

Inpainting de maillages 3D couleur par recopie de patches en spirale*

Olivier LÉZORAY et Sébastien BOUGLEUX

Université Caen Normandie, ENSICAEN, CNRS, Normandie Univ, GREYC UMR 6072, F-14000 Caen, France

{olivier.lezoray, sebastien.bouglex}@unicaen.fr

Résumé – Les maillages 3D colorés sont de plus en plus utilisés, mais peuvent présenter des défauts de couleur dus au processus de numérisation. Nous proposons un cadre basé sur la recopie de patch pour compléter la couleur, en adaptant l’approche de Criminisi *et al.* [1] aux maillages 3D. Un patch en spirale est défini pour exploiter la similarité des sommets. Un terme de priorité dédié est utilisé pour définir l’ordre de remplissage, de sorte que les patches proches de la frontière de la zone à restaurer et présentant des propriétés spécifiques de continuité soient complétés en premier. Les résultats montrent de bonnes performances en termes de reconstruction visuelle des zones corrigées.

Abstract – Colored 3D meshes are increasingly used but may exhibit color defects due to the scanning process. We propose an exemplar-based framework for color completion, adapting the approach of Criminisi *et al.* [1] to 3D meshes. A spiral patch is defined to exploit vertex similarity. A dedicated priority term is used to determine the filling order, ensuring that patches near the inpainting boundary with specific continuity properties are completed first. Results show good performance in terms of visual reconstruction of the corrected areas.

1 Introduction

Les techniques d’acquisition 3D permettent à présent de capturer les coordonnées 3D d’un objet, mais aussi sa couleur, générant ainsi des maillages couleur en 3D. Cependant, bien que l’acquisition soit devenue plus accessible, l’édition des données 3D reste un défi, notamment la correction des défauts géométriques et colorimétriques des maillages, connue sous le nom de complétion 3D. La complétion de la géométrie des maillages a fait l’objet de nombreuses recherches [2–4]. En revanche, la complétion de la couleur sur les maillages 3D reste peu étudiée. Quelques travaux portent sur la colorisation des maillages [5] ou l’inpainting des textures 2D associées aux faces d’un maillage [6], mais ils ne traitent pas directement la couleur au niveau des sommets du maillage. L’objectif de nos travaux est donc d’adapter l’algorithme d’inpainting de Criminisi *et al.* [1] aux maillages 3D couleur. Comme cette approche repose sur la notion de similarité entre des patches qui sont ensuite collés pour remplir la zone à restaurer, une notion similaire de patches est nécessaire pour les maillages. Pour y remédier, un patch en spirale est défini afin de représenter le voisinage local des sommets et permettre leur comparaison. Un terme de priorité est ensuite défini pour déterminer l’ordre de remplissage, permettant ainsi de reconstruire en premier les patches situés près de la frontière de la zone à restaurer et présentant des propriétés spécifiques en termes de densité, de variance et de continuité.

Dans la section suivante, nous introduisons les notations et la notion de patch en spirale, qui est au cœur de notre adaptation de [1]. La section 3 présente la méthode proposée pour l’inpainting des maillages 3D couleur ainsi que ses détails. Ensuite, nous présentons quelques résultats avant de conclure.

2 Notations et patches en spirale

Un maillage M est représenté par un graphe $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ composé d’un ensemble fini de sommets $V = \{v_1, \dots, v_m\}$ et d’un ensemble fini d’arêtes $\mathcal{E} \subset \mathcal{V} \times \mathcal{V}$. On suppose que \mathcal{G} est non orienté, sans boucles et sans arêtes multiples. Soit (v_i, v_j) une arête de \mathcal{E} reliant deux sommets v_i et v_j de \mathcal{V} . La notation $v_i \sim v_j$ est utilisée pour désigner deux sommets adjacents. L’ensemble $\mathcal{N}(v_i) = \{v_j, v_j \sim v_i\}$ représente l’ensemble des sommets adjacents à v_i dans son 1-hop (c’est-à-dire les sommets atteignables en un saut d’une arête à partir de v_i).

On définit un signal \mathbf{F} sur un graphe \mathcal{G} comme une fonction qui associe des vecteurs aux sommets :

$$\mathbf{F} : \mathcal{V} \rightarrow \mathbb{R}^d \quad (1)$$

Nous considérons trois types de signaux sur graphe :

1. $\mathbf{S} : \mathcal{V} \rightarrow \mathbb{R}^3$ qui fournit les coordonnées d’un sommet v_i ,
2. $\mathbf{N} : \mathcal{V} \rightarrow \mathbb{R}^3$ qui fournit la normale en un sommet v_i ,
3. $\mathbf{C} : \mathcal{V} \rightarrow \mathbb{R}^3$ qui fournit la couleur d’un sommet v_i .

Les normales aux sommets $\mathbf{N}(v_i)$ sont calculées comme une moyenne pondérée des normales des faces adjacentes, en utilisant des poids basés sur les angles entre faces [7].

Pour effectuer un inpainting basé motif, il nous faut procéder par recopie de patch locaux [1]. Nous proposons d’exploiter la notion de patch en spirale, proposée par Lim *et al.* [8]. Le principe est que les sommets environnants d’un sommet peuvent être énumérés en suivant une spirale, et cela peut être utilisé pour définir des patches sur des maillages 3D. Comme nous l’avons fait dans [9], nous pouvons définir un patch en spirale $\text{Sp}(v_i, k)$ comme une séquence ordonnée à partir de la concaténation de ses anneaux ordonnés. Un anneau de rang k pour un noeud v_i , noté $k\text{-ring}(v_i)$ donne la liste ordonnée en spirale des noeuds accessibles en un saut à partir de l’anneau

*Ce travail a bénéficié d’un financement de la région Normandie dans le cadre du projet émergent COSURIA.

de rang $k - 1$. Nous avons donc $1\text{-ring}(v_i) = \mathcal{N}(v_i)$ et ainsi de suite. Un patch en spirale est finalement défini par

$$\text{Sp}(v_i, k) = (v_i, 1\text{-ring}(v_i), \dots, k\text{-ring}(v_i)) \quad (2)$$

On peut définir une distance $d(\text{Sp}(v_i, k), \text{Sp}(v_j, k))$ entre deux patches en spirale (voir [9] pour plus de détails) en comparant les signaux portés par les noeuds, après mise en correspondance des patches en spirale.

3 Inpainting de maillage 3D couleur

Étant donné un maillage M et son graphe associé $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$, la zone à restaurer est notée $\Omega \subset \mathcal{V}$, et sa frontière est définie comme $\partial\Omega = \{v_i \in \Omega \mid \exists v_j \in \mathcal{N}(v_i) \text{ avec } \text{Marked}(v_j) = 0\}$. Nous marquons les sommets à restaurer à l'aide de la fonction suivante :

$$\text{Marked}(v_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } v_i \in \Omega, \\ 0 & \text{si } v_i \notin \Omega. \end{cases}$$

Pour les sommets v_i appartenant à Ω , leur couleur est considérée comme inconnue et initialisée à $\mathbf{C}(v_i) = (0, 0, 0)^T$. L'objectif de l'inpainting est de reconstruire la couleur de ces sommets en recopiant la couleur des sommets provenant de patches en spirale avoisinants.

3.1 Principe de l'algorithme proposé

L'algorithme suit une approche similaire à celle proposée par Criminisi *et al.* pour l'inpainting d'images [1], mais il est adapté au cas particulier de l'inpainting des maillages 3D couleur. Une description en pseudo-code des étapes de l'algorithme est présentée dans l'Algorithme 1. À chaque itération, la priorité des sommets est calculée, et le sommet v_{target} ayant la priorité la plus élevée est sélectionné comme celui à remplir. Ensuite, le sommet v_{best} ayant le patch en spirale $\text{Sp}(v_{best}, k)$ le plus similaire à $\text{Sp}(v_{target}, k)$ est recherché parmi l'ensemble des sommets appartenant à $\gamma\text{-ring}(v_{target})$. L'algorithme dépend donc de deux paramètres : la taille k des patches en spirale, la taille γ de l'anneau de recherche pour les patches similaires. La recherche est restreinte aux patches en spirale entièrement définis (c'est-à-dire sans sommets appartenant à Ω). Les valeurs de couleur de $\text{Sp}(v_{best}, k)$ sont ensuite copiées sur le patch $\text{Sp}(v_{target}, k)$ pour ses sommets situés dans Ω . La frontière $\partial\Omega$ est alors mise à jour, et l'algorithme continue jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de sommets à restaurer. Dans la suite, nous détaillons les différentes étapes de cet algorithme.

3.2 Calcul de priorité

L'algorithme 1 est similaire à celui proposé dans [1] et réalise l'inpainting en adoptant une stratégie de remplissage optimal basée sur des valeurs de priorité attribuées à chaque patch en spirale de la frontière $\partial\Omega$. Dans [1], la priorité est définie comme le produit de deux termes : le terme de confiance et le terme de données. Le terme de confiance mesure la quantité d'informations connues autour d'un pixel, tandis que le terme de données favorise la restauration des structures linéaires en premier. Cependant, ces deux termes ne peuvent pas être directement appliqués aux maillages 3D couleur (par exemple, il n'existe pas

Algorithm 1 Inpainting d'un maillage 3D couleur basé sur des patches en spirale

Entrée : Maillage M et graphe associé $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$, zone à restaurer $\Omega \subset \mathcal{V}$

Définir la taille k des patches en spirale et γ la taille de l'anneau de recherche

Calculer les patches en spirale $\text{Sp}(v_i, k)$ de taille k , $\forall v_i \in \Omega \cup \{v_j \in \gamma\text{-ring}(v_i)\}$

Marquer les sommets à restaurer : $\text{Marked}(v_i) = 1, \forall v_i \in \Omega$
while $\partial\Omega \neq \emptyset$ **do**

1) Calculer $\text{Priority}(v_i), \forall v_i \in \partial\Omega$

2) Trouver le patch en spirale $\text{Sp}(v_{target}, k)$ avec la priorité maximale, i.e., $v_{target} = \arg \max_{v_i \in \partial\Omega} \text{Priority}(v_i)$

3) Trouver le patch exemple totalement défini $\text{Sp}(v_{best}, k)$ (avec $v_{best} \in \mathcal{V} \setminus \Omega$) minimisant $d(\text{Sp}(v_{target}, k), \text{Sp}(v_{best}, k))$ avec $\text{Confidence}(v_{best}) = 1$ dans $\gamma\text{-ring}(v_{target})$

4) Copier les couleurs du patch en spirale $\text{Sp}(v_{best}, k)$ vers $\text{Sp}(v_{target}, k), \forall v_i \in \text{Sp}(v_{target}, k)$ avec $\text{Marked}(v_i) = 1$

5) Mettre à jour $\text{Marked}(v_i)$ et $\partial\Omega$ pour tous les sommets inpaintés

end while

de définition d'isophotes pour les maillages). Nous proposons donc un terme de priorité dédié aux maillages 3D couleur, qui est défini comme le produit de quatre termes que nous introduisons dans la suite.

3.2.1 Confiance

Le terme de confiance est similaire à celui utilisé pour les images. Son objectif est de remplir en priorité les patches en spirale dont la majorité des couleurs des sommets sont déjà connues. La confiance est définie comme suit :

$$\text{Confidence}(v_i) = \frac{\sum_{v_j \in k\text{-disk}(v_i)} (1 - \text{Marked}(v_j))}{|k\text{-disk}(v_i)|} \quad (3)$$

L'ensemble $k\text{-disk}(v_i)$ est l'ensemble de tous les noeuds accessibles en k sauts à partir de v_i (c'est l'union de tous les $l\text{-ring}(v_i)$ avec $0 \leq l \leq k$, c-à-d l'ensemble des noeuds de $\text{Sp}(v_i, k)$). Le terme de confiance mesure la proportion de couleurs de sommets connues à l'intérieur du patch en spirale $\text{Sp}(v_i, k)$. Il est proche de 1 si la majorité des sommets du patch en spirale ont une couleur connue et proche de 0 lorsque le patch contient peu de sommets avec des couleurs connues (voir Figure 1(c)).

3.2.2 Densité

Le terme de densité a pour objectif de privilégier le remplissage des patches en spirale les plus denses en premier. En effet, dans un maillage, la couverture spatiale d'un patch peut varier considérablement d'une région à l'autre. Il est donc préférable de restaurer en priorité les petits patches en spirale. La densité est définie comme suit :

$$\text{Density}(v_i) = \frac{|k\text{-hop}(v_i)|}{\sum_{v_j \in k\text{-hop}(v_i)} \|\mathbf{S}(v_i) - \mathbf{S}(v_j)\|_2} \quad (4)$$

avec $k\text{-hop}(v_i) = k\text{-disk}(v_i) \setminus \{v_i\}$. Ce terme mesure la dispersion spatiale moyenne des sommets du patch en spirale $\text{Sp}(v_i, k)$ par rapport à son centre v_i . Il est élevé si le patch en spirale est petit et est faible si le patch est plus étendu (voir Figure 1(d)).

3.2.3 Variance

Le terme de variance vise à privilégier le remplissage des patches en spirale présentant de fortes variations géométriques. Ces variations sont mesurées à l'aide de la variance totale des normales des sommets d'un patch en spirale $\text{Sp}(v_i, k)$. Une valeur élevée de ce terme indique des variations significatives dans la surface du patch en spirale. Une faible valeur suggère une surface plus homogène (voir Figure 1(e)). La variance est définie comme suit :

$$\text{Variance}(v_i) = \sum_{j=1}^3 \sigma_j^2(\mathcal{N}(v_i, k)) \quad (5)$$

où $\mathcal{N}(v_i, k)$ est l'ensemble des normales des sommets appartenant au patch en spirale $\text{Sp}(v_i, k)$.

3.2.4 Continuité

Le terme de continuité est similaire au terme de données utilisé pour les images. Son objectif est d'encourager l'inpainting des patches en spirale où une forte variation de couleur est présente. Ainsi, les patches en spirale situés dans la continuité des structures de couleur seront remplis en priorité. Dans le cas des images, cette idée est motivée par la notion d'isophotes. Cependant, comme il n'existe pas d'équivalent direct pour les maillages, nous utilisons la Structure Tensor Total Variation (STTV) [10]. De plus, une approche similaire, la SSTV, a déjà été utilisée pour l'inpainting d'images dans [11], avec de bons résultats. Le tenseur de structure \mathbf{J} est une matrice définie comme le produit extérieur du gradient : $\mathbf{J}(v_i) = \nabla^T \mathbf{f}(v_i) \cdot \nabla \mathbf{f}(v_i)$. Le gradient en un sommet v_i est défini comme le vecteur contenant toutes les distances entre les descripteurs en spirale de v_i et ceux de ses voisins dans son $k\text{-ring}(v_i)$:

$$\nabla \mathbf{f}(v_i) = [d(\text{Sp}(v_i, k), \text{Sp}(v_j, k)), v_j \in k\text{-hop}(v_i)]^T \quad (6)$$

Dans la comparaison des patches spiraux, le signal du graphe est le vecteur de couleurs des sommets : $\mathbf{F}(v_i) = \mathbf{C}(v_i)$. Le tenseur de structure résume les directions dominantes du gradient dans l'anneau $k\text{-ring}(v_i)$ autour d'un sommet v_i . L'importance du tenseur de structure réside dans ses valeurs propres, qui fournissent une description riche de la géométrie locale en résumant la distribution des gradients dans le voisinage $k\text{-ring}(v_i)$. Sa décomposition spectrale est donnée par : $\mathbf{J}(v_i) = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{U}^T$ où \mathbf{U} est la matrice de ses vecteurs propres et $\mathbf{\Lambda}$ est la matrice diagonale de ses valeurs propres. Nous définissons alors la continuité à partir de la STTV comme suit :

$$\text{Continuity}(v_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^{|k\text{-ring}(v_i)|} \lambda_j^2} \quad (7)$$

avec $\lambda_j = \mathbf{\Lambda}(j, j)$. Une valeur élevée de ce terme signifie qu'il existe des variations de couleur importantes sur la surface autour du patch en spirale (voir Figure 1(f)).

3.2.5 Priorité

La priorité est ensuite définie comme suit :

$$\text{Priority}(v_i) = \frac{\text{Confidence}(v_i) \cdot \text{Density}(v_i)}{\text{Variance}(v_i) \cdot \text{Continuity}(v_i)}$$

L'objectif de cette priorité est de favoriser le remplissage des patches en spirale qui : 1) possèdent peu d'informations manquantes (terme de confiance), 2) ont une petite portée spatiale (terme de densité), 3) sont situés sur des structures géométriques marquées (terme de variance), 4) sont situés sur des structures de variations fortes de couleur (terme de continuité). La Figure 1 montre ces termes pour une zone à restaurer. On peut y voir que le patch cible sélectionné, ayant la priorité la plus élevée, est celui qui combine au mieux ces quatre termes.

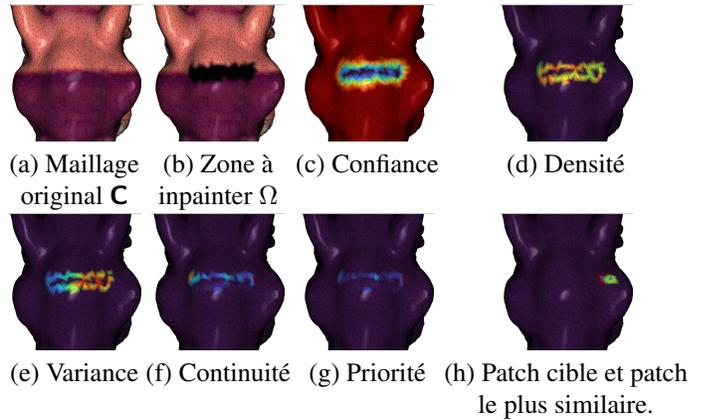


FIGURE 1 – De gauche à droite, de haut en bas : une partie originale d'un maillage 3D couleur, la zone sélectionnée à restaurer Ω , les termes de Confiance, Densité, Variance et Continuité calculés, qui sont combinés pour obtenir la Priorité (les couleurs chaudes indiquent la priorité la plus élevée). L'image finale montre le patch en spirale cible $\text{Sp}(v_{\text{target}}, 1)$ de plus haute priorité (montré en rouge) et son patch en spirale le plus similaire (montré en vert) dans une zone de recherche d'un 3-hop.

3.3 Recopie d'un patch en spirale sur un autre

Dans l'étape 4 de l'algorithme 1, une fois que le meilleur patch en spirale $\text{Sp}(v_{\text{best}}, k)$ de $\text{Sp}(v_{\text{target}}, k)$ a été identifié, son contenu doit être collé sur les parties manquantes de $\text{Sp}(v_{\text{target}}, k)$. Cela signifie que seuls les sommets $v_j \in \text{Sp}(v_{\text{target}}, k)$ avec $\text{Marked}(v_j) = 1$ auront leur couleur restaurée. Pour ce faire, nous nous appuyons sur la mise en correspondance entre deux patches en spirale [9] et les couleurs de tous les sommets de $l\text{-ring}(v_{\text{best}})$ qui sont associés à un sommet v_m sont moyennées pour remplir $\mathbf{C}(v_m)$.

4 Résultats

Dans cette section, nous présentons des exemples de restauration de maillages 3D couleur avec l'approche proposée. Dans la Figure 2, nous présentons des résultats sur des maillages issus de numérisations réelles. Le premier maillage provient de

la base de données de maillages 3D couleur GREYC [12], le second est une numérisation d’un artefact archéologique obtenue depuis SketchFab, et le troisième est un scan d’une personne obtenue depuis reconstructMe. Ces maillages présentent divers défauts de numérisation de la couleur, tels que des erreurs de scan (premier maillage), des traces de marqueur (second maillage) des grains de beauté ou des rougeurs (troisième maillage), qui doivent être corrigés. Les zones d’inpainting, où la couleur doit être restaurée, sont indiquées en jaune dans la deuxième colonne de la Figure 2. La troisième colonne montre que notre approche a réussi à reconstruire la couleur des zones manquantes (homogènes ou texturées) sans artefacts visibles, même lorsque la zone à combler est étendue. Les paramètres utilisés étaient $k = 1$ et $\gamma = 3$, ce qui signifie que nous avons utilisé des patches en spirale de type 1-ring avec une zone de recherche dans un 3-ring (v_i). La reconstruction présente une bonne qualité visuelle dans toutes ces situations, même lorsque la texture sous-jacente est complexe. Afin d’évaluer la qualité visuelle des maillages restaurés, nous avons mesuré les valeurs BRISQUE [13] des maillages rendus en 2D. Une amélioration moyenne du score de 0.13 a été observée, indiquant que les résultats obtenus offrent une qualité perceptuelle légèrement supérieure.

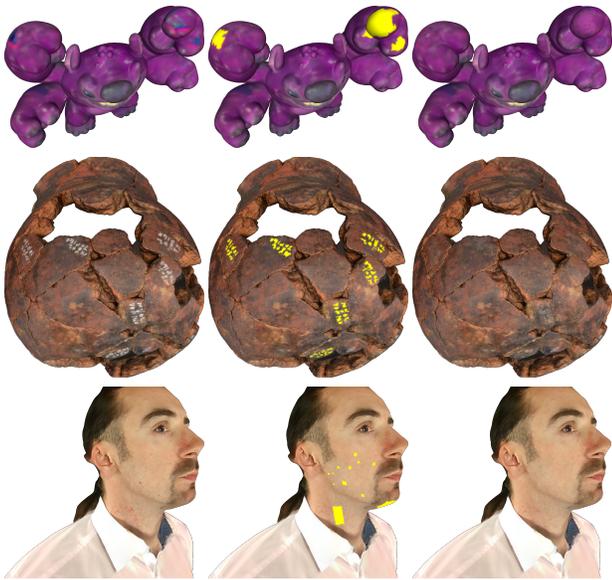


FIGURE 2 – Exemples de restauration de maillages 3D couleur (de préférence à observer zoomé). Chaque ligne présente un maillage original (première colonne) où certains défauts doivent être corrigés. Ces zones, marquées en jaune (deuxième colonne), nécessitent une restauration. La dernière colonne montre les résultats de l’inpainting.

5 Conclusion

Nous avons proposé une approche pour l’inpainting basé patch de maillages 3D couleur. L’objectif est de reconstruire la couleur manquante pour les sommets du maillage. Un équivalent des patches sur les maillages 3D a été défini sous forme de

patches en spirale. Ensuite, une adaptation spécifique de l’algorithme de Criminisi *et al.* pour les images [1] a été proposée. Un terme de priorité dédié est utilisé pour définir l’ordre de remplissage, de sorte que les patches proches de la frontière de la zone à restaurer et présentant des propriétés spécifiques de continuité soient complétés en premier. Plusieurs résultats ont été présentés, montrant les avantages de l’approche qui permet de bien reconstruire les zones colorées manquantes dans les maillages 3D couleur.

Références

- [1] A. Criminisi, P. Pérez, and K. Toyama, “Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting,” *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 13, no. 9, pp. 1200–1212, 2004.
- [2] G. Gisbert, R. Chaine, and D. Coeurjolly, “Inpainting holes in folded fabric meshes,” *Computers & Graphics*, vol. 114, pp. 201–209, 2023.
- [3] X. Wu, X. Lin, N. Li, and H. Li, “Patch-based mesh inpainting via low rank recovery,” *Graphical Models*, vol. 122, p. 101139, 2022.
- [4] G. Harary, A. Tal, and E. Grinspun, “Context-based coherent surface completion,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 33, no. 1, pp. 5 :1–5 :12, 2014.
- [5] B. Li, Y. Lai, and P. L. Rosin, “Sparse graph regularized mesh color edit propagation,” *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 29, pp. 5408–5419, 2020.
- [6] A. Maggioromo, P. Cignoni, and M. Tarini, “Texture inpainting for photogrammetric models,” *Computer Graphics Forum*, vol. 42, no. 6, p. e14735, 2023.
- [7] J. A. Bærentzen and H. Aanæs, “Signed distance computation using the angle weighted pseudonormal,” *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 11, no. 3, pp. 243–253, 2005.
- [8] 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. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2018, pp. 349–362.
- [9] O. Lézoray and A. Nouri, “3d mesh saliency from local spiral hop descriptor,” in *IS&T Electronic Imaging*, vol. 35, no. 17, 2023, pp. 103–1–103–6.
- [10] S. Lefkimmatis and S. J. Osher, “Nonlocal structure tensor functionals for image regularization,” *IEEE Trans. Computational Imaging*, vol. 1, no. 1, pp. 16–29, 2015.
- [11] P. Buysse, M. Daisy, D. Tschumperlé, and O. Lézoray, “Exemplar-based inpainting : Technical review and new heuristics for better geometric reconstructions,” *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 24, no. 6, pp. 1809–1824, 2015.
- [12] A. Nouri, C. Charrier, and O. Lézoray, “Greyc 3d colored mesh database,” Technical Report hal-01441721, Tech. Rep., 2017.
- [13] D. Kong, K. Kong, K. Kim, S. Min, and S. Kang, “Image-adaptive hint generation via vision transformer for out-painting,” in *IEEE/CVF WACV*, 2022, pp. 4029–4038.