

La vidéogrammétrie en milieux hostiles.

S. Roose, M. Henrist

Centre Spatial de Liège (CSL) - Université de Liège
Parc Scientifique du Sart-Tilman, B-4031 Angleur - Liège (Belgique)

B.Sarti, R. Veefkind

European Space research and Technology Centre (ESTEC) - Agence spatiale européenne
Keplerlaan 1, P.O. Box 299n, 2200 AG Noordwijk ZH (Pays-Bas)

Résumé

Cette communication présente des développements récents à l'ESTEC et au CSL de l'utilisation de la vidéogrammétrie en milieux hostiles.

-utilisation de la vidéogrammétrie pour la mesure de déformations de grandes structures spatiales pendant des tests en vide thermique.

-utilisation de la vidéogrammétrie en milieux sous-marins. Où l'on démontre que des équipements à faible coût peuvent être utilisés pour de la métrologie dimensionnelle.

Introduction

La vidéogrammétrie est une méthode de métrologie dimensionnelle basée sur la triangulation, connue en cartographie et en topologie. Elle est dérivée de la photogrammétrie [1, 2, 3, 4] où l'on utilise des appareils photographiques à film. Dans le cas de la vidéogrammétrie des appareils photographiques numériques sont utilisés [5, 6, 7].

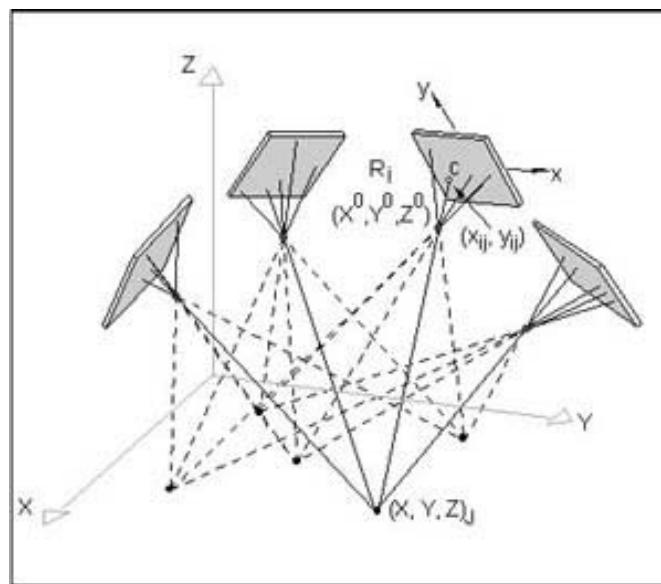


Figure 1. Vidéogrammétrie : le principe de la triangulation

Un ou plusieurs capteurs optiques, visant un objet, sont disposés ou déplacés autour d'un objet. Des points extraordinaire sont définis sur l'objet. Ils sont matérialisés par des trous, des arêtes, des coins, des mires ou bien par des cibles rétroréfléchissantes.

Etant donné que la ligne entre le point principal de la caméra et le point observé, est définie par deux équations, l'intersection de deux lignes de visée donnera donc 4 équations pour un point dans l'espace (3 inconnues). Cette redondance dans les équations permet notamment (à condition d'observer suffisamment de points) de considérer l'orientation, la position et la distorsion des caméras comme inconnues. La triangulation à multiples points consiste donc, du point de vue mathématique, à résoudre un ensemble de N équations non linéaires avec M inconnues ($N > M$). Des techniques classiques existent pour résoudre ce problème. Une barre étalon plongée dans la scène permet de mettre le système d'équation à l'échelle.

Afin de comprendre les performances métrologiques d'un système vidéogrammétrique, nous allons le considérer comme un système de métrologie bidimensionnel. Imaginons deux cas de figure :

a. vidéogrammétrie industrielle avec cibles rétroréfléchissantes et photos N/B.

Avec des pixels CCD de 10 μm et une centroïdisation au 1/20 de pixel nous pouvons atteindre une erreur de 0.5 μm sur le détecteur. Si l'objet se trouve à 1 mètre et la focale du système est de 40 mm avec un champ de 60°, nous obtenons une erreur dans le plan objet de $(1000/40) 0.5 \mu\text{m} = 12.5 \mu\text{m}$. L'erreur relative pour un objet de 1 m est 12.5 ppm.

b. vidéogrammétrie non industrielle et photos couleurs

Dans ce cas ci nous ne pouvons pas centroïdiser. L'erreur de position sur le CCD est limitée par la dimension du pixel : 10 μm . Si l'objet se trouve à 1 mètre et la focale du système est de 40 mm avec un champ de 60°, nous obtenons une erreur dans le plan objet de $(1000/40) 10 \mu\text{m} = 250 \mu\text{m}$. L'erreur relative pour un objet de 1 m est 250 ppm.

Le lien entre les plans objet et image est en principe linéaire. Mais de nombreux paramètres peuvent dégrader cette linéarité. Ceci crée la distorsion du modèle de la caméra. Des techniques modernes permettent de modéliser cette distorsion et de la calibrer simultanément au calculs des coordonnées [1].

Le passage à la métrologie tridimensionnelle devient évident si nous imaginons deux ou trois capteurs avec lignes de visée perpendiculaires (géométrie forte) [2, 3]. Dans ce cas, les mesures des coordonnées sont découpées et l'erreur est celle d'un système de métrologie bidimensionnelle. Dès que l'angle entre les caméras est différent de 90°, la configuration est moins convergente. La limite est la configuration normale avec les lignes de visée parallèles (géométrie faible) [2, 3]. Une configuration normale avec 2 caméras, est connue sous le nom de stéréoscopie.

La vidéogrammétrie a l'avantage d'être une méthode sans contact, qui ne demande aucune connaissance absolue de la position du capteur par rapport à l'objet.

La vidéogrammétrie en test de vide thermique

Le principe de l'utilisation de la vidéogrammétrie pour la mesure de déformations de grandes structures spatiales pendant des tests en vide thermique a été testé par l'ESTEC avec un système de photogrammétrie [8, 9]. L'ESTEC a démontré la possibilité d'atteindre des erreurs relatives d'environ 10 ppm, ce qui est comparable aux systèmes très performants sur le marché (Leica [10], Imetric [11]). L'évolution vers la vidéogrammétrie s'imposait : l'avantage était la possibilité de traiter les données en quasi temps réel (par rapport à la constante de temps thermique) et de suivre les évolutions de grandes structures spatiales lors des cyclages thermiques dans les grandes cuves à vide.

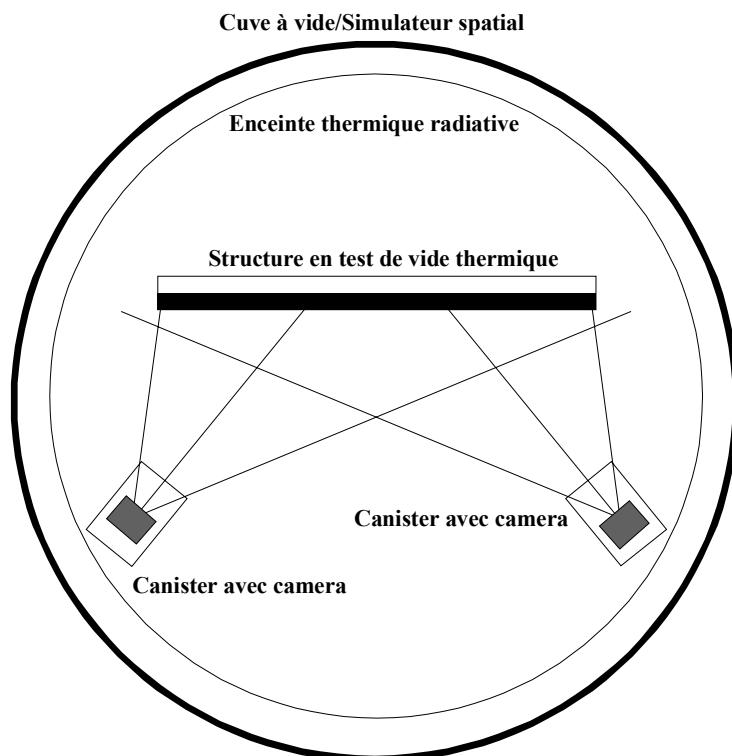


Figure 2. La configuration des caméras vidéogrammétiques dans un test en vide thermique

Le système de vidéogrammétrie de l'ESTEC utilise un couple de caméras Rolleiflex 6008 avec boîtier numérique Rollei Chippack (CCD de 2048 sur 2048 pixels, avec électronique de proximité) et objectif Zeiss Distagon 4/40 mm. L'ensemble est monté sur une structure rotative qui permet de faire tourner la camera sur son axe et d'augmenter le nombre de prises de vue pour «résoudre» les paramètres de distorsion de la caméra.



Figure 3. La caméra Rollei montée sur bloc rotatif

Cet équipement standard n'est pas conçu pour fonctionner sous vide. L'ESTEC a fait construire des caissons (canister), pour maintenir les caméras à l'air et les isoler du vide. En vue de rendre le système insensible à l'environnement thermique, un système d'air conditionné injecte en permanence de l'air dans le système au moyen d'une canalisation spécifique qui traverse la cuve à vide. L'air injecté emmène les calories ou frigories par une deuxième canalisation en dehors de la cuve à vide. Une isolation avec un matelas multicouche de Mylar (MLI) autour du canister et un débit d'air à 20°C de 0.018 m³/h permet de maintenir la température du CCD en dessous de 30°C pour des températures des panneaux radiatifs de la cuve allant jusqu'à 110°C. Le bruit sur le CCD est inférieur à 1 (pour une dynamique de 8-bits) à une température inférieure à 30°C.



Figure 4. La console du système de vidéogrammétrie de l'ESTEC avec un canister

Afin d'obtenir une haute résolution, des techniques de centroïdisation sont utilisées pour mesurer la position d'un point dans une image. La matérialisation des points est réalisée par des cibles retroréfléchissantes. La centroïdisation calcule le centre de la cible, à une fraction (<1/10) d'un pixel du CCD. Un flash annulaire est monté sur le devant de la caméra pour illuminer les cibles.

Le système d'acquisition et de traitement des données, développé par RolleiMetric [12], a les fonctions suivantes :

1. Acquisition de photos numériques avec la caméra Rollei
2. Reconnaissance automatique de cibles codées et cibles standard
3. Calcul de l'orientation des photos et des caméras sur base de la position des cibles codées dans l'image
4. Calcul des centroïdes des cibles dans les images
5. Calcul des coordonnées tridimensionnelles des cibles et autocalibration [4] des caméras

On peut définir un indicateur empirique [2, 3] de l'erreur : $E = q/\sqrt{s} S \sigma$ avec, q = facteur géométrique 0.5-1.5 pour une géométrie forte et 1.5-3.0 pour une géométrie faible, S = distance objet/distante focale, σ =erreur dans le plan image de la caméra, s nombre de photos ($s=1$ pour une géométrie faible [2, 3]). Quelques exemples numériques :

Dans le cas d'une géométrie fortement convergente (4 positions caméra, 16 photos), $E(q = 0.8 ; s = 16 ; S = 100 ; \sigma = 1 \mu\text{m}) = 20 \mu\text{m}$, 10 ppm pour un objet de 2 m de large.

Dans la configuration envisagée dans les cuves à vide (2 positions caméra, 8 photos) à faible convergence: $E(q = 1.6 ; s = 1 ; S = 100 ; \sigma = 1 \mu\text{m}) = 160 \mu\text{m}$, 80 ppm pour un objet de 2 m de large.

Les performances métrologiques dépendent du matériel, du logiciel mais également de la configuration des prises de vue.

La vidéogrammétrie en milieu sous-marin

La diffusion des systèmes vidéogrammétiques est malheureusement limitée par leur coût lorsque l'on recherche la meilleure précision possible. Si par contre on relâche les performances métrologiques demandées, on constate que l'on peut satisfaire les besoins d'un grand nombre d'utilisateurs avec un matériel dont le coût est beaucoup plus abordable. L'apparition de la photographie numérique grand public a donné à la vidéogrammétrie un essor remarquable, et les applications en sont de plus en plus nombreuses.

Cette technique présente en effet des avantages spécifiques par rapport à d'autres méthodes, notamment :

- la rapidité et la facilité des opérations sur le terrain
- le budget global d'un relevé
- la qualité de la mesure, qui se situe en général entre 100 et 500 ppm
- l'archivage immédiat et total de l'information sur l'objet mesuré, ce qui permet de recalculer les données tridimensionnelles à volonté pendant un temps illimité

Les domaines d'application actuels comprennent entre autres l'archéologie (mesurage de sites), la géologie (mines, carrières), la criminologie (reconstitution de scènes de meurtre ou d'accidents sur base de caméra vidéo de surveillance), l'architecture (élaboration de plans d'un bâtiment existant, aide à la restauration de monuments), l'ingénierie inverse (reconstitution de plans à partir des objets existants), la robotique (position des bras robotisés), etc.

Le créneau choisi est l'archéologie sous-marine à faible et moyenne profondeur (<15 m), qui impose des contraintes de fonctionnement sous caisson dans un environnement hostile, en plus de l'objectif de faible coût. Les enseignements apportés par l'étude seront directement applicables à d'autres milieux agressifs, comme les gaz, les liquides, la poussière, la contamination radioactive, l'humidité tropicale. Cette application est dérivée de ce que nous pratiquons dans une cuve à vide. En effet, le vide et le cyclage thermique rendent le milieu hostile pour l'équipement. Un canister (caisson) protège les caméras.

Notons que la vidéogrammétrie appliquée à l'archéologie sous-marine à grande profondeur (>15 m) a déjà été mise en œuvre par une organisation publique (DRASSM) [13] et une entreprise privée (COMEX) [14].

Comme matériel de base, l'équipement suivant a été sélectionné :

- appareil photo numérique NIKON D1 + objectif NIKKOR 20 mm
- logiciel de photogrammétrie PHOTOMODELER Pro 3.0 [15].
- sac souple étanche EWA MARINE, les essais devant se dérouler à faible profondeur.

Le logiciel Photomodeler a été comparé au logiciel RolleiMetric. Les performances numériques sont de l'ordre de 100 ppm, ce qui suffit à notre application. La caméra NIKON D1 peut atteindre une précision relative de 500 ppm. A titre d'essai à l'air, nous avons mesuré les dimensions d'un bâtiment (CSL) d'environ 30 m x 10 m. La vidéogrammétrie est réalisée sur base de sept photos prises de différents points suivant un demi-cercle d'un bord à l'autre de la façade (Figure 5).

Les mesures vidéogrammétiques sont comparées aux dimensions figurant sur le plan de l'architecte.

Objet	Dimension selon plan (m)	Mesure vidéogrammétrique (m)	Différence	
			(m)	%
Mur 1	10.74	10.62	0.12	~1
Mur 2	11.19	11.19	0	(Etalon)
Espace vitré	11.21	11.27	0.06	0.5
Hauteur fenêtre	1.6	1.606	0.006	~0.3



Figure 5: Photo du bâtiment indiquant les longueurs mesurées.

Les résultats suivants sont ceux d'un test qui a été réalisé en piscine (Piscine de l'Université de Liège) à une profondeur d'environ trois mètres (Figure 6). La scène analysée mesure environ 9 m^2 et contient entre autres trois objets métalliques (a, b et c) dont les dimensions sont connues. Les autres objets présents sur la scène ont été ajoutés afin de disposer d'un plus grand nombre de points identifiables sur les différentes photos.



Figure 6: Une des photos sous l'eau de la scène à analyser.

Objet	Dimension (mm)	Mesure vidéogrammétrique (mm)	Différence	
			mm	%
A (longueur)	750	750	0	(Etalon)
B (longueur)	1387	1396	9	~0.6
C (longueur)	1720	1735	15	~0.9

Sur les douze photos réalisées, seules cinq présentent un contraste et une luminosité suffisants pour être exploitable par le logiciel. L'éclairage utilisé était en effet limité au flash intégré dans l'appareil photo à l'intérieur du caisson, alors que des éclairages spécifiques devraient être employés pour les prises de vue sous-marines. Néanmoins, nous avons pu obtenir des performances métrologiques identiques à celles obtenues à l'air. Ce résultat démontre que le logiciel de traitement peut prendre également en compte les paramètres de distorsion dus à l'indice de réfraction de l'eau ($n \approx 1.33$), ainsi que la focale effective des prises de vue dans l'eau ($f n$). Pour un utilisateur un peu exercé, le traitement de problèmes comme ceux que nous avons présentés est réalisé en environ deux heures.

Conclusions

Nous avons pu démontrer expérimentalement que la vidéogrammétrie peut être appliquée dans des environnements hostiles, et ce sous deux modes à finalité différente :

- un mode à haute précision, lorsque le prix n'est pas le facteur dominant
- un mode à basse précision, lorsque le prix de l'équipement est déterminant.

Les auteurs remercient Alain Carapelle, Frédéric Rabecki, Stéphane Driesen et Renaud Ligot pour les prises de vue sous l'eau. Ce projet est cofinancé par la Direction Générale de la Technologie, de la Recherche et de l'Economie (DGTRÉ) de la Région Wallonne et par L'Agence Spatiale Européenne (ESA).

Références

- [1]. C.S. Fraser et al., "Self-calibration of a fixed-frame multiple-camera system", Photogrammetric Engineering & Remote sensing 46, 1439 (1980).
- [2]. C.S. Fraser, "Network design considerations for non-topographic photogrammetry", Photogrammetric Engineering & Remote sensing 50, 1115 (1984).
- [3]. C.S. Fraser, "Photogrammetric measurement to one part in a million", Photogrammetric Engineering & Remote sensing 58, 305 (1992).
- [4]. C.S. Fraser et al., "Multi-sensor self calibration", Proc. SPIE 2598, 2 (1995). (1995).
- [5]. H. Beyer, "Accurate calibration of CCD-cameras", IEEE Computer vision and Pattern Recognition, 96 (1992).
- [6]. A. Gruen et al., "Kodak DCS200: a camera for high accuracy measurements?", Proc. SPIE 2598, 52 (1995).
- [7]. M.R. Shortis, "Calibration stability of the Kodak DCS420 and 460 cameras", Proc SPIE 3174, 94 (1997).
- [8]. N. Nikolaizing et al., "High accuracy photogrammetric system for large space simulator at ESTEC", ESA SP-304, 409 (1990).
- [9]. J. Bouman et al., "A photogrammetry system for use in thermal vacuum testing", ESA Bulletin 81.
- [10]. Leica: <http://www.leica.com/>
- [11]. Imetric: <http://www.imetric.com/>
- [12]. RolleiMetric: <http://www.rolleimetric.de/>
- [13]. DRASSM: <http://www.culture.fr/culture/archeosm/img0019.htm>
- [14]. Comex: <http://www.comex.fr/>
- [15]. Photomodeler: <http://www.photomodeler.com/>