

# Saillance de maillages 3D à partir de descripteurs locaux en spirale

Olivier LÉZORAY<sup>1</sup>, Anass NOURI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Normandie Univ, UNICAEN, ENSICAEN, CNRS, GREYC, 14000 Caen, France

<sup>2</sup>Laboratoire des Systèmes Électroniques, Traitement de l'Information, Mécanique et Énergétique, Université Ibn Tofail, Kénitra, Maroc  
olivier.lezoray@unicaen.fr, anass.nouri@uit.ac.ma

**Résumé** – La saillance des maillages 3D, c-à-d le processus de détection des régions visuellement importantes dans les maillages 3D, est un élément important en infographie. Dans cet article, nous proposons une nouvelle mesure de saillance des maillages 3D qui permet d'identifier des caractéristiques géométriques abruptes dans les maillages. Un descripteur local basé sur les normales est construit pour chaque sommet grâce à un chemin en spirale dans un  $k$ -hop voisinage. Les saillances géométrique et spectrale sont définies à partir de l'étude de la variation du gradient défini à partir des alignements de descripteurs en spirale. La saillance finale est alors définie comme la rugosité du sommet pondérée par la somme des saillance géométriques et spectrales normalisées.

**Abstract** – Mesh saliency, the process of detecting visually important regions in 3D meshes, is a significant component in computer graphics. In this paper, we propose a new 3D mesh saliency measure that can identify sharp geometric features in meshes. A local normal-based descriptor is built for each vertex thanks to a spiral path within a  $k$ -hop neighborhood. Geometric and spectral saliencies are defined from the study of the variation of the gradient defined from the spiral descriptor alignments. The final saliency is then defined as the vertex roughness weighted by the sum of normalized geometric and spectral saliencies.

## 1 Introduction

Aujourd'hui, grâce aux scanners 3D, il est facile de créer des données 3D. Les maillages 3D sont ainsi largement utilisés dans des domaines d'application tels que l'infographie et les jeux vidéos. De nombreux problèmes d'infographie peuvent tirer parti de la connaissance des régions d'un maillage qui sont les plus importantes. Par exemple, dans un algorithme de simplification de maillage, l'importance des sommets peut être utilisée pour guider la décimation. Notre objectif est de définir une mesure de la saillance pour maillages 3D. Pour ce faire, nous étudions localement la géométrie des normales des sommets du maillage. Pour avoir une mesure robuste, l'étude ne doit pas être basée sur des mesures reposant sur les seules normales des sommets. En effet, pour bien décrire la géométrie d'un sommet donné, il faut prendre en compte son voisinage : une région plate étant moins saillante qu'une région abrupte. Cela nécessite la définition d'un descripteur local extrait en chaque sommet et qui prend en compte les variations des normales dans un voisinage large, de manière similaire aux patches pour les images. La plupart des descripteurs de la littérature ont adapté des caractéristiques du cas 2D (LBP, histogrammes) au cas 3D, et l'ont utilisé soit dans le domaine spatial, soit dans le domaine spectral. Nous proposons ici un descripteur spécialement conçu pour les maillages 3D. Ce descripteur est un descripteur local en spirale, construit pour chaque sommet grâce à un chemin en spirale à l'intérieur d'un  $k$ -hop voisinage. Ce descripteur sert d'élément de base pour comparer deux sommets. Cela permet d'identifier des zones géométriques abruptes dans le maillage qui sont considérées comme saillantes. À partir de là, des mesures de saillance sont dérivées dans les do-

maines spatial et spectral, et sont combinées en une mesure de saillance globale.

## 2 Descripteurs locaux en spirale

Un maillage est représenté par un graphe  $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$  constitué d'un ensemble de noeuds  $\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_m\}$  et d'arêtes  $\mathcal{E} \subset \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ . L'arête  $(v_i, v_j)$  de  $\mathcal{E}$  connecte les deux noeuds  $v_i$  et  $v_j$  de  $\mathcal{V}$ . La notation  $v_i \sim v_j$  est utilisée pour désigner deux noeuds adjacents. L'ensemble  $\mathcal{N}(v_i) = \{v_j, v_j \sim v_i\}$  donne tous les noeuds adjacents à  $v_i$  dans un 1-hop (noeuds atteints en un saut). Dans [1], Lim *et al.* ont proposé des opérateurs locaux en spirale. Le principe est que les sommets environnants d'un sommet peuvent être énumérés en suivant une spirale, comme l'illustre la figure 1. Pour définir les descripteurs locaux en spirale, les définitions suivantes sont introduites :

$$\begin{aligned} R^0(v_i) &= \{v_i\} \\ R^{(k+1)}(v_i) &= \mathcal{N}(R^k(v_i)) \setminus k\text{-disk}(v_i) \\ k\text{-disk}(v_i) &= \bigcup_{l=0, \dots, k} R^l(v_i) \\ k\text{-ring}(v_i) &= k\text{-disk}(v_i) \setminus \{v_i\} \end{aligned}$$

Étant donné un noeud  $v_i$  et un rayon  $k$ , un  $k\text{-disk}(v_i)$  est l'ensemble des noeuds qui peuvent être atteints de  $v_i$  en 0 à  $k$  sauts. Comme cela inclut  $v_i$ , l'ensemble  $k\text{-ring}(v_i)$  est identique mais sans  $v_i$ .  $R^k(v_i)$  est le  $k$ -ring (ou  $k$ -hop) : un ensemble ordonné de sommets dont le plus court chemin vers  $v_i$  est exactement de  $k$  sauts.  $R^{(k+1)}(v_i)$  est alors l'ensemble des sommets qui peuvent être atteints en 1 saut à partir de  $R^k(v_i)$  sans passer par son  $k\text{-disk}$  (qui contient les sommets qui peuvent être atteints à partir de  $v_i$  en 0 à  $k$  sauts).  $R_j^k(v_i)$  désigne le  $j$ -ième élément du  $k$ -

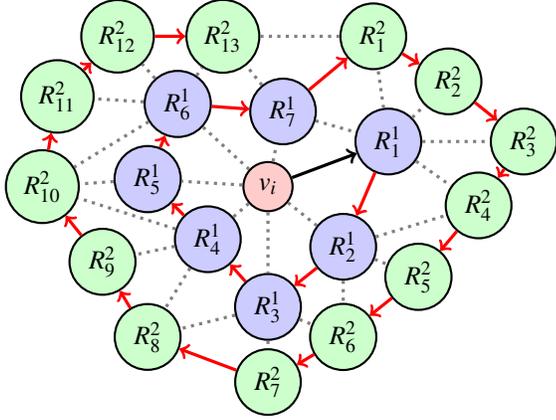


FIGURE 1 – Exemple d'un descripteur local 2-hop en spirale pour un noeud  $v_i$  d'un maillage.

ring. On a évidemment  $R^1(v_i) = \mathcal{N}(v_i)$  et  $R^0(v_i) = v_i$ . À partir de ces opérateurs, nous pouvons définir un descripteur local en spirale  $\text{Sp}(v_i, k)$  comme la concaténation des  $k$ -ring :

$$\begin{aligned} \text{Sp}(v_i, k) &= (v_i, 1\text{-ring}(v_i), \dots, k\text{-ring}(v_i)) \\ &= (R^0(v_i), R^1(v_i), R^2(v_i), \dots, R^k_{|R^k|}(v_i)) \end{aligned}$$

Cet opérateur possède deux degrés de liberté : la direction des rings (dans le sens des aiguilles d'une montre ou dans le sens inverse) et le premier sommet choisi  $R^1_1(v_i)$  (indiqué par la flèche noire dans la figure 1). Les autres sommets sont ordonnés de manière inductive. Pour supprimer ces deux degrés de liberté, nous fixons l'orientation dans le sens des aiguilles d'une montre et choisissons le sommet initial  $R^1_1(v_i)$  comme étant celui situé dans la direction du plus court chemin géodésique vers  $v_i$  sur le maillage :

$$R^1_1(v_i) = \arg \min_{v_j \in \mathcal{N}(v_i)} d_G(v_i, v_j)$$

avec  $d_G$  la distance géodésique entre deux sommets du graphe  $\mathcal{G}$ . Cela permet à l'opérateur de devenir invariant par rapport aux rotations du voisinage. Un tel choix a également été considéré dans [2] pour la définition de convolution en spirale sur graphes. Le descripteur local en spirale a été utilisé dans [1, 2] et a fourni des résultats compétitifs pour la correspondance des formes. Cependant, comme la taille de l'opérateur  $\text{Sp}(v_i, k)$  varie pour les sommets (car tous les sommets n'ont pas le même nombre de voisins), ces deux approches n'ont considéré que des spirales de taille fixe. Elles tronquent ou ajoutent avec des zéros à chaque spirale en fonction de sa taille. Cela ne permet évidemment pas de bien saisir les similitudes entre deux spirales différentes. C'est pourquoi nous procédons différemment. Étant donné un signal sur graphe  $\mathbf{F}$  sur  $\mathcal{G}$ , avec  $\mathbf{F} : \mathcal{V} \rightarrow \mathbb{R}^d$ , nous définissons la différence entre les descripteurs locaux en spirale de deux sommets comme la somme des différences entre leurs  $k$ -ring respectifs :

$$d(\text{Sp}(v_i, k), \text{Sp}(v_j, k)) = \sum_{l=0}^k d(R^l(v_i), R^l(v_j))$$

Deux  $k$ -ring sont comparés en faisant correspondre les sommets du plus grand ring au plus petit :

$$d(R^l(v_i), R^l(v_j)) = \sum_{n=0}^{|R^l(v_i)|} d(R_n^l(v_i), R_n^l(v_j))$$

avec  $n' = \lfloor \frac{n \cdot |R^l(v_j)|}{|R^l(v_i)|} \rfloor$  et  $|R^l(v_i)| > |R^l(v_j)|$ . La distance entre deux noeuds est la distance entre leurs signaux sur graphe :

$$d(R_n^l(v_i), R_m^l(v_j)) = \|\mathbf{F}(R_n^l(v_i)) - \mathbf{F}(R_m^l(v_j))\|_2$$

qui sont les normales en chaque noeud  $\mathbf{F}(v_i) = \mathbf{n}(v_i)$  [3].

## 3 Saillance 3D

### 3.1 Rugosité

Dans [4], il a été démontré que la courbure joue un rôle important dans la détection de la saillance. Dans [5], Lee *et al.* ont proposé la première approche de saillance de maillages basée sur des différences entre des courbures moyennes pondérées. En effet, pour la détection de la saillance, il est préférable de considérer la variation de la courbure plutôt que la courbure elle-même [6]. Cela permet d'éviter de détecter les zones lisses à forte courbure comme des régions saillantes. Par conséquent, nous considérons plutôt la notion de rugosité proposée par Wang *et al.* [7] que nous étendons à des rings au lieu d'un 1-hop. Tout d'abord, pour chaque sommet  $v_i$  du maillage, nous calculons sa courbure moyenne. Les deux courbures principales ( $k_1(v_i), k_2(v_i)$ ) en un sommet d'un maillage mesurent la courbure de la surface dans différentes directions et correspondent aux courbure maximale et minimale. L'approche de Panozzo *et al.* [8] est utilisée pour calculer les deux courbures principales et la courbure moyenne est alors [9]  $\kappa(v_i) = \frac{1}{2}(k_1(v_i) + k_2(v_i))$ . Les valeurs sont proches de 0 pour les surfaces planes, positives dans les zones convexes et négatives dans les zones concaves. La rugosité d'un sommet  $v_i$  est définie comme la différence entre la courbure d'un sommet et celle de ses voisins (pondérée par son Laplacien). Dans [7], la définition ne prenait en compte que les voisins directs  $\mathcal{N}(v_i)$ . Pour obtenir une mesure plus précise, nous considérons des voisinages plus larges  $\gamma\text{-ring}(v_i)$  et prenons la puissance  $\gamma$  du Laplacien pour créer des poids entre les sommets qui sont éloignés de  $\gamma$  sauts. La rugosité est définie comme suit :

$$\text{Rugosité}(v_i) = \left| \kappa(v_i) - \frac{\sum_{v_j \in \gamma\text{-ring}(v_i)} L_{ij}^\gamma \cdot \kappa(v_j)}{\sum_{v_j \in \gamma\text{-ring}(v_i)} L_{ij}^\gamma} \right|$$

avec  $L$  le Laplacien cotangent.

### 3.2 Saillances géométrique et spectrale

Nous définissons le gradient en un sommet donné  $v_i$  comme le vecteur (non local) de toutes les distances entre les descripteurs en spirale de  $v_i$  et ses voisins au sein de son  $\gamma\text{-ring}(v_i)$ , avec  $\gamma > k$  :

$$\nabla \mathbf{f}(v_i) = [d(\text{Sp}(v_i, k), \text{Sp}(v_j, k)), v_j \in \gamma\text{-ring}(v_i)]^T$$

À partir de ce gradient non local, nous définissons les saillances géométrique et spectrale. La saillance géométrique est la norme  $L_1$  du gradient :

$$\begin{aligned} GS(v_i) &= \frac{1}{|\gamma\text{-ring}(v_i)|} \|\nabla \mathbf{f}(v_i)\|_1 \\ &= \frac{1}{|\gamma\text{-ring}(v_i)|} \sum_{v_j \in \gamma\text{-ring}(v_i)} d(\text{Sp}(v_i, k), \text{Sp}(v_j, k)) \end{aligned}$$

Cette définition de la saillance géométrique est similaire à celle proposée dans [10] où un descripteur de patch est utilisé à la place de notre descripteur local en spirale. La saillance géométrique aura des valeurs élevées pour les sommets qui sont très différents de leurs voisins car les distances seront élevées.

Le tenseur de structure  $\mathbf{J}$  est le produit extérieur du gradient :  $\mathbf{J}(v_i) = \nabla^T \mathbf{f}(v_i) \cdot \nabla \mathbf{f}(v_i)$ . Il s'agit d'une matrice semi-définie positive  $|\gamma\text{-ring}(v_i)| \times |\gamma\text{-ring}(v_i)|$  :  $\mathbf{J}(v_i) \in \mathbb{S}_+^{|\gamma\text{-ring}(v_i)|}$ . Elle résume les directions dominantes du gradient dans les  $\gamma\text{-ring}(v_i)$  d'un sommet  $v_i$ . L'importance du tenseur de structure réside dans ses valeurs propres qui fournissent une description riche et discriminante de la géométrie locale en résumant la distribution des gradients dans le voisinage de  $\gamma\text{-ring}(v_i)$ . Sa décomposition spectrale est  $\mathbf{J}(v_i) = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{U}^T$  avec  $\mathbf{U}$  ses vecteurs propres et  $\mathbf{\Lambda}$  ses valeurs propres. Les valeurs propres du tenseur de structure peuvent être plus informatives sur les structures locales du maillage que la magnitude du gradient, qui est très lisse (voir la figure 2). Cela nous amène à définir la saillance spectrale à partir de la variation totale du tenseur de structure (STTV)

[11]. Elle est définie comme suit :  $SS(v_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^{|\gamma\text{-ring}(v_i)|} \lambda_j^2}$ . avec

$\lambda_j = \mathbf{\Lambda}(j, j)$ . Étant donné que le tenseur de structure peut capturer des informations de premier ordre dans le voisinage de  $\gamma\text{-ring}(v_i)$ , la saillance spectrale basée sur le SSTV peut fournir des mesures de variation plus robustes. La figure 2 montre la robustesse et la précision des saillances géométrique et spectrale. Comme on peut le voir, elles peuvent identifier des caractéristiques géométriques abruptes du maillage même en présence d'un bruit important (sur les coordonnées des sommets du maillage).

### 3.3 Combinaison

Étant donné la rugosité, les saillances géométrique et spectrale d'un sommet donné, nous présentons maintenant le calcul de la saillance. La rugosité étant basée sur les différences de courbure, elle a tendance à être très sensible aux petits changements (voir figure 2). En revanche, la saillance géométrique est lisse et la saillance spectrale très localisée. Ils fournissent tous deux des informations différentes sur le maillage. Pour fusionner ces informations en une seule mesure de saillance, nous pondérons la rugosité par la somme des saillances géométrique et spectrale normalisées :

$$S(v_i) = K_\sigma \left( \text{Rugosité}(v_i) \cdot \left( \overline{GS}(v_i) + \overline{SS}(v_i) \right) \right)$$

Cette définition permet d'obtenir une mesure de la saillance qui met en avant les zones présentant des valeurs élevées de rugosité, et de saillances géométrique et spectrale.  $K_\sigma$  est un lissage

Gaussien dans le voisinage de  $\gamma\text{-ring}(v_i)$  avec  $\sigma = 0.002 \cdot B$  où  $B$  est la longueur de la diagonale de la boîte englobante du maillage (comme dans [12]). Les saillances géométrique et spectrale sont préalablement normalisées entre 0 et 1 avec  $\overline{S}(v_i) = \frac{S(v_i) - \min(S)}{\max(S) - \min(S)}$ .

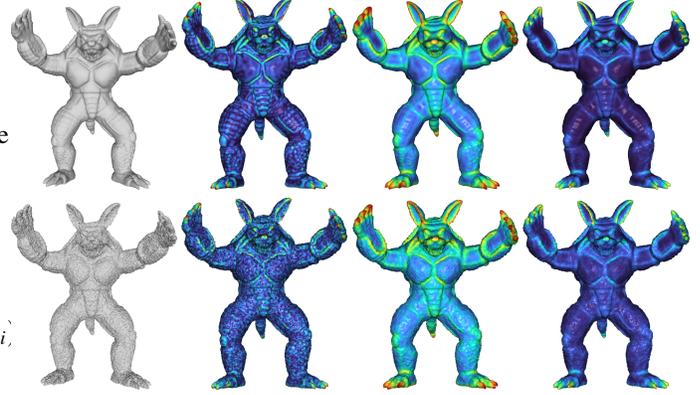


FIGURE 2 – Robustesse au bruit. Maillage original (haut) et bruité (bas) avec leurs rugosité, saillances géométrique et spectrale (de gauche à droite) sur des 3-ring avec des descripteurs 2-hop en spirale.

## 4 Résultats

Plusieurs expériences sont menées pour illustrer les avantages de la méthode proposée de saillance 3D. Dans la figure 3, nous montrons pour un maillage, sa rugosité  $R(v_i)$ , ses saillances géométrique  $\overline{GS}(v_i)$ , et spectrale  $\overline{SS}(v_i)$ , et la saillance finale  $S(v_i)$  qui les combine toutes. La rugosité est un bon point de départ pour la saillance. Cependant, elle a tendance à sur-détecter des zones non saillantes et à saturer les zones très saillantes. Au contraire, la saillance géométrique est très lisse et détecte plus finement certaines caractéristiques géométriques abruptes. La saillance spectrale détecte également des caractéristiques géométriques finement marquées, mais elle est beaucoup moins lisse et plus localisée sur les fortes variations. La combinaison finale permet de ne mettre en avant que les parties les plus saillantes du maillage, les zones lisses ou plates n'étant pas détectées comme saillantes.

Enfin, nous comparons notre méthode à l'état de l'art. La figure 4 compare nos résultats avec ceux de [12–14]. Notre approche produit des résultats beaucoup plus fins que ceux de [14] et [12] qui sont très grossiers et ne parviennent souvent pas à détecter les petites zones saillantes. L'approche de [13] produit des résultats plus fins mais tend à sur-détecter la saillance dans les zones lisses. Ce n'est pas le cas de notre approche. En outre, certaines approches utilisant la décomposition spectrale (comme [14]) calculent la saillance sur un maillage décimé pour accélérer le traitement, ce qui n'est pas le cas de notre approche.

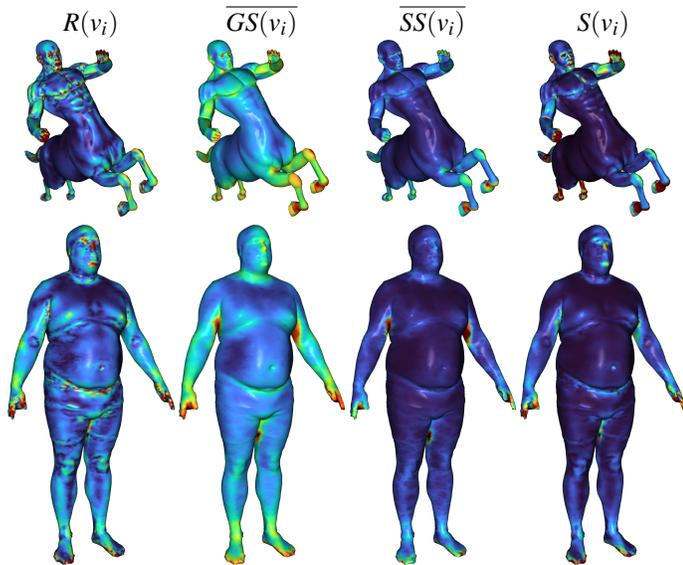


FIGURE 3 – Détection de saillance sur un 3-ring avec des descripteur locaux 2-hop en spirale  $Sp(v_i, 2)$ . Les couleurs chaudes sont synonymes de valeurs élevées de saillance.

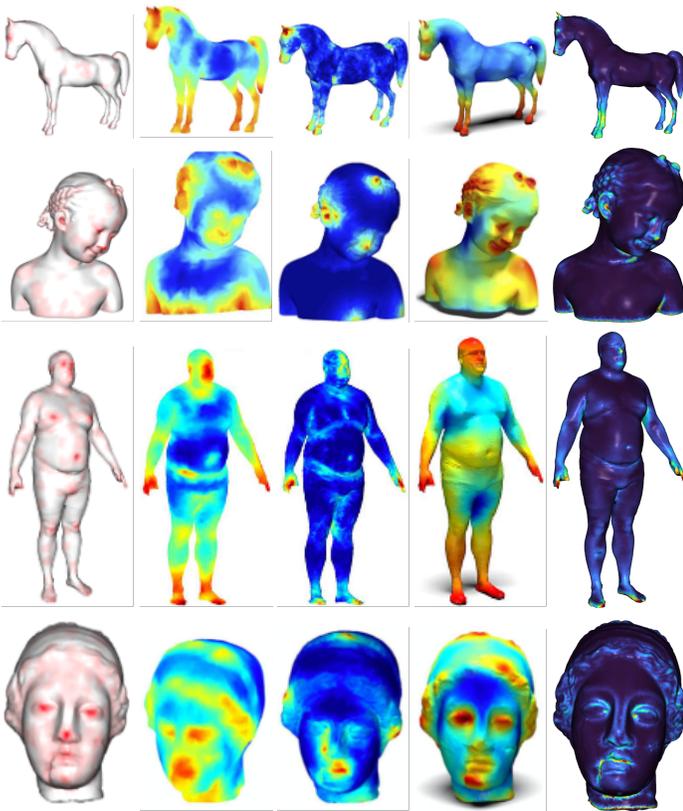


FIGURE 4 – De gauche à droite : vérité terrain [4], les méthodes de détection de saillance de [14], [13], [12], notre approche sur des 3-ring avec des descripteurs 1-hop en spirale.

## 5 Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé une nouvelle approche pour la saillance des maillages 3D. Pour détecter avec précision les régions saillantes (qui sont différentes de leur environnement), nous considérons un descripteur local basé sur la normale qui est construit pour chaque sommet selon une trajectoire en spirale dans un  $k$ -hop voisinage. Ce descripteur est ensuite utilisé pour définir un gradient non local pour chaque sommet. La norme  $L_1$  de ce gradient définit une mesure de saillance géométrique tandis que la variation totale du tenseur de structure définit une mesure de saillance spectrale. Ces deux mesures sont combinées avec une mesure de la rugosité du sommet. Les résultats expérimentaux montrent l'intérêt de l'approche.

## Références

- [1] I. Lim, A. Dielen, M. Campen, and L. Kobbelt, "A simple approach to intrinsic correspondence learning on unstructured 3d meshes," in *ECCV*, ser. LNCS, vol. 11131, 2018, pp. 349–362.
- [2] G. Bouritsas, S. Bokhnyak, S. Ploumpis, S. Zafeiriou, and M. M. Bronstein, "Neural 3d morphable models : Spiral convolutional networks for 3d shape representation learning and generation," in *ICCV*, 2019, pp. 7212–7221.
- [3] J. A. Bærentzen and H. Aanaes, "Signed distance computation using the angle weighted pseudonormal," *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 11, no. 3, pp. 243–253, 2005.
- [4] X. Chen, A. Sapiro, B. Pang, and T. A. Funkhouser, "Schelling points on 3D surface meshes," *ACM Trans. Graph.*, vol. 31, no. 4, pp. 29 :1–29 :12, 2012.
- [5] C. H. Lee, A. Varshney, and D. W. Jacobs, "Mesh saliency," *ACM Trans. Graph.*, vol. 24, no. 3, pp. 659–666, 2005.
- [6] G. Lavoué, "A local roughness measure for 3D meshes and its application to visual masking," *ACM Trans. Appl. Percept.*, vol. 5, no. 4, pp. 21 :1–21 :23, 2009.
- [7] K. Wang, F. Torkhani, and A. Montanvert, "A fast roughness-based approach to the assessment of 3d mesh visual quality," *Comput. Graph.*, vol. 36, no. 7, pp. 808–818, 2012.
- [8] D. Panozzo, E. Puppo, and L. Rocca, "Efficient multi-scale curvature and crease estimation," in *Computer Graphics, Computer Vision and Mathematics*, 2010.
- [9] M. Meyer, M. Desbrun, P. Schröder, and A. H. Barr, "Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-manifolds," in *Visualization and Mathematics*, 2002, pp. 35–57.
- [10] A. Nouri, C. Charrier, and O. Lézoray, "Multi-scale mesh saliency with local adaptive patches for viewpoint selection," *Signal Process. Image Commun.*, vol. 38, pp. 151–166, 2015.
- [11] S. Lefkimmiatis and S. J. Osher, "Nonlocal structure tensor functionals for image regularization," *IEEE Trans. Computational Imaging*, vol. 1, no. 1, pp. 16–29, 2015.
- [12] R. Song, Y. Liu, R. R. Martin, and K. Rodriguez-Echavarría, "Local-to-global mesh saliency," *Vis. Comput.*, vol. 34, no. 3, pp. 323–336, 2018.
- [13] R. Song, Y. Liu, R. R. Martin, and P. L. Rosin, "Mesh saliency via spectral processing," *ACM Trans. Graph.*, vol. 33, no. 1, pp. 6 :1–6 :17, 2014.
- [14] J. Sun, M. Ovsjanikov, and L. J. Guibas, "A concise and provably informative multi-scale signature based on heat diffusion," *Comput. Graph. Forum*, vol. 28, no. 5, pp. 1383–1392, 2009.