

Tatouage robuste et aveugle de maillages 3D basé sur les moments volumiques *

Kai Wang¹

Guillaume Lavoué¹

Florence Denis²

Atila Baskurt¹

¹ LIRIS, UMR 5205 CNRS, INSA-Lyon, F-69621 Villeurbanne

² LIRIS, UMR 5205 CNRS, Université Lyon 1, F-69622 Villeurbanne

{kwang, glavoue, fdenis, abaskurt}@liris.cnrs.fr

Résumé

Cet article présente une méthode de tatouage robuste et aveugle pour les maillages tridimensionnels. Un tatouage multi-bits est inséré dans le maillage en modifiant ses moments volumiques analytiques locaux. Le maillage est d'abord normalisé en utilisant ses moments volumiques globaux, et ensuite décomposé en patchs par une discrétisation de son domaine cylindrique. Puis, un bit est inséré dans chaque patch candidat sélectionné par une quantification de son moment volumique local d'ordre zéro. Le patch est ensuite déformé itérativement pour atteindre le moment voulu. Cette déformation est guidée par un masque lisse pour ne pas introduire de distorsion visible. Un processus de compensation est nécessaire après l'insertion du tatouage pour restaurer la pose canonique du maillage, afin d'éviter le problème de causalité. La sécurité du tatouage est aussi assurée par une quantification scalaire de Costa modifiée et adaptée. L'extraction du tatouage est aveugle et simplement composée de trois étapes : la normalisation du maillage, la décomposition en patchs et l'extraction de bits des patchs candidats. Les résultats expérimentaux et les comparaisons avec l'état de l'art montrent les bonnes performances de notre méthode en termes de robustesse, imperceptibilité et sécurité. À notre connaissance, elle constitue aussi la première tentative pour obtenir la robustesse contre la conversion de représentations d'objets 3D (e.g. discrétisation du maillage en voxels).

Mots clés

Maillage, tatouage, robustesse, aveugle, moment volumique.

1 Introduction

Actuellement, le maillage polygonal devient l'une des principales représentations numériques d'objets 3D dans de nombreuses applications comme l'héritage culturel, l'imagerie médicale, la réalité virtuelle, les jeux vidéos et la conception assistée par ordinateur. De plus en plus de maillages 3D sont manipulés, visualisés et transmis sur Internet. Avec cette forte augmentation de l'utilisation des maillages 3D, les problèmes de protection de copyright et

d'authentification attirent de plus en plus d'attention. Le tatouage est considéré comme une solution efficace pour ces deux problèmes. Cette technique cache une certaine quantité d'information secrète dans la partie utile du fichier. Comparé avec la cryptographie, le tatouage numérique est capable de protéger (tatouage robuste) ou d'authentifier (tatouage fragile ou semi-fragile) les oeuvres digitales après la phase de transmission et l'accès légal.

Le travail présenté dans cet article a pour objectif de construire un tatouage robuste et aveugle pour les maillages 3D. Un tatouage aveugle ne nécessite pas le maillage original non-tatoué pour son extraction et possède une gamme d'applications beaucoup plus élargie qu'un tatouage non-aveugle. Cependant, pour les maillages 3D, il existe encore peu de méthodes robustes et aveugles proposées dans la littérature [1]. Cette situation est liée aux difficultés dues à la topologie arbitraire et à l'échantillonnage irrégulier des maillages 3D, ainsi qu'à la complexité des attaques (de géométrie, de connectivité et de changement de représentations) éventuelles sur les maillages tatoués.

Certaines méthodes spatiales sont aveugles [2, 3], mais ne sont pas robustes, surtout aux attaques de connectivité (e.g. simplification et remaillage), car les primitives géométriques de tatouage utilisées disparaissent après ces attaques. Par contre, certaines méthodes dans un domaine transformé sont robustes mais non-aveugles [4, 5]. Les outils de transformation utilisés sont sensibles aux changements de connectivité ; donc un pré-traitement de ré-échantillonnage du maillage d'entrée est nécessaire à l'extraction. Ce pré-traitement permet de restaurer la même connectivité que le maillage original non-tatoué mais rend inévitablement la méthode non-aveugle. Il existe également deux méthodes aveugles basées sur l'analyse spectrale [6] ou la transformation en ondelettes [7] ; cependant, elles sont peu robustes aux attaques sur la connectivité.

Quelques algorithmes robustes et aveugles sont néanmoins proposés. Afin de lutter contre les attaques de connectivité, les auteurs considèrent des descripteurs de forme des maillages 3D comme primitives de tatouage : l'histogramme des erreurs de prédiction pour les coordonnées des sommets dans un patch [8], et l'histogramme des normes des sommets [9]. Ces méthodes montrent une bonne robustesse due à la stabilité intrinsèque des descripteurs de forme

* Ce travail est partiellement soutenu par 'Chinese Scholarship Council' du gouvernement chinois ainsi que par la région Rhône-Alpes (Cluster ISLE, projet SISS).

utilisés. L’algorithme de Cho et al. [9] est peut-être le plus robuste dans la littérature ; cependant, il semble que cette technique ait un faible niveau de sécurité puisque l’histogramme des normes des sommets modifié est accessible par tout le monde. Une extraction non-autorisée et un effacement optimal peuvent donc être effectués très facilement.

2 Moments volumiques

Le moment volumique d’une surface 3D fermée est défini comme l’intégration volumique :

$$m_{pqr} = \int \int \int x^p y^q z^r \rho(x, y, z) dx dy dz \quad (1)$$

où p, q, r sont les ordres, et $\rho(x, y, z)$ est la fonction d’indication de volume (elle est égale à 1 si (x, y, z) est à l’intérieur de la surface ; sinon elle est égale à 0). Pour un maillage orientable, Zhang et Chen [10] ont dérivé l’expression explicite pour cette intégration volumique. L’idée est de la calculer comme une somme des intégrations primaires sur des primitives géométriques élémentaires. Pour un maillage triangulaire, sa primitive est le tétraèdre constitué d’une facette triangulaire f_i et de l’origine du système de coordonnées \mathcal{O} . Le signe de la contribution pour chaque intégration primaire est déterminé selon l’orientation de f_i et la position relative entre f_i et \mathcal{O} . Notons que si les facettes sont correctement orientées, le moment m_{000} est le volume de la surface fermée. Les expressions de quelques moments élémentaires d’ordres bas ($m_{pqr}^{(f_i)}$) sont listées dans les équations 2 à 4 (dans la page suivante), où $f_i = \{v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}\} = \{(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}), (x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}), (x_{i3}, y_{i3}, z_{i3})\}$. Avec ce calcul, les moments volumiques peuvent être facilement généralisés pour les surfaces orientables mais non-fermées (e.g. un patch de maillage 3D). Le calcul consiste à ajouter des facettes imaginaires en reliant les sommets de bords et l’origine \mathcal{O} , et puis calculer les moments pour la surface fermée obtenue. Ces moments volumiques sont des caractéristiques robustes et sont souvent utilisés pour le recalage et l’indexation de maillages 3D [10].

3 Vue d’ensemble de notre méthode

La méthode proposée est basée sur l’hypothèse qu’un tatouage robuste doit être intrinsèquement lié à la forme 3D du maillage, et non pas à ses éléments combinatoires (i.e. sommets, arêtes et facettes). De ce point de vue, les moments analytiques et continus présentés ci-dessus semblent être de bons candidats. Nous avons souhaité les utiliser pour insérer un tatouage lisible multi-bits (par opposition à un tatouage détectable). Il surgit immédiatement deux difficultés : premièrement, les moments de différents ordres sont corrélés, donc il est difficile de modifier les différents moments d’un maillage simultanément et indépendamment pour insérer plusieurs bits ; deuxièmement, la transformation pour obtenir ces moments n’est pas réversible, donc nous sommes obligés de les modifier indirectement dans le domaine spatial en déplaçant les sommets. Le premier point nous a forcés à décomposer le maillage en plusieurs patches et à insérer un bit dans chaque patch. Concernant

le deuxième point, nous introduisons un algorithme itératif pour la déformation des patches.

La figure 1.(a) illustre le processus d’insertion du tatouage. Le maillage hôte est d’abord normalisé en utilisant ses moments volumiques globaux. Puis, il est transformé du système de coordonnées Cartésien (x, y, z) au système cylindrique (h, r, θ) . Le maillage est ensuite décomposé en patches par une simple discrétisation de ses domaines h et θ . Pour certains patches hôtes sélectionnés, nous calculons les moments d’ordre zéro et les quantifions pour insérer un bit par patch. Afin d’assurer un calcul précis pour les moments des patches, nous insérons des sommets et arêtes auxiliaires sur les bords des patches ; ils peuvent être facilement retirés après l’insertion du tatouage. La modification des moments est effectuée par une déformation itérative des patches, avec l’utilisation d’un masque lisse pour assurer l’imperceptibilité du tatouage. Une troisième difficulté, le problème de causalité, apparaît à ce stade. En effet, après la déformation des patches hôtes, les moments globaux du maillage sont généralement modifiés ; par conséquent, nous risquons de ne pas trouver, d’une manière aveugle, la même pose du maillage à l’extraction après la normalisation. Un processus de compensation des moments globaux est introduit pour résoudre ce problème.

La figure 1.(b) illustre le processus d’extraction du tatouage, qui ne nécessite ni le maillage original non-tatoué, ni information supplémentaire, sauf une clé secrète par raison de sécurité. Ce processus consiste successivement en la normalisation du maillage, la décomposition en patches et l’extraction de bits des patches hôtes obtenus. Les sections suivantes détaillent les différentes étapes de l’insertion et de l’extraction.

4 Insertion du tatouage

4.1 Normalisation du maillage

La normalisation du maillage est un pré-traitement qui sert à la fois à l’insertion et à l’extraction du tatouage. Elle contient trois opérations consécutives :

1. translation du maillage pour que son centre coïncide avec l’origine du système de coordonnées objectif ;
2. mise à l’échelle uniforme du maillage pour qu’il soit englobé dans une sphère unité ;
3. rotation du maillage pour que ses axes principaux coïncident avec les axes du système de coordonnées.

Les coordonnées du centre du maillage sont calculées comme les ratios des moments volumiques ci-dessous :

$$C = (x_c, y_c, z_c) = \left(\frac{m_{100}}{m_{000}}, \frac{m_{010}}{m_{000}}, \frac{m_{001}}{m_{000}} \right) \quad (5)$$

Les trois axes principaux du maillage sont obtenus comme les vecteurs propres ordonnés de la matrice :

$$M = \begin{bmatrix} m_{200} & m_{110} & m_{101} \\ m_{110} & m_{020} & m_{011} \\ m_{101} & m_{011} & m_{002} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Cette normalisation est basée sur les moments volumiques calculés dans un espace continu. Elle est expérimentalement beaucoup plus robuste que celle basée sur les moments discrets du maillage [11]. Notons que le maillage

$$m_{000}^{(f_i)} = \frac{1}{6} |x_{i1}y_{i2}z_{i3} - x_{i1}y_{i3}z_{i2} - y_{i1}x_{i2}z_{i3} + y_{i1}x_{i3}z_{i2} + z_{i1}x_{i2}y_{i3} - z_{i1}x_{i3}y_{i2}| \quad (2)$$

$$m_{100}^{(f_i)} = \frac{1}{4}(x_{i1} + x_{i2} + x_{i3}) \cdot m_{000}^{(f_i)} \quad (3)$$

$$m_{110}^{(f_i)} = \frac{1}{10}(x_{i1}y_{i1} + x_{i2}y_{i2} + x_{i3}y_{i3} + \frac{x_{i1}y_{i2} + x_{i1}y_{i3} + x_{i2}y_{i1} + x_{i2}y_{i3} + x_{i3}y_{i1} + x_{i3}y_{i2}}{2}) \cdot m_{000}^{(f_i)} \quad (4)$$

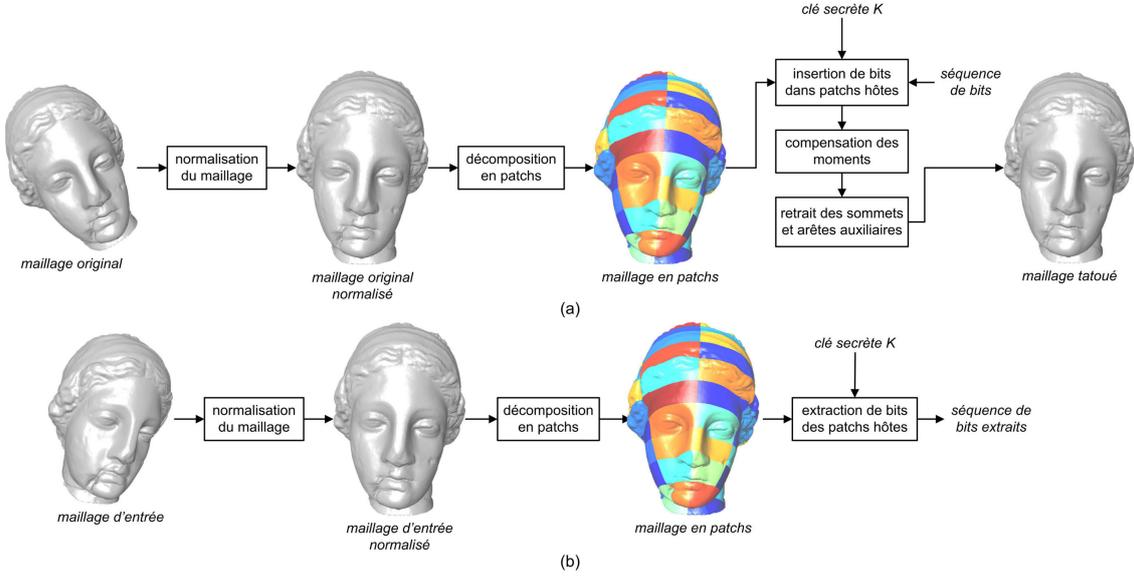


Figure 1 – Illustrations des processus de l'insertion du tatouage (a) et de l'extraction du tatouage (b).

normalisé a des valeurs nulles pour les moments m_{100} , m_{010} , m_{001} , m_{110} , m_{101} et m_{011} .

4.2 Décomposition en patches

Après la normalisation, chaque sommet $v_k = (x_k, y_k, z_k)$ est converti au système de coordonnées cylindrique : $v_k = (h_k, r_k, \theta_k) = (z_k, \sqrt{x_k^2 + y_k^2}, \tan^{-1}(\frac{y_k}{x_k}))$. La décomposition en patches du maillage est simplement une discrétisation uniforme de ses domaines h et θ en I_h et I_θ intervalles. Il serait possible de rendre cette discrétisation pseudo-aléatoire en utilisant une clé secrète afin de renforcer encore la sécurité du tatouage.

Chaque sommet est associé à un patch en calculant ses indices discrétisés $ind(h_k)$ et $ind(\theta_k)$; cependant, certaines facettes peuvent couvrir plusieurs patches. Ces facettes sont donc subdivisées en plusieurs petites facettes qui appartiennent complètement à un seul patch. Ce traitement peut être considéré comme une segmentation du maillage par des intersections de plans 3D avec le maillage dans l'espace continu. Ainsi, il permet un calcul précis des moments locaux des différents patches, ce qui est très important pour la robustesse du tatouage. La subdivision des facettes concernées est réalisée en ajoutant des sommets et des arêtes auxiliaires sur les bords des patches (voir la figure 2). Le maillage est maintenant décomposé en $I_h \times I_\theta$ patches. L'indice d'un patch est déterminé comme $j = ind(h_k) \cdot I_\theta + ind(\theta_k)$.

4.3 Classification des patches et synchronisation du tatouage

Tous les patches obtenus sont classifiés en trois groupes :

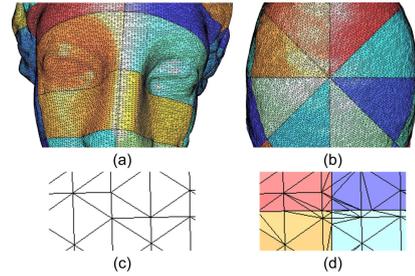


Figure 2 – Décomposition en patches : zooms sur l'insertion des sommets et arêtes ((c) avant, (d) après).

1. patches hôtes pour l'insertion des bits de tatouage ;
2. patches négligés qui ne seront pas déformés ;
3. patches de compensation pour la compensation des moments globaux après l'insertion des bits.

Les patches négligés ne sont pas utilisés ni pour l'insertion des bits ni pour la compensation, et incluent les petits patches ayant un faible moment volumique d'ordre zéro, les patches plats ayant une faible gamme du domaine h , et les patches étroits ayant une faible gamme du domaine θ . Nous choisissons les 12 patches qui ont les plus grandes amplitudes de m_{000} comme les patches de compensation, car ces patches permettent une variation de moments plus large tout en gardant une bonne imperceptibilité. Tous les autres patches sont les patches hôtes, notés comme $\mathcal{P}_{n,n=0,1,\dots,N-1}^w$, où N est leur nombre total. Un patch hôte avec un indice plus petit dans cette séquence a aussi un indice plus petit dans la numérotation globale $\mathcal{P}_{j,j=0,1,\dots,I_h \cdot I_\theta - 1}$. Cet ordre sert à la synchronisation du tatouage : les bits sont insérés consécutivement dans ces patches hôtes ordonnés.

Au cours de la déformation, des mesures spéciales seront mises en place pour conserver et renforcer cette classifi-

cation : par exemple, les amplitudes de m_{000} pour certains patches de compensation seront contraintes à augmenter pour qu'ils ne deviennent pas des patches hôtes après la compensation. Ainsi, la désynchronisation apparaît rarement, même sous une forte attaque.

4.4 Quantification des moments

Le maillage permet l'insertion d'une séquence de $(N - 1)$ bits w_1, w_2, \dots, w_{N-1} dans ses N patches hôtes (le premier patch hôte ne sera pas tatoué, voir l'équation 8). Le bit $w_n \in \{0, 1\}$ est inséré via une quantification scalaire de Costa [12] modifiée et adaptée du moment $m_{000}^{(\mathcal{P}_n^w)}$. D'abord, un dictionnaire pseudo-aléatoire est construit pour le moment de chaque patch (équation 7), où $\Delta^{(\mathcal{P}_n^w)}$ est le pas de quantification, $z \in \mathcal{Z}$ est un entier, $a \in \{0, 1\}$ représente le bit impliqué par le mot de code u , et $t^{(\mathcal{P}_n^w)}, 1 \leq n < N$ forment une séquence pseudo-aléatoire uniformément distribuée entre $[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$ et sont générés en utilisant une clé secrète K .

$$U_{m_{000}^{(\mathcal{P}_n^w)}, t^{(\mathcal{P}_n^w)}} = \bigcup_{a=0}^1 \left\{ u = z \cdot \Delta^{(\mathcal{P}_n^w)} + a \frac{\Delta^{(\mathcal{P}_n^w)}}{2} + t^{(\mathcal{P}_n^w)} \Delta^{(\mathcal{P}_n^w)} \right\} \quad (7)$$

À la différence de [12] et de manière similaire à [13], les pas de quantification $\Delta^{(\mathcal{P}_n^w)}, 1 \leq n < N$ varient pour différents patches :

$$\Delta^{(\mathcal{P}_n^w)} = \begin{cases} \Delta_{pre} \cdot \left| m_{000}^{(\hat{\mathcal{P}}_{n-1}^w)} / \left[\frac{m_{000}^{(\mathcal{P}_{n-1}^w)}}{m_{000}^{(\mathcal{P}_n^w)}} \right] \right|, & \text{si } \left| \frac{m_{000}^{(\mathcal{P}_{n-1}^w)}}{m_{000}^{(\mathcal{P}_n^w)}} \right| > 1 \\ \Delta_{pre} \cdot \left| m_{000}^{(\hat{\mathcal{P}}_{n-1}^w)} \cdot \left[\frac{m_{000}^{(\mathcal{P}_n^w)}}{m_{000}^{(\mathcal{P}_{n-1}^w)}} \right] \right|, & \text{sinon} \end{cases} \quad (8)$$

où $m_{000}^{(\hat{\mathcal{P}}_{n-1}^w)}$ est le moment quantifié du patch précédent avec $m_{000}^{(\hat{\mathcal{P}}_0^w)} = m_{000}^{(\mathcal{P}_0^w)}$, et Δ_{pre} est donné par :

$$\Delta_{pre} = \begin{cases} 0.04, & \text{si } \left| m_{000}^{(\mathcal{P}_n^w)} \right| > 0.01 \\ 0.07, & \text{sinon} \end{cases} \quad (9)$$

Une fois le dictionnaire construit, nous cherchons le mot de code $u_{m_{000}^{(\mathcal{P}_n^w)}}$ qui est le plus proche de $m_{000}^{(\mathcal{P}_n^w)}$ et dont le bit impliqué est égal à w_n . Le moment quantifié est calculé selon l'équation 10, où $\alpha^{(\mathcal{P}_n^w)} \in [0, 1]$ est un facteur de compensation. Dans notre méthode, $\alpha^{(\mathcal{P}_n^w)}$ contrôle partiellement la distorsion et la sécurité du tatouage. Une sécurité parfaite est atteinte si $\alpha^{(\mathcal{P}_n^w)}$ est égale à 0.50 [14].

$$m_{000}^{(\hat{\mathcal{P}}_n^w)} = m_{000}^{(\mathcal{P}_n^w)} + \alpha^{(\mathcal{P}_n^w)} (u_{m_{000}^{(\mathcal{P}_n^w)}} - m_{000}^{(\mathcal{P}_n^w)}) \quad (10)$$

Ce mécanisme de quantification a deux avantages : il est intrinsèquement invariant à la mise à l'échelle uniforme ; et il permet théoriquement et expérimentalement une déformation plus équilibrée dans différents patches.

4.5 Déformation des patches

Dans cette étape, les patches hôtes sont déformés par un processus itératif pour atteindre les valeurs de moments quantifiées voulues. L'idée de base est d'ajuster l'amplitude et la direction de la déformation d'un patch à chaque itération afin de rapprocher au fur et à mesure de son moment souhaité. De plus, les déplacements des sommets d'un patch

sont pondérés par un masque lisse pour que la déformation globale du patch soit de basse fréquence, ce qui est à la fois plus imperceptible et plus robuste. La forme de ce masque est illustrée par la figure 3, où les axes X et Y représentent les coordonnées de h et θ normalisées des sommets du patch. Le masque est constant près des bords et du centre du patch, et possède une forme sinusoïdale entre ces deux régions. L'amplitude et la direction de ce masque sont contrôlées par un facteur de déformation global. Le facteur multiplicatif de déformation local pour un sommet est la valeur de cette fonction masque correspondant aux coordonnées normalisées du sommet. En ajustant le facteur global à la fin de chaque itération, nous pouvons finalement trouver la bonne valeur pour ce facteur pour que le patch déformé ait le moment voulu.

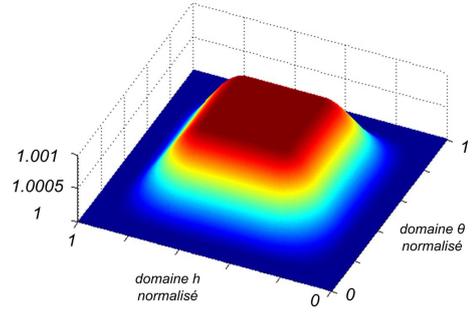


Figure 3 – Illustration de la forme du masque lisse utilisé pour la déformation itérative des patches. Ici, le facteur de déformation global est égal à 1.001.

4.6 Compensation des moments globaux

L'objectif est de restaurer le centre et les axes principaux du maillage après la déformation des patches hôtes. Concrètement, il faut remettre les moments globaux $m_{100}, m_{010}, m_{001}, m_{110}, m_{101}$ et m_{011} à zéro. Notre compensation est basée sur le résultat suivant : avec l'algorithme de déformation itératif présenté ci-dessus, le ratio entre les variations des moments de différents ordres (e.g. $\frac{\Delta m_{100}^{(\mathcal{P}_j)}}{\Delta m_{000}^{(\mathcal{P}_j)}}, \frac{\Delta m_{010}^{(\mathcal{P}_j)}}{\Delta m_{000}^{(\mathcal{P}_j)}}$,

$\frac{\Delta m_{001}^{(\mathcal{P}_j)}}{\Delta m_{000}^{(\mathcal{P}_j)}}, \frac{\Delta m_{110}^{(\mathcal{P}_j)}}{\Delta m_{000}^{(\mathcal{P}_j)}}, \frac{\Delta m_{101}^{(\mathcal{P}_j)}}{\Delta m_{000}^{(\mathcal{P}_j)}}$ et $\frac{\Delta m_{011}^{(\mathcal{P}_j)}}{\Delta m_{000}^{(\mathcal{P}_j)}}$) reste approximative-

ment constant sous différentes valeurs du facteur de déformation global. Ces six ratios sont d'abord appris pour chaque patch de compensation \mathcal{P}_i^c en imposant une déformation arbitraire sur le patch, et sont notés de \mathbf{r}_1^l à \mathbf{r}_6^l .

Le problème maintenant est de déduire les variations des moments d'ordre zéro pour les 12 patches de compensation (i.e. $\Delta m_{000, l=0,1,\dots,11}^l$) pour que les variations des autres moments de ces patches puissent compenser les moments globaux du maillage tatoué $\tilde{m}_{100}, \tilde{m}_{010}, \tilde{m}_{001}, \tilde{m}_{110}, \tilde{m}_{101}$ et \tilde{m}_{011} . Un système linéaire de moindres carrés de dimension 6×12 est construit :

$$M = \arg \min \left\| R \cdot M - \tilde{M} \right\|_2^2 \quad (11)$$

où R est une matrice de 6×12 avec $R_{ij} = \mathbf{r}_i^{j-1}$, M est une matrice de 12×1 avec $M_{i1} = \Delta m_{000}^{i-1}$, et $\tilde{M} = [\tilde{m}_{100} \ \tilde{m}_{010} \ \tilde{m}_{001} \ \tilde{m}_{110} \ \tilde{m}_{101} \ \tilde{m}_{011}]^T$. L'optimisation de ce système est soumise à deux contraintes :

$$Lb \leq M \leq Ub \quad (12)$$

$$R' . M' = \tilde{M}' \quad (13)$$

où Lb et Ub sont les bornes inférieure et supérieure des variations des moments, et R' , M' et \tilde{M}' sont composés des trois dernières lignes de R , M et \tilde{M} , respectivement. La première contrainte est liée à l'imperceptibilité de la déformation. La deuxième contrainte donne une priorité à la restauration des moments d'ordre deux, car le tatouage est expérimentalement beaucoup plus sensible au changement des axes principaux qu'au changement du centre.

Ensuite, nous déformons les patchs de compensation pour atteindre les variations des moments d'ordre zéro souhaitées. Ainsi, les six moments globaux de premiers et deuxièmes ordres du maillage tatoué sont très proches de zéro et donc n'ont aucune influence négative sur l'extraction du tatouage. La dernière étape de l'insertion est la suppression des sommets et des arêtes auxiliaires ajoutés.

5 Extraction du tatouage

L'extraction du tatouage est aveugle et rapide. D'abord, le maillage d'entrée est normalisé en utilisant la technique présentée dans la section 4.1. Puis, les coordonnées des sommets sont converties au système cylindrique, et le maillage est décomposé en patchs par une discrétisation de ses domaines h et θ . Après avoir appliqué les lois de classification introduites dans la section 4.3, nous pouvons repérer les patchs hôtes pour l'extraction des bits. Avec la connaissance de la clé secrète K et avec l'utilisation des équations 7 à 9, nous construisons un dictionnaire $\hat{U}_{m_{000}^{(P_n^w)}, t^{(P_n^w)}}$ pour chaque patch hôte. D'après la valeur actuelle du moment $m_{000}^{(P_n^w)}$ du patch, nous pouvons retrouver le mot de code $\hat{u}_{m_{000}^{(P_n^w)}}$ qui est le plus proche de $m_{000}^{(P_n^w)}$ dans ce dictionnaire. Enfin, le bit de tatouage extrait w_n' est considéré comme le bit impliqué a du mot de code $\hat{u}_{m_{000}^{(P_n^w)}}$.

6 Résultats expérimentaux

Nous avons testé notre algorithme sur plusieurs objets. Dans nos expérimentations, les paramètres I_h et I_θ sont fixés à 11 et 8, respectivement. Le temps d'exécution varie selon la complexité du maillage. Pour le maillage de Venus illustré par la figure 4.(a) (dans la page suivante) possédant 100759 sommets, la procédure d'insertion est accomplie en 410.8 secondes et celle d'extraction en 3.2 secondes sur un ordinateur équipé d'un processeur de 2.0 GHz et de 2 Go de RAM. La figure 4.(b) représente le maillage Venus tatoué ainsi qu'un zoom sur son œil gauche. Un tatouage robuste de 75 bits est inséré. $\alpha^{(P_n^w)}$ est fixé à 0.70 pour tous les patchs hôtes. Les distances perceptuelle et objective entre le maillage original et le maillage tatoué sont mesurées par MSDM (mesh structural distortion measure) [15] et MRMS (maximum root mean square error), respectivement. Ces deux types de distances sont très faibles (pour Venus, MSDM= 0.15, MRMS= 2.34×10^{-3}).

Afin de tester la robustesse de notre méthode, nous avons attaqué le maillage tatoué avec différents types d'attaques.

Tableau 1 – Résultats des tests de robustesse

Attaque	Intensité	MRMS (10^{-3})	BER	Corré.
Bruit additif	0.10%	0.33	0.03	0.94
	0.30%	0.98	0.06	0.87
	0.50%	1.63	0.11	0.78
Lissage Laplacien	50 itérations	0.51	0.04	0.92
	100 itérations	0.88	0.08	0.84
Quantification	9-bit	0.66	0.04	0.92
	8-bit	1.32	0.11	0.81
	7-bit	2.70	0.11	0.79
Simplification	90% enlevés	0.29	0.03	0.95
	95% enlevés	0.51	0.05	0.89
	97.5% enlevés	0.91	0.07	0.84
	non-unif. 50%	0.25	0.04	0.92
Voxélisation	non-unif. 75%	0.67	0.09	0.82
	$350 \times 350 \times 350$	0.95	0.13	0.74

Les figure 4.(c)-(f) illustrent quatre exemples de maillages attaqués, et le tableau 1 présente les résultats expérimentaux, où la robustesse est mesurée par deux indicateurs : le taux de bits erronés (BER : bit error rate) et la corrélation normalisée entre le tatouage extrait et le tatouage initialement inséré. Les distorsions introduites par les attaques sont également mesurées par MRMS. La conclusion est que notre tatouage est capable de résister aux attaques de géométrie, de connectivité et de changement de représentations, même avec une intensité très forte ou même si les attaques sont non-uniformes.

Nous avons comparé notre méthode avec celle de Cho et al. [9]. Notre algorithme montre généralement une meilleure imperceptibilité, surtout pour les maillages lisses comme le Cheval illustré par la figure 5, car la distorsion introduite est de plus basse fréquence. Le tableau 2 présente une comparaison de robustesse entre ces deux méthodes pour le maillage Cheval. Notre tatouage semble être plus résistant, surtout aux attaques fortes. Finalement, le niveau de sécurité de notre méthode est aussi meilleur, grâce à une quantification dépendant d'une clé secrète et à un réglage approprié du paramètre $\alpha^{(P_n^w)}$.

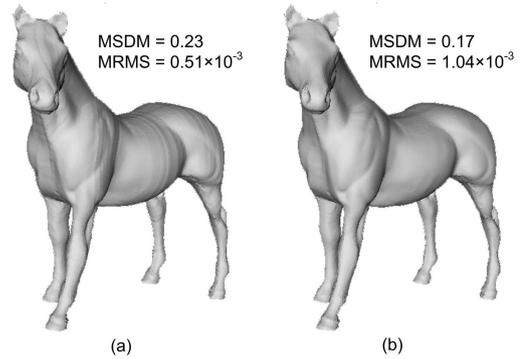


Figure 5 – Comparaison d'imperceptibilité : (a) Cheval tatoué par l'algorithme I de Cho et al. avec force $\alpha = 0.03$; (b) Cheval tatoué par notre méthode. 46 bits sont insérés pour toutes les deux méthodes.

7 Conclusions et perspectives

Nous avons proposé un nouvel algorithme de tatouage robuste et aveugle pour les maillages 3D, qui repose sur la stabilité intrinsèque des moments volumiques globaux et locaux du maillage. Après une simple décomposition du

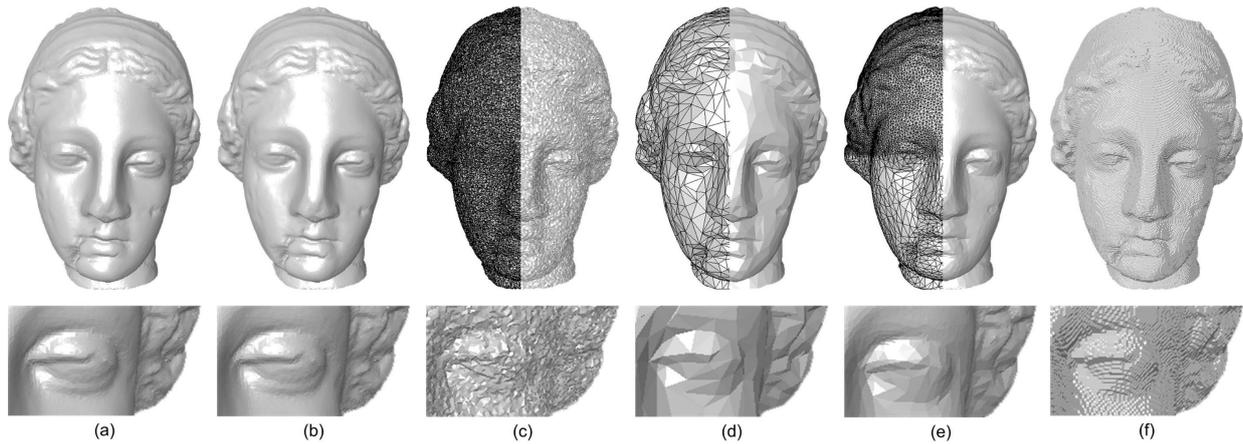


Figure 4 – Résultats expérimentaux pour le maillage Venus : (a) Venus original ; (b) Venus tatoué (75 bits sont insérés) ; (c) Venus tatoué et attaqué par un bruit additif aléatoire de 0.50% ; (d) attaqué par une forte simplification uniforme (97.5% de sommets sont enlevés) ; (e) attaqué par une forte simplification non-uniforme (75% de sommets sont enlevés) ; (f) attaqué par un changement de représentations (discrétisation en $350 \times 350 \times 350$ voxels, et puis triangulation Marching Cubes).

Tableau 2 – Comparaison de robustesse entre les deux méthodes sur le maillage Cheval.

Attaque	Cho et al.		Notre méthode	
	BER	Corré.	BER	Corré.
Bruit 0.30%	0.24	0.52	0.08	0.86
Bruit 0.50%	0.41	0.17	0.12	0.77
Lissage 50 itérations	0.09	0.84	0.07	0.87
Lissage 100 itérations	0.20	0.62	0.13	0.74
Quantification 8-bit	0.37	0.26	0.15	0.70
Quantification 7-bit	0.46	0.08	0.26	0.49
Simplification 95%	0.22	0.57	0.02	0.96
Simplification 97.5%	0.30	0.40	0.07	0.87

maillage, les bits de tatouage sont insérés par une légère déformation des patches hôtes sélectionnés. La capacité, la robustesse, l'imperceptibilité, la sécurité et le problème de causalité sont tous pris en compte soigneusement au cours de l'élaboration de l'algorithme. En particulier, notre méthode montre une très forte robustesse contre les différents attaques, incluant le changement de représentations d'objets 3D qui est considéré comme la plus destructrice.

Les travaux en cours concernent l'introduction d'une mesure de distance perceptuelle pour guider la déformation des patches, et une décomposition adaptative et robuste du maillage qui produirait des patches de tailles comparables. À long terme, nous souhaitons chercher une solution pour parvenir à la robustesse contre l'attaque de coupe et les déformations locales très fortes, éventuellement combinées avec des changements de connectivité ; elle pourrait s'appuyer sur la dérivation d'un descripteur de forme local et robuste.

Références

- [1] K. Wang, G. Lavoué, F. Denis, et A. Baskurt. A comprehensive survey on three-dimensional mesh watermarking. *IEEE Trans. on Multimedia*, 2008. (à paraître).
- [2] R. Ohbuchi, H. Masuda, et M. Aono. Data embedding algorithms for geometrical and non-geometrical targets in three-dimensional polygonal models. *Computer Communications*, 21(15) :1344–1354, 1998.
- [3] F. Cayre et B. Macq. Data hiding on 3-D triangle meshes. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 51(4) :939–949, 2003.
- [4] E. Praun, H. Hoppe, et A. Finkelstein. Robust mesh watermarking. Dans *Proc. of the ACM Siggraph*, pages 49–56, 1999.
- [5] R. Ohbuchi, A. Mukaiyama, et S. Takahashi. A frequency-domain approach to watermarking 3D shapes. *Computer Graphics Forum*, 21(3) :373–382, 2002.
- [6] F. Cayre, P. Rondao-Alface, F. Schmitt, B. Macq, et H. Maître. Application of spectral decomposition to compression and watermarking of 3D triangle mesh geometry. *Signal Processing : Image Communications*, 18(4) :309–319, 2003.
- [7] K. Wang, G. Lavoué, F. Denis, et A. Baskurt. Hierarchical watermarking of semi-regular meshes based on wavelet transform. *IEEE Trans. on Information Forensics and Security*, 3(4), 2008. (à paraître).
- [8] S. Zafeiriou, A. Tefas, et I. Pitas. Blind robust watermarking schemes for copyright protection of 3D mesh objects. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 11(5) :596–607, 2005.
- [9] J.-W. Cho, R. Prost, et H.-Y. Jung. An oblivious watermarking for 3D polygonal meshes using distribution of vertex norms. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 55(1) :142–155, 2007.
- [10] C. Zhang et T. Chen. Efficient feature extraction for 2D/3D objects in mesh representation. Dans *Proc. of the IEEE Inter. Conf. on Image Processing*, pages 935–938, 2001.
- [11] J. Ricard. *Indexation et recherche d'objets 3D à partir de requêtes 2D et 3D*. Dissertation de thèse, Université Lyon 1, 2005.
- [12] J. J. Eggers, R. Bauml, R. Tzschoppe, et B. Girod. Scalar cost scheme for information embedding. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 51(4) :1003–1019, 2003.
- [13] F. Pérez-González, C. Mosquera, M. Barni, et A. Abrardo. Rational dither modulation : A high-rate data-hiding method invariant to gain attacks. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 53(10) :3960–3975, 2005.
- [14] L. Pérez-Freire, P. Comesaña, et F. Pérez-González. Information-theoretic analysis of security in side-informed data hiding. Dans *Proc. of the Inter. Workshop on Information Hiding*, pages 131–145, 2005.
- [15] G. Lavoué, E. D. Gelasca, F. Dupont, A. Baskurt, et T. Ebrahimi. Perceptually driven 3D distance metrics with application to watermarking. Dans *Proc. of the SPIE-IS & T Electronic Imaging*, volume 6312, page 63120L, 2006.