite la distance de *Hausdorff* et la distance calculée par la racine carrée de l’erreur quadratique moyenne [2]. Ces mesures géométriques profitent d’une complexité réduite mais elles ne reflètent pas les qualités de maillages perçues par les êtres humains [1]. D’autres métriques intègrent les propriétés de la perception visuelle. Dans ce cadre, la métrique *3DWPM* (*3D Watermarking Perception Metric*) [3] calcule la distance perceptuelle entre deux maillages en se reposant sur la rugosité des surfaces. Lavoué et al. introduisent la métrique *MSDM* (*Mesh Structural Distortion Measure*) qui utilise l’amplitude de la courbure moyenne sur la surface du maillage 3D pour quantifier la distorsion perceptuelle. Cette métrique a été récemment améliorée sous le nom de *MSDM2* en intégrant une analyse multi-échelle

[4]. *MSDM* et *MSDM2* se basent uniquement sur des statistiques sur les amplitudes de courbures. On propose dans notre étude de combiner les amplitudes de courbures avec les directions principales de courbures pour calculer une distance perceptuelle. Notre métrique de qualité perceptuelle fondée sur la distance entre les tenseurs de courbure, notée *MDPT* (Mesure de Distance Perceptuelle des Tenseurs), intègre aussi des propriétés perceptuelles telles que l’effet de masquage¹ spatial. Dans le cas des maillages, cet effet signifie essentiellement que la même distorsion paraît plus visible dans la partie lisse que dans la partie rugueuse du maillage. Les différentes étapes de notre approche sont détaillées dans la deuxième section de ce papier. Nous présentons quelques résultats expérimentaux dans la troisième section. Dans la quatrième section, nous concluons et faisons état des perspectives de notre travail.

2 Métrique de qualité perceptuelle des maillages

Le diagramme fonctionnel de la mesure de qualité perceptuelle *MDPT* est présenté sur la figure 1. Dans les paragraphes suivants on détaille les différentes étapes affichées dans cette figure et nécessaires à la construction de notre métrique de qualité

1. Le masquage est l’effet de réduction de la visibilité d’une composante visuelle (signal masqué) par la présence d’une autre composante (signal masquant).

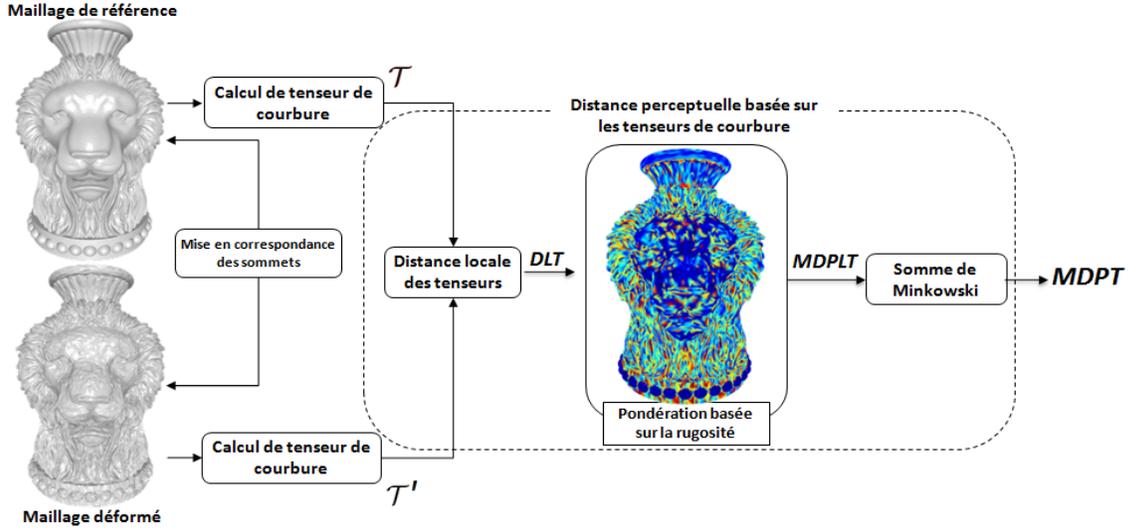


FIGURE 1 – Diagramme fonctionnel des différentes étapes de la mesure de qualité perceptuelle de maillages 3D proposée.

perceptuelle fondée sur les tenseurs de courbure.

2.1 Mise en correspondance des sommets

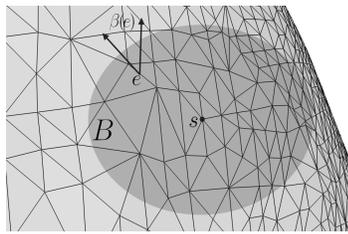
Afin de pouvoir comparer deux maillages de connectivités différentes, dans une première étape de pré-traitement on établit une correspondance entre les sommets des deux maillages à comparer. Pour cela, on a utilisé un algorithme de recherche rapide à travers une structure de données en arbre (*AABB tree*) [5]. A l'issue de cette étape, on associe pour chaque sommet s_i du maillage de référence un sommet correspondant noté s'_i sur le maillage à comparer.

2.2 Calcul de tenseur de courbure

Pour définir un tenseur de courbure sur la surface de maillage, nous utilisons une estimation dérivée de la théorie du cycle normal [6]. Sur chaque sommet s_i du maillage, le tenseur \mathcal{T} est calculé à partir d'une moyenne sur un disque géodésique B :

$$\mathcal{T}(s) = \frac{1}{|B|} \sum_e \beta(e) |e \cap B| \bar{e} \bar{e}^t, \quad (1)$$

où $|B|$ est l'aire du disque géodésique, $\beta(e)$ désigne l'angle signé entre les normales des facettes incidentes à l'arête e , $|e \cap B|$ représente la longueur de la portion de e à l'intérieur de B et \bar{e} est le vecteur unitaire dans la direction de e . \mathcal{T} est une matrice de taille 3×3 . Ce sont les valeurs absolues des valeurs propres non nulles, notées κ_{min} et κ_{max} , qui représentent les courbures minimale et maximale. Les vecteurs propres associés à ces valeurs, notés γ_{min} et γ_{max} , sont les directions des



courbures principales de la surface [6]. Dans notre étude, le tenseur de courbure est calculé sur une fenêtre locale B établie par l'intersection d'une sphère centrée sur le sommet courant et de rayon égal à 0.5% de la diagonale de la boîte englobante du maillage.

2.3 Distance locale des tenseurs

Sur la base des éléments propres du tenseur, il est important de souligner que les directions de courbures minimale et maximale représentent les structures saillantes de la surface qui sont perceptuellement pertinentes [7]. En utilisant ces éléments, on calcule dans cette étape une distance locale de tenseurs notée *DLT*. Pour chaque paire de sommets mis en correspondance, on déduit à partir du tenseur de courbure \mathcal{T} les valeurs de courbures principales et les directions principales de courbures. Pour chaque direction principale du tenseur sur le sommet s_i , nous trouvons la direction principale du tenseur sur le sommet s'_i qui a la plus petite distance angulaire à la première direction. Nous associons ces deux directions principales pour le calcul de distance locale des tenseurs. Les correspondances entre les amplitudes de courbures sont ainsi établies entre les deux tenseurs. La distance locale des tenseurs proposée s'appuie à la fois sur les angles formés par les directions de courbures principales (θ_{min} et θ_{max}) et le contraste de Michelson entre les amplitudes de courbures principales ($\delta_{\kappa_{min}}$ et $\delta_{\kappa_{max}}$) :

$$DLT_i = \theta_{min} \delta_{\kappa_{min}} + \theta_{max} \delta_{\kappa_{max}}. \quad (2)$$

2.4 Pondération basée sur la rugosité

Pour incorporer l'effet de masquage, on effectue une pondération guidée par deux descripteurs de rugosité déduits sur le voisinage direct de chaque sommet s_i . Le premier élément du descripteur de rugosité est calculé par l'écart type des angles entre les directions principales de courbure sur les différents

sommets dans le voisinage. Le deuxième descripteur est calculé par le ratio du Laplacien de la courbure moyenne et de la valeur de courbure moyenne au sommet s_i . Une carte de rugosité est affichée au centre de la figure 1, où les couleurs les plus chaudes représentent les régions de surface les plus rugueuses. Il existe un mapping entre les descripteurs de rugosité et les poids de pondération qui appartiennent à l'intervalle $[0.1, 1]$: plus la surface est rugueuse plus petits sont les poids $R_i^{(\gamma)}$ et $R_i^{(\kappa)}$ dans l'équation (3). La mesure de distance perceptuelle locale des tenseurs est donnée par :

$$MDPLT_i = R_i^{(\gamma)} \cdot R_i^{(\kappa)} \cdot DLT_i. \quad (3)$$

2.5 Mesure de la distance perceptuelle globale

Pour calculer une distance perceptuelle globale, on utilise une somme pondérée de Minkowski des distances locales :

$$MDPT = \left(\sum_{i=1}^N p_i |MDPLT_i|^l \right)^{\frac{1}{l}}, \quad (4)$$

où p_i est proportionnel à l'aire totale des facettes incidentes à chaque sommet. L'objectif de cette pondération est d'améliorer la stabilité de notre métrique vis à vis de la densité du maillage. Dans le but d'attribuer plus d'importance aux erreurs locales de haute amplitude dans le calcul de la distance globale [8], le paramètre l est fixé dans tous nos tests à 2.5. $MDPT$ mesure une distance perceptuelle entre deux maillages : plus la valeur de distance est élevée plus la dégradation visuelle est importante.

3 Résultats expérimentaux

Afin d'étudier les performances de la métrique proposée, on a comparé les mesures objectives issues de la métrique avec les scores subjectifs fournis par les trois bases de données publiques suivantes :

- Base de données à usage général du *LIRIS/EPFL* qui vise à étudier le comportement général des métriques de qualité perceptuelle.
- Base de données de masquage du *LIRIS* qui simule l'effet de masquage spatial sur les maillages 3D. Dans cette base de données, le bruit a été ajouté localement sur les régions lisses ou rugueuses des surfaces des maillages.
- Base de données de simplification de l'*IEETA* qui contient des versions simplifiées de maillages 3D. On note qu'il est impossible d'appliquer sur ces données les métriques qui ne supportent pas le changement de connectivité ($3DWP M_1$ et $3DWP M_2$ [3]).

Deux coefficients de corrélation sont calculés entre les mesures objectives et les scores subjectifs : la corrélation linéaire de *Pearson* et la corrélation non linéaire de *Spearman* (voir tableau 1). Le premier coefficient évalue le degré de dépendance linéaire. Le second permet de comparer les rangs de scores subjectifs avec les mesures de qualité perceptuelle objectives. On constate que la métrique $MDPT$ offre une corrélation non

linéaire r_s plus élevée que les autres métriques sur les trois bases de données et une corrélation linéaire r_p la plus élevée sur les bases de données à usage général et de masquage.

Pour ce qui concerne l'effet de masquage, la figure 2 présente la carte de distances pour la mesure géométrique RMS [2] et notre métrique $MDPT$. On constate que $MDPT$ accorde plus d'importance aux régions où le bruit est plus visible. Ceci prouve l'intégration de la propriété perceptuelle de masquage, puisque le bruit est plus visible dans les parties lisses de la surface maillée que dans les régions à forte rugosité.

Une application de notre métrique de distance perceptuelle pour l'évaluation des résultats visuels des algorithmes de tatouage est présentée en figure 3. On applique sur le modèle Venus la méthode de tatouage de Wang et al. [9] (figure 3-(b)) et la méthode de Cho et al. [10] pour avoir respectivement la même distance $MRMS$ (*Maximum Root Mean Square error* [2]) (figure 3-(c)) et la même distance $MDPT$ (figure 3-(d)) que le modèle tatoué de Wang et al.. On remarque que pour une distance $MRMS$ égale, le résultat visuel est clairement meilleur en utilisant la méthode de Wang et al. (figure 3-(b)). Cette mesure géométrique ne permet pas la prédiction de la qualité perçue par les êtres humains après tatouage. Notre approche donne une distance assez élevée (0.89) pour le maillage de qualité dégradée (figure 3-(c)) et la même valeur de distance (0.24) pour les deux maillages de qualité perceptuelle comparable (figure 3-(b) et (d)).

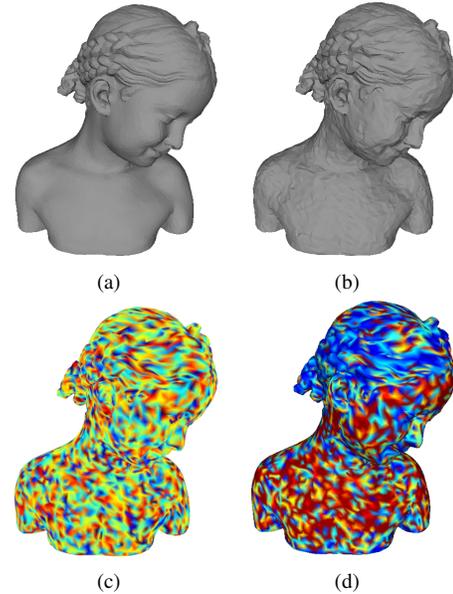


FIGURE 2 – Cartes de distances : (a)- maillage de référence, (b)- maillage bruité, (c)- carte de distance de RMS (*Root Mean Square Error* [2]), (d)- carte de distance perceptuelle de $MDPT$. Les couleurs les plus chaudes représentent les distances les plus élevées.

4 Conclusions et perspectives

L'objectif de la conception des métriques de qualité perceptuelle est de quantifier la distorsion visuelle perçue après différents

TABLE 1 – Résultats de corrélation linéaire de *Pearson* (r_p) et non linéaire de *Spearman* (r_s) pour différentes métriques objectives sur les trois bases de données de qualité subjective. Les valeurs sont représentées en pourcentage de corrélation.

Métrique	Base de données à usage général		Base de données de masquage		Base de données de simplification	
	r_p	r_s	r_p	r_s	r_p	r_s
<i>Hausdorff</i> [2]	11.4	13.8	20.2	26.6	50.5	49.4
<i>3DWPM</i> ₁ [3]	61.9	69.3	31.9	29.4	—	—
<i>3DWPM</i> ₂ [3]	49.6	49.0	42.7	37.4	—	—
<i>MSDM</i> ₂ [4]	81.4	80.4	87.3	89.6	89.2	86.7
<i>MDPT</i>	86.2	89.6	88.6	90.0	86.9	88.2

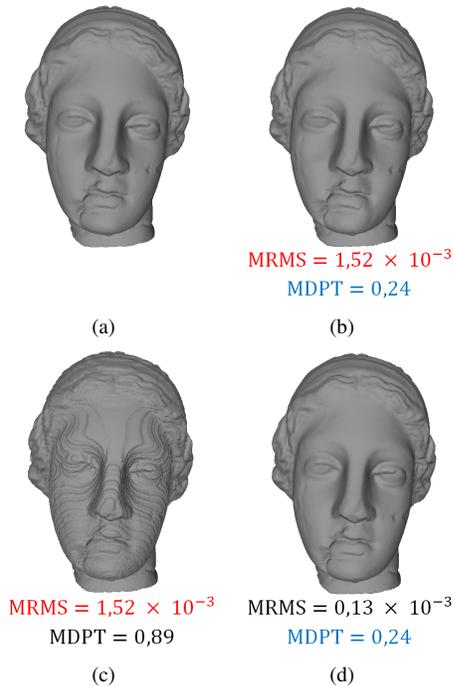


FIGURE 3 – Application de *MDPT* pour l'évaluation de la qualité perceptuelle des maillages 3D après tatouage : (a)-maillage Venus de référence, (b)- maillage Venus tatoué par la méthode de Wang et al. [9], (c)- et (d) présentent les résultats du tatouage par la méthode de Cho et al. [10] pour avoir respectivement la même distance géométrique *MRMS* [2] et la même distance perceptuelle *MDPT*.

types de traitements (compression, tatouage, transmission, etc.). Dans cette étude, nous avons présenté une nouvelle métrique de distance perceptuelle fondée à la fois sur les directions et sur les amplitudes des courbures principales. De plus, on a vérifié expérimentalement avec des valeurs de corrélations élevées sur la base de données de masquage que cette métrique simule la propriété de masquage du système visuel humain. Nous avons montré également que notre métrique offre une mesure objective capable de prédire correctement la qualité perceptuelle des maillages tatoués par différentes méthodes. La distance perceptuelle fondée sur les tenseurs de courbure pourra aussi être utilisée dans d'autres applications comme la segmentation ou l'indexation. Une étude de l'optimisation des différents paramètres dont la taille du disque géodésique local est une perspective de ce travail. Des travaux futurs sur

l'estimation de courbure seraient également pertinents, particulièrement pour pallier l'instabilité pour les cas dégénérés. Ce travail fait l'objet d'une étude complémentaire visant à traiter le problème d'analyse de la qualité de maillages dynamiques dans l'esprit de faire ressortir une métrique objective en corrélation avec les mesures subjectives issues du test d'analyse perceptuelle de la qualité de séquences maillées.

Références

- [1] M. Corsini, M.-C. Larabi, G. Lavoué, O. Petřík, L. Váša et K. Wang : Perceptual metrics for static and dynamic triangle meshes. In : Proc. of Eurographics State-of-the-Art Rep. (2012) 135-157.
- [2] P. Cignoni, C. Rocchini et R. Scopigno : Metro : measuring error on simplified surfaces. Comput. Graphics Forum 17(2) (1998) 167-174.
- [3] M. Corsini, E. Drelie Gelasca, T. Ebrahimi et M. Barni : Watermarked 3-D mesh quality assessment. IEEE Trans. on Multimedia 9(2) (2007) 247-256.
- [4] G. Lavoué : A multiscale metric for 3D mesh visual quality assessment. Comput. Graphics Forum 30(5) (2011) 1427-1437.
- [5] P. Alliez, S. Tayeb et C. Wormser : 3D fast intersection and distance computation (AABB tree). CGAL User and Reference Manual. (2012)
- [6] D. Cohen-Steiner et J.M. Morvan : Restricted Delaunay triangulations and normal cycle. Symp. on Computat. Geometry. (2003) 312-321.
- [7] F. Cole, A. Golovinskiy, A. Limpaecher, H.S. Barros, A. Finkelstein, T. Funkhouser et S. Rusinkiewicz : Where do people draw lines ? ACM Trans. on Graphics 27(3) (2008) 88:1-88:11.
- [8] Z. Wang et X. Shang: Spatial pooling strategies for perceptual image quality assessment. In: Proc. of IEEE Int. Conf. on Image Process. (2006) 2945-2948.
- [9] K.Wang, G. Lavoué, F. Denis et A. Baskurt: Robust and blind mesh watermarking based on volume moments. Comput. & Graphics 35(1) (2011) 1-19.
- [10] J.W. Cho, R. Prost et H.Y. Jung: An oblivious watermarking for 3-D polygonal meshes using distribution of vertex norms. IEEE Trans. on Signal Process. 55(1) (2007) 142-155.