

## Etude sur la reconstruction géométrique et topologique d'un bâtiment par photogrammétrie mono-image

■ Omar AL KHALIL & Pierre GRUSSENMEYER

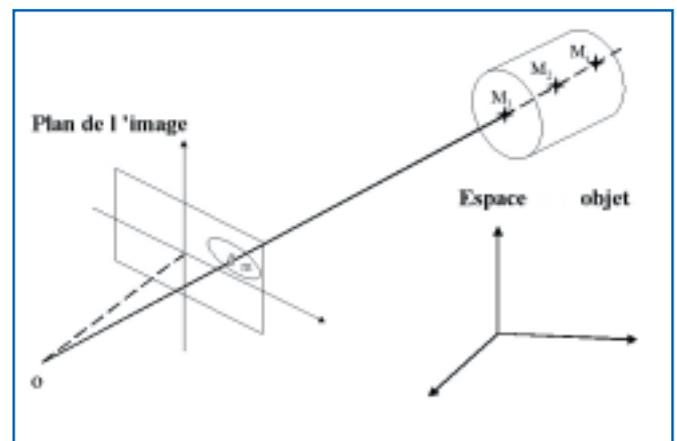
*De plus en plus de logiciels de photogrammétrie rapprochée proposent des méthodes de modélisation tridimensionnelle à partir d'une seule image. L'objectif est en général de reconstruire la géométrie d'un objet en partant d'hypothèses sur sa position et sa forme. D'autres informations non géométriques peuvent être prises en compte dans la modélisation. Dans cet article, nous proposons une méthode de modélisation mono-image basée sur la combinaison de concepts de géométrie projective et de topologie. Cette étude a permis d'élaborer un modèle 3D de l'ancien hôtel de Ville de Zurich dans le cadre d'un projet du Comité International de Photogrammétrie Architecturale.*

La photogrammétrie rapprochée permet de reconstruire les modèles 3D de scènes architecturales à partir de photos. La géométrie tridimensionnelle requise pour l'élaboration de ces modèles est habituellement saisie à l'aide de stéréorestituteurs analytiques ou numériques ou de systèmes de photogrammétrie multi-images. L'application des principes de la stéréophotogrammétrie et de la photogrammétrie multi-image, nécessite une démarche particulière lors de la prise de vues (respect des conditions du cas normal pour la stéréorestitution, mise en correspondance des points homologues sur les différentes photos, relevé de points d'appui, connaissance préalable des caractéristiques des appareils photographiques). Ces données servent à déterminer les paramètres de différentes transformations géométriques décrivant la formation de l'image.

Par ailleurs, la photogrammétrie est souvent utilisée pour résoudre les problèmes de documentation ou de reconstruction du patrimoine culturel. Des illustrations, des cartes

postales ou des photos d'amateur peuvent quelquefois être la seule source d'information existante sur l'objet à documenter. En général, ces photos ne satisfont pas les conditions de la stéréophotogrammétrie ou de la photogrammétrie multi-image et l'établissement des données de contrôle nécessaires au traitement n'est pas toujours possible. La photogrammétrie doit permettre d'utiliser ces archives afin de reconstruire le modèle 3D de la scène concernée en considérant une seule image.

En théorie, une seule image ne fournit pas assez d'informations pour effectuer une reconstruction 3D d'une scène photographiée. En effet, le processus de formation de l'image représente la projection conique d'une scène tridimensionnelle sur un plan (le plan de l'image). Les différences de profondeur sont difficiles à évaluer sur une image (figure 1) car plusieurs points de l'espace objet peuvent correspondre à un point spécifique de l'image.



**FIG. 1.** Le point correspondant à (m) se trouve sur la droite (O, m, Mi)

Pour définir la géométrie 3D d'une scène à partir d'une seule image, on peut appliquer différentes méthodes basées sur la reconstruction de la forme à partir de :

**1. l'ombre :** il s'agit d'extraire la forme uniquement à partir des variations de la lumière observée sur les surfaces de l'objet photographié (*Horn, 1981*) ;

**2. la combinaison de la focalisation et de la défocalisation :** quand une image est prise avec un appareil photographique, l'objectif est focalisé à une distance particulière. Les objets en dehors de la zone de netteté sont flous. La défocalisation relative entre deux photos est utilisée pour déterminer la structure 3D de l'objet (*Pentland, 1987*);

**3. l'interprétation des textures :** cette technique est basée sur le concept du gradient de texture qui correspond au changement systématique de la taille et de la forme des composantes des textures dû aux effets combinés de la géométrie de l'objet photographié et de la formation de l'image (*Clerc et Mallat, 1999*);

#### 4. La géométrie

Les trois premières techniques ont des domaines d'application spécifiques, leur précision est limitée et les algorithmes sont complexes. En revanche, les techniques basées sur la connaissance préalable des caractéristiques géométriques de l'objet photographié sont précises et leurs applications sont variées. Lors de la reconstruction de la forme à partir de la géométrie, les approches sont les suivantes :

- l'utilisation des surfaces analytiques : l'objet à modéliser est décrit à l'aide de l'équation d'une surface analytique. Si cette description est possible, il faut déterminer les paramètres qui définissent cette équation et définir le processus à suivre pour combiner la surface analytique et l'image (*El-hakim, 2000*), (*Taylor, 2000*), (*Theodoropoulou, 1999*);
- la combinaison d'une image aérienne avec un MNT et des orthophotographies : l'idée de base consiste à orienter une seule image à l'aide d'une orthophotographie et d'un modèle numérique de terrain. A l'issue de cette orientation, les coordonnées-objets des nouveaux points mesurés sur l'image peuvent être calculées (*Shan, 2001*);
- l'utilisation de contraintes géométriques et topologiques : dans le contexte de la modélisation 3D le mot "contrainte" indique les relations géométriques (la perpendicularité, le parallélisme, la symétrie, etc.) et topologiques (les relations topologiques entre l'objet et sa projection dans la photo et les relations topologiques entre les composantes de l'objet lui-même) existantes entre les composantes des objets. Ces contraintes sont utilisées pour orienter les lignes et les plans de l'objet photographié et reconstruire son modèle 3D (*Van den Heuvel, 1998*);
- l'utilisation des concepts de la géométrie projective (coordonnées homogènes, points de fuite, homographie et coniques absolues). Ces approches sont intéressantes car elle donnent la possibilité d'effectuer une reconstruction 3D à partir d'une image non étalonnée (*Criminisi, 1999*).

## Photogrammétrie mono-image et topologie

Notre recherche s'applique à la modélisation et à la représentation tridimensionnelle des objets de type "bâtiment". Cette approche est basée sur la représentation de l'information sous

forme hiérarchique et la structuration simultanée des données dans une base de données relationnelle (*Al Khalil et al., 2001*).

Les données géométriques sont principalement obtenues à l'aide de la photogrammétrie architecturale mono-image. La structuration des données inclut la géométrie, la topologie et les aspects sémantiques des différentes entités des scènes modélisées. Elle est effectuée à l'intérieur même du processus de modélisation.

L'idée de présenter l'information sous une forme hiérarchique est l'un des apports importants d'un système d'information. Le niveau géométrique est une représentation graphique qui rend uniquement compte de la position et de la forme des objets géométriques et des relations spatiales entre ces objets (voisinage, intersection, inclinaison, etc.). Le niveau topologique est quant à lui un niveau intermédiaire qui permet de définir les relations entre les primitives géométriques (points, lignes et surfaces) présentées dans le niveau précédent. En ce qui concerne le niveau sémantique, il permet de définir les objets à modéliser ainsi que les attributs de ces objets, en réponse aux besoins de la modélisation et en concordance avec les données géométriques disponibles.

Lors de l'application de notre prototype, l'acquisition de données possède les deux formes suivantes :

- Acquisition des données géométriques : il s'agit des positions des points saisis sur l'image et donc décrits à l'aide de leurs coordonnées cartésiennes 3D dans un référentiel donné. Cette acquisition se fait par un module de photogrammétrie mono-image. Cette application est basée en partie sur des travaux antérieurs (Criminisi, 1999). Ici, les concepts de la géométrie projective comme les coordonnées homogènes, les points de fuite et l'homographie, constituent les éléments de base de la modélisation.
- Acquisition des données sémantiques et topologiques : il s'agit de la définition des entités que l'on cherche à modéliser. Cela suppose que l'opérateur ait une bonne connaissance de l'objet. La précision de la nature sémantique est facilement réalisable à l'aide des outils intégrés dans l'interface de l'acquisition géométrique elle-même.

Les données géométriques, topologiques et sémantiques sont enregistrées à la fin de la saisie dans une base de données relationnelle. Cette base sera utilisée avec une interface graphique intégrée dans un logiciel de DAO pour reconstruire et visualiser le modèle 3D de la scène photographiée.

## Application du prototype de Modélisation Mono-Image

Le prototype de Modélisation Mono-Image (MMI) a été validé à l'aide d'une application développée au sein de l'Equipe Photogrammétrie et Géomatique à l'ENSAIS. Pour calculer la géométrie 3D à partir d'une seule image, l'application MMI utilise des concepts de géométrie projective : points de fuite, coordonnées homogènes, homographie, coniques absolues, etc. ■■■

- ■ ■ La reconstruction du modèle 3D est quant à elle basée sur des relations topologiques enregistrées dans une base de données relationnelle de type Access.

Pour bien montrer le fonctionnement de cette application, nous avons reconstruit le modèle 3D de l'ancien hôtel de Ville de Zurich (*figure 2*) à l'aide de données d'un projet du Comité International de Photogrammétrie Architecturale (*Grussenmeyer, 2000*).

## ■ Introduction

L'ancien Hôtel de Ville de Zurich (Suisse) datant de 1694-98 a été relevé en mai 1999. Les dimensions approximatives de ce bâtiment sont de  $(35 \times 12 \times 18) \text{m}^3$ . Il est constitué de quatre façades planes et d'un toit composé d'un groupe de plans.



**FIG 2 : Ancien hôtel de Ville de Zurich**

Les prises de vues de l'ancien Hôtel de Ville de Zurich ont été réalisées en 1999 avec deux appareils photographiques numériques standards : Fuji DS 300 (1280 x 1000 pixels) et Olympus D1400L (1280 x 1024 pixels). Ces photos couvrent les façades du bâtiment, avec des obstacles autour de l'objet (plan d'eau ou faible recul) rendant le relevé difficile.

**FIG. 3. Images utilisées pour la modélisation mono-image de l'ancien hôtel de ville de Zurich**



Image des façades Nord et Ouest

Aucun objectif de précision n'était fixé pour la modélisation. Il s'agissait plutôt d'étudier les capacités des logiciels de photogrammétrie rapprochée à traiter des configurations de prises de vues peu conventionnelles (*Streilein et al., 1999*).

## ■ Etapes de la modélisation mono-image

### Données

Deux images prises avec l'appareil Fuji DS 300 ont été utilisées (*figure 3*). La première couvre les façades Nord et Est tandis que la deuxième couvre les façades Nord et Ouest. En ce qui concerne la façade Sud, elle a été modélisée à l'aide de points mesurés sur les façades Est et Ouest.

Sur les deux images sélectionnées, le calcul des points de fuite associés aux différents axes du système local de coordonnées mis en place est réalisé par la mesure de lignes parallèles de l'objet.

Afin de configurer la scène pour une modélisation mono-image, un système local de coordonnées ainsi que 4 points d'appui ont été définis (*figure 4*) sur la façade Nord du bâtiment.



**FIG.4 : Système de coordonnées local et points d'appui**



Image des façades Nord et Est

Les points d'appui sont donnés dans le tableau suivant :

N°	X	Y	Z
201	11.91	12.154	0
202	1.30	12.154	0
211	11.91	1.5	0
212	1.30	1.5	0

**Tableau 1 : Coordonnées des points d'appui (façade Nord)**

### Modélisation avec MMI

L'application MMI a été utilisée pour extraire la géométrie 3D. On considère les étapes suivantes :

**1. Définition des projets mono-images :** cela nécessite pour chaque projet, une image, un fichier de points d'appui et un fichier avec les caractéristiques de l'appareil photographique (ce dernier est optionnel car la modélisation fonctionne avec des images non-étalonnées) ;

**2. Calcul des points de fuite associés aux axes du système de coordonnées mis en place :** on mesure une série de lignes parallèles à chaque axe du système de coordonnées locales (figure 5) et on calcule l'intersection de ces lignes. La qualité des mesures et des calculs est évaluée en appliquant une régression linéaire.



**FIG. 5. Calcul des points de fuite (axe X)**

**3. Etalonnage de l'appareil photographique à l'aide des points de fuite issus de l'étape précédente :** le point principal de l'image est l'orthocentre du triangle formé par ces points dans le plan de l'image. La distance principale est aussi calculée à l'aide des trois points de fuite. Pour calculer ces paramètres, nous avons appliqué l'algorithme proposé dans *Caprile et Torre, (1990)* basé sur les coniques absolues. La conique absolue est une entité située dans le plan 3D à l'infini et l'image de cette conique est définie par la relation suivante :  $\omega = K^{-T} K^{-1}$ . La matrice  $\omega$  (3,3) est symétrique et possède cinq degrés de

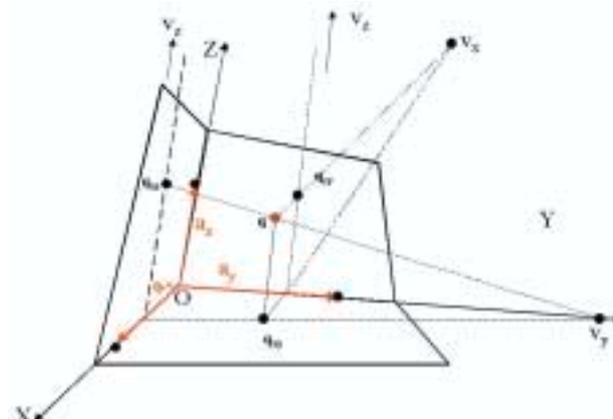


**FIG. 6. Points mesurés sur la façade ouest**

liberté. La matrice d'étalonnage de l'appareil photographique ( $K$ ) peut être calculée à partir de  $(\omega)$  en appliquant la décomposition de Cholesky.

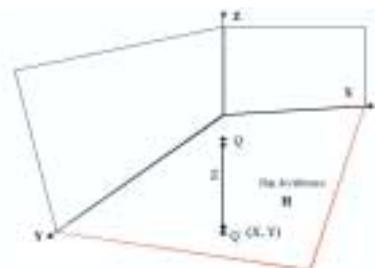
**4. Calcul des paramètres de l'homographie de la façade Nord :** ce calcul a été fait à l'aide des quatre points d'appui de la figure 4 ;

**5. Calcul des coordonnées 3D des points mesurés sur les différentes façades (figure 6) :** afin de pouvoir effectuer une reconstruction 3D complète, l'espace de l'objet doit être présenté sous forme d'une combinaison de trois plans (figure 7). Le plan qui contient les axes ( $X, Y$ ) est appelé le plan de référence tandis que la direction qui correspond à l'axe ( $Z$ ) est appelée la direction de référence (*Criminisi, 1999*). La détermination des coordonnées 3D d'un point nécessite la connaissance de l'un de ses projetés dans l'un des trois plans constitutifs de la scène



**FIG. 7. Configuration de l'espace à l'aide de 3 plans**

■■■ à modéliser. On peut déterminer automatiquement les projetés dans le plan de référence de points situés dans les plans (XZ), (YZ) ou dans un plan libre qui coupe le plan de référence à l'aide du point et de son projeté. La détermination des coordonnées 3D de ce point (figure 8) est directe en appliquant l'algorithme suivant : les coordonnées-objets (X, Y) du point sont calculées à l'aide de l'homographie du plan de référence et du point correspondant dans le plan de référence. La coordonnée (Z) est calculée à l'aide du facteur d'échelle de l'axe (Z), ce facteur étant calculé à l'aide d'une distance de référence le long de (Z).

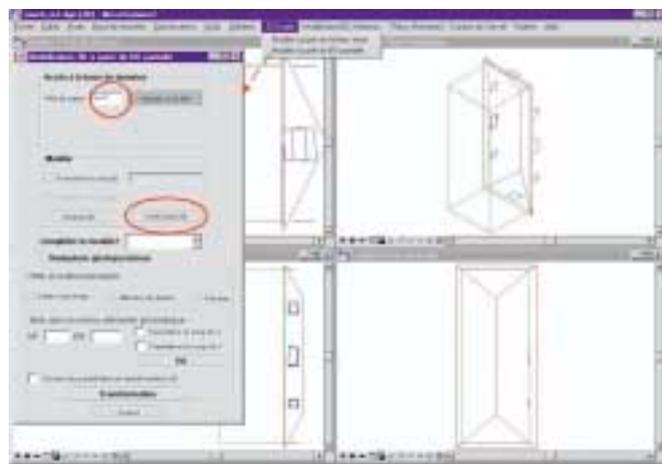


**FIG. 8. Détermination des coordonnées 3D d'un point en deux étapes**

**6. Etablissement d'une base de données à l'aide d'une interface intégrée dans l'application MMI :** cette base de données contient les données topologiques concernant le bâtiment à modéliser et issues des deux projets définis dans la première étape. La face constitue l'élément de base de la modélisation. Pour une surface donnée, l'opérateur saisit les points des limites et précise ensuite le type sémantique de cette surface (type MUR, SOL, PLAFOND (ou TOIT), PORTE ou FENETRE). La dernière étape consiste à préciser les numéros des points qui constituent les limites des faces. A la fin de la saisie, une base de données relationnelle est générée.

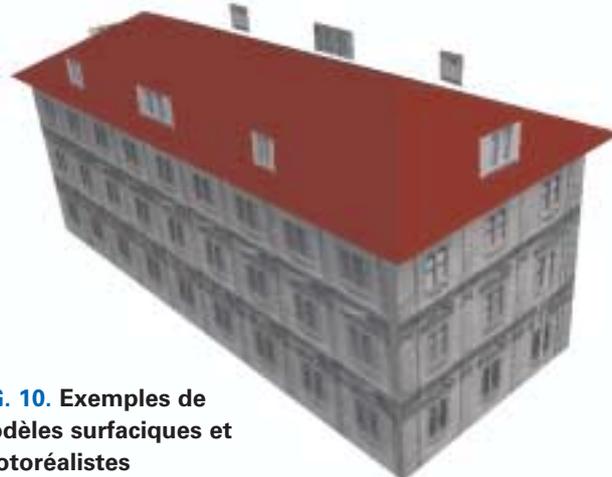
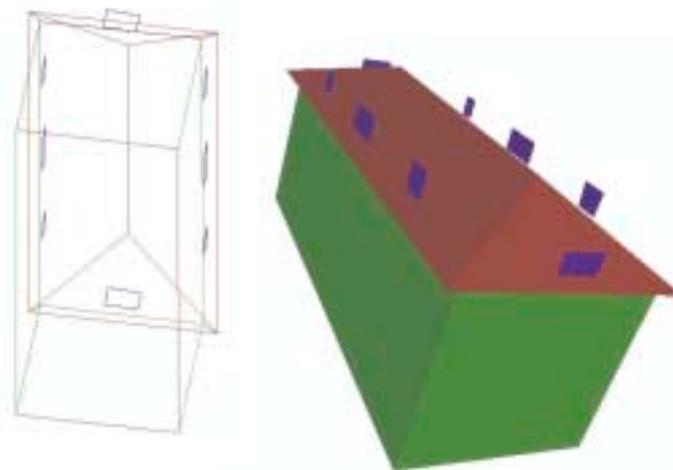
### Génération du modèle 3D

A l'aide des données géométriques, des relations topologiques (enregistrées dans la base de données relationnelle issue de l'étape précédente) et d'une interface intégrée dans un logiciel de DAO, la reconstruction et la visualisation du modèle surfacique 3D se fait automatiquement.



**FIG. 9. Génération du modèle surfacique 3D à l'aide de l'interface intégrée dans un logiciel de DAO**

Les textures ont été attachées aux différentes faces pour obtenir un modèle photoréaliste. On peut constater les défauts du modèle à certains endroits et particulièrement au niveau des angles des façades avec des problèmes de raccordement. En ce qui concerne le toit, des textures artificielles ont été utilisées. Il est à noter que les textures des différentes faces ont été calculées à l'aide des points 3D mesurés sur ces faces lors de l'étape 5. Il est à noter que les textures des différentes faces ont été calculées à l'aide des points 3D mesurés sur ces faces lors de l'étape 5 de la modélisation mono-image.



**FIG. 10. Exemples de modèles surfaciques et photoréalistes**

## Conclusion

Pour la reconstruction virtuelle en 3D d'un bâtiment, la configuration photogrammétrique mono-image constitue une solution intéressante. Nous avons développé une approche basée sur la pré-connaissance des caractéristiques géométriques de l'objet à modéliser et sur les concepts de la géométrie projective. Le calcul de l'orientation externe des images n'est pas nécessaire. La reconstruction de l'objet se fait à l'aide des relations topologiques enregistrées dans une base de données relationnelle. La méthode a été validée sur différents types d'objets constitués de faces planes et de lignes remarquables. Elle peut être appliquée pour la modélisation des parties internes et externes d'un bâtiment. ●

## Contacts

Omar AL KHALIL  
alkhalil@ensais2.u-strasbg.fr

Pierre GRUSSENMEYER  
pierre.grussenmeyer@ensais.u-strasbg.fr  
ENSAIS, Equipe Photogrammétrie et Géomatique, Strasbourg, France  
UMR MAP CNRS/MCC 694

## Références

- Al khalil O., Grussenmeyer P & Nour el Din M., 2001.** *3D indoor modeling of buildings based on photogrammetry and topologic approaches.* CIPA, International Symposium 18-21 sept. 2001, Potsdam University, Germany, 7 pages.
- Caprile, B., Torre, V. 1990.** *Using Vanishing Points for Camera Calibration.* International Journal of Computer Vision, 1990, 4, pp. 127-140.
- Clerc, M., Mallat S.** *Shape from Texture through Deformations* <http://www-stat.stanford.edu/~maureen/ShapeFromTexture.html> (12/02/2002).
- Criminisi, A., 1999.** *Accurate visual metrology from single and multiple uncalibrated images.* University of Oxford, Department of Engineering Science, Visual Geometry Group, Publications.
- El-Hakim, S., 2000.** *A practical approach to creating precise and detailed 3D models from single and multiple views.* ISPRS Congress, Amsterdam, 2000, Vol. 33(5), pp. 203-211.
- Grussenmeyer, P., 2000.** *Enquête : les performances des logiciels de photogrammétrie à courte distance.* Revue de l'Association Française de Topographie, 1<sup>er</sup> trim. 2000 N°82, p. 40-42.
- Horn, B.K.P., 1981.** *Hill-Shading and the Reflectance Map.* Proceedings of the IEEE, 1981, Vol. 69(1), pp. 14-47.
- Pentland, A. P. 1987.** *A New Sense for Depth of Field.* IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, Vol. 9(4), pp. 523-531.

**Shan, J. 2001.** *An approach to single image automatic orientation and point determination using ortho-images and DTM.* Photogrammetric record, 2001, vol.17(98), pp.343-353.

**Streilein, A., Grussenmeyer, P., Hanke, K., 1999.** *Zurich city hall- a reference data set for digital close-range photogrammetry.* XVII CIPA International Symposium, October 3-6, 1999. Onlinda, Brazil, CIPA Archives.

**Taylor, C. J., Jelinek, D. 1999.** *Model-based Reconstruction.* <http://www.cis.upenn.edu/~davidj2/summ/wpage/wpage.html> (08/2001).

**Theodoropoulou, I. 1999.** *Single Image Photogrammetry with Analytical Surfaces.* A review prepared for the CIPA Task Group 2 : Single Images in Conservation. <http://www.fpk.tu-berlin.de/~iliana/cipa.htm> (02/2002).

**Van Den Heuvel, F.A., 1998.** *3D Reconstruction from single Image using Geometric Constraints.* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 53(6), pp. 354-368.

## ABSTRACT

*More and more close range photogrammetry software packages include three-dimensional modeling methods based on single images. The objective is in general to rebuild the geometry of an object on the basis of assumptions on its position and its form. Other nongeometrical information can be taken into account in the modeling process. In this paper, we propose a single image modeling method based on the combination of concepts of projective geometry and topology. This study made it possible to work out a 3D model of the old city hall of Zurich within the framework of a project of the International Committee of Architectural Photogrammetry.*