

Extraction des éléments de façade de bâtiments du patrimoine architectural à partir de données issues de scanner laser terrestre

Kenza k Aitelkadi¹, Elisabeth E Simonetto², Hakim H Boulaassal³, Driss D Tahiri¹, Imane I Sebari¹

¹: IAV Hassan II, Rabat, Maroc

k.aitelkadi@iav.ac.ma; d.tahiri@iav.ac.ma; i.sebari@iav.ac.ma

²: GeF/L2G, Le Mans, France

elisabeth.simonetto@esgt.cnam.fr

³: FST, Tanger, Maroc

hakim.boulaassal@gmail.com

Résumé

Le relevé par Scanner Laser Terrestre (SLT) et le traitement de ces données, ou lasergrammétrie, est en pleine évolution depuis plusieurs années. Les domaines de l'architecture et de la sauvegarde du patrimoine culturel bénéficient de plus en plus des produits dérivés de cette technologie. L'apparition de la lasergrammétrie a permis l'inventaire, l'archivage et la modélisation tridimensionnelle des édifices et des sites. Toutefois, le processus de traitement des données brutes et de production des produits dérivés est long et parfois difficile. Des travaux de recherche ont alors permis d'automatiser certaines étapes de traitement. Dans le cadre de l'analyse de façades de bâtiments historiques, les approches de traitement automatique développées pour l'identification des plans et des détails, dont la phase de segmentation, sont généralement géométriques. Ces approches présentent cependant des limites dans l'identification des éléments de façades appartenant au même plan. Dans ce contexte, nous proposons un nouveau processus automatique de segmentation d'un nuage de points. Ce processus intègre l'ensemble des composantes du nuage de points à savoir les composantes géométriques et radiométriques - couleur et intensité laser. Nous présentons ensuite une nouvelle méthode de filtrage des résultats de segmentation basée sur la triangulation de Delaunay. L'étape finale consiste à détecter les contours des éléments segmentés en vue de l'établissement d'un modèle vectoriel. Cette méthode est testée sur des façades des anciennes Médinas au Maroc dont celle de la Médina de Casablanca. Nos résultats montrent l'importance d'intégrer toutes les composantes du nuage de points pour l'établissement du modèle vectoriel.

Mots-clés : sauvegarde du patrimoine, modélisation 3D, scanner laser terrestre, segmentation, vectorisation.

Abstract

The lasergrammetry or surveying by Terrestrial Laser Scanner (TLS) is an evolving technology in several fields. The architecture and cultural heritage renovation take benefit of this technology. The advent of laser scanning allows the archiving and three-dimensional modeling. However, the processing and extraction of 3D products, which are often manual, is long and sometimes difficult. Also, the automatic approaches developed to identify plans and details including the segmentation phase, are generally geometric. These approaches have limitations when details are located in the same facade plane. In this context, we propose a new automatic segmentation process of the point cloud. This process integrates all the components of the cloud of points that is the geometric and radiometric components: color and laser intensity. We also present a new method for filtering the results of segmentation through the Delaunay triangulation. The final step is to detect the edges of the details of facades and the vector model. This process is tested on the facades of Moroccan old Medinas, such as Casablanca Medina. The evaluation of the final product shows the importance of integrating all components of cloud points for the establishment of a vector model.

Keywords: heritage preservation, 3D model, terrestrial laser scanner, segmentation, vectorization.

1. Introduction

La Médina, type d'urbanisme inventé au Moyen Age, est un mot arabe qui nommait une ville. Elle est actuellement limitée à la notion de « quartier traditionnel, patrimonial ou historique » (Cattedra, 2003). La plupart des anciennes Médinas sont placées sous la protection de l'UNESCO. Pour préserver ce patrimoine présent dans plusieurs pays d'Afrique du Nord, les ministères de la culture se

retrouvent devant un dé de levé et de stockage d'une grande quantité de données 3D des bâtiments restants au sein de ces sites. L'avènement du relevé par scanner laser terrestre (SLT) et les moyens informatiques toujours plus performants ont résolu cette di culté. Néanmoins, la grande quantité de données acquises, entrave leur traitement rapide et leur intégration directe dans des outils de communication tels que les SIG (Système d'information géographique). Aussi, lorsque l'extraction des produits dérivés tels que les

modèles vectoriels, est effectuée semi-automatiquement ou manuellement, le traitement exige beaucoup de temps, une main-d'œuvre qualifiée et ne donne pas toujours des résultats satisfaisants. D'où la nécessité de développer des approches automatiques d'extraction des éléments de façades et d'établissement des modèles vectoriels. On appelle ici modèle vectoriel, un modèle qui représente une façade et ses éléments qui la composent – fenêtres, volets, portes, balcons... – sous forme de segments de droite et arc. L'extraction automatique des éléments à partir d'un nuage de points 3D inclut plusieurs étapes de traitement. Elle commence par les opérations de segmentation et de filtrage puis se poursuit par la détection des contours. Le modèle vectoriel est obtenu par vectorisation de ses contours. Les deux premières étapes influencent considérablement les résultats.

La segmentation signifie généralement la partition de données en régions caractéristiques selon certains critères d'homogénéité. Concernant les nuages de points 3D, des approches de segmentation sont fondées sur des critères géométriques, utilisant soit des contraintes d'orthogonalité et de coplanarité, soit une reconnaissance de formes paramétriques. Lorsque nous examinons une façade de bâtiment, on confirme l'apport des considérations géométriques dans l'identification de plans distincts. Toutefois, lorsqu'une configuration architecturale présente plusieurs éléments dans un même plan tel que les volets de fenêtres ou les portes, l'information géométrique n'est plus suffisante pour séparer les différentes parties du nuage de points. Cette configuration caractérise la majorité des anciens bâtiments des Médinas. La figure 1 montre un exemple de l'architecture fréquemment observée sur les bâtiments de la Médina de Casablanca. Sur cette figure, le cadre rouge montre un exemple où le seul critère géométrique sera insuffisant pour distinguer les volets de fenêtres du mur, car ils sont situés dans le même plan.

C'est pourquoi nous proposons une nouvelle approche de segmentation qui tient compte des caractéristiques architecturales des bâtiments des anciennes Médinas. Le processus de segmentation repose sur l'exploitation des données du nuage de points tout en évitant toute transformation en image. Aussi, la nouveauté du processus réside dans l'exploitation de l'ensemble des composantes du nuage de points brut à savoir les coordonnées géométriques, les composantes couleurs et

l'intensité laser. Ensuite, nous proposons une méthode de filtrage du résultat de segmentation avant d'identifier les contours des différents éléments de la façade et de construire le modèle vectoriel.



Figure 1 : Façade d'un bâtiment, ayant servi de résidence au Général Lyautey durant la période du protectorat français au Maroc, dans la Médina de Casablanca. Le cadre rouge montre un échantillon de surface où deux éléments se situent dans le même plan (mur et volets de fenêtres).

2. Contexte méthodologique

2.1. Méthodes de segmentation

La littérature fait état de plusieurs approches de segmentation et de détection de contours permettant de générer les modèles de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) en 3D de bâtiments.

En ce qui concerne le processus de segmentation, deux catégories de méthodes peuvent être distinguées. La première est fondée sur le regroupement des points en segments en fonction de certains critères d'homogénéité. La seconde définit les meilleures primitives ajustant un nuage de points. En ce qui concerne la première catégorie, on note l'influence majeure du bruit et de la densité des points sur les résultats. Par exemple, l'algorithme de croissance de région est sensible à la présence de bruit dans la phase d'identification de la surface germe et la phase de croissance (Pu and Vosselman, 2006 ; 2009). Les algorithmes de regroupement nécessitent un temps de calcul important pour les données multidimensionnelles (3D) et sont également sensibles au bruit entachant les données (Filin, 2002). La segmentation par la technique de plans (Mapurisa and Sithole, 2012) présente également certaines limites, notamment elle ne convient pas à des données non structurées, c'est-à-dire caractérisées par des densités de points variables.

La deuxième catégorie de méthodes permet de segmenter la donnée malgré la présence d'une forte

proportion de bruit. Cependant, elle présente d'autres limites. Dans la littérature, deux algorithmes de reconnaissance de forme sont souvent utilisés dans le traitement des nuages de points : la transformée de Hough et l'algorithme RANSAC (*Random Sample Consensus*). L'inconvénient de la transformée de Hough est son temps d'exécution notamment pour traiter une grande quantité de points (Borrmann et al., 2011). La technique RANSAC est moins efficace lorsque les points appartenant à deux plans adjacents sont associés trop tôt à l'un des plans premièrement défini (Boulaassal et al., 2009 ; Boulaassal, 2010). En outre, sur un bâtiment, les détails ne peuvent pas toujours être modélisés en se basant uniquement sur l'aspect géométrique. D'ailleurs, si certaines entités peuvent être caractérisées par des propriétés géométriques, d'autres sont facilement identifiables par leur caractéristique colorimétrique (Barnea et Filin, 2013). Les approches de segmentation hybrides, basées sur les composantes géométriques et radiométriques, sont actuellement peu développées. Selon (Pu and Vosselman, 2009) et (Strom et al., 2010), elles exigent un choix minutieux de l'espace de représentation colorimétrique et un traitement préalable faisant appel à des techniques de filtrage comme le filtrage médian (Koschan and Abidi, 2001).

Dans le cadre de ce travail, une nouvelle approche est adoptée pour la segmentation automatique des bâtiments des anciennes Médinas du Maroc. Cette approche repose sur une combinaison géométrie-radiométrie palliant les limites de l'aspect géométrique seul à travers l'information couleur. Par ailleurs, l'utilisation de l'intensité laser permet de s'affranchir du choix d'un système de représentation colorimétrique particulier et d'un prétraitement. Certaines des régions obtenues ne sont pas pertinentes pour la suite des traitements et faussent les résultats de la détection de contours et de la modélisation. Nous les considérons comme du bruit dans le résultat de segmentation. Pour réduire ces composantes, certains auteurs projettent les segments sur une image. Cette transformation leur permet d'utiliser des filtres de traitement d'image pour séparer le bruit des régions bien détectées (Boulaassal, 2010). Dans le but de conserver la nature de la donnée et ses caractéristiques, nous avons développé un algorithme pour supprimer directement ces composantes du nuage des points en se basant sur la triangulation de Delaunay.

2.2. Méthodes de détection de contour

L'établissement du modèle vectoriel débute par la détection des contours des éléments segmentés. Il existe plusieurs techniques pour cela : géométriques, statistiques et topologiques (Wang et Gao, 2006). Dans ce travail, nous avons considéré les solutions qui combinent la géométrie et la topologie (Pedro, 2002). La plupart des algorithmes d'extraction des lignes caractéristiques s'appuient sur un maillage triangulé en guise d'entrée. Ils considèrent le problème d'extraction comme une généralisation de l'enveloppe convexe d'un ensemble de points plans (Jarvis, 1977 ; Stylianou and Farin, 2003). Dans (Boissonnat, 1984), les auteurs recommandent l'utilisation de la triangulation de Delaunay. Parmi les algorithmes basés sur la triangulation de Delaunay, on trouve la famille des alpha-formes (Edelsbrunner and Mücke, 1994). Dans (Demir and Baltsavias, 2012) et (Xiao et al., 2014), les formes des toits issues des données LIDAR aéroportées sont ainsi vectorisées à l'aide des alpha-formes. Une alpha-forme est un n -simplexe qui permet de définir la forme d'un ensemble de points sous forme de points, de contours et de triangles. La complexité de la forme, pouvant laisser apparaître des discontinuités et des cavités, dépend du choix du paramètre alpha. Ce paramètre correspond au rayon d'une sphère mobile dont l'intersection avec le nuage des points se limite aux points de la forme. L'algorithme de construction des alpha-formes est ici employé pour la détection des contours des éléments de façade.

Le modèle vectoriel de façade est ensuite reconstruit à partir de l'analyse des intersections des contours extraits dans chaque plan.

Dans la partie 3, nous détaillons notre méthodologie. Les résultats et une discussion sont présentés respectivement dans les parties 4 et 5.

3. Méthodologie

Notre méthodologie comporte cinq étapes principales : segmentation géométrique, segmentation radiométrique, filtrage, détection des contours et leurs ajustements. La figure suivante présente l'organigramme de la méthodologie proposée (Figure 2).

3.1. Segmentation

L'approche de segmentation proposée repose sur plusieurs hypothèses :

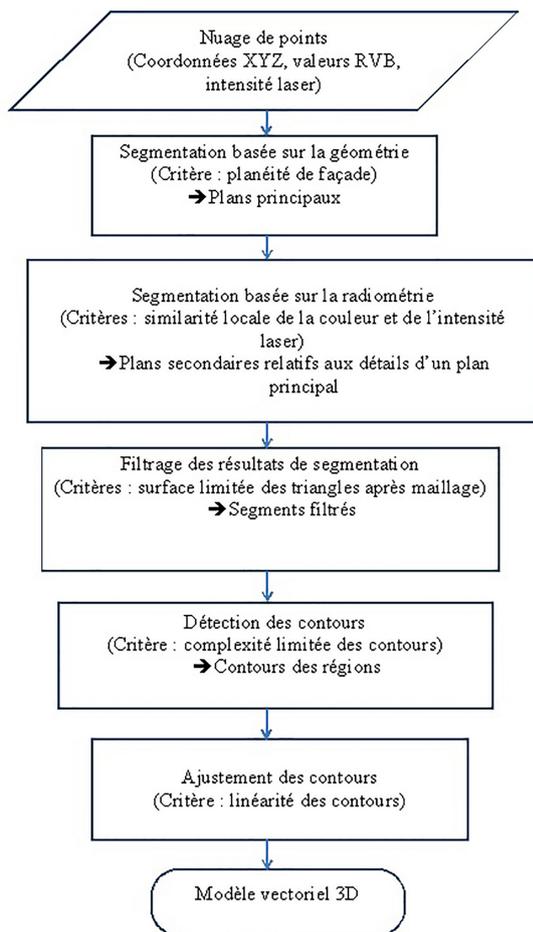


Figure 2 : Organigramme de la méthodologie proposée.

- Le nuage de points saisis par SLT est non structuré, bruité et de densité variable ;
- La majorité des points se situent sur la façade ;
- Le premier plan principal identifié est le plan de la façade qui englobe le plus grand nombre de points du nuage. Les autres plans principaux sont sécants ou parallèles au premier plan identifié. Pour chaque plan principal, on détecte des plans secondaires (volets, cadre, fenêtre, etc.) à travers l'exploitation des données radiométriques.

Notons $PTS = \{P_1, P_2 \dots P_m\}$ l'ensemble des points issus du relevé par SLT d'un bâtiment. La première étape de segmentation est basée sur des critères géométriques menant à un ensemble de plans principaux, $\Sigma SP_i = \{SP_1, SP_2, \dots, SP_n\}$. La deuxième étape consiste à traiter chaque plan de l'ensemble ΣSP_i en adoptant des critères basés sur la similarité des couleurs. Pour éviter les erreurs de segmentation dues aux variations d'éclaircement, un

critère de similarité de l'intensité laser est utilisé. On obtient à la fin du processus des ensembles de plans secondaires homogènes en termes de coplanarité et de radiométrie : $\Sigma \Sigma SP_{ij} = \{SP_{i1}, SP_{i2}, \dots, SP_{ik}\}$ (Aitelkadi et al., 2013).

3.1.1. Processus géométrique

L'approche géométrique repose sur la reconnaissance des formes géométriques à partir d'un ensemble de points en présence de bruit de mesures et de points aberrants. L'algorithme RANSAC (Fischler and Bolles, 1981) est l'un des algorithmes qui répond le mieux à notre besoin. Ici, s'inspirant de (Boulaassal, 2010), il est utilisé au cours de deux étapes à savoir :

- ✓ Distinguer le plan de la façade contenant un nombre maximal de points par rapport aux autres éléments de la scène (arbre, fontaine, etc.).
- ✓ Extraire les autres plans principaux de la façade.

Le résultat de l'algorithme dépend tout particulièrement du choix de la distance maximale d'un point au modèle pour être considéré comme *inlier* ou *outlier* (Aitelkadi et al., 2013). Nous notons ce paramètre ds et il sera discuté dans la partie 4. Le temps d'exécution de l'algorithme dépend du nombre d'itérations N (Hartley and Zisserman, 2003) et de la taille du nuage de points. Le premier plan principal de la façade est celui de plus grand consensus. Les autres plans principaux sont obtenus dans un deuxième processus RANSAC en tenant compte des *outliers* restants (Aitelkadi et al., 2013). Le résultat est alors un ensemble de plans ΣSP_i .

3.1.2. Processus radiométrique

Afin de reconnaître les éléments de façade localisés sur un même plan, la deuxième étape consiste à segmenter chaque plan extrait, SP_i . Notre approche s'appuie sur un algorithme de croissance de région à partir d'un point germe et selon un prédicat P_r . Ici, le prédicat repose sur la vérification de contraintes telle que la similarité de couleur. Le résultat est un ensemble de régions homogènes nommées plans secondaires, $\Sigma \Sigma SP_{ij}$.

L'algorithme de croissance de région est un processus itératif. Il est conçu en trois étapes :

- La sélection aléatoire du point germe parmi les points du segment SP_i .
- La croissance du point germe en une surface germe.

- La croissance de la surface germe en région homogène SP_{j_i} .

La croissance du point germe en surface germe dépend de la vérification des critères géométriques et radiométriques :

- ✓ Le critère géométrique :

Les plus proches voisins du point germe, situés à l'intérieur de la sphère de rayon td et de centre le point germe, délimitent la surface germe. Cette surface germe ne peut être validée que si elle satisfait le critère radiométrique.

- ✓ Le critère radiométrique :

La distance colorimétrique entre le point germe et le centre de gravité de la surface germe est inférieure au seuil tr : $Sim_{co} < tr$. Sim_{co} est la distance euclidienne dans l'espace colorimétrique RVB. De plus, la variance de couleur de la surface germe (Var_{co}) doit être inférieure au seuil Vr . $Var_{co} < Vr$, où :

$$Var_{co} = (V_R + V_G + V_B)$$

Avec :

V_R , V_G et V_B = les variances empiriques de chaque composante couleur de la surface germe.

La croissance de régions à partir des surfaces germes repose sur le seul test de similarité de la couleur d'un point avec celle de la surface germe par distance euclidienne.

Les changements d'éclairage sur la façade et les effets d'ombre souvent rencontrés lors du balayage d'un bâtiment causent des erreurs de segmentation, et l'utilisation d'un autre système de représentation colorimétrique RVB, HSV, CIE-Lab, CIE-XYZ ou CIE-Luv, ne permettra pas de résoudre toutes ces difficultés, notamment sur les surfaces fortement ombragées dont la signature colorimétrique n'est pas correctement perçue. Dans le cadre de ce travail, les défauts de segmentation sont traités après croissance de région. Ce traitement consiste à fusionner les régions d'intensité laser similaire. L'intensité laser varie en fonction du type de matériau (béton, bois, fer, sable...), de la clarté de son apparence colorée relativement à la longueur d'onde du SLT : blanc, couleur claire, sombre, noir, de la distance, de l'incidence, ou encore des conditions d'humidité (Voegtler et al., 2008 ; Voegtler and Wakaluk, 2009) et (Cang et al., 2013). La fusion dépend de la validation du prédicat de similarité d'intensité laser entre deux régions :

$$Pr(i,j) = \text{Vrai} \quad |I_i - I_j| < f \quad (1)$$

Avec :

I_i et I_j = les valeurs des intensités moyennes liées à chaque région i et j .

La détection des contours est faite sur chaque plan extrait. C'est une phase intermédiaire et indispensable à la vectorisation des éléments de façade.

3.2. Filtrage des résultats de segmentation

Avant de procéder à la détection de contours, une étape de filtrage est nécessaire à cause des résultats imparfaits de la segmentation qui montrent des petites régions isolées à l'intérieur d'un même segment, ou des points isolés. Appelées ici composantes connexes bruit, ces régions affectent directement les résultats d'identification des contours. Afin de réduire ces composantes, deux approches ont été étudiées.

La première méthode est une analyse du voisinage de chaque point et s'inspire de (Hu et al., 2013). Elle est basée sur le calcul de la distance moyenne entre chaque point et son voisinage. Tous les points dont la distance moyenne est hors d'un intervalle prédéfini ne peuvent être considérés comme des points aberrants et retirés de la région segmentée. L'intervalle de distance est fonction de la distance moyenne entre les points du nuage et son écart type. La taille importante de la donnée rend le temps de calcul très élevé. Pour être plus efficace, les auteurs utilisent la structure de l'arbre Kd pour la recherche des k-plus proches voisins.

Nous proposons une deuxième méthode plus rapide que la première, basée sur la triangulation de Delaunay de chaque segment. Elle suppose que les sommets associés à plusieurs grands triangles sont probablement les points aberrants. Cela se justifie par la structure des segments. En effet, l'algorithme procède à la suppression des points, sommets de triangles, qui vérifient les critères suivants :

- ✓ $St > \delta$

- ✓ $Nt > \eta$

Avec St : surface d'un triangle dont le point est un sommet.

δ : seuil. La valeur doit être supérieure à la surface moyenne des triangles.

Nt : nombre de triangles dont le point est un sommet et vérifiant la première condition.

η : seuil.

Le processus est itératif et s'arrête lorsqu'il n'est plus possible de supprimer des points.

3.3. La détection des contours

Le résultat des segments filtrés est l'objet du processus de détection de contours. Basé aussi sur la triangulation de Delaunay, nous exploitons les alpha-formes dans la détection de contours, notamment les contours des éléments de façade. La définition de ces formes et l'algorithme associé ont été présentés dans (Edelsbrunner and Mücke, 1994). Le principe de l'algorithme consiste à creuser l'enveloppe convexe d'un échantillon de points à l'aide d'une boule. Cette boule est naturellement vide et les simplexes constituant les limites de l'alpha-forme sont parmi les simplexes de la triangulation de Delaunay. Soit S un ensemble de points non dégénéré. Le paramètre alpha contrôle le niveau de complexité d'une forme autour de l'ensemble S .

Dans la triangulation de Delaunay, une arête est définie par la connexion par une ligne droite entre p et q si et seulement si p et q sont des points voisins du diagramme de Voronoï. Un point p est un point alpha-extrême de l'ensemble S s'il existe une sphère vide de rayon alpha, tel que p se trouve sur sa frontière et la sphère ne contient aucun autre point de l'ensemble S . Deux points p et q sont des alpha-voisins s'ils sont des points alpha-extrêmes de la même sphère de rayon alpha.

Compte tenu de la valeur d'alpha, l'alpha-forme de l'ensemble S est le graphe de droites dont les sommets sont les points alpha-extrêmes et qui connectent les alpha-voisins.

Lorsque la valeur d'alpha est assez importante, l'alpha-forme se rapproche de l'enveloppe convexe. Quand alpha diminue, l'alpha-forme développe des cavités et des vides dans la triangulation. Quand alpha devient nulle, tous les points sont isolés. Normalement, en changeant la valeur d'alpha, l'ensemble de points alpha-extrêmes change aussi.

- ✓ Si $\alpha = 0$, l'alpha-forme est l'ensemble des points isolés;
- ✓ Si $\alpha > 0$, l'alpha-forme est le graphe dont les sommets sont des alpha-extrêmes ;
- ✓ Si α tend vers ∞ , l'alpha-forme représente l'enveloppe convexe.

L'algorithme consiste donc à déterminer les points alpha-extrêmes. Le paramètre alpha peut être défini

en fonction des résultats de tests empiriques ou calculé en se basant sur une valeur approchée. Pour se rapprocher des contours réels des éléments recherchés, le paramètre alpha doit être supérieur au rayon des cercles circonscrits des triangles issus de la triangulation de Delaunay. Le contour correspond ensuite aux limites des facettes (1-simplexe) qui ne sont rattachées qu'à un seul triangle et dont le cercle circonscrit a un rayon inférieur à alpha. Ces limites de facettes sont définies par les points alpha-extrêmes.

3.4. Le modèle vectoriel

Le passage du contour défini par l'alpha-forme au modèle vectoriel de la façade nécessite une étape d'extraction de lignes et des arcs de cercles.

Le processus est réalisé indépendamment pour chaque région. Il débute par la recherche des lignes passant par les points de l'alpha-forme, selon leur direction : droites horizontales, droites verticales puis les lignes inclinées. Les points hors des lignes feront l'objet d'une identification des arcs de cercles. Nous employons l'algorithme RANSAC pour ces reconnaissances.

La classification de lignes selon leur direction est conditionnée par le coefficient directeur a de l'équation $y = ax + b$

- $a \neq 0$ lignes inclinées.
- $a = 0$ lignes horizontales (une tolérance sur l'orientation de quelques degrés peut être ajoutée).
- a tend vers ∞ lignes verticales.

Une droite identifiée peut correspondre à plusieurs segments, par exemple les côtés de deux fenêtres alignées sur la façade. Afin d'identifier chaque segment de droite, on ajoute un critère de distance qui dépend de l'espacement moyen entre les points du nuage.

Une fois les segments de droites définis, les points restants permettent la recherche par RANSAC d'arcs de cercle, définis par 7 paramètres : centre et rayon du cercle, position des deux points d'extrémités.

Afin de produire le modèle vectoriel, nous avons besoin d'assurer la connexion des segments obtenus à travers le calcul d'intersection entre les différents segments droits et entre les segments droits et arcs sur chaque plan.

4. Résultats

4.1. Les données expérimentales

4.1.1. Matériel

Des bâtiments de la Médina de Casablanca ont été scannés par un SLT FARO Focus 3D. La portée de ce système atteint 120 m à l'intérieur ou à l'extérieur dans des conditions de faible éclairage et sur une surface réfléchissante à 90% sous incidence normale. La précision des mesures est de 2 mm à une distance de 10 m. Ce système est équipé d'un appareil photographique couleur de 70 mégapixels. Les couleurs RVB sont codées sur 8 bits [0 - 255] et les intensités laser sur 11 bits [-2047 - 2048]. Nous obtenons un nuage de 323012 points dont l'espacement moyen est de 5 cm.

4.1.2. Caractéristiques des données laser

On entend par des données laser une matrice de points qui comprend les coordonnées tridimensionnelles, l'information couleur RVB et l'intensité laser. Afin de comprendre la valeur du produit brut de la phase d'acquisition et de valoriser son apport dans les processus menant à l'établissement de modèle vectoriel, nous avons choisi de conserver la matrice du nuage de points dans l'ensemble des étapes sans faire appel à des données supplémentaires ou transformations.

Les nuages de points exploités dans ce travail sont les résultats d'assemblage de produit brut de deux stations de levé. Le but de l'assemblage est d'obtenir un recouvrement maximal des façades et une double acquisition des détails. Le nuage de points résultant est caractérisé par un ensemble important et désorganisé de points d'une densité non-homogène.

4.1.3. Caractéristique des façades

Les façades de bâtiments des anciennes Médinas sont composées de surfaces planes. La spécification d'une façade de bâtiments des anciennes Médinas demeure dans l'agencement des détails par rapport à son plan principal. En effet, une façade d'un bâtiment de l'ancienne Médina est caractérisée par une forme plane qui abrite une majorité des détails tels que les volets de fenêtres, le cadre de porte, le garage, etc. Ces détails, supposés de formes géométriques simples, ont une planéité presque confondue. Les autres entités caractéristiques de la façade sont géométriquement identifiables à travers des données d'orientation et d'espacement.

Le nuage de points exploité dans ce travail représente une seule façade dont celle étudiée dans cet article et qui présente des volets, des fenêtres, arche de porte, balcons et porte (Fig. 1).

4.2. Les résultats de la segmentation

Le processus de segmentation nécessite la détermination de seuils. Le processus géométrique (cf. 3.1.1) impose tout d'abord le choix du seuil ds pour distinguer les points *inliers* des points *outliers*. Le choix du seuil ds dépend principalement des caractéristiques des façades à segmenter. Par exemple, dans le cas des murs, la valeur de ds est influencée par la planéité du mur qui reflète la perfection de construction des bâtiments. Le seuil dépend aussi de l'objectif de la phase de modélisation. En effet, pour une reconstitution de l'architecture de base d'un bâtiment, ds peut avoir une valeur grande. Par contre, si l'objectif est le contrôle de verticalité, le choix doit être plus fin, et parfois variable d'une zone à l'autre. L'objectif de ce travail est limité à la reconnaissance et l'archivage de l'architecture initiale du bâtiment. Déterminer un seuil optimal semble difficile. Dans notre cas, le choix de la valeur de ds est heuristique et vise à éviter la sur-segmentation du plan principal de façade et la sous-segmentation entre plans principaux parallèles. Aussi, puisqu'une deuxième étape du processus de segmentation corrigera les défauts, nous utilisons une valeur de 6 cm pour ds qui nous permet de retrouver le plan principal de la façade (en vert sur la Fig. 3).

Ce plan principal correspond à l'ensemble de consensus de cardinal le plus grand. Les segments rouges correspondent aux autres plans principaux.

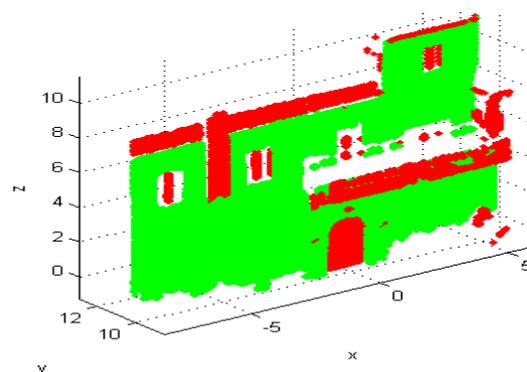


Figure 3 : Résultat de la segmentation géométrique. Les axes expriment des coordonnées en mètre. En vert, le plan principal de la façade. En rouge les plans secondaires.

Sur chaque plan, la segmentation en segments homogènes basée sur les couleurs des points du nuage exige le choix de quatre seuils: td , tr et Vr pour l'identification de la surface germe et tr_2 pour la croissance de la surface germe (cf. 3.1.2.). Chaque seuil dépend de la donnée :

- ✓ Le rayon td permet de sélectionner des points voisins au point germe de façon à éviter l'agrégation des points trop éloignés ou la sélection de la surface germe sur une zone isolée. Ce seuil doit donc dépendre de la distance moyenne entre points du nuage.
- ✓ Les seuils tr et Vr doivent dépendre de la distance colorimétrique maximale entre les points du nuage.
- ✓ Le seuil tr_2 doit être plus élevé que tr puisque l'on peut s'attendre à ce que la variation de couleur augmente lorsque la zone de traitement devient plus étendue. La valeur de tr_2 dépasse la différence moyenne de couleur de la région germe.

Sur le plan principal représentant la façade, on mesure des segments de distance entre points de même région couleur. Pour une distance moyenne de 20 cm entre points, la distance colorimétrique moyenne des segments est de 30. De même pour une distance maximale de 140 cm, la distance colorimétrique moyenne est de 60. Selon ces considérations, des valeurs possibles de seuils sont choisies manuellement et après l'examen visuel des résultats intermédiaires. Malgré divers essais, les effets d'ombrage induisent des variations inattendues, qui provoquent une sur-segmentation. Dans la plupart des cas, il sera difficile de trouver des seuils appropriés, un compromis devra être trouvé entre sur-segmentation et sous-segmentation. Ainsi dans notre cas, nous choisissons les valeurs suivantes : $td=0,2$ m, $tr=30$, $Vr=200$ et $tr_2=60$.

Le résultat de la croissance de région correspondant au plan principal de la façade est un ensemble de segments plans (10 segments) (Figure 4). Huit segments correspondent au mur, un segment correspond aux volets de fenêtres et au cadre de la porte et un segment qui semble faux, en effet, il correspond à la double réactivité de certains points.

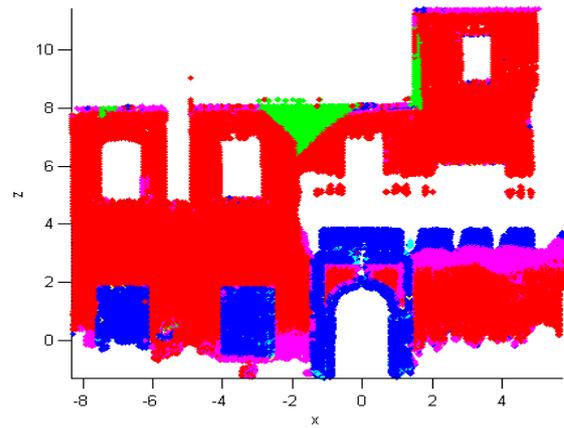


Figure 4 : Résultat de la segmentation radiométrique basée sur les couleurs : $td=0,2$ m, $tr=30$, $Vr=200$ and $tr_2=60$. Dix segments ont été identifiés.

Afin de corriger les erreurs de segmentation liées aux effets d'ombrage, nous exploitons les intensités laser (cf. partie 3.1.2). Dans cette étape, nous fusionnons les régions ayant une intensité laser similaire. La validation de cette similarité dépend du seuil f . Le seuil doit être choisi en fonction du degré de variabilité de l'intensité laser entre les régions obtenues. Les régions correspondant au mur présentent des valeurs importantes d'intensité du laser, entre 1832 et 2032. Les autres régions ont un niveau inférieur d'intensité laser. Pour la région correspondant aux volets et cadre de la porte, nous avons une valeur moyenne d'intensité laser égal à 200 avec une variabilité de 50. Une troisième gamme de valeurs négatives a été identifiée dans la région visiblement aberrante. Selon ces observations, un seuil possible est de choisir $f = 200$ qui est fonction de la grande variabilité des deux régions résultante.

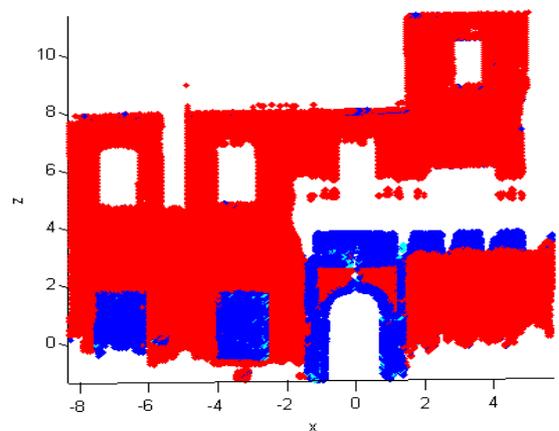


Figure 5 : Le résultat du processus de fusion basé sur les intensités laser avec $f = 200$.

La figure 6 présente les deux segments homogènes obtenus depuis le plan principal.

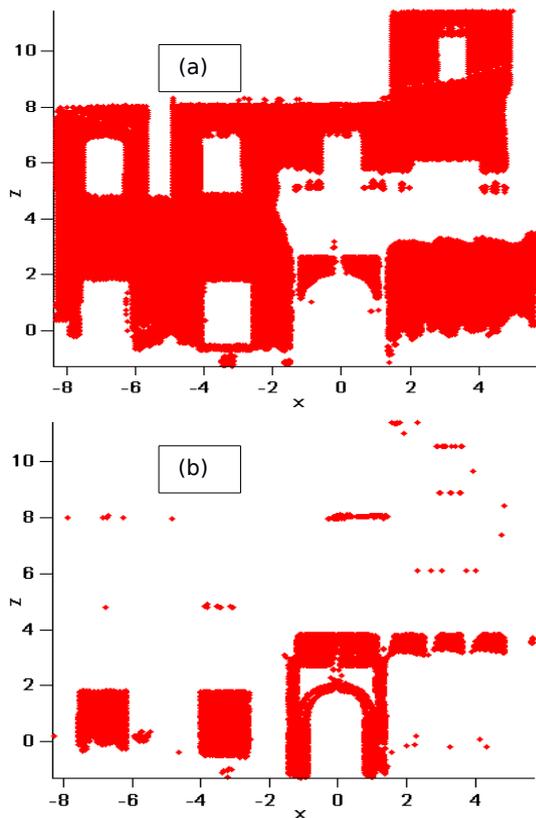


Figure 6 : Les résultats de la segmentation: (a) la région mur, (b) la région volets-cadre.

Le résultat montre l'ajustement des imperfections de l'étape précédente. Nous passons ainsi de 10 à 3 régions (Figure 5).

4.3. Les résultats de la détection des contours

Sur la figure 6, nous notons que les régions obtenues, en particulier celle des volets et cadre de porte, sont caractérisées par plusieurs composantes connexes dont certaines petites et isolées.

Pour réduire ces composantes que nous considérons comme du bruit, nous appliquons un ltrage basé sur deux seuils, δ et η (cf. partie 3.2.1.). Les valeurs des seuils dépendent de la distribution spatiale des composantes connexes, leur cardinal et leur distance par rapport aux autres éléments du segment. La valeur de δ dépend aussi de la proportion des grands triangles par rapport aux petits triangles. Après analyse sur trois données LIDAR similaires, 3% à 5% des triangles ont une surface supérieure à la moyenne. De plus, nous observons que les points situés dans ces

composantes connexes bruit sont au moins attachés à cinq triangles.

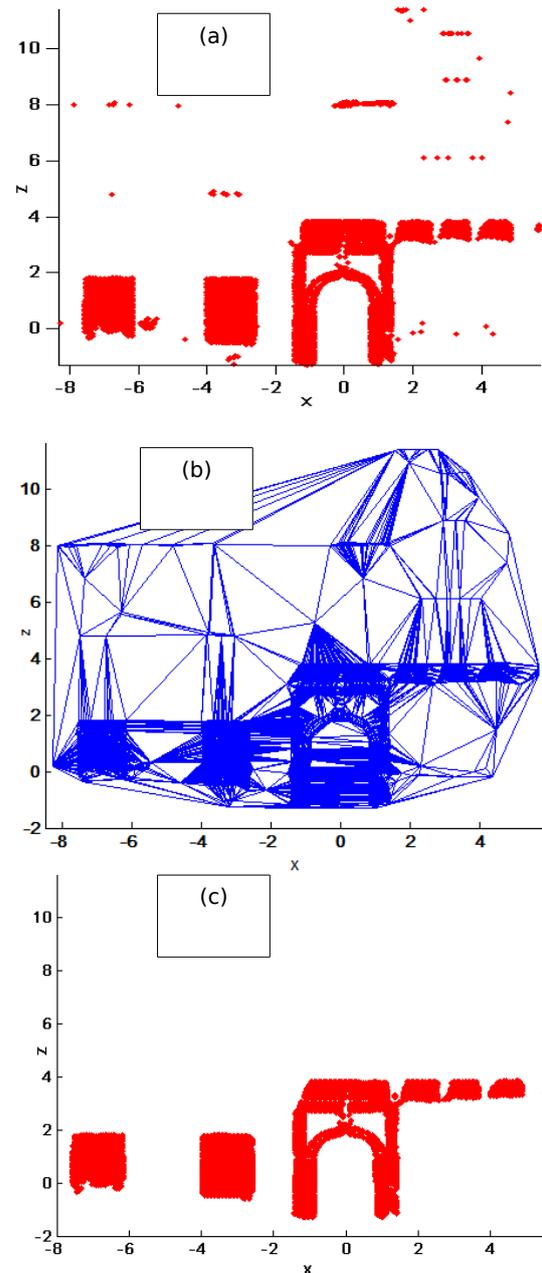


Figure 7 : Résultat de la réduction des composantes connexes: (a) région volets-cadre de porte sans ltrage, (b) triangulation de Delaunay initiale, (c) résultat après ltrage.

Nous choisissons $\delta = 3 * m$. La grandeur m est la surface moyenne des triangles et $\eta = 5$. Le nombre d'itérations dépend du nombre des composantes connexes que nous voulons réduire. Pour obtenir le résultat présenté dans la figure 7, 10 itérations sont satisfaisantes.

Ensuite, la détection des contours dépend du paramètre alpha (cf. partie 3.2.2.). Ici, la valeur du paramètre est choisie de telle sorte que le contour extrait soit très proche du modèle laire du nuage de points, c'est-à-dire pour éviter des cavités. Pour cela, nous nous basons sur les caractéristiques du nuage de points (cf. partie 4.1). Alpha est ici égal à 6 cm (Figure 8).

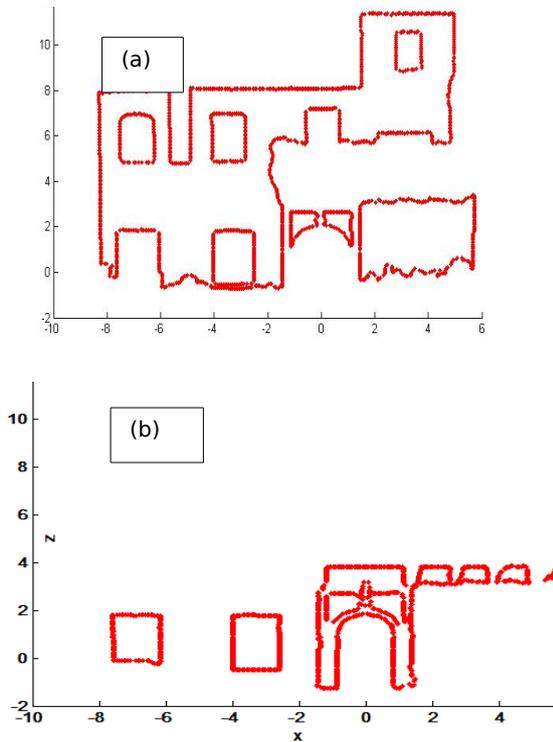


Figure 8 : Résultat de la détection des contours avec $\alpha = 0,06$ m : (a) contour de la région mur ; (b) contour de la région volets-cadre.

La gure 9 présente l'établissement du modèle vectoriel par l'ajustement de segments droits et arcs de cercle et le calcul des points d'intersection (cf. partie 3.2.3.).

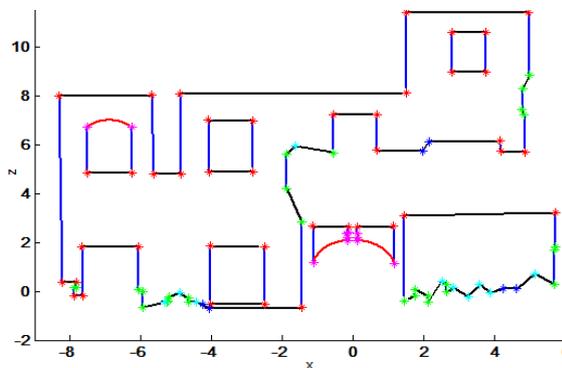


Figure 9 : Résultat des contours de la région du mur ajustés en calculant les points d'intersection.

Pour chaque plan principal, un modèle vectoriel est établi. Le modèle vectoriel de la façade est obtenu par la superposition de tous ces modèles vectoriels (Figure 10).

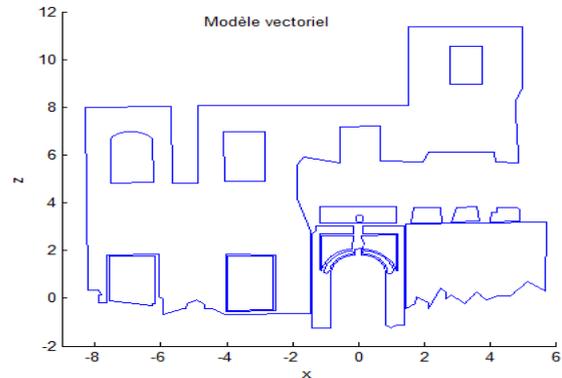


Figure 10 : Modèle vectoriel du plan principal de la façade.

4.4. Évaluation des résultats

Pour évaluer la qualité de résultat de notre processus automatique, nous avons utilisé une extraction manuelle et mesuré environ 19 longueurs d'éléments (volets, cadre de porte). La différence moyenne est de 4 mm avec un écart-type de l'ordre de 6 mm. Notre approche a été testée sur d'autres façades de l'ancienne Médina de Casablanca qui sont dotées d'une architecture similaire à celle de la résidence. Les résultats obtenus sont similaires. Ce travail valide la abilité de la méthode d'extraction qui intègre toutes les composantes du nuage de points pour la modélisation 3D de bâtiment.

5. Conclusions

La richesse de l'information contenue dans un nuage de points présente de grandes opportunités dans le processus d'établissement du modèle vectoriel des façades des bâtiments historiques des anciennes Médinas. Ces bâtiments sont dotés d'une architecture qui confond les plans géométriques des détails ou des motifs. La méthodologie proposée dans ce travail dévoile une relation de complémentarité entre les différentes composantes du nuage de points. L'information géométrique est indispensable dans l'identification des segments plans des façades. Ces segments forment des plates-formes d'initiation et de développement des approches orientées couleur ou intensité. La couleur

débloque la classification des éléments ayant la même forme géométrique. L'intensité résout les imperfections des variations des couleurs. Sur le résultat de segmentation, un ltrage des composantes connexes bruit est indispensable. Nous avons donc proposé un ltrage qui est basé sur la triangulation de Delaunay. De plus, nous avons adapté un algorithme de détection des contours des détails de la façade en utilisant l'algorithme alpha-forme.

A travers un ajustement des contours et la détermination des points d'intersection, nous avons formé le modèle vectoriel du plan principal de la façade.

Ce processus dépend cependant de la valeur de différents seuils que nous chercherons à xer de manière plus automatique dans nos travaux futurs selon les caractéristiques du nuage et des résultats intermédiaires.

Notre méthode peut aisément s'étendre au traitement d'un nuage de points qui représenterait plusieurs façades. Cependant, certaines entités complexes comme un balcon avec des ornements ne sont pas encore considérées dans notre méthode.

Références

Journaux

Cattedra R., 2003. Casablanca: la réconciliation patrimoniale comme enjeu de l'identité urbaine. *Rives nord-méditerranéennes*, 6 : pp. 61-77.

Barnea S., Filin S., 2013. Segmentation of terrestrial laser scanning data using geometry and image information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76: pp. 33-48.

Boissonnat J.D., 1984. Geometric structures for three dimensional shape representation. *ACM Transactions on Graphics*, 3(4): pp. 266-286.

Borrmann D., Elseberg J., Lingemann K., Nüchter A., 2011. The 3D Hough Transform for Plane Detection in Point Clouds: A Review and a new Accumulator Design. *3D Research*, 2(2): pp. 1-13

Boulaassal H. Landes T., Grussenmeyer P., 2009. Automatic Extraction of Planar Clusters and their Contours on Building Facades Recorded by

Terrestrial Laser Scanner. *International Journal of Architectural Computing*, 7 (1): pp. 1-20.

Edelsbrunner H., Mücke E.P., 1994. Three-dimensional alpha shapes. *ACM Transactions on Graphics*, 13(1): pp. 43-72.

Fischler M.A., Bolles R.C., 1981. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*, vol. 24: pp. 381-395.

Mapuris W.T., Sithole G., 2012. 3D Object Segmentation of point clouds using proling techniques. *South African Journal of Geomatics*, 1(1): pp. 60-76.

Pedro A., De-Alarcó N., Pascual-Montano A., Gupta A., Jose M.C., 2002. Modeling Shape and Topology of Low-Resolution Density Maps of Biological Macromolecules. *Biophysical Journal*, 83: pp. 619 – 632

Pu S., Vosselman G., 2009. Building facade reconstruction by fusing terrestrial laser points and images. *Sensors*, 9(6): pp. 4525-4542.

Livres et thèses:

Boulaassal H., 2010. Segmentation et modélisation géométriques de façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres. *PhD thesis of INSA Strasbourg*, Strasbourg, France.

Hartley R. et Zisserman A., 2003. Multiple view geometry in computer vision. *Cambridge University Press*. Second edition.

Stylianou G. et Farin G., 2003. Crest lines extraction from 3D triangulated meshes. In: *Hierarchical and geometrical methods in scientific visualization*. Heidelberg, Springer : pp. 269-281.

Conférences

Aitelkadi K., Tahiri D., Simonetto E., Sebari I., Polidori L., 2013. Segmentation of heritage building by means of geometric and radiometric components. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences—Volume II-5/W1*: pp 1-6; Strasbourg, France.

Cang G., Li M., Yue J., Ou J., Zhu L., 2013. Effect of Target Properties on Terrestrial Laser Scanning Intensity Data. In: *International Conference on*

Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE 2013); vol. 31: pp. 818 – 821

Demir N., Baltsavias E., 2012. Automated modeling of 3D building roofs using image and LIDAR data. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume I-4, 2012, Melbourne, Australia.

Filin S., 2002. Surface clustering from airborne laser scanning data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIV, part 3A/B, Graz, Austria: pp. 119-124.

Jarvis R.A., 1977. Computing the shape hull of points in the plane. In: *Proceedings of the Computing Society Conference on Pattern Recognition and Image Processing*: pp 231-241.

Hu F., Zhao Y., Wang W., Huang X., 2013. Discrete point cloud filtering and searching based on VGSO algorithm. In: *Proceedings of the 27th European Conference on Modelling and Simulation*. Lancaster University, UK: pp 850-856

Koschan A., Abidi M., 2001. A Comparison of Median Filter Techniques for Noise Removal in Color Images. In: *D. Paulus and J. Denzler (Editors), Proc. 7th German Workshop on Color Image Processing*, pp. 69-79, Erlangen, Germany, October 2001.

Pu S., Vosselman G., 2006. Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning. *International Archives of Photogrammetry, Remote*

Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 35 (Part 6): pp. 33-39.

Voegtli T., Schwab I., Landes T., 2008. Influences of different materials on the measurements of a terrestrial laser scanner (TLS). *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 37 (Part B5), Beijing, China, 2008, pp. 1061-1066.

Voegtli T., Wakaluk S., 2009. Effect on the measurements of terrestrial laser scanner HDS 6000 (LEICA) caused by different object materials. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 38 (Part 3/W8) – Paris, France: pp 68 – 74.

Wang Y., Gao J., 2006. Boundary recognition in sensor networks by topological methods. In: *MobiCom'06, Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, ACM. Los Angeles, CA, USA.

Xiao Y., Wang C., Xi X.H., Zhang W.M., 2014. A comprehensive framework of building model reconstruction from airborne LIDAR data. In: *35th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE35), 2014 IOP Conf. Ser: Earth Environ. Sci.* 17 012178. Beijing, China.

Strom J., Richardson A., Olson E., 2010. Graph-based segmentation for colored 3D laser point clouds. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 2010, Taipei, Taiwan.