

Expériences de photogrammétrie rapprochée par Corrélation épipolaire dense

■ Ibrahim ZEROUAL - Abdelkrim LIAZID - Pierre GRUSSENMEYER

L'objectif de cet article est d'évaluer la méthode de Corrélation épipolaire dense (CED) en photogrammétrie numérique rapprochée. Les différentes phases du processus métrologique aboutissant à la génération de nuages de points à partir des images sont discutées. L'utilisation d'un boîtier reflex numérique CANON EOS 5D équipé d'objectifs de 20 mm et 28 mm nous a permis de tester la méthode sur trois objets et d'en déduire la démarche applicable à de futurs projets.

MOTS-CLÉS

Photogrammétrie, corrélation dense, métrologie, étalonnage, précision, exactitude

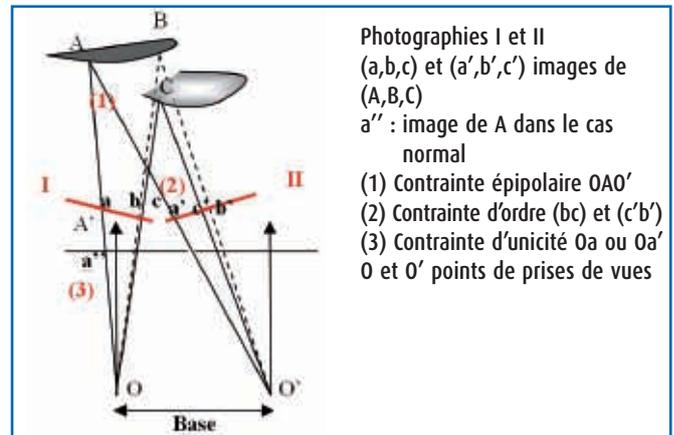


Figure 1. Contraintes géométriques en stéréoscopie

Introduction

Les méthodes algébriques et numériques récentes ont permis d'améliorer le traitement des vues multiples en photogrammétrie. Dans un couple stéréoscopique, la géométrie épipolaire nous informe que pour chaque point observé sur une image, ce même point peut être observé sur l'image correspondante le long d'une droite dite "épipolaire" (figure 1). La définition d'un intervalle d'éloignement de l'objet par rapport aux prises de vues correspond à un intervalle le long de cette droite. L'intervalle de recherche pour l'appariement n'est donc plus toute l'image, mais se situe le long d'un segment. Les caractéristiques des prises de vues sont généralement inconnues (paramètres de l'objectif, conditions de mise au point, position des points de vue, orientation de l'appareil photo) et affectent les opérations de mesure et de calcul. Le potentiel métrique des systèmes de mesure 3D basé sur des appareils photographiques numériques a été souligné dans (Förstner, 2004 ; Sanz-Ablanedo et al. 2009 ; Eos Systems Inc., 2010) ; il faut néanmoins s'imprégner de la démarche algorithmique pour être en mesure de valider les résultats des calculs.

Les méthodes SIFT (Scale Invariant Feature Transform) développée par Lowe (2004) et SURF (Speeded Up Robust Features) sont très utilisées pour la mise en correspondance des points d'intérêts entre les images en photogrammétrie et en vision par ordinateur. Au voisinage de points particuliers et des points d'intérêts, il est important d'avoir un signal suffisamment riche pour permettre une bonne identification. Les cibles codées facilitent l'extraction automatique de points. D'autre part, les grandes variétés de déformation sur l'objet limitent l'usage de la corrélation, cela implique des configurations particulières pour les

prises de vues. L'utilisation d'une approche multi-échelle peut améliorer la mesure automatique (Förstner, 1986 ; Kalantari et Jung, 2008).

Les développements récents en photogrammétrie numérique rapprochée cherchent à résoudre les problèmes d'exactitude, de vitesse de mesure, d'automatisation des différents calculs, d'intégration de processus et de rapport coût/délai. Les systèmes peuvent être dédiés à la mesure de points, à la mesure des déformations et des mouvements, des découpes 3D et des surfaces 3D discrètes. Les développements se concentrent aussi sur des applications dynamiques plus robustes ou sur l'intégration des systèmes dans les chaînes de production où l'exactitude recherchée doit être élevée tout en réduisant les coûts (Luhmann, 2010). Plusieurs ouvrages abordent la qualité et l'exactitude de la mesure en photogrammétrie rapprochée (Mikhail et al., 2001), (Fryer et al., 2007).

Principe et méthodes

Le monde tridimensionnel se projette dans deux images bidimensionnelles ; c'est une application d'un espace de dimension 3 dans un espace de dimension 2 par réciprocity de la stéréoscopie. La généralisation des concepts de la géométrie épipolaire et l'application de la théorie des invariants apportent plusieurs solutions relatives aux applications de la photogrammétrie rapprochée (Grussenmeyer et Alkhalil, 2002) : orthophotographies, birapport et redressement, restitution mono image, etc.

Le principe de la méthode de traitement en photogrammétrie se décompose en deux étapes :

- ▶ - L'étalonnage de l'appareil photographique (ou de plusieurs appareils) et définition des éléments internes.
- Reconstitution et restitution de l'objet en utilisant les principes de corrélation comme par ex. la CED.

■ Etalonnage

Si la problématique que nous soulevons dans cet article est axée sur l'influence des erreurs de métrologie d'une mire codée (format A0 par ex.) représentant les points de référence, la formulation du problème de prise en compte de ces erreurs côtoie des domaines de recherche largement investis (Hartley et Zisserman, 2004). En effet, la formulation qui suppose pouvoir estimer conjointement la position de chaque vue, la structure du modèle et les paramètres de l'appareil photographique est largement utilisée en photogrammétrie. L'approche, du fait qu'elle requiert un modèle approximatif de la mire, est en retrait par rapport aux travaux d'étalonnage 3D mais garde l'avantage important d'intégrer un vecteur de paramètres internes de caméra complexe apte à prendre en compte des déformations d'image importantes. Des techniques d'étalonnage incluant la prise en compte des déformations d'images ont été introduites par les photogramètres utilisant des caméras non étalonnées (Luhmann et al., 2006).

Il est utile de rappeler la nécessité de définir les éléments internes de la caméra. La distance principale, le format de l'image et les distorsions sont autant de facteurs à calculer pour le projet. En métrologie, l'étalonnage est basé sur des observations en coordonnées images sur des cibles codées. L'appareillage se compose d'un appareil photographique et d'une mire 2D contenant 100 points cibles permettant un calcul des éléments internes à partir de plusieurs images (figure 3). L'optimisation d'un processus d'étalonnage se base sur la méthode des faisceaux. La formulation (1) de l'expression de l'équation de colinéarité est donc de la forme :

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ -c \end{bmatrix} = k.R. \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

En exprimant les coordonnées corrigées dans le système image on obtient la relation :

$$\begin{aligned} x' &= x - x_0 + \bar{\Delta}x \\ y' &= y - y_0 + \bar{\Delta}y \end{aligned} \quad (2)$$

Dans cette équation les termes x_0 et y_0 représentent les coordonnées du point principal, x et y sont les coordonnées mesurées du point p. $\bar{\Delta}x$ et $\bar{\Delta}y$ représentent la distorsion totale regroupant les distorsions radiale Δx_r , tangentielle Δx_t , et affine Δx_a .

$$\begin{aligned} \bar{\Delta}x &= \Delta x_r + \Delta x_t + \Delta x_a \\ \bar{\Delta}y &= \Delta y_r + \Delta y_t + \Delta y_a \end{aligned} \quad (3)$$

A partir de l'équation (3) nous introduisons la formulation de la fonction de distorsion, définie par Brown (1971), impliquant que les coefficients comme paramètres inconnus.

$$\begin{aligned} \Delta x_r &= x'(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) \\ \Delta y_r &= y'(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) \\ \Delta x_t &= P_1[r^2 + 2x'^2] + 2P_2 x' y' \end{aligned} \quad (4)$$

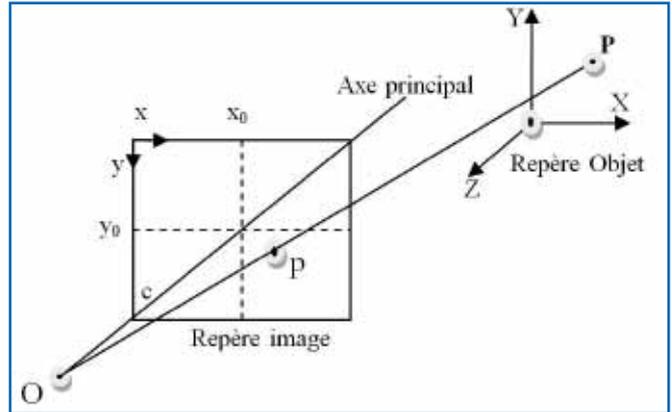


Figure 2. Schéma de principe

$$\begin{aligned} \Delta y_t &= P_2[r^2 + 2y'^2] + 2P_1 x' y' \\ \Delta x_a &= C_1 x' + C_2 y' \\ \Delta y_a &= 0 \end{aligned}$$

Où dans ces expressions :

- (X, Y, Z) sont les coordonnées du point objet.
- (X_0, Y_0, Z_0) sont les coordonnées du centre perspectif.
- x', y' sont les coordonnées images rapportées au point principal,
- x_0, y_0 les coordonnées du point principal dans le référentiel image,
- K_1, K_2, K_3 paramètres du polynôme modèle de distorsion radiale,
- P_1, P_2 paramètres du polynôme de distorsion tangentielle,
- $r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$; distance radiale rapportée au point principal.

Le traitement de la projection perspective par les moindres carrés aboutira au calcul du vecteur des paramètres inconnus P , en supposant par ailleurs un système de coordonnées - images avec des axes orthogonaux et des pixels carrés :

$$P = [x_0, y_0, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2, C_1, C_2, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \chi]^T \quad (5)$$

Les données objet (X, Y, Z) et image $(x', y', -c)$ contribuent pour chaque faisceau au calcul de 15 paramètres inconnus dont 9 paramètres relatifs aux éléments internes et 6 paramètres externes de rotation (ω, ϕ, χ) et de translation (X_0, Y_0, Z_0) . Pour un ensemble de faisceaux, $(9 + 6 \times m)$ paramètres seront à définir. L'utilisation de systèmes d'observations très redondants est nécessaire pour obtenir des résultats cohérents.

■ Méthode de restitution

En photogrammétrie numérique, la restitution ou reconstruction en trois dimensions (3D) est basée sur la génération de nuages de points. Les méthodes denses en stéréoscopie sont limitées à des appareils étalonnés et des points de vue très proches les uns des autres (Luhmann, 2010), (Riecke-Zapp et Peipe, 2006). Les applications de modélisation et visualisation nécessitent des reconstructions denses ou quasi denses. Le calcul de la mise en correspondance débute par l'appariement de quelques points d'intérêts comme par ex. des cibles pour affiner l'orientation en détectant et en éliminant des points aberrants. Les méthodes de



corrélations sont basées sur des modèles de densification recherchant des points homologues sur un couple de photographies ou sur plusieurs photographies. L'orientation automatique est ensuite basée sur les points de jonction reliant les différentes photographies.

Les relations de stéréoscopie en photogrammétrie nous permettent de calculer la position tridimensionnelle (3D) d'un point correspondant aux points homologues. Par rapport aux contraintes, les solutions de l'appariement peuvent être multiples ou inexistantes (taux de bruit). Il devient donc nécessaire d'appliquer des contraintes au problème de la corrélation pour converger vers une solution, unique et stable par rapport à l'objet. L'acquisition à la génération du modèle 3D est sujette à un ensemble de sources d'erreurs qui dépendent principalement :

- Des paramètres intrinsèques de la caméra, et en particulier les distorsions optiques qui transforment les droites (dont les épipolaires) en courbes ;
- De la position et l'orientation des appareils photos, qui diffèrent du cas normal ;
- Du rapport R (Base/Eloignement), du recouvrement des images, et de l'existence des objets sur les images.

Le rapport R doit être optimisé lors de l'acquisition des photographies, les paramètres intrinsèques sont déterminés pendant l'étalonnage de l'appareil. Les distorsions et les écarts au cas normal sont corrigés par rectification épipolaire (création de deux caméras idéales virtuelles, rapportées au cas normal). La ressemblance entre les niveaux de gris dans les images pour les points homologues m et m' permet de calculer la corrélation entre images. La formulation suivante permet d'exprimer cette fonction (Kasser et Egels, 2001 ; Hullo, 2010) :

$$m[x, y, I(x, y)] \Leftrightarrow m'[x', y', I'(x', y')] \quad (6)$$

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à la réponse de cette technique aux besoins de la reconstruction 3D. Les critères élaborés sont basés sur :

- La géométrie : niveau de détail et exactitude du modèle orienté ;
- Les taux qualitatifs et quantitatifs permettant l'analyse de la reconstruction.

En second lieu, la technique utilisée actuellement pour des relevés et mesures métrologiques peut faire l'objet de comparaison par rapport aux données objets. Les éléments

externes des faisceaux sont donc calculés et analysés par rapport à la situation réelle de prise de vues.

Le Système de mesure

Le dispositif principal d'un système en photogrammétrie rapprochée est basé sur la technologie des appareils photographiques. Le choix du dispositif approprié est basé sur la résolution, la vitesse d'acquisition, la synchronisation, la quantité de données, l'information spectrale, le champ visuel, les interfaces numériques et le coût. De nos jours la variété des appareils photographiques et de caméras disponibles pour l'acquisition d'images est énorme. Basé sur la technologie CCD et CMOS, les appareils numériques sont disponibles avec de très hautes résolutions (> 60 Mpixel), des tailles de pixel variant de 1 micron à 15 microns, avec des formats différents (Luhmann et al. 2006). Pour nos expérimentations, nous utilisons un appareil photographique EOS 5D, afin d'en analyser les possibilités métrologiques.

Le système de mesure PhotoModeler Scanner d'EOS Systems est utilisé pour les mesures et les traitements photogramétriques. Le processus de calcul se répartit entre orientation, détermination des paramètres externes et mise en place d'un processus additionnel (contraintes) permettant d'améliorer la précision de la restitution ou du modèle 3D. La génération d'un modèle 3D se fait sur la base d'un couple ou d'un ensemble de vues réparties de façon homogène par rapport à l'objet. Une base de formes géométriques élémentaires (cylindre, cône...) permet de reconstruire les parties simples de l'objet. La création du nuage de points permet une densification et un choix sur la méthode de modélisation 3D de l'objet.

Par rapport aux principes théoriques, la démarche des professionnels reste sujette à des erreurs dans les opérations pratiques de mesures. Le temps de prise de vues ainsi que le milieu environnant, la résolution et la position géométrique des images sont un ensemble connexe non négligeable pour l'analyse de la qualité d'un traitement photogramétrique. L'étalonnage reste donc une étape nécessaire pour la démarche de la qualité. L'expérience et le matériel utilisé pour ses opérations se résument comme suit :

- PhotoModeler version 5.2 et PhotoModeler Scanner version 7.

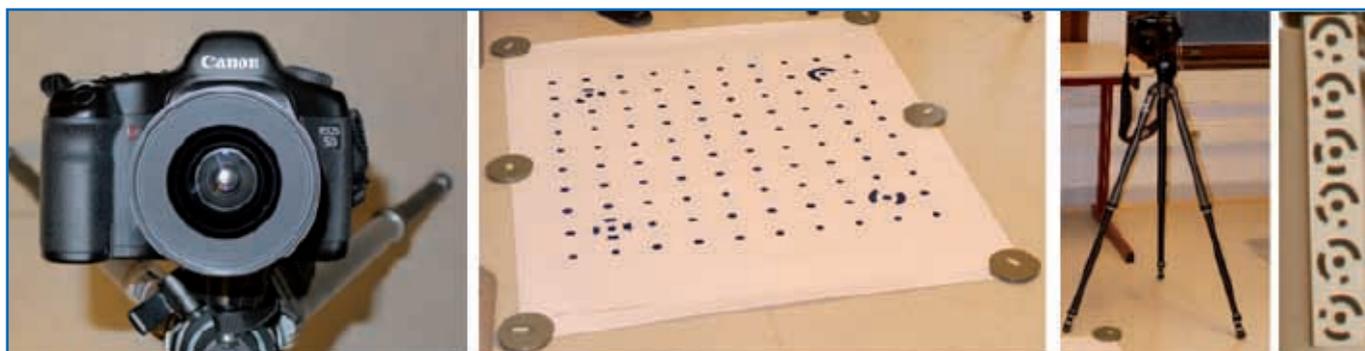


Figure 3. Appareil réflex Canon, mire A0 d'étalonnage, trépied et cibles

- Appareil Canon EOS 5D équipé d'objectifs 20 et 28 mm.
- Mire de calibration 2D (100 points de référence).
- Cibles circulaires PhotoModeler 12 bits réparties sur les objets.
- Scanner 3D Trimble GX.

Désignation	Canon EOS 5D
Taille en mm x mm	35.8 x 23.9
Matrice image	4368 x 2918
Rapport image	3/2
Sensibilité	ISO 100-1600
Type capteur	CMOS
Objectifs	20 et 28 mm
Vitesse obturation	1"/8000 - 30"

Tableau 1. Caractéristiques du système de prises de vues

Notre expérience utilise trois tests définis en fonction de la taille, de l'éloignement et de la complexité du sujet. Ceux-ci sont caractérisés par les paramètres résumés dans le tableau suivant :

Expériences	Volume	Eloignement	Recouvrement
Test 1 (laboratoire)	10*10*3.5 m ³	5 m	60-80 %
Test 2 (Wild B9)	1.5 m ³	1 m	>70%
Test 3 (pièce)	64 dm ³	0.5 m	>70%

Tableau 2. Caractéristiques des tests effectués

Les opérations de détermination sur l'objet sont appliquées au premier test en laboratoire : l'acquisition au Scanner Laser Trimble GX et les mesures de coordonnées avec RealWorks 6.5 ont permis de calculer les coordonnées des 102 points (17 blocs de 6 cibles). L'exactitude des mesures est limitée à 5 mm sur l'objet (avec le scanner Trimble GX) et

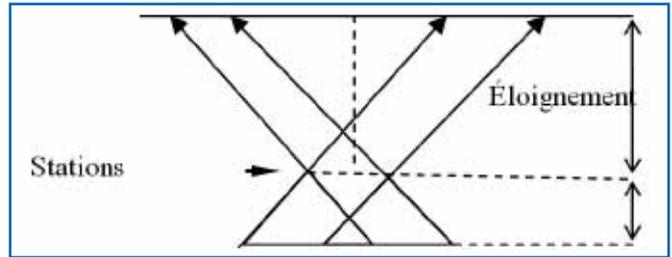


Figure 5. Schéma d'acquisition pour la CED

reste suffisante pour valider notre expérience. La distance station/cible est de l'ordre de 5 m. En ce qui concerne les deux autres tests, les distances entre cibles suffisent à orienter le modèle. La mise en place d'un schéma d'acquisition basée sur des couples proches du cas normal est souhaitable pour la CED.

Résultats et discussion

La fiabilité du processus et son impact pour satisfaire une bonne reconstruction implique la considération de plusieurs paramètres.

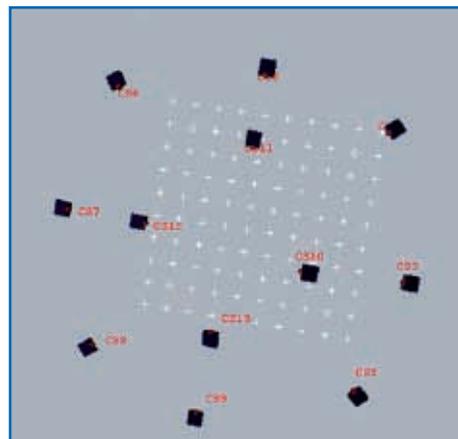


Figure 6. Configuration des stations et des cibles de référence

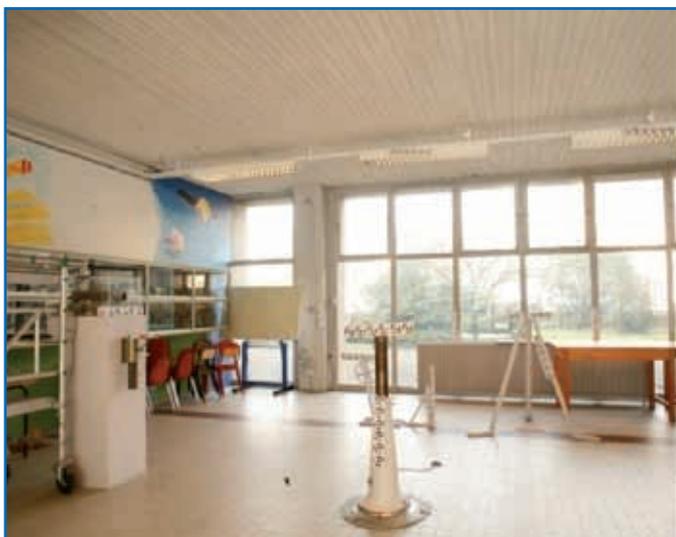
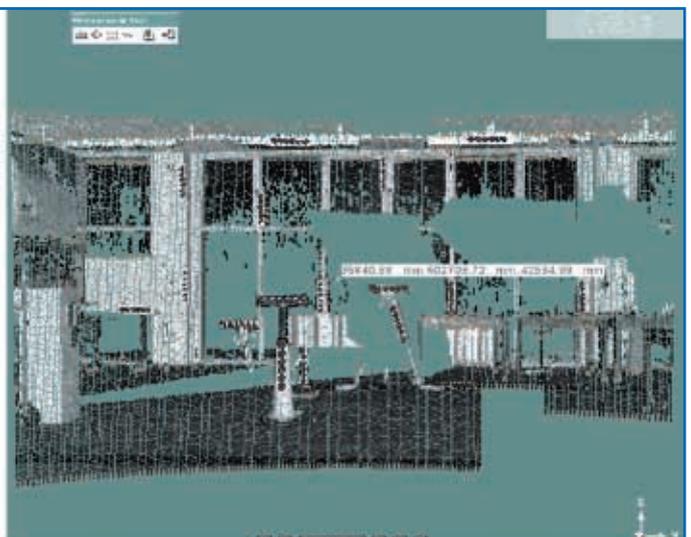


Figure 4. Acquisition de la scène au scanner Trimble GX





Paramètres internes	Caméra 20 mm		Caméra 28 mm	
	Dist. principale - mm	20.591	20.749	28.583
Format- mm	35.792x23.927	35.808x23.927	35.891x23.927	35.851x23.927
Point principal mm	17.951-11.963	17.995-11.963	17.857-12.107	17.916-11.963
K1	2.1 x10 ⁻⁴	2.21x 10 ⁻⁴	1.31x 10 ⁻⁴	1.30 x10 ⁻⁴
K2	-3.57x 10 ⁻⁷	-3.27x10 ⁻⁷	-1.659x10 ⁻⁷	-1.62x10 ⁻⁷
K3	0	0	0	0
P1-P2	0	0	1.07x10 ⁻⁵ ; 0	1.071x 10 ⁻⁵ ;0

Tableau 3. Résultats des éléments internes de l'étalonnage

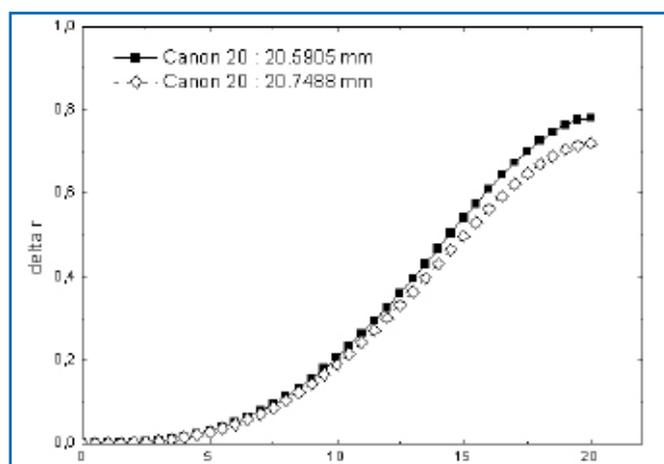


Figure 7. Courbes de distorsion (objectif de 20 mm)

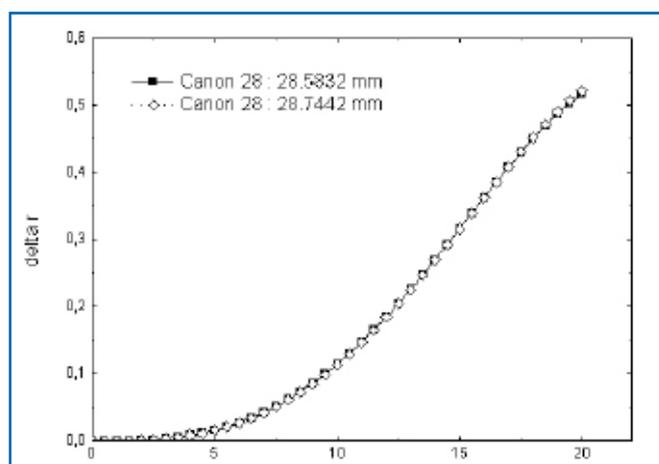


Figure 8. Courbes de distorsion (objectif de 28 mm)

■ Etalonnage et orientation

La mire de format A0, comprenant 100 points a permis d'étalonner les appareils Canon EOS 5D. La figure 6 illustre le résultat de l'étalonnage sur les 100 points de référence. Pour cette opération, les résidus à l'issue du calcul sont de l'ordre de 0.5 pixel.

Les paramètres issus des calculs d'étalonnage sont résumés dans le tableau suivant. De très faibles variations sont constatées par rapport aux configurations des images utilisées :

Les courbes de distorsions pour les deux objectifs (20 et 28 mm) pour l'appareil canon EOS 5D sont représentées sur les figures 7 et 8. Elles expriment la distorsion radiale (en considérant que les autres distorsions sont négligeables). Les paramètres P1 et P2 fournissent une correction maximale de 0.3 micron (= 0.04 pixel).

Le calcul en bloc du modèle 3D par les faisceaux fournit les résultats suivants :

Test étalonnage	Ecart-type en x (mm)	Ecart-type en y (mm)	Ecart-type en z (mm)	Ecart type sur les résidus (pixels)
Canon 20 mm	0.3 E-03	1,2 E-03	0.9 E-03	0,025
Canon 28 mm	1,2E-03	0.7 E-03	1,1 E-03	0.047

Tableau 4. Ecarts obtenus sur les points de la mire d'étalonnage

Le processus d'acquisition comprend les prises de vues pour l'étalonnage et les prises de vues pour la restitution. Dans le premier test, l'expérience menée au laboratoire utilise 17 mires représentant 102 cibles codées sur 12 bits. L'espace,

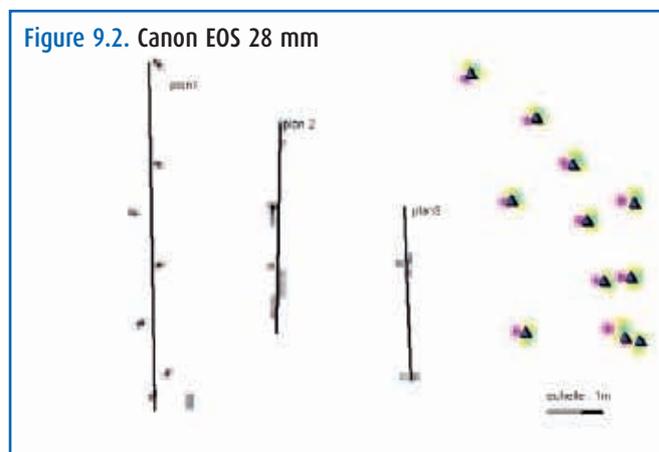
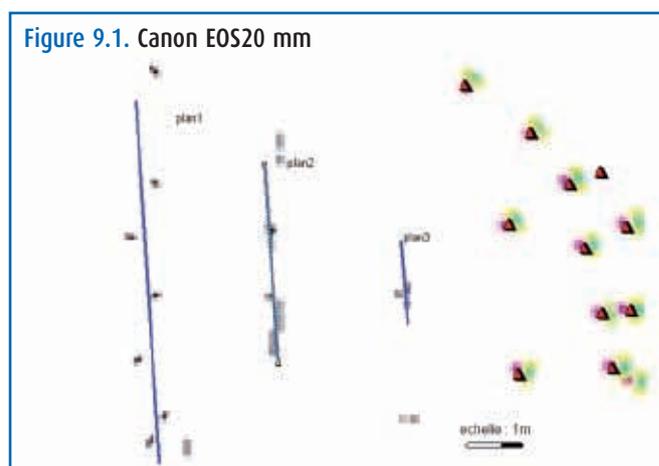


Figure 9. Configuration globale appareil photo /cibles

objet de l'expérience est défini dans un volume de 10 x 10 x 3.5 m³ avec trois plans contenant les cibles (figure 9). Les stations d'observations sont placées sur des points très proches, la détection des plans est constatée avec des décalages de ± 5mm. Les figures 9.1 et 9.2 présentent cet aspect par rapport à l'objet réel (position, dimension, forme). On constate que la configuration globale est bien conservée.

La restitution par CED est abordée après avoir validé les orientations sur les images corrigées des distorsions. Les écarts moyens sur les points d'appuis sont résumés dans le tableau 5. On note la valeur de la composante de l'écart spatial résiduel en accord avec la précision globale du système de mesure (≈5mm) calculé sur la base de 103 points. L'écart-type sur les résidus est déterminé sur un échantillon de 400 points répartis entre points de liaisons et points d'appuis.

Chantiers test	Ecart x (mm)	Ecart y (mm)	Ecart z (mm)	Ecart-type sur les résidus (pixels)
Canon 20 mm	3,1	3,2	3,2	0,100
Canon 28 mm	1,8	2,1	5,6	0,090

Tableau 5. Ecarts sur les points d'appui

Les différences entre les distances calculées par le système photogrammétrique et les mesures de distances entre stations de prises de vues sont résumées dans le tableau 6. Ce contrôle permet de valider l'orientation externe, notamment la position des stations.

Numéro de station	St2-St3	St3-St4	St4-St5	St5-St6
Distance mesurée (mm)	1450	1180	1230	1175
Distance calculée (mm)	1449	1181	1229	1176

Tableau 6. Différences entre distances mesurées et calculées

Les écarts observés sont dus aux mesures approchées et à l'incertitude du système de référence établi lors de l'opération de référencement. Le choix des points de référence par rapport aux images et la mise en place de contraintes géométriques permet d'améliorer le calcul du modèle 3D. Le tableau agrégé des écarts montre une précision de l'ordre de 2.10-4 m sur le positionnement des points par voie photogrammétrique.

Test	Ecart x (mm)	Ecart y (mm)	Ecart z (mm)
Canon 20 mm	0,3	0,3	1
Canon 28 mm	0,2	0,2	0,3

Tableau 7. Affinement du calcul 3D pour les deux tests

L'analyse des paramètres du traitement global (étalonnage, orientation et restitution) fournit une précision relative moyenne de 1/10 000 par rapport à la taille de l'objet.

■ La restitution

En photogrammétrie la reconstruction est basée sur la correspondance d'images et l'intersection des rayons homologues. Par rapport à la démarche classique, il est judicieux

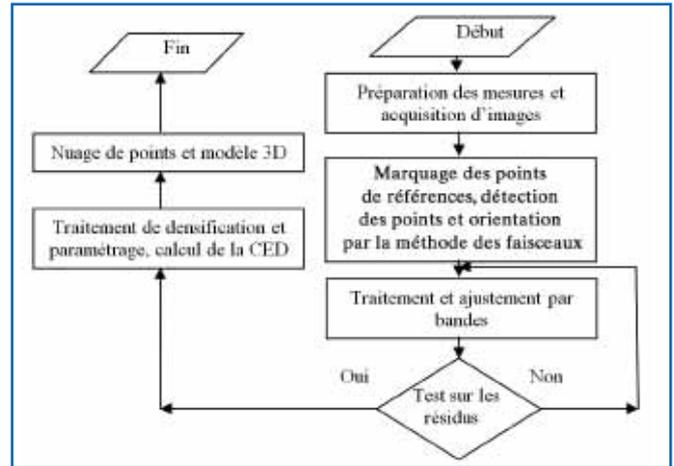


Figure 10. Processus de traitement

d'analyser le rapport Base/Eloignement pour extraire une position idéale des stations de prises de vues. Les étapes du processus photogrammétrique sont représentées sur la figure 10.

La corrélation pour l'orientation relative

La corrélation multi-vue est réalisée automatiquement en utilisant le module d'orientation sans tenir compte des coordonnées-objets. Après segmentation du fichier généré, les classes d'erreurs en pixels définies pour les trois tests permettent d'encourager cette démarche pour aborder la restitution. Globalement l'erreur de correspondance est inférieure à 1 pixel. Les tableaux suivants illustrent les résultats de ce calcul pour les trois tests. Le nombre de points appariés exprimant une bonne corrélation pour l'orientation relative selon les classes d'erreurs entre 0 et 3 pixels. Les valeurs aberrantes ou fausses sont rejetées.

Test 1(laboratoire)	Nombre de points	Taux de présence
Classe [0,1 pixel]	174	50%
Classe [1,2 pixels]	133	38.2%
Classe [2,3 pixels]	41	11.8%

Tableau 8. Répartition des erreurs sur les coordonnées-images pour le test 1

Test 2 (wild-B9)	Nombre de points	Taux de présence
Classe [0,1 pixel]	379	59.2%
Classe [1,2 pixels]	202	31.6%
Classe [2,3 pixels]	59	9.2%

Tableau 9. Répartition des erreurs sur les coordonnées-images pour le test 2

Test 3 (pièce)	Nombre de points	Taux de présence
Classe [0,1 pixel]	248	50%
Classe [1,2 pixels]	170	34.2%
Classe [2,3 pixels]	78	15.8%

Tableau 10. Répartition des erreurs sur les coordonnées-images pour le test 3



Projet	Nombre de couples	Nombre de points	Facteurs d'intersection relative (%) et absolue (mm) des rayons homologues	Angle d'intersection des rayons (degrés)
Test 1 : laboratoire	26	8009	0.00051- 0.000005 2.55 - 0.025 (mm)	1.866°-81.540°
Test 2 : Wild B9	47	17851	0.005-0.00001 5 - 0.01 (mm)	4.476°-89.300°
Test 3 : pièce mécanique	21	19884	0.0085-0.000019 1.91 - 0.004 (mm)	7.070°-89.960°

Tableau 11. Résultat des traitements pour les 3 tests.

Densification et restitution

Les objets étudiés sont illustrés sur les *figures 11 à 13*. La génération du nuage de points est primordiale car elle permet de fixer des conditions optimales pour les prises de vues, dont le rapport Base / éloignement. Sachant que la méthode CED se base sur un calcul par couple de faisceaux, l'algorithme dispose de $(n^2-n)/2$ possibilités pour la densification (Barazzetti, 2010).

Un rapport compris entre 0.1 et 0.3 pour le calcul des intersections entre points appariés par la CED est conseillé (Hullo, 2010). Le *tableau 11* présente les résultats pour des valeurs

Base / éloignement compris entre 0.1 et 0.3. Les angles des rayons intersectés sont variables et nous informent sur la détermination stéréoscopique du point.

Les nuages de points ainsi générés sont tributaires de l'ensemble des traitements appliqués en amont à savoir l'orientation interne et l'orientation externe. La comparaison avec des données auxiliaires (externes et indépendantes) permet de certifier le processus de mesure et de calcul.

Il existe plusieurs indicateurs permettant de juger de la qualité d'une bonne restitution. Le facteur d'intersection exprime la qualité des intersections spatiales (*figure 14*).

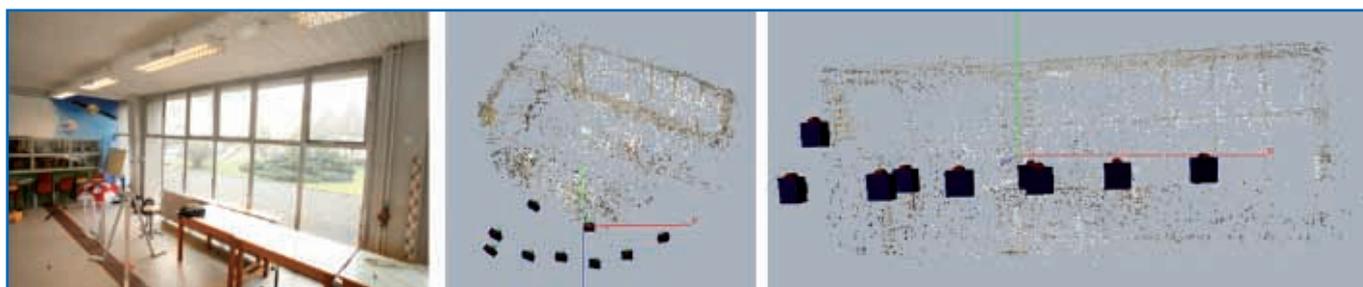


Figure 11. Résultat du calcul 3D (laboratoire, test 1)

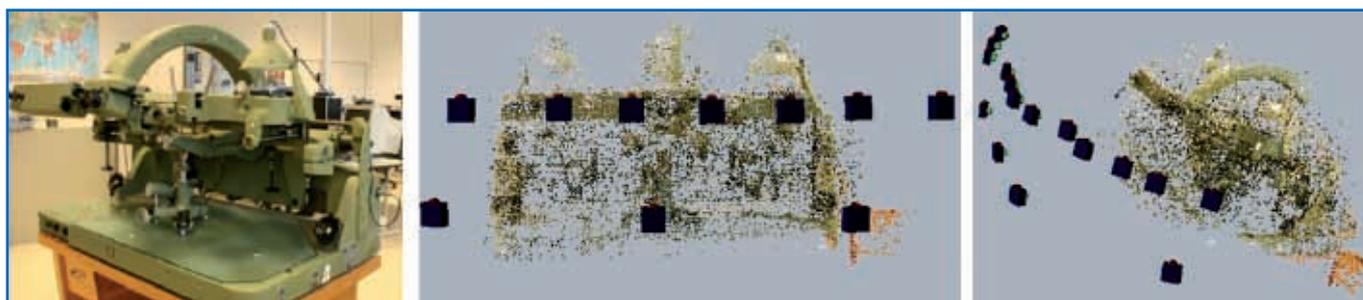


Figure 12. Résultat du calcul 3D (Wild B9, test 2)

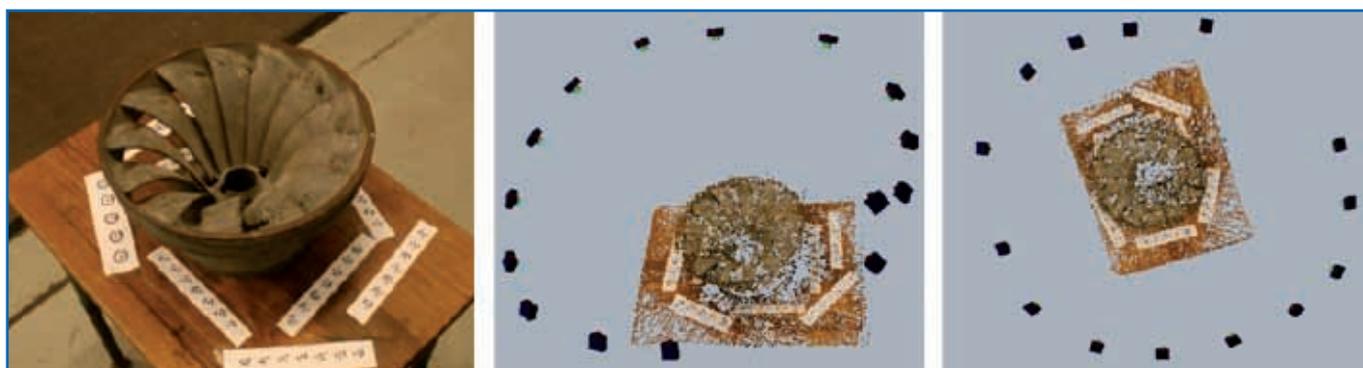


Figure 13. Résultat du test (pièce mécanique, test 3)



Figure 14. Intersections de rayons homologues (test 3)

▶ Un facteur d'intersection de 0.1 % signifie que l'écart entre les rayons homologues est de l'ordre du millième de la taille de l'objet.

Dans la pratique, ni le marquage, ni l'étalonnage et l'orientation ne sont parfaits. Ceci implique que les rayons homologues ne s'intersectent pas mais définissent au voisinage du point considéré un espace métrique permettant de choisir le point le plus probable calculé sur la base d'une distance maximale entre rayons. En raison de l'erreur de mesure, ces rayons ne s'intersectent jamais en un point parfait dans l'espace 3D, la figure 15 illustre les conditions

d'intersection des rayons homologues pour les trois tests (à partir d'une sélection de points). Un facteur d'intersection de 0.1 % correspond à une bonne restitution. Pour les travaux de précision ce rapport doit être inférieur à 0.01 % (Luhmann, 2010 ; Fraser et Cronk, 2010). Les résultats obtenus sur des objets volumineux ($\approx 100 \text{ m}^3$) confirment les développements récents de la méthode en métrologie industrielle (Ozbek et al., 2010 ; Arias et al., 2010). L'apport des données auxiliaires et l'indexation dans les traitements de primitives géométriques est une alternative pour la reconstruction 3D (Jian-Dong et al., 2009).

Conclusion

L'apport de la Corrélation Epipolaire Dense (CED) est d'une grande importance en photogrammétrie numérique rapprochée. D'un point de vue géométrique, la corrélation s'avère très performante à condition de valider les différentes étapes du traitement à l'aide d'indicateurs : étalonnage des appareils photographiques, orientation externe par compensation des faisceaux et restitution du nuage de points. La technique est indépendante de la taille de l'objet. En termes de mise en œuvre, l'utilisateur sera confronté au choix de l'appareil photographique, à la répartition adaptée des stations de prises de vues, à la configuration des cibles (codées ou non) et au choix des couples d'images pour la CED. Les opérateurs SIFT ou SURF issus de la vision par ordinateur permettent dans certains cas de s'affranchir de cibles. Nous avons utilisé une solution commerciale (PhotoModeler Scanner) pour notre étude basée sur l'exploitation de couples d'images pour la génération de nuages de points. Des solutions multi-images automatiques existent en open-source (Bundler et

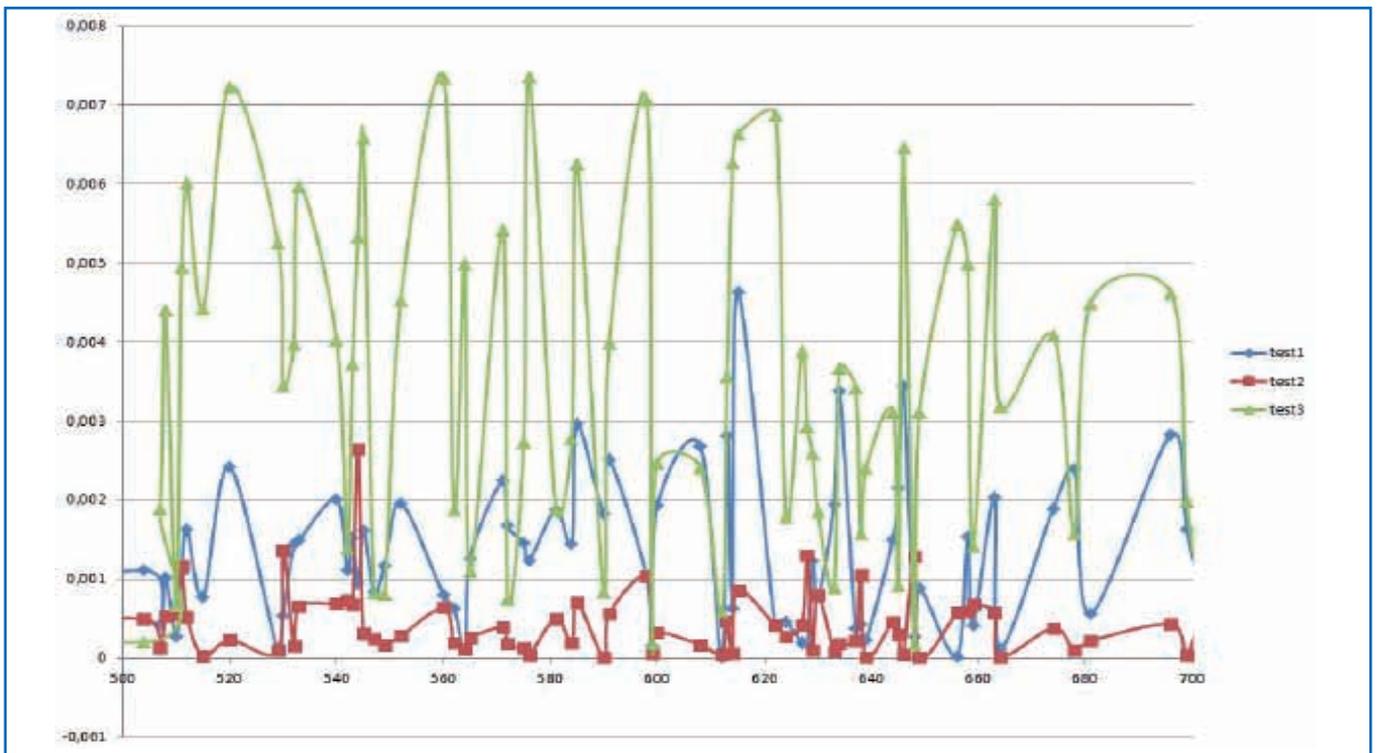


Figure 15. Facteurs d'intersection des rayons homologues pour les 3 tests



PMVS par ex.), sous la forme de services Web (Arc3D, Photosynth par ex.) ou d'applications téléchargeables (MicMac et Apero de l'IGN). Les techniques de corrélation dense pour la génération de nuages de points en photogrammétrie numérique constituent une alternative intéressante à celles proposées par le balayage laser. ●

Remerciements

Cette étude a été réalisée à l'INSA de Strasbourg. Nos remerciements vont aux membres du groupe PAGE, notamment à Samuel Guillemain pour sa disponibilité au cours des expérimentations.

Contact

Ibrahim ZEROUAL

Faculté des sciences de la terre, Université d'Oran
zeroual_ib@yahoo.fr

A. LIAZID

Laboratoire LTE-ENSET-Oran, B.P. 1523 El Mnaouer 31000 - Oran
liazid@enset-oran.dz

Pierre GRUSSENMEYER

INSA de Strasbourg, Groupe PAGE équipe TRIO-LSIIT UMR 7005
pierre.grussenmeyer@insa-strasbourg.fr

Bibliographie

Ouvrages

Förstner W., 2004. *Manual of photogrammetry, 5th edition*, ASPRS, chap. 11, 'quality of 3D points', pp. 800-804.

Fryer, J., Mitchell, H., Chandler, J. (eds), 2007. *Applications of 3D Measurement from Images*. Whittles Publishing, Scotland, 336 pages.

Hartley, R., Zisserman, A., 2004. *Multiple view Geometry in computer vision*. Cambridge University Press, 672 pages.

Kasser M. and Egels Y., 2001. *Digital Photogrammetry*, Taylor and Francis, 351 pages.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I., 2006. *Close Range Photogrammetry: Principles, Methods and Applications*. Whittles Publishing, 528 pages.

Mikhail, E.M.; Bethel, J.S., McGlone, J.C., 2001. *Introduction to Modern Photogrammetry*. John Wiley & Sons, 496 pages.

Revues

Arias P., Ordonez C., Lorenzo H., Herraes J., Armesto J., 2007. *Low cost documentation of traditional agro-industrial buildings by close range photogrammetry*, Building and environment, Elsevier, Vol. 42: 1817-1827.

Brown D. C., 1971. *Close range camera calibration*, Photogrammetric Engineering 37(8): 855-866.

Fraser C., Cronk S., 2009. *A hybrid measurement approach for close range photogrammetry*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 64(3): 328-333.

Grussenmeyer P., Al Khalil O., 2002. *Solutions for exterior orientation in photogrammetry, a review*. The photogrammetric record,

an international journal of photogrammetry, Vol. 17(100): 615-634.

Hullo J. F., 2010. *Acquisition de nuages de points denses par photogrammétrie terrestre*. Revue XYZ n°122, pp. 19-26.

Jian-dong Z., Li-yan Z., Xiao-yu D, Zhi-an D, 2009. *3D curve structure reconstruction from a sparse set of unordered images*, Computers in industry, Vol. 60(2): 126-134.

Kalantari, M., Jung, F., 2008. *Estimation automatique de l'orientation relative en imagerie terrestre*, revue XYZ, n°114, pp. 59-63.

Lowe D. G., 2004. *Distinctive Image Features from Scale Invariant Keypoints*, International Journal of Computer Vision, Vol. 60(2): 91-110.

Luhmann, T., 2010. *Close range photogrammetry for industrial applications* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 65(6): 558-569.

Ozbek M., Rixen D.J., Erne O., Sanow G., 2010. *Feasibility of monitoring large wind turbines using photogrammetry*, Energy Vol. 35: 4802-4811, Elsevier.

Sanz-Ablanedo E., Rodríguez-Pérez J. R., Arias-Sánchez P., Armesto J., 2009. *Metric potential of a 3D measurement system based on digital compact camera*, Sensors, Vol.9, pp. 4178-4194.

Conférences

Barazzetti L., Remondino F., Scaioni M., 2010. *Automation in 3D Reconstruction: Results on Different Kinds of Close-Range Blocks*, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5, Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK, pp. 55-61.

Dařilková K., 2005. *Modeling of Real 3D Object using Photographs*, The 13-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, pp. 65-68.

Förstner W., 1986. *A feature based correspondence algorithm for image matching*, Int. Arch. Of Photogrammetry, 26-3/3, pp. 150-166.

Rieke-Zapp D.H., Peipe, J., 2006. *Performance evaluation of a 33 megapixel alpha 12 medium format camera for digital close range photogrammetry*, Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium Image Engineering and Vision Metrology, Dresden, Germany, September 2006.

Web

Eos Systems, Inc., PhotoModeler Pro User's Manual, Version 7, 2010.
www.photomodeler.com

ABSTRACT

Keywords: Photogrammetry, dense stereo matching, metrology, calibration, precision, accuracy

In this paper, the method of Dense Stereo Matching in close range photogrammetry is assessed. The different steps of the metrological process delivering point clouds from images are discussed. The method has been tested on three objects recorded by a Canon EOS 5D camera with two different lenses of 20mm and 28mm focal lengths. From these results we finally validate the approach for future projects.