

Reconstruction semi-régulière de surfaces par stéréoscopie

J.-L. Peyrot¹, Frédéric Payan¹ et Marc Antonini¹

¹Laboratoire I3S - UMR 7271 - Université de Nice - Sophia Antipolis - CNRS
peyrot@i3s.unice.fr, fpayan@i3s.unice.fr, am@i3s.unice.fr

Résumé

Notre objectif consiste à inclure dans les systèmes stéréoscopiques un remaillage semi-régulier qui est capable de générer un maillage semi-régulier à partir des images stéréoscopiques, au contraire des systèmes actuels qui génèrent seulement des nuages de points. Notre méthode de reconstruction est basée sur une approche coarse-to-fine, et crée directement à partir des images stéréoscopiques une maille semi-régulière. De plus, pour tenir compte des contraintes temps-réel des systèmes d'acquisition, cette construction semi-régulière est parallélisée sur GPU. Les résultats expérimentaux montrent l'efficacité de notre méthode sur divers types de surfaces.

Mots clé : Maillage semi-régulier, multi-résolution, stéréoscopie, GPU

1. Introduction

Parmi les systèmes de numérisation, les systèmes stéréoscopiques utilisent la lumière comme grandeur physique pour mesurer les informations 3D d'une scène. Ils se composent de deux caméras pour générer deux images correspondant à deux points de vues différents de la même scène, comme l'illustre l'exemple donné à la Figure 1.

Trois étapes sont nécessaires pour reconstruire l'information tridimensionnelle d'une scène :

1. la **calibration** des deux caméras dont le but est de trouver la relation entre les coordonnées spatiales d'un point de la scène et ses coordonnées dans le repère associé aux images stéréoscopiques. Cela nécessite d'estimer les paramètres extrinsèques (*i.e.* la position et l'orientation des caméras) et intrinsèques (*i.e.* la distance focale des caméras, les facteurs d'agrandissement de l'image, les coordonnées de la projection du centre optique des caméras sur les plans images, le facteur de non-orthogonalité qui indique si la grille des cellules photosensibles qui composent le capteur, est rectangulaire ou non). Mathématiquement, on peut ainsi déterminer les matrices de passage du repère de la scène (X_w, Y_w, Z_w) au repère image (U_i, V_i);
2. l'**appariement** des deux points de vues, pour trouver les paires de pixels correspondants aux images du même point 3D à travers les deux caméras. Un état de l'art sur les différentes techniques de mise en correspondance peut être trouvé dans la thèse de Chambon [Cha05];



Figure 1: Exemple d'un système de reconstruction par stéréoscopie.

3. la **triangulation** consistant à calculer les coordonnées 3D des points de la scène à partir des paramètres extrinsèques et intrinsèques déterminés lors de la calibration, et du résultat de l'appariement.

Parmi l'état de l'art sur les méthodes de reconstruction de surfaces, on s'attachera plus particulièrement à décrire les principales techniques de stéréoscopie qui utilisent une paramétrisation lors de la reconstruction. Pour avoir plus de détails et une vue plus globale des techniques de reconstruction de surfaces, nous proposons au lecteur de regarder l'état de l'art proposé par Seitz *et al.* [SCD*06].

Une première méthode que nous pouvons citer est la technique proposée par Park *et al.* [PSM*13] qui réalise une reconstruction efficace à partir d'images multi-vues d'une scène ou d'un objet. L'idée principale consiste à combiner une méthode de reconstruction de type *Multi-View Stereo (MVS)* qui utilise une correspondance entre les pixels des images multi-vues, et une méthode utilisant la notion de reflectance de la surface *Shape from Shading* comme par exemple celle de Zhang *et al.* [ZPKA02]. Pour cela, les auteurs utilisent une structure composée de deux caméras, d'un ensemble de lumières et d'une table pivotante sur laquelle

repose l'objet scanné. Comme le montre la Figure 2, la table pivotante permet d'obtenir plusieurs images de l'objet à différents angles de vue, tandis que l'ensemble de lumière dont une seule est allumée à un instant donné permet de générer plusieurs niveaux d'éclairage de la même scène.

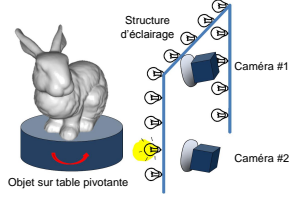


Figure 2: Structure utilisée pour acquérir des images (image extraite de [PSM*13]).

La première étape de cette méthode consiste à générer un maillage de base de l'objet scanné. Pour cela, la technique *Structure from Motion* [SSS06] est tout d'abord utilisée pour générer le nuage de points de l'objet reconstruit. Ensuite une carte de profondeur est créée grâce à la méthode *MVS* de Hernandez *et al.* [HVC08] et utilisée pour construire le maillage de base. La seconde étape est la création d'une paramétrisation par *charts* qui consiste à paramétriser avec le moins de distorsion possible la surface du maillage de base en la partitionnant, comme expliqué dans la méthode de Zhou *et al.* [ZSGS04] : une illustration de la paramétrisation obtenue est donnée à la Figure 3.

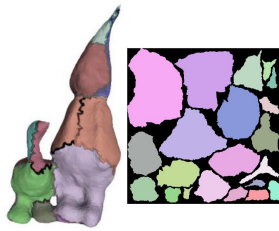


Figure 3: Illustration des charts définis sur la surface du maillage de base ainsi que la paramétrisation obtenue (image extraite de [PSM*13]).

Finalement, à partir de la paramétrisation 2D et d'une estimation des normales à la surface en chaque point du maillage de base, un raffinement est réalisé sur l'espace paramétrique 2D en utilisant une minimisation d'énergie pour contraindre la position des points dans l'espace 3D. Ainsi, cette méthode génère des reconstructions de haute qualité en fusionnant les avantages des méthodes géométriques et photométriques, grâce à l'utilisation d'une paramétrisation globale de la surface de l'objet.

Une autre technique proposée par Pietroni *et al.* [PTSZ11] permet de générer des paramétrisations globales applicables à différents types de surfaces, comme les surfaces implicites, les maillages polygonaux, les nuages de points générés par des scanners 3D, etc. Les auteurs présentent une application de cette technique de paramétrisation au remaillage quadrangulaire de surfaces. Le principe de cette méthode, schématisé à la Figure 4 consiste à paramétriser chaque image

de distances (nuage de points d'une vue stéréoscopique par exemple) vers un domaine paramétrique 2D, en tenant compte des artefacts aux frontières des différentes images. En effet, lors de la paramétrisation d'une surface vers un domaine planaire paramétrique, un ensemble de disques topologiques pris sur la surface sont paramétrisés indépendamment, ce qui génère des duplications pour les points de la surface se trouvant aux frontières des disques topologiques car ils appartiennent à plusieurs disques par définition. De ce fait, pour générer une paramétrisation globale robuste, il convient de gérer ces zones de frontières et d'imposer des conditions par rapport aux changements de coordonnées paramétriques lors du passage d'un disque à l'autre. Pour tenir compte des quatre orientations possibles d'un référentiel donné et des différentes positions de l'origine des repères locaux sur le domaine paramétrique, il faut imposer que ce changement de coordonnées paramétriques se fasse suivant une rotation d'angle $\frac{k\pi}{2}$ et une translation de valeur entière. Pietroni *et al.* [PTSZ11] calculent cette paramétrisation en minimisant une contrainte sur les gradients avec l'équation (1) ci-dessous,

$$E(q) = \min_q \sum_T A_T \cdot \|\Delta q^T - w^T\|^2 \quad (1)$$

avec T un triangle d'une image de distances (les images de distances ont été triangulées), Δq est le gradient au point de coordonnées paramétriques complexe $q = u + \sqrt{-1}v$, et w le vecteur complexe représentant les deux directions de gradient.

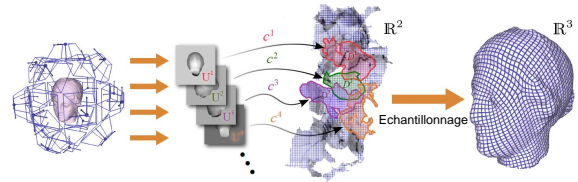


Figure 4: Principe de la méthode [PTSZ11]. Un ensemble d'images de distances (nuages de points par exemple) U^i est généré. Ensuite, chaque image U^i est paramétrisée dans un domaine planaire 2D grâce à la bijection c^i , en tenant compte des contraintes de distorsion pour générer au final une paramétrisation globale. À droite est présenté un résultat de remaillage quadrangulaire (image extraite de [PTSZ11]).

Les deux techniques présentées précédemment sont les principales techniques qui utilisent une paramétrisation durant une étape de reconstruction de surfaces. Elles sont fiables et génèrent des maillages de haute qualité en termes de forme et d'aire des triangles (quadrangles).

2. Maillage semi-régulier basé stéréoscopie

2.1. Présentation des maillages semi-réguliers

Un maillage semi-régulier possède une connectivité intéressante car elle permet de générer des maillages à différents

niveaux de détails géométriques, et est très utilisée en compression. En notant L le nombre de résolutions que l'on souhaite créer, on peut générer $L - 1$ maillages, indicés de M_0 à M_{L-2} correspondant aux différents niveaux de détails, avec en plus $M_{L-1} = M_{sr}$ car ce dernier correspond au maillage de niveau de détails le plus élevé. De façon générale, à partir du maillage M_l de résolution $l \in [1, L - 1]$, on génère le maillage de résolution inférieure M_{l-1} par fusions quaternaires de ses triangles, comme illustré à la Figure 5 : le maillage M_{l-1} correspond donc à une approximation géométrique du maillage de résolution supérieure M_l . La hiérarchie de maillages est créée en réalisant successivement cette étape de fusions quaternaires à partir du maillage semi-régulier $M_{sr} = M_{L-1}$ jusqu'à obtenir le maillage de résolution la plus basse M_0 . La Figure 6 montre un exemple d'une telle hiérarchie générée sur le modèle RABBIT à $L = 3$ niveaux de résolution.

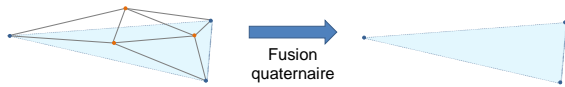


Figure 5: Fusion quaternaire d'un triangle du maillage M_l de résolution l . A gauche sont représentés 4 triangles voisins du maillage M_l , avec le triangle bleu correspondant au triangle qui sera généré après leur fusion et qui fera partie du maillage de résolution inférieure M_{l-1} , comme illustré à droite.

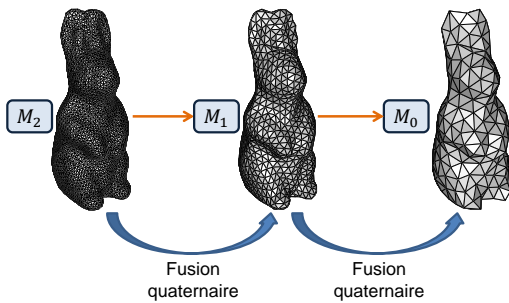
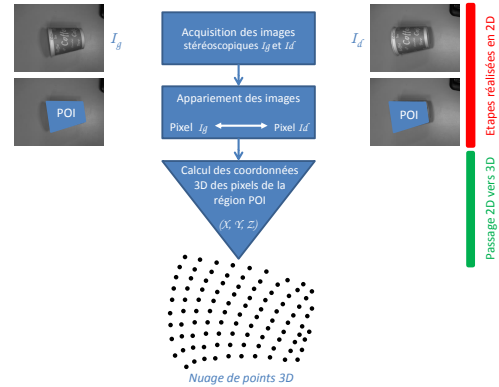


Figure 6: Hiérarchie multi-résolution du modèle RABBIT avec 3 niveaux de détails.

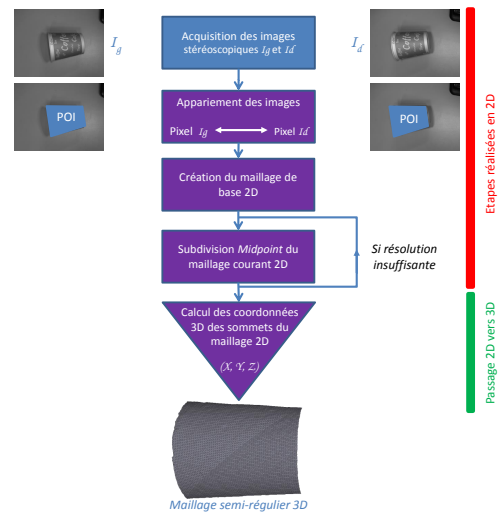
2.2. Méthode de maillage semi-régulier proposée

La Figure 7(a) illustre les deux principales étapes d'un algorithme classique de reconstruction stéréoscopique.

1. Tout d'abord, une méthode d'appariement [SS02] recherche les paires de pixels dans les deux images stéréoscopiques, qui représentent le même point 3D dans la scène. L'ensemble des paires de pixels est nommé région *Pixels Of Interest (POI)*, correspondant aux régions entourées en bleu sur les images du haut de la Figure 7 ;
2. Chaque paire de pixels dans la région POI est ensuite utilisée pour calculer les coordonnées du point 3D correspondant dans la scène, à l'aide d'une technique de triangulation [HZ04].



(a) Approche classique.



(b) Approche proposée.

Figure 7: Approche classique (en haut) et l'approche proposée (en bas) pour reconstruire une surface à partir d'un système stéréoscopique.

La sortie des scanners 3D actuels consiste en un ensemble de points 3D, appelé communément un nuage de points 3D. Ce nuage de points est généralement dense, puisqu'il contient autant de points 3D que de paires de pixels dans la région POI, et plus la résolution des images stéréoscopiques est élevée, plus le nuage de points sera dense.

Notre approche est différente comme le décrit la Figure 7(b), et est constituée de quatre étapes :

1. Détecter la région POI dans les images stéréoscopiques grâce à la phase d'appariement ;
2. Créer le maillage de base 2D à partir de la région POI ;
3. Subdivision de la connectivité du maillage 2D courant et repositionnement des sommets ajoutés, à l'intérieur de la région POI ; cette phase est répétée jusqu'à obtenir un maillage à la résolution souhaitée ;
4. Calcul des coordonnées 3D des sommets du maillage 2D pour générer le maillage semi-régulier 3D final.

Notre algorithme de maillage a l'avantage de ne nécessiter comme entrées que les images stéréoscopiques et la connaissance de la région POI pour générer la connectivité semi-régulière. De plus, au lieu de calculer les coordonnées 3D pour chaque pixel de la région POI, comme cela est fait avec des algorithmes classiques (ce qui génère des nuages de points sur-échantillonnés), notre méthode restreint les calculs aux seuls pixels utilisés lors des subdivisions successives, ce qui diminue la complexité par rapport aux approches classiques.

Un exemple est présenté à la Figure 8 sur un maillage semi-régulier à 3 niveaux de résolution généré par notre méthode.

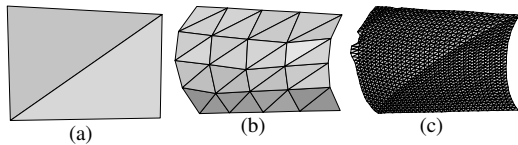


Figure 8: Trois niveaux de résolution d'un maillage semi-régulier créé avec notre algorithme de reconstruction semi-régulier. Chaque résolution contient (a) 2 triangles ; (b) 32 triangles et (c) 2048 triangles.

2.3. Détails d'implémentation

Génération du maillage semi-régulier 2D

Comme expliqué précédemment, notre algorithme crée d'abord la connectivité du maillage semi-régulier dans l'espace 2D des images stéréoscopiques. Pour générer cette connectivité semi-régulière, nous adoptons une approche *coarse-to-fine*. On crée d'abord un maillage de base qui est une version très approximative de la région POI, en utilisant les trois phases suivantes, illustrées sur les Figures 9(a) et 9(b) :

1. Quatre points sont initialisés aux coins de l'image stéréoscopique ;
2. Un algorithme parallélisé sur GPU de plus proches voisins déplace ces points sur leur plus proches pixels dans la région POI (flèches oranges dans la Figure 9(b)) ;
3. La connectivité des deux triangles correspondant est créée.

La connectivité des résolutions supérieures est générée avec une subdivision *Midpoint* : chaque arête est divisée en deux arêtes plus petites en ajoutant un sommet en son milieu et chaque triangle est ainsi divisé en quatre sous-triangles. Un tel maillage est appelé semi-régulier car les sommets ajoutés sont toujours réguliers (leur valence est égale à 6). Le point milieu ne faisant pas forcément parti de la région POI, il est déplacé vers le plus proche pixel de la région POI grâce à l'algorithme de plus proches voisins.

La Figure 9(c) montre le maillage 2D semi-régulier résultant. Le même processus est réitéré plusieurs fois pour générer des maillages de plus en plus denses et détaillés : la Figure 9(d) montre le troisième niveau de détails de la connectivité définie par $2 \times 4 \times 4$ triangles.

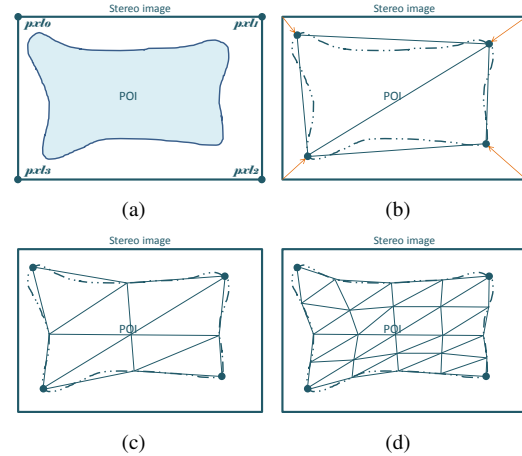


Figure 9: Génération coarse-to-fine du maillage semi-régulier 2D. (a) Phase d'initialisation : quatre sommets sont positionnés aux coins de l'image stéréoscopique ; (b) création du maillage de base ; (c) et (d) les deux premières résolutions obtenues par subdivisions Midpoint après déplacements des sommets ajoutés sur la région POI à l'aide de l'algorithme de plus proches voisins parallélisé sur GPU.

Calculs des coordonnées 3D

Pour générer le maillage final, les coordonnées 3D de chaque point du maillage semi-régulier 2D sont calculées. Nous utilisons la même technique que l'approche classique, décrite à la Figure 7(a). En itérant cette technique sur chaque sommet du maillage semi-régulier 2D, on crée le maillage semi-régulier 3D, comme illustré sur la Figure 8. Nous observons que le maillage semi-régulier résultant approxime fidèlement la surface originale, en évitant la génération d'un maillage dense : le nuage de points contient 93595 points 3D, alors que la résolution la plus fine de notre maillage semi-régulier ne contient que 4225 sommets.

3. Résultats expérimentaux

Nous présentons plusieurs résultats pour montrer l'efficacité de notre méthode, sur divers types de surfaces. La Figure 10 présente une image stéréoscopique d'un coin de mur, en dessous sont présentés les mailles semi-régulières à différents niveaux de résolution obtenues avec notre mailleur.

La Figure 11 présente le maillage semi-régulier de plus haute résolution obtenu pour une partie d'une porte (à gauche) et sa représentation texturée (à droite).

4. Conclusion

Nous avons présenté une contribution permettant de construire directement à partir des images stéréoscopiques une maille semi-régulière, sans passer par l'information 3D, au contraire des méthodes actuelles. Cela permet ainsi de raccourcir la chaîne de numérisation classique qui consiste à partir du nuage de points généré par le scanner, à le nettoyer, le mailler puis ensuite à le remailler en semi-régulier.

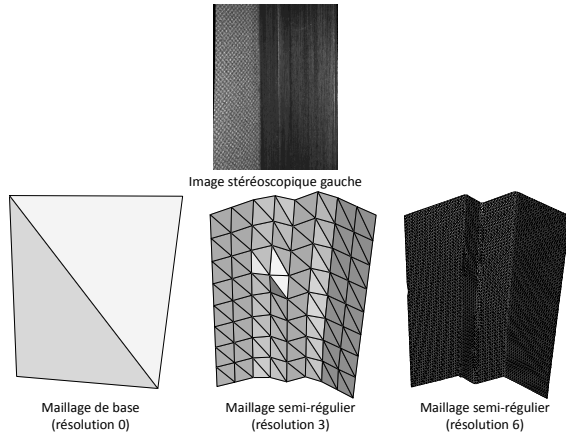


Figure 10: Résultat visuel d'un coin de mur.

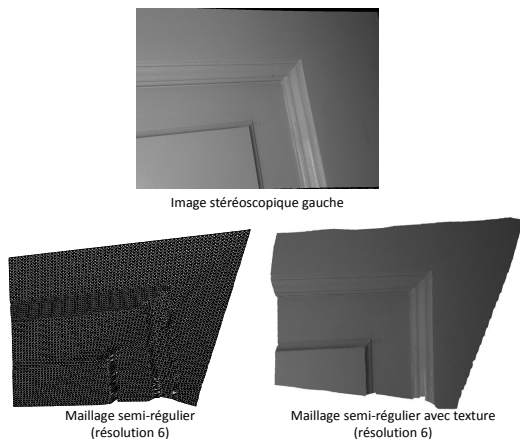


Figure 11: Résultat visuel d'une partie d'une porte.

Une perspective possible consiste à améliorer notre maillage semi-régulier pour générer des mailles plus uniformes en termes de forme et d'aire des triangles. Ceci permettrait de régulariser les distributions de sommets, ce qui facilite l'étape de subdivision et évite la génération de triangles fins et disproportionnés.

Références

- [Cha05] CHAMBON S. : *Mise en correspondance stéréoscopique d'images couleur en présence d'occultations*. PhD thesis, Université toulouse III-Paul Sabatier, 2005.
- [HVC08] HERNANDEZ E. C., VOGIATZIS G., CIPOLLA R. : Multiview photometric stereo. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* Vol. 30, Num. 3 (mars 2008), 548–554.
- [HZ04] HARTLEY R. I., ZISSERMAN A. : *Multiple View Geometry in Computer Vision*, second ed. Cambridge University Press, ISBN : 0521540518, 2004.
- [PSM*13] PARK J., SINHA S. N., MATSUSHITA Y., TAI Y.-W., KWEON I. S. : Multiview photometric stereo using planar mesh parameterization. *Computer Vision, IEEE International Conference on*. Vol. 0 (2013), 1161–1168.
- [PTSZ11] PIETRONI N., TARINI M., SORKINE O., ZORIN D. : Global parametrization of range image sets. *ACM Trans. Graph.* Vol. 30, Num. 6 (décembre 2011), 149 :1–149 :10.
- [SCD*06] SEITZ S. M., CURLESS B., DIEBEL J., SCHARSTEIN D., SZELISKI R. : A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. In *Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Volume 1* (Washington, DC, USA, 2006), CVPR '06, IEEE Computer Society, pp. 519–528.
- [SS02] SCHARSTEIN D., SZELISKI R. : A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *Int. J. Comput. Vision*. Vol. 47, Num. 1-3 (avril 2002), 7–42.
- [SSS06] SNAVELY N., SEITZ S. M., SZELISKI R. : Photo tourism : Exploring photo collections in 3d. *ACM Trans. Graph.* Vol. 25, Num. 3 (juillet 2006), 835–846.
- [ZPKA02] ZHANG Y., PAIK J., KOSCHAN A., ABIDI M. A. : A simple and efficient algorithm for part decomposition of 3-d triangulated models based on curvature analysis. In *Proceedings of the International Conference on Image Processing, III* (2002), pp. 273–276.
- [ZSGS04] ZHOU K., SYNDER J., GUO B., SHUM H.-Y. : Iso-charts : Stretch-driven mesh parameterization using spectral analysis. Eurographics.