

Processus de création de nuages de points par corrélation d'images

■ Hugo ROSE

Cet article présente les dernières innovations en photogrammétrie et notamment les dernières techniques de génération de nuages de points par calcul de corrélation d'images. Un large choix de solutions logicielles existe et parmi elles, figurent des outils "libres". Ces derniers intéressent tout particulièrement les professionnels comme les architectes, les topographes ou toute autre profession relative à la conservation du patrimoine. C'est pourquoi, une chaîne d'opérations permettant l'intégration et la valorisation de la méthode photo dans un contexte de production doit être mise en place, en vue de son exploitation par des professionnels. Des applications sur des cas concrets à différentes échelles (façades, statues, objets de petite taille) ont été réalisées pour vérifier leur faisabilité en photogrammétrie. Des comparaisons avec la lasergrammétrie permettent d'identifier les avantages et les inconvénients de la méthode photogramétrique.

Depuis quelques années, les nombreux progrès de la photographie numérique et la puissance de calcul croissante des ordinateurs ont permis de grandes avancées dans le domaine de la photogrammétrie. A cela, on peut ajouter que le rapprochement du domaine de la vision par ordinateur et du domaine de la photogrammétrie dans les années 2000, a permis de redonner un engouement certain pour cette technologie. Le facteur déclencheur a été la mise au point de la détection automatique des points de liaison qui consiste à déterminer des points homologues uniquement en se basant sur le recouvrement des images. Plusieurs solutions logicielles commerciales ou libres ont vu le jour depuis 2007. Elles permettent de générer des modèles 3D de manière quasi automatique. Les applications multiples que l'on peut en faire intéressent un grand nombre de professionnels comme les architectes, les topographes ou toute autre profession au service de la conservation du patrimoine.

Étant donnés les résultats impressionnants de certaines équipes d'universitaires et du succès d'applications comme Photosynth de Microsoft pour des utilisations grand public gratuites,

la photogrammétrie se trouve soudainement revalorisée, dans une période où la lasergrammétrie semblait s'imposer dans la plupart des opérations de relevé architectural.

Cet article s'attachera à présenter les dernières évolutions concernant la modélisation automatique d'objets par corrélation d'images, mais aussi à proposer une méthodologie efficace en vue d'obtenir des modèles 3D complets en couplant la photogrammétrie à la lasergrammétrie.

Des exemples de projets à différentes échelles réalisés par photogrammétrie seront également présentés.

Généralités

On peut différencier actuellement trois types de solutions photogrammétriques accessibles par les utilisateurs, ayant pour objectif la génération de nuage de points. Certaines sont "Open Source", d'autres sont payantes.

1. Les solutions "WEB" : ce sont des solutions accessibles par Internet. L'une des plus connues est Photosynth. On remarquera que pour ces solutions, les algorithmes de traitement d'images ne sont pas en accès libre car ils sont développés par

des sociétés privées, comme Microsoft avec Photosynth. Par conséquent, il est difficile de comprendre les tenants et les aboutissants de la chaîne de traitement utilisée.

2. Les solutions proposées sous forme de logiciels commerciaux : l'un des plus connus est le logiciel Photomodeler développé par EOS Systems. Ces logiciels sont payants et il s'agit souvent de "boîtes noires", c'est-à-dire que certains paramètres ne sont pas accessibles par l'utilisateur. Ces logiciels trouvent de nombreux acquéreurs, dans la mesure où leur utilisation est souvent simplifiée.

3. Les solutions dites "logiciels libres" : ces solutions sont le plus souvent développées par des groupes de chercheurs universitaires. L'avantage de ces solutions libres est qu'elles répondent à une demande d'utilisation

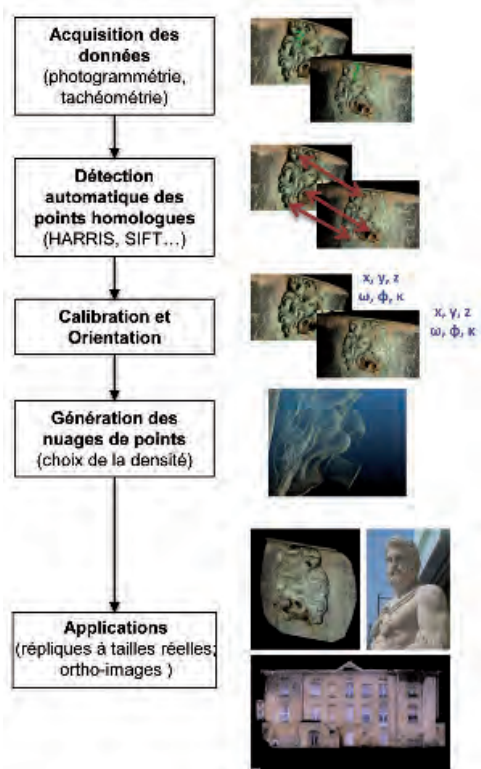


Figure 1. Etapes de la méthode photogrammétrique



réelle par la communauté scientifique et les professionnels de la conservation du patrimoine, à la recherche d'outils puissants et interactifs à faible coût.

Les nombreuses innovations dans le domaine de la vision par ordinateur combinées aux nouvelles avancées photogrammétriques ont permis la modélisation automatique de scènes à partir de photographies. Pour cela, trois défis majeurs ont été résolus :

- Tout d'abord, il a fallu apporter une réponse au problème de la détection automatique des points de liaison entre des images se recouvrant partiellement.
- Le second défi était de résoudre l'orientation automatique d'un groupe d'images les unes par rapport aux autres en utilisant uniquement les points de liaison (détecteurs de HARRIS, *Scale Invariant Feature Transform*).
- Enfin, la dernière étape consistait à générer un nuage dense de points en se basant sur les algorithmes de corrélation automatique. Ces dix dernières années, plusieurs algorithmes sont apparus.

Ces trois étapes représentent le fonctionnement classique d'une chaîne de traitement dans le processus de génération de nuages de points par corrélation d'images. La *figure 1* reprend l'ensemble de ces étapes.

Les outils mis en place

On peut retenir que les solutions logicielles *open source* ou en accès libre utilisent les dernières techniques de corrélation épipolaire dense (CED), comme la technique dite *patch-based*



Figure 2. Reconstruction de scènes selon la méthode dite patch base.
Source : [Habbeke et Kobbelt, 2006]

ou encore la technique utilisant les cartes de profondeur. Ces deux techniques sont à l'heure actuelle les plus efficaces dans leur mise en œuvre.

La reconstruction de scènes selon la méthode *patch-based* permet d'assembler des grands ensembles de patches (zones) comme le montre la *figure 2*.

La création de nuages de points à partir de cartes de profondeur est une méthode flexible mais nécessite d'assembler l'ensemble des cartes de profondeur autour d'un unique modèle.

Les solutions logicielles suivant des approches multi-vues permettent d'obtenir des modèles 3D à la fois précis et complets. Certaines solutions peuvent traiter plus de 50 images simultanément.

Les différentes solutions universitaires actuellement disponibles sont des techniques fonctionnelles avec des mises en œuvre et des chaînes de traitement propres, aboutissant à des nuages de points de qualité différente. La prise en compte des démarches et des paramètres à respecter pour l'acquisition des données sont des facteurs clés dans la prise de décision pour réaliser des projets par photogrammétrie. Il faut prendre en considération le temps nécessaire à l'acquisition des données mais surtout le temps alloué au post-traitement. Ce dernier est d'ailleurs l'un des inconvénients majeurs de la photogrammétrie.

La technologie à privilégier à l'heure actuelle

En photogrammétrie, l'acquisition des données est très souple et s'adapte à presque tous les types de chantier du fait de l'encombrement réduit d'un appareil photo. Il est envisageable de coupler un appareil photo à un appareil



Figure 4. Drone Lheman au décollage.
Source : [Pierrot Deseilligny, 2011]

mobile (cerf-volant, drone, bateau...) comme le montre la *figure 4*. Actuellement, les techniques photogrammétriques tendent à être de plus en plus simplifiées afin d'être exploitables par des personnes n'ayant pas forcément de connaissances accrues en photogrammétrie. En revanche, l'opérateur devra suivre une rigoureuse procédure de prises de vues.

De plus, avec un équipement photographique "classique" (un appareil reflex et un ou deux objectifs), il est possible de reconstruire des scènes en trois dimensions à toutes les échelles. Toutefois, bien que le degré d'automatisation des techniques photogrammétriques soit relativement élevé à ce jour, il est indispensable de consacrer un temps suffisant au post-traitement avant d'obtenir un nuage dense de points.

De plus, la photogrammétrie reste dépendante de la topographie puisqu'elle suppose le géoréférencement, la mise à l'échelle des nuages de points et le contrôle de la précision finale.

Hormis toutes ces remarques, le coût d'investissement reste cependant bien inférieur à celui du scanner laser.

Il est clair que la photogrammétrie et la lasergrammétrie présentent des avantages complémentaires. Des modèles



Figure 3. Cartes de profondeur. Source : [Gardon, 2009]

	Photogrammétrie	Lasergrammétrie
Coût	attractif : entre 3 000 € et 7 000 €	onéreux : de 35 000 € à 100 000 €
Transport	peu encombrant	de peu encombrant à encombrant
	de léger à lourd	de léger à lourd
Polyvalence	S'adapte à tout type d'acquisition possible	
Acquisition	temps d'acquisition moyen	temps d'acquisition rapide
	nécessite un éclairage adéquat	
	nécessite une base (écart entre deux prises de vues)	ne nécessite pas de base
	peut être adapté sur un mobile (drone, cerf-volant, bateau...)	point fixe (sauf si centrale inertielle)
Espace de stockage	faible : quelques Go	important : plusieurs dizaines de Go
Consommation d'énergie	grande autonomie	autonomie moyenne
Résultat de l'acquisition	photos	nuages de points
Temps de post-traitement	long	court
Mise à l'échelle	indirectement (post-traitement)	directement à l'acquisition
Précision	relative à l'orientation absolue	millimétrique et infra-millimétrique
Couleur du nuage de points	directement	en fonction du scanner

Tableau 1. Tableau de comparaison entre la photogrammétrie et la lasergrammétrie.

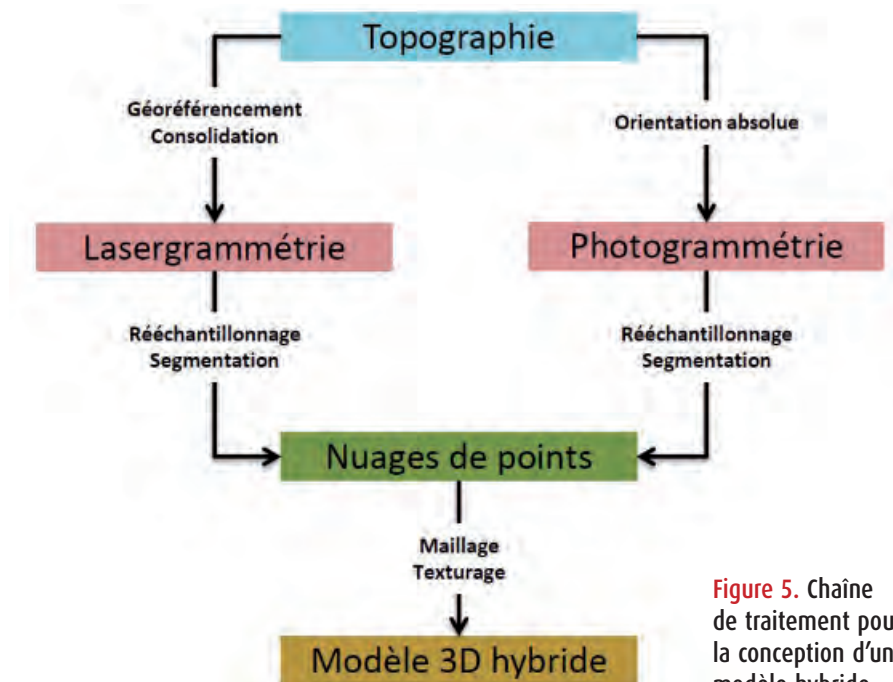


Figure 5. Chaîne de traitement pour la conception d'un modèle hybride.

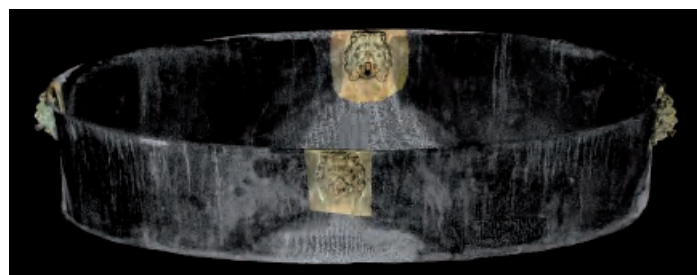


Figure 6. Modèle hybride : modélisation de la vasque par scanner laser FARO FOCUS 3D ; modélisation des mascarons de lions par photogrammétrie.

hybrides peuvent alors être envisagés comme le montrent les *figures 5 et 6*. L'un des inconvénients de la photogrammétrie réside dans le fait qu'elle dépend d'autres techniques pour effectuer le géoréférencement et la mise à l'échelle des nuages de points tout en conservant la donnée couleur attachée à chacun des points.

Parmi le nombre important de solutions existantes de CED, des solutions gratuites, polyvalentes et efficaces existent. Concernant le choix de la solution logicielle à adopter, certaines offrent plus de liberté dans le paramétrage tandis que d'autres sont plus autonomes dans les traitements.

Or ces outils "libres" paraissent "fermés" en termes de contrôle des données et d'évaluation des résultats. Elles nécessitent d'être complétées, notamment au niveau du géoréférencement et de la mise à l'échelle. A l'heure actuelle, il faut considérer la photogrammétrie et la lasergrammétrie comme deux techniques qui se complètent.

Une vaste gamme de réalisations par photogrammétrie

Les derniers outils développés par les équipes de recherche universitaires permettent de modéliser une vaste gamme de matériaux à n'importe quelle échelle. Les seules conditions de contraintes se limitent aux capacités des appareils photos utilisés. Certains matériaux comme le bronze, le marbre poli ou même les dorures sont modélisables par technique photo. Par contre, les matériaux sans texture marquée et de couleurs homogènes sont difficilement modélisables. Lorsque la texture de l'objet n'est pas idéale, il faut veiller à adapter l'éclairage de telle manière à optimiser le rendu de la texture ou encore de s'approcher de l'objet pour que le grain de la texture soit clairement identifiable au niveau pixellaire.

En ce qui concerne l'acquisition, les contraintes se limitent seulement aux 3x3 règles du CIPA [CIPA, 2011] afin de garantir une couverture photographique complète, avoir de la redondance dans les données, faire des



Figure 7. Modèles 3D des façades du château de Theizé réalisés par photogrammétrie.



Statue



Nuage de points



Maillage



Copie à taille réelle

Figure 8. Modèles 3D de la statue d'Hercule dans le jardin du château de Versailles.



contrôles et assurer une certaine organisation pour les prises de vues.

Voici maintenant quelques exemples de projets réalisés à différentes échelles.

• Levés de façade :

Les levés de façade par photogrammétrie permettent de réaliser par exemple des plans d'élévation ou des orthoimages. Les outils libres permettent d'obtenir des nuages de points d'une résolution de 2 à 3 millimètres pour des prises de vues réalisées à une quinzaine de mètres avec les appareils photos classiques de type reflex (avec une résolution du capteur de 12 MPixels). Cette densité de points est nécessaire pour restituer suffisamment fidèlement les détails architecturaux à une échelle de l'ordre du 1/50° voire du 1/20°. Pour la mise à l'échelle, un recalage sur des points d'appui est nécessaire (relevé tachéométrique).

• Modélisations de statues :

La technique CED s'adapte parfaitement à des relevés statuaires et c'est certainement dans ce domaine qu'elle est la plus exploitée. Les nuages de points ainsi obtenus permettent de réaliser des modèles 3D en vue de leur intégration dans des projets de conser-

vation du patrimoine ou encore pour réaliser des copies de statues existantes.

La photogrammétrie s'impose lorsque l'accès aux objets à modéliser n'est pas favorable à une acquisition par scanner. En effet, selon les cahiers des charges imposés dans certaines missions, il n'est pas permis d'utiliser des trépieds, rendant l'utilisation des scanners impossible.

Pour de tels objets, il est possible d'obtenir une précision de l'ordre du millimètre à condition de prendre des cotes de mise à l'échelle d'une précision adaptée.



• Des modélisations d'objets avec une haute précision :

La photogrammétrie permet de modéliser des objets avec une précision inframillimétrique pour étudier l'état de conservation de pièces de musée ou archéologiques. Pour cela, les photographies doivent être réalisées à une distance très courte de l'objet à modéliser, de façon à atteindre une résolution spatiale suffisante.

Le principal défi de la modélisation d'objets de faible dimension réside dans la phase de mise à l'échelle. En effet, deux solutions se présentent : la première consiste à utiliser un pied à coulisse (précision de $\pm 0,2$ mm) et de mesurer des cotes directement sur la statuette ; la seconde solution serait d'utiliser un scanner de haute précision pour effectuer une mise à l'échelle mais cette alternative aurait pour conséquence d'affecter le caractère bon marché de la photogrammétrie. Par conséquent, on comprend facilement que la précision des nuages de points photo-



Figure 9. (à gauche) Nuages de points réalisés avec des photographies en mode macro ; (à droite) Modèle de maillage texturé avec la couleur extraite du nuage de points photogrammétriques.



Figure 10. (à gauche) Photographie du modèle réduit du chapiteau les quatre vents de Vézelay ; (à droite) Modèle maillé et texturé à partir de la couleur du nuage de points photogrammétrique.

Le **CIPA** (*The International Committee for Documentation of Cultural Heritage*) a pour principal objectif l'amélioration des techniques de mesures au service de la conservation des monuments et des sites culturels.

Contact

Hugo ROSE

Ingénieur INSA, Spécialité topographie
rose.hugo@neuf.fr

Références

@CIPA. 3x3 règles du CIPA.
<http://cipa.icomos.org/>.

Pierrot Deseilligny, M. et Clery, I. (2011). *Evolutions récentes en photogrammétrie et modélisation 3D par photo des milieux naturels*.

Gardon, E. (2009). *Fusion de cartes de profondeur en photogrammétrie architecturale*. Rapport technique, ENSG.

Habbecke, M. et Kobbelt, L. (2006). *Iterative multi-view plane fitting*. In VMV'06, pages 73-80.

grammétiques est directement liée à la précision de recalage.

Ces exemples de projets valident l'emploi de méthodes photogrammétriques en relatif mais pas en absolu. Les nuages de points issus de ces méthodes sont fidèles à la référence (points d'appui tachéométriques, cotes de contrôle, laser) à une homothétie près. Enfin, la photogrammétrie permet toujours d'obtenir l'information de couleur des nuages de points, ce qui n'est pas toujours possible avec les scanners laser.

Conclusion

La photogrammétrie se trouve de plus en plus utilisée par les professionnels de la mesure dans le cadre de la modélisation automatisée. En moins de dix ans, il y a eu de nombreuses solutions efficaces développées et les plus adaptées à une utilisation peu contraignante commencent à se départager des autres. Deux facteurs essentiels ont permis de faire évoluer la photogrammétrie au stade d'une utilisation quasi-automatique pour reconstruire des scènes en trois dimensions. Il s'agit de la détection automatique des points homologues et la possibilité de simplifier les protocoles d'acquisition grâce à l'évolution des performances du matériel de prise de vues. A noter que la prise en compte des procédures d'auto-calibration des caméras allège la procédure d'acquisition.

De nombreux projets réalisés à la fois par lasergrammétrie et par photogram-

métrie permettent d'affirmer que la technique photo aboutit maintenant à des résultats similaires, voire de meilleure qualité qu'avec un scanner laser.

Pour conclure, et de manière plus globale, la photogrammétrie peut maintenant faire office d'alternative efficace en termes de qualité à la lasergrammétrie. Elle offre un échantillon de possibilités d'exploitation très diversifiée avec un investissement moindre sachant que le temps de post-traitement handicape cette solution en termes de productivité face au laser.

La photogrammétrie n'a pas pour objectif de se substituer à la lasergrammétrie, mais constitue un outil complémentaire, produisant des données de même nature qu'un scanner laser, et à ce titre facilement intégrables. L'utilisation conjointe des deux technologies ouvre ainsi la voie à la création de modèles hybrides, permettant de répondre efficacement aux besoins en fonction des conditions de relevé, et de tirer parti des avantages respectifs de chaque technique, d'où l'intérêt d'utiliser la lasergrammétrie de pair avec la photogrammétrie. Cette solution permet d'obtenir rapidement des nuages de points à l'échelle et géoréférencés par lasergrammétrie, complétés avec des points de vue photogrammétriques impossibles à réaliser à partir de stationnement laser (nacelle élévatrice, bateau, sous-marin...). Cela ouvre donc de nouvelles perspectives en vue de la réalisation de projets par technique photogrammétrique. ●

ABSTRACT

This article presents the latest photogrammetric innovations, and more particularly new dense correlation computation of images. A wide solutions panel is available and some of them are "open-source". These "open-source" soft interest some of measurement professional as architect, topographer or all other heritage conservation profession. That's why, specific protocol has been determined to integrate and improve the image of the photogrammetric method in a production context. Concrete applications have been made with different scales (fronts, statues, small objects) to confirm their feasibility with photogrammetry. Comparisons with lasergrammetric techniques permit the user to identify advantages and drawbacks of the photogrammetric method.