



HAL
open science

Colorisation photo-réaliste de nuages de points 3D

Nathan Crombez, Guillaume Caron, El Mustapha Mouaddib

► **To cite this version:**

Nathan Crombez, Guillaume Caron, El Mustapha Mouaddib. Colorisation photo-réaliste de nuages de points 3D. Orasis, Congrès des jeunes chercheurs en vision par ordinateur, Jun 2013, Cluny, France. hal-00829449

HAL Id: hal-00829449

<https://hal.science/hal-00829449>

Submitted on 3 Jun 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Colorisation photo-réaliste de nuages de points 3D

Nathan Crombez

Guillaume Caron

El Mustapha Mouaddib

Université de Picardie Jules Verne, Laboratoire MIS
33 rue Saint-Leu, 80039 Amiens

{nathan.crombez, guillaume.caron, mouaddib}@u-picardie.fr

Résumé

Le patrimoine architectural est composé de biens historiques et artistiques qui doivent être protégés, préservés, restaurés et exposés au plus grand nombre. Des appareils modernes tels que les scanners laser 3D sont de plus en plus utilisés en documentation culturelle. Ces outils permettent de générer avec précision et rapidité des nuages de points de monuments historiques. Avec les données collectées, il est possible de créer un maillage afin de visualiser virtuellement les formes et/ou la surface de l'édifice. La plupart du temps, le scanner tridimensionnel est équipé d'un appareil photo qui est utilisé pour coloriser les points relevés. Cependant, la qualité photométrique du nuage de points est généralement assez mauvaise à cause principalement de problèmes de couleurs et de résolution. Des méthodes d'uniformisation d'intensité existent pour améliorer la colorimétrie mais ne permettent pas d'obtenir des rendus photo-réalistes et d'améliorer la résolution. C'est pourquoi, nous proposons une nouvelle méthode pour coloriser les nuages de points à l'aide de photographies de haute résolution acquises de points de vue différents du scanner (angle de vue différent, distance à l'édifice réduite, etc). Des résultats sur des jeux de données issus de la numérisation de la cathédrale d'Amiens démontrent la validité de notre approche en obtenant des nuages de points de qualité et de résolution photométriques nettement meilleures.

Mots Clef

Nuage de points, colorisation, optimisation visuelle virtuelle

Abstract

Architectural heritage is a historic and artistic property which has to be protected, preserved, restored and must be shown to the public. Modern tools like 3D laser scanners are more and more used in heritage documentation. These systems allow fast generation of accurate point clouds of historical monuments. Using these data, we are able to create a polygon mesh that defines the shape of the edifice for virtual visualization. Most of the time, the 3D laser scanner is completed by a digital camera which is used to colorize the point cloud. However, the photometric quality of point clouds is generally rather low, mainly due to color and resolution problems. Intensity uniformization methods exist to

improve the colorimetry but they do not permit to obtain a photo-realist rendering nor to improve the resolution. That is why this paper proposes a new solution to colorize point clouds using high resolution digital images acquired with a camera from any viewpoint. Results, on datasets of the cathedral of Amiens, highlight the success of our approach, leading to point clouds with better photometric quality and resolution.

Keywords

Point clouds, colorization, visual and virtual optimisation

1 Introduction

Quoi de plus vrai que la célèbre citation de Confucius "Etudiez le passé si vous souhaitez définir le futur"? Le patrimoine architectural est composé de vestiges considérables de notre passé. Par conséquent, c'est avec précaution que nous devons assurer leur protection. C'est pourquoi la sauvegarde du patrimoine est un axe de recherches important. Le patrimoine culturel comprend des monuments, des bâtiments et des lieux historiques. Ces sites peuvent régulièrement être confrontés à des conditions environnementales difficiles, à des détériorations causées par l'Homme et sont également victimes des années.

C'est dans cet esprit que le projet de recherche e-Cathedr@le¹ a vu le jour. Il a pour objectif de réaliser et d'exploiter une maquette virtuelle fidèle et complète de la cathédrale Notre-Dame d'Amiens. C'est la cathédrale complète la plus haute de France avec une hauteur sous voûte de 42,30 mètres pour un volume intérieur de 200 000 mètres cube.

De récentes avancées technologiques ont permis le développement de méthodes et d'outils, comme les scanners laser 3D, capables de mesurer avec précision la structure spatiale de ces monuments. La capacité de générer rapidement et précisément des nuages de points ont fait de ces scanners laser 3D des outils de plus en plus utilisés en documentation historique. La cathédrale d'Amiens a été partiellement scannée : les trois premières campagnes de numérisation ont permis de relever des milliards de points avec une résolution d'environ 2 mm sur les zones présentant des détails et 5 mm sur les parties moins détaillées

1. www.mis.u-picardie.fr/E-Cathedrale/

(Figure 1). Pour cette étude, nous nous focaliserons sur le portail sud de l'édifice appelé le portail de la Mère-Dieu ou de la Vierge (Figure 2 droite). Pour couvrir le portail sud dans son intégralité, en évitant les occultations, le scanner a été placé à quatre positions géographiques comme le montre la Figure 2 de gauche.



FIGURE 1 – Les nuages de points de la partie sud de la cathédrale d'Amiens assemblés.

2 Travaux connexes

Ces dernières années, l'utilisation des technologies de prélèvement 3D de surfaces sont devenues les principales méthodes pour mesurer avec précision des objets architecturaux ou historiques. Ces objets à mesurer peuvent être petits comme la tombe de Sidamara [CFH⁺07] ou de grande taille comme les palais du désert de Jordanie [AkAsH09] ou encore le Todai-ji au Japon, plus grand édifice du monde [IOT07]. Dans tous les cas, l'objectif est d'obtenir des documentations précises avec un grand niveau de réalisme pour la protection, la conservation, de futures restaurations ou des études archéologiques et artistiques. Plusieurs méthodes d'acquisitions de mesures existent comme les méthodes de photogrammétrie terrestre ou aérienne, par photogrammétrie rapprochée [AWWF12], les scanners laser terrestres [Had11] ou en combinant ces méthodes [AkAsH09] [HKHR12].

Un appareil photo est souvent monté sur le scanner laser afin d'affecter une couleur RVB (rouge, vert, bleu) à chaque point du nuage relevé. Cependant, à cause de la

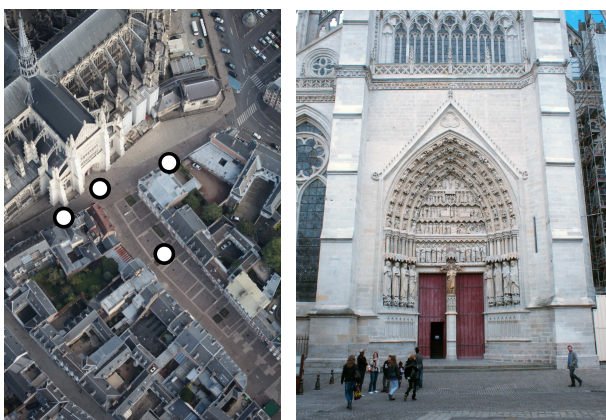


FIGURE 2 – A gauche : Les positions géographiques (points blancs) du scanner laser pour couvrir le portail sud. A droite : Une photographie de haute qualité (4032x3024 pixels) du portail sud de la cathédrale.



FIGURE 3 – Le nuage de points (à droite) issu du recalage des quatre nuages de points bruts obtenus à partir des différentes positions du scanner laser (à gauche).

faible résolution et la faible dynamique d'intensités des appareils photo utilisés, les nuages de points obtenus sont ternis par leur couleur et leur résolution en termes de texture. Malgré la grande précision de mesure des points, nous devons faire face à deux problèmes de colorisation des nuages de points. Le premier problème est dû à la faible résolution de capteur de l'appareil photo utilisé pour la colorisation. Lorsque la résolution du nuage de points prélevés est plus élevée que celle de l'appareil photo, un point 3D ainsi que ses voisins sont colorisés avec la même valeur RVB. Ce phénomène crée un effet de flou sur le nuage de point, qui est alors loin d'être représentatif de l'aspect de l'objet réel. Le second problème vient du fait que nous devons placer le scanner à différentes positions géographiques pour pouvoir couvrir entièrement une scène étendue comme la façade sud de la cathédrale d'Amiens (Figure 2). Nous obtenons un nuage de points pour chaque position du scanner. Malgré la grande vitesse d'acquisition (quelques minutes par station), les nuages de points sont obtenus à différents moments de la journée et donc à différentes heures d'ensoleillement. A cause de cela, deux points côte à côte provenant de deux nuages distincts d'une même zone du monument, peuvent avoir une couleur complètement différente (Figure 3). L'image de droite de la Figure 4 est générée avec le même nuage de points que celui de la Figure 3 mais d'un autre point de vue et en niveaux de gris. Les problèmes de résolution et de couleur du nuage sont clairement visibles lorsque l'on compare l'image de synthèse et l'image réelle (Figure 4) prise à une position similaire. C'est pourquoi, il apparaît intéressant que le scanner laser 3D et l'appareil photo soient utilisés séparément.

En effet, les mesures du scanner peuvent être combinées aux méthodes de photogrammétrie rapprochée ou à des photographies pour améliorer la qualité et la résolution de la texture des nuages de points (par texture de nuage, on entend aspect lié aux couleurs de ses points) avec un photo-réalisme accru. Ces méthodes nécessitent de recalibrer les données collectées par les deux appareils (scanner laser et appareil photo) puisqu'ils n'ont pas de repère commun a priori. Ce recalage peut être effectué en utilisant un appariement de primitives visuelles entre les deux jeux de données. Ces primitives visuelles peuvent être des points, des droites, des régions d'intérêt ou d'autres caractéristiques.

Les points peuvent être sélectionnés manuellement comme dans l’approche de [APS12] où les nuages de points sont utilisés pour générer des ortho-images afin de sélectionner les points identiques dans l’image réelle et dans l’ortho-image virtuelle. La matrice de transformation est calculée en utilisant ces points mis en correspondance afin de recalculer la photographie et le nuage de points 3D. Les points d’intérêt peuvent être détectés et appariés automatiquement en utilisant SIFT, ASIFT ou d’autres extracteurs et descripteurs de points d’intérêts. Dans l’article [AWWF12], les primitives sont détectées avec ASIFT dans la photographie et dans une image constituée avec les nuages de points, leurs intensités et leurs réflectances. Sélectionnées manuellement ou automatiquement, les droites sont plus précises et robustes que les points et sont donc plus appropriées pour ce type de recalage [AN04].

Les dimensions considérables de la cathédrale d’Amiens nous orientent vers les méthodes automatiques d’extraction de primitives. Cependant, ces méthodes ne sont pas efficaces sur nos jeux de données difficiles, ternis par les problèmes de couleurs des points. Par exemple, utiliser ASIFT sur les images gauche et droite de la Figure 4 ne permet pas de mettre en correspondance un seul point d’intérêt entre ces deux images. C’est pourquoi, nous proposons une approche qui n’utilise aucune des primitives mentionnés précédemment mais directement les intensités de l’image complète comme primitive. Cette primitive photométrique dense a l’avantage d’éviter la détection et la mise en correspondance de primitives géométriques et a le potentiel d’atteindre une meilleure précision de recalage qu’en utilisant des primitives géométriques éparses.

La primitive photométrique a été utilisée pour du suivi visuel de plans [BM04]. Dans ces travaux, le suivi de plans est effectué selon un modèle de mouvement 2D : l’homographie. La variation des intensités de l’image est reliée à celle des paramètres de l’homographie pour l’estimation dans un processus d’optimisation. Dans notre cas, nous proposons une méthode qui utilise directement les intensités d’une image pour estimer les six degrés de liberté (translations et rotations) de la pose de la caméra dans un espace virtuel 3D. Pour cela, en s’inspirant de [BM04], nous avons besoin de mettre en relation la variation d’intensités d’une image à la variation de pose de la caméra. Cette problématique fut dans un premier temps abordée pour contrôler les mouvements d’un système robotique en utilisant une caméra, c’est ce que l’on appelle l’asservissement visuel photométrique [CM11]. Depuis plus de vingt ans, l’asservissement visuel décline le contrôle de robot à l’aide de primitives visuelles variées (points, droites, moments, etc) [CH06]. Il a été également étendu à l’asservissement visuel virtuel (AVV) [MC02] dans le but de calculer la pose d’une caméra à partir de mesures réalisées dans les images, par une optimisation non-linéaire, et en exploitant les connaissances de l’asservissement visuel. Notre approche étend l’asservissement visuel photométrique [CM11] à l’AVV en y exploitant la primitive photométrique.

La suite du papier présente l’approche que l’on propose, en commençant par exposer le procédé d’optimisation de position de caméra virtuelle et ensuite, la colorisation des

nuages de points. Finalement, des résultats expérimentaux sont présentés avant de conclure.

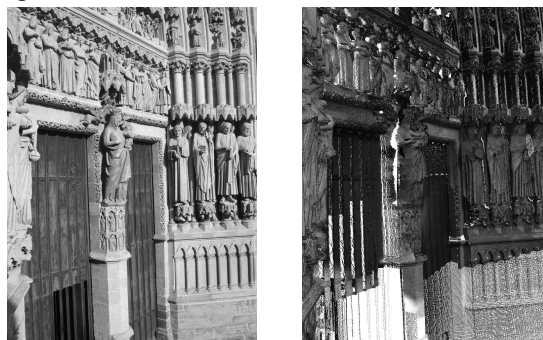


FIGURE 4 – A gauche : une photographie prise à partir d’une position que l’on aimerait atteindre virtuellement.

A droite : Une image de synthèse générée avec le nuage de points terni par ses couleurs. La position de la caméra virtuelle est proche de la position réelle.

3 Approche proposée

3.1 Pré-traitements des nuages de points

Nous considérons un nuage de points, constitué de plusieurs mesures, obtenu par des acquisitions réalisées à des emplacements géographiques distincts (Figure 2) et à différents moments de la journée. Le résultat de leur combinaison est terni par un certain nombre de problèmes de couleur (Figure 3) : certaines zones sont trop lumineuses et certaines sont dans l’ombre. S’ajoute à ces différences de couleur entre les nuages qui se chevauchent, l’effet de flou de la texture des nuages de points. Ce problème de résolution tient son origine dans la distance trop importante entre le bâtiment et l’appareil photo combiné au scanner laser qui a été utilisé pour coloriser les points. Même si différents procédés de combinaisons de couleurs existent pour homogénéiser les couleurs des nuages de points, nous voulons être capable de coloriser les nuages de points à partir de mesures, et presque sans aucun traitement d’image.

Nous considérons ces différents problèmes liés à la couleur des points des nuages comme étant un problème d’acquisition. C’est pourquoi nous proposons une nouvelle méthode pour coloriser les nuages de points en amont plutôt que de traiter un maillage généré à partir de ces nuages. De plus, un maillage serait obtenu par approximation des nuages de points introduisant ainsi des biais. Notre processus de colorisation peut être subdivisé en plusieurs étapes (Figure 5).

Nous procédons d’abord au filtrage des nuages de points en effectuant une analyse statistique sur le voisinage de chaque point [RMB⁺08]. En supposant une distribution gaussienne, tous les points dont la distance moyenne sont en dehors d’un intervalle défini par les distances moyennes et leur écart-type, peuvent être considérés comme des valeurs aberrantes et supprimés.

Les nuages de points sont acquis à différentes positions géographiques. De ce fait, les nuages ont leur propre système de coordonnées. Cependant, les positions du scanner sont choisies de manière à ce que les nuages de points relevés se chevauchent suffisamment pour être re-

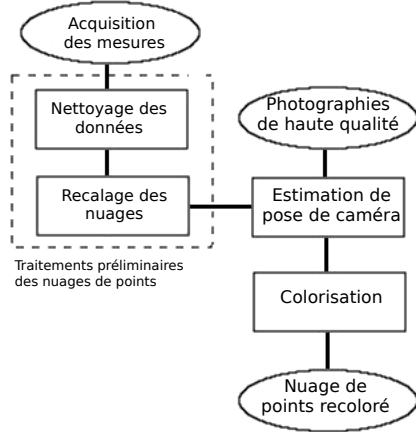


FIGURE 5 – Le processus de colorisation des nuages de points.

calés. Pour cela, nous utilisons l’algorithme Iterative Closest Point (ICP) [BM92] qui identifie et associe des points de correspondances entre les ensembles de données pour calculer les transformations (translations, rotations) nécessaires afin de minimiser itérativement la distance (erreur d’alignement) entre les deux nuages de points.

3.2 Estimation de pose

En entrée, nous utilisons des photographies de haute qualité sur lesquelles nous cherchons à recaler le nuage de points résultant des traitements préliminaires. Les photographies numériques de haute définition sont obtenues avec un Olympus PEN E-P3 équipé d’une lentille numérique Olympus M.Zuiko, offrant des images de 4032x3024 pixels avec une focale de 17 mm. Par exemple, la photographie de la Figure 2 a été utilisée pour coloriser avec une qualité photo-réaliste les nuages de points nettoyés et recalés. L’appareil est calibré, nous connaissons donc ses paramètres intrinsèques.

La tâche principale de l’approche proposée consiste à estimer avec précision la position de l’appareil photo à l’origine des photographies. Nous essayons d’atteindre ces positions en observant un nuage de points 3D avec une caméra virtuelle. Cette estimation de pose consiste à trouver la matrice de transformation cM_o qui définit le changement de repère entre l’objet virtuel et le repère de la caméra :

$${}^cM_o = \begin{pmatrix} {}^cR_o & {}^c t_o \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

L’estimation de pose peut être faite en utilisant des points, des lignes, ou d’autres primitives géométriques détectées dans l’image. Dans notre cas, nous n’utilisons pas ces primitives, mais toutes les intensités de l’image. Les images numériques et celles de synthèse générées avec le nuage de points 3D sont utilisées en niveaux de gris (Figure 4). Nous exprimons ce problème d’estimation de pose comme un problème d’optimisation dans le cadre d’un asservissement visuel virtuel. Cependant, contrairement à l’asservissement visuel photométrique [CM11], notre méthode ne cherche pas à minimiser la différence entre

deux images réelles provenant d’un même capteur de vision. Notre procédé minimise la différence entre une image réelle et l’image d’une scène 3D acquise par une caméra virtuelle ayant les mêmes paramètres intrinsèques que l’appareil à l’origine de l’image réelle. Pour cela, le critère à minimiser est :

$$e = \|I(r) - I^*\| \quad (2)$$

Où $r = (t_x, t_y, t_z, \theta_{u_x}, \theta_{u_y}, \theta_{u_z})$ est la pose actuelle de la caméra virtuelle (3 éléments de translation et 3 de rotations), I est le vecteur contenant les intensités de l’image virtuelle et I^* est le vecteur de l’image réelle que l’optimisation cherche à atteindre.

La loi de commande du mouvement de la caméra virtuelle est obtenue grâce à l’algorithme de Levenberg-Marquardt qui estime l’incrément de pose suivant :

$$\dot{r} = -\lambda(H + \mu \text{diag}(H))^{-1} L_I^T (I(r) - I^*) \quad (3)$$

avec $H = L_I^T L_I$, avec L_I , la matrice d’interaction liée à la luminance de l’image I . Cette matrice d’interaction relie les variations de l’image aux variations de la pose de la caméra (voir [CM11] pour plus de détails). Ensuite, la pose cM_o est itérativement mise à jour grâce à l’incrément de la pose \dot{r} en utilisant l’application exponentielle du groupe spécial euclidien SE(3).

Pour vérifier la capacité à comparer une image réelle et une image virtuelle en utilisant le critère d’erreur mentionné précédemment, nous étudions la somme des différences au carré (SSD) entre les deux images en faisant évoluer uniquement deux degrés de liberté de la caméra virtuelle. Les mouvements de caméra sont exécutés le long des axes x et y . Nous utilisons l’image de haute qualité (Figure 2) et une caméra virtuelle avec les paramètres intrinsèques de l’appareil à l’origine de l’image réelle. Ceci nous permet de tracer un exemple de fonction de coût dont la forme convexe et le minimum clairement identifiable nous indiquent la possibilité de trouver une pose de caméra virtuelle menant à une image de synthèse proche d’une image réelle (Figure 6). Une première pose de caméra virtuelle est nécessaire pour initialiser l’optimisation de l’estimation de pose. Actuellement, cette première pose approximative cM_o est obtenue en déplaçant la caméra virtuelle manuellement dans la scène 3D. Nous avons es-

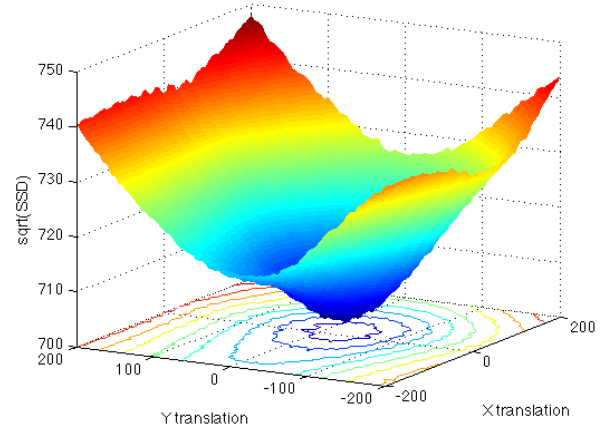


FIGURE 6 – Tracé de la fonction de coût pour deux degrés de liberté (t_x, t_y en mm).

sayé une mise en correspondance éparse en utilisant ASIFT entre l'image numérique et celle de synthèse (Figure 4) pour réaliser automatiquement cette initialisation, mais aucun des points d'intérêts détectés n'a pu être mis en correspondance. A partir de cette première pose, nous pouvons effectuer l'optimisation jusqu'à ce que la pose de la caméra virtuelle converge vers la pose de l'appareil à l'origine de l'image de haute qualité.

La caméra virtuelle peut avoir quelques difficultés pour converger en raison des différents problèmes liés à l'éclairage et aux ombres des nuages de points fusionnés (Figure 3). Pour faire face à ces problèmes, deux solutions sont avancées. La première est de centrer et normaliser les intensités des deux images à chaque itération. L'erreur à minimiser est calculée sur ces intensités. C'est pourquoi la forme de la fonction de coût est très lisse, convexe et présente un minimum clairement identifiable. La seconde solution est de rendre l'optimisation encore plus robuste à l'aide d'un M-estimateur [CMC03] qui est basé sur des statistiques robustes [Hub81]. Pour l'image du portail sud, la caméra virtuelle s'est positionnée en calculant itérativement ses 6 degrés de liberté (Figure 7) jusqu'à atteindre un état stable après 17 itérations. La Figure 8 nous montre la

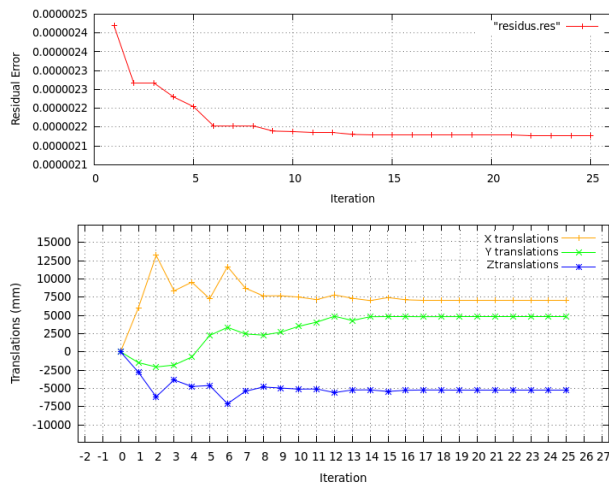


FIGURE 7 – L'évolution de l'erreur résiduelle pondérée moyenne et des trois translations de la caméra virtuelle en fonction des itérations de l'optimisation de pose.

différence entre l'image HD à atteindre et celle virtuelle à la première et à la dernière itération de l'optimisation de pose. La distance entre la position de la caméra virtuelle initiale et la position optimale est de 674mm.

3.3 Colorisation

Après l'estimation de la pose permettant de recalculer le nuage de points 3D sur l'image 2D de haute qualité, nous sommes en mesure de procéder à la colorisation du nuage de points.

L'estimation de pose permet de transformer chaque point 3D du nuage dans le repère de l'image HD. Les données du nuage de points 3D sont initialement exprimées dans le repère monde. Nous utilisons la cM_o estimée par l'optimisation de la pose de la caméra virtuelle afin d'exprimer le nuage de points dans le repère caméra. Puis les points 3D sont projetés dans l'image en coordonnées

réelles. Nous utilisons une interpolation bilinéaire pour définir une couleur pour chaque point 3D. Cette valeur est calculée à partir de la moyenne pondérée des valeurs RVB des quatre pixels voisins dans l'image HD.

Dans la plupart des cas, la colorisation ou la texturisation est réalisée lorsque le nuage de points est maillé, sur le modèle 3D représentant les surfaces du nuage. Notre approche consiste à coloriser directement les nuages de points originaux. De ce fait, nous ne pouvons nous attendre à de bons résultats de colorisation sans prendre en considération la gestion des occultations du nuage. En effet, certains points provenant de certaines parties de la scène qui sont invisibles d'une position de caméra peuvent être considérés comme visibles et colorisés. Ce phénomène peut se produire dans deux situations : lorsque deux (ou plusieurs) points de différentes profondeurs sont sur la même ligne de vue et sont donc projetés dans un même pixel ou lorsque tous les points, projetés dans un pixel, proviennent de parties invisibles de la scène. Dans les deux cas, des points sont colorisés avec une couleur RVB qui, en réalité, n'est pas censée leur être attribuée.

Pour résoudre ces problèmes, nous utilisons un maillage 3D du nuage de points dont les surfaces sont estimées avec l'algorithme de reconstruction de surface de Poisson [KBH06]. La reconstruction de surface de Poisson possède la particularité de remplir les trous lorsque certaines mesures sont manquantes dans le nuage de points. Le modèle surfacique ainsi obtenu permet de générer une carte de profondeur qui, à l'inverse du nuage de points, contient les différentes occultations de la scène. Ainsi, nous pouvons

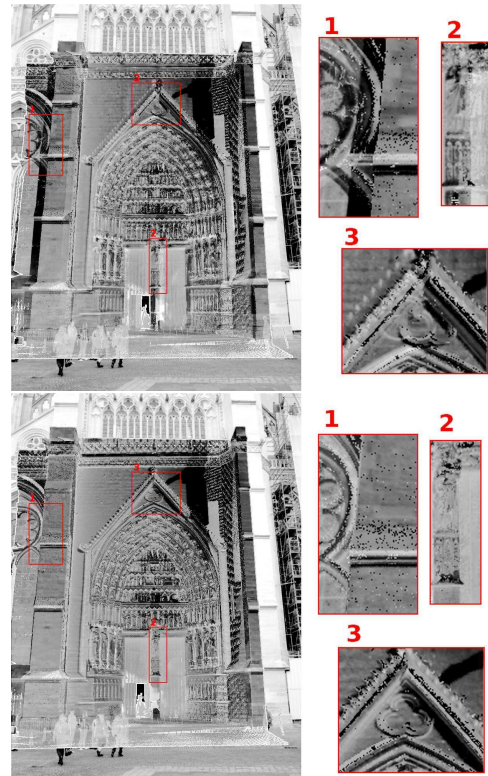


FIGURE 8 – Les images de différence entre la photographie HD et les images virtuelles avant (en haut) et après (en bas) l'estimation de la pose.

comparer la profondeur des points 3D du nuage à coloriser et celle du maillage pour ne coloriser que les points visibles du nuage à partir de la pose estimée.

4 Résultats

Nous utilisons notre approche pour coloriser le nuage de points du portail sud de la cathédrale d'Amiens (Figure 3). Nous obtenons un nuage de points qui semble parfaitement recoloré (Figure 9).

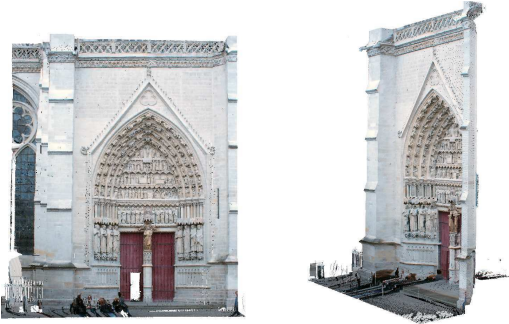


FIGURE 9 – Le nuage de points du portail sud après sa colorisation en utilisant une photographie HD.

Les couleurs sont beaucoup plus uniformes mais si on regarde de plus près le nuage (Figure 10), nous pouvons constater que nous avons besoin de plusieurs photographies HD pour couvrir entièrement le portail. Nous pouvons également remarquer le manque de précision de la texture de la statue de la Vierge Marie du fait d'un point de vue mal choisi pour prendre la photo HD réelle. Pour améliorer la visibilité des détails nous devons prendre des photos à partir de positions plus proches de la statue. Nous avons utilisé notre méthode complète pour coloriser entièrement une plus petite partie du portail sud : la statue de la Vierge Marie. Pour parvenir à un résultat optimal, l'idéal serait que chaque point 3D visible à partir de la pose de la caméra soit projeté dans un pixel différent de la photographie. Connaissant les caractéristiques intrinsèques de l'appareil photo et la résolution du nuage de points, nous avons calculé la distance nécessaire entre la statue et l'appareil photo pour s'assurer qu'un pixel de la photographie ne reçoive qu'un unique point 3D projeté. Cette distance a été estimée à quatre mètres nécessaires entre la statue et notre appareil photo en considérant une scène plane fronto-parallèle à la caméra.

Nous avons donc pris trois photographies autour de la statue à environ quatre mètres de distance pour une couverture maximale (Figure 11).

Les trois poses de l'appareil photo à l'origine de ces photographies ont été calculées à l'aide de l'optimisation de pose et nous avons utilisé le processus complet de colorisation décrit ci-dessus. Pour le moment, la colorisation des points du nuage est effectuée une photo à la fois. Les points sont projetés dans la première photo, les points couverts par cette photo sont colorisés, les autres sont marqués comme non-coloré. Les points sont ensuite projetés dans une seconde image et les points marqués comme étant non-coloré et couvert par cette photo sont cette fois colorisés. L'opéra-

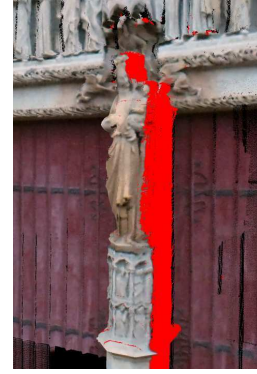


FIGURE 10 – Zoom sur la statue de la Vierge du portail sud recoloré. Les points colorés en rouge sont invisibles à partir de la pose à l'origine de la photographie.

tion est répétée sur l'ensemble des images ou jusqu'à ce que la totalité des points du nuage soit colorée. Une comparaison entre le nuage de points de la Vierge Marie avant et après notre colorisation est visible en Figure 12.

Nous avons pris une autre photographie de la statue à partir d'un angle de vue différent pour une validation visuelle. Cette dernière image n'a pas été utilisée pour la colorisation du nuage de points. La Figure 13 montre le nuage de la Vierge Marie depuis la même pose de caméra que la nouvelle photographie, avant et après le processus de colorisation. Cette comparaison met en évidence les améliorations indéniables apportées par la colorisation. Les deux images centrées sur le visage de la Vierge (Figure 13) montrent que la résolution de la texture du nuage de points est très précise après sa colorisation. La nouvelle photographie et les trois photographies utilisées pour la colorisation ont été prises avec cinq mois d'intervalle (différentes saisons). C'est ce qui explique les différences de colorimétrie entre la nouvelle photographie et le nuage de points recoloré avec les trois premières photographies.

Le scanner laser 3D utilisé possède son propre visualiseur de nuage de points appelé Cyclone. Afin d'améliorer l'affichage des nuages de points, Cyclone utilise des traitements sur les couleurs pour homogénéiser l'aspect des nuages de points (Figure 14). Cependant, même si les détails sont légèrement accentués, ces traitements ne permettent pas d'obtenir une meilleure résolution de texture des nuages de points.

Pour évaluer quantitativement la colorisation du nuage de



FIGURE 11 – Les photographies (4032x3024 pixels) de la Vierge Marie utilisées pour la colorisation de la statue.

points de la Vierge Marie, nous calculons la somme des différences au carré (SSD) ainsi que la corrélation croisée normalisée centrée (ZNCC) entre la photographie et les deux images de synthèse (Figure 13).

La SSD diminue d'environ 22%. Les résultats des ZNCCs nous montrent une corrélation améliorée de 20%. La ZNCC entre la photographie et les images de synthèse avant et après la colorisation sont respectivement 0,53 et 0,74. Ces résultats démontrent explicitement que la colorisation a permis de rendre l'aspect du nuage de point de la Vierge Marie plus proche de la réalité terrain en termes de couleurs et de résolution.

5 Conclusion et perspectives

Nous avons proposé une méthode alternative pour le recalage automatique entre nuages de points et photographies. Les méthodes manuelles existantes, utilisées pour sélectionner et pour mettre en correspondance des primitives géométriques de ces deux ensembles de données, peuvent amener à de bons résultats. Cependant, ces méthodes peuvent s'avérer très fastidieuses lorsque l'on doit gérer une quantité importante de données. Les méthodes automatiques de primitives géométriques quant à elle, peuvent s'avérer être délicates car elles imposent d'avoir des similitudes certaines entre les photographies et les images virtuelles générées à partir des nuages 3D.

Dans notre approche, plutôt que d'utiliser des primitives géométriques des images, nous utilisons les intensités de l'image complète, ce qui rend le recalage plus robuste et précis. Il serait intéressant, par la suite, d'utiliser les informations RGB de l'image plutôt que la luminance unique-



FIGURE 12 – Le nuage de points de la statue de la Vierge Marie avant (au-dessus) et après (en-dessous) la colorisation.



(a) (b) (c)
FIGURE 13 – De gauche à droite : vue en contre-plongée de la statue de la Vierge en photographie (a) et en image virtuelle avant (b) et après (c) la colorisation.



FIGURE 14 – Image du nuage de points de la Vierge Marie générée par Cyclone, le logiciel fourni par Leica.

ment. Nous souhaitons également expérimenter notre approche en utilisant d'autres caractéristiques telles que les normales ou la réflexion optique en chaque points du nuage. Nous allons également étudier d'autres fonctions de coût. Cette étude visera à déterminer la fonction objectif la mieux adaptée à la situation avec un rapport robustesse/volume de convergence le plus favorable possible. L'optimisation virtuelle visuelle d'une position de caméra 3D permet d'obtenir un recalage précis automatiquement. Les résultats présentés montrent que notre procédé permet d'obtenir des nuages de points avec une texture de qualité réaliste en termes de couleur et de résolution. Les travaux futurs seront axés sur la recherche des poses optimales pour prendre les photographies nécessaires à la colorisation d'un nuage de points quelconque.

Références

[AkAsH09] S. AL-KHEDER, Y. AL-SHAWABKEH et N. HAALA : Developing a documentation system for desert palaces in Jordan using

- 3D laser scanning and digital photogrammetry. *Journal of Archaeological Science*, 36(2): 537–546, février 2009.
- [AN04] Y. ALSHAWABKEH et Haala N. : Integration of digital photogrammetry and laser scanning for heritage documentation. *IAPRS*, pages 12–23, 2004.
- [APS12] A. ADAN, Merchan P. et S. SALAMANCA : Creating Realistic 3D Models From Scanners by Decoupling Geometry and Texture. *Pattern Recognition (ICPR), 2012 21st International Conference on*, pages 457–460, 2012.
- [AWWF12] M. ABDEL-WAHAB, K. WENZEL et D. FRITSCH : Efficient reconstruction of large unordered image datasets for high accuracy photogrammetric applications. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, I-3:1–6, 2012.
- [BM92] P. J. BESL et N. D. MCKAY : A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 14(2):239–256, février 1992.
- [BM04] S. BENHIMANE et E. MALIS : Real-time image-based tracking of planes using efficient second-order minimization. *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS IEEE Cat No04CH37566*, pages 943–948, 2004.
- [CFH⁺07] Altuntas C., Yildiz F., Karabork H., Yakar M. et Karasaka L. : Surveying and documentation of detailed historical heritage by laser scanning. *XXI International CIPA Symposium*, pages 01–06, 2007.
- [CH06] F. CHAUMETTE et S. HUTCHINSON : Visual servo control part 1 : Basic approaches. *IEEE Robotics and Automation Mag*, 13:82–90, 2006.
- [CM11] C. COLLEWET et E. MARCHAND : Photometric Visual Servoing. *IEEE Transactions on Robotics*, 27(4):828–834, août 2011.
- [CMC03] A. COMPORT, E. MARCHAND et F. CHAUMETTE : A real-time tracker for markerless augmented reality. *In ACM/IEEE Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, ISMAR'03*, pages 36–45, Tokyo, Japon, 2003.
- [Had11] N. A. HADDAD : From ground surveying to 3D laser scanner : A review of techniques used for spatial documentation of historic sites. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 23(2):109–118, juin 2011.
- [HKHR12] P. HENRY, M. KRAININ, E. HERBST et X. REN : Rgb-d mapping : Using kinect-style depth cameras for dense 3d modeling of indoor environments. *The International Journal of Robotics Research*, 31(5):647–663, 2012.
- [Hub81] Peter J. HUBER : *Robust Statistics*. John Wiley and Sons, 1981.
- [IOT07] Katsushi IKEUCHI, Takeshi OISHI et TAKAMATSU : The great buddha project : Digitally archiving, restoring, and analyzing cultural heritage objects. *Int. J. Comput. Vision*, 75(1):189–208, octobre 2007.
- [KBH06] M. KAZHDAN, M. BOLITHO et H. HOPPE : Poisson surface reconstruction. *In Eurographics symposium on Geometry processing*, pages 61–70, Aire-la-Ville, Suisse, 2006.
- [MC02] E. MARCHAND et F. CHAUMETTE : Virtual visual servoing : A framework for real-time augmented reality. *In Eurographics 2002 Conference Proceeding*, volume 21(3), pages 289–298, 2002.
- [RMB⁺08] R. B. RUSU, Z. C. MARTON, N. BLODOW, M. DOLHA et M. BEETZ : Towards 3d point cloud based object maps for household environments. *Robot. Auton. Syst.*, 56(11):927–941, novembre 2008.