

AOMS : UN NOUVEL OUTIL DE PHOTOGRAMMÉTRIE

A. Dumont, F. Jallon et JB. Monnerie

ESIC SN – Z.A. du buisson de la couldre – 1 Allée des Châtaigniers - F78190 TRAPPES

S. Naudet, P. Sayd et M. Viala *

LETI (CEA – Technologies Avancées)

DEIN-SLA-CEA F91191 – GIF SUR YVETTE CEDEX

L. Cohen

CEREMADE, Université Paris IX Dauphine

Place du Maréchal de Lattre de Tassigny – F75775 PARIS CEDEX 16

1. INTRODUCTION

Au cours des quinze dernières années, la technique de mesure tridimensionnelle par photogrammétrie a trouvé de nombreuses applications dans l'industrie, que ce soit pour la modélisation 3D sous CAO d'installations ou pour le contrôle sur site de grands équipements.

Cette utilisation croissante de la photogrammétrie est due essentiellement à l'apparition de caméras numériques et au développement de procédés semi-automatiques d'analyse d'image.

Dans cette présentation nous décrirons tout d'abord quelques applications types de la photogrammétrie industrielle en détaillant plus particulièrement une application ayant donné lieu à une modélisation 3D sous CAO exploitée en combinaison avec des mesures 3D de précision.

Ensuite nous présenterons certains développements engagés dans la perspective d'automatiser le plus possible le traitement des images.

2. APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE LA PHOTOGRAMMETRIE

2.1 Mesure en chambre thermique

Déterminer les déformations d'une antenne ou d'un satellite à différents états de température et sous vide a toujours représenté un véritable challenge.

Bien avant l'apparition des caméras numériques, de telles mesures ont été réalisées avec succès avec des caméras photographiques. Si ces mesures donnaient d'excellents résultats, elles étaient en revanche délicates à mettre en œuvre et le temps de traitement des clichés pouvait s'avérer rédhibitoire. Avec le développement des caméras numériques, la photogrammétrie est véritablement devenue une technique industrielle de mesure 3D en chambre thermique.

En 1998, les sociétés ESIC SN et INTESPACE ont développé une méthodologie de mesure permettant d'obtenir une très grande précision, l'objectif étant de pouvoir mesurer un objet entre -135°C et $+110^{\circ}\text{C}$.

Pour ce type de mesure, deux stratégies étaient possibles :

- soit mesurer l'objet disposé sur un plateau tournant avec la ou les caméras à l'extérieur visant au travers de hublots (voir figure 1),
- soit installer la caméra à l'intérieur de la chambre thermique et la faire tourner autour de l'objet fixe ou la fixer et disposer l'objet sur un plateau tournant.

* co-fondateur de la société ActiCM

Après quelques investigations il fut démontré que les deux solutions étaient équivalentes à condition de pouvoir obtenir des configurations de mesure comparables (en fonction, notamment, de la position des hublots et de la géométrie de la chambre thermique). Dans les deux cas la plus grosse difficulté est d'obtenir une information d'échelle fiable : là encore deux méthodologies sont possibles :

- soit disposer des étalons de longueur de différents matériaux (invar, carbone, etc) et effectuer des corrections de température en fonction des CTE respectifs,
- soit disposer une structure invariante.

C'est cette dernière solution qui a fait l'objet des recherches effectuées par INTESPACE et ESIC SN au travers de la conception d'un châssis thermostaté et d'une méthodologie de calcul adaptée (brevet INTESPACE / ESIC SN). En effet, cette solution permet d'accroître la précision de mesure notamment par le fait que la même structure fixe est mesurée lors des n états et que ces observations sont intégrées dans un calcul en bloc qui affine la mesure de l'échelle tout en mettant en évidence une éventuelle déformation ponctuelle de la structure.

Les premières mesures réalisées avec cette méthode ont montré qu'il était possible d'obtenir une incertitude de mesure absolue de l'ordre de $40 \mu\text{m}$ sur un objet représentant une enveloppe cylindrique de 2.5 m de diamètre et de hauteur.



Figure 1: caméra INCA à l'extérieur de la chambre

2.2 Une mesure intégrée au process

Au delà du recours à des fins de diagnostic ou d'essais, la meilleure preuve de l'introduction d'une technique de mesure dans le domaine industriel est son intégration dans le process.

C'est le cas dans une centrale nucléaire française pour laquelle ESIC SN réalise à chaque arrêt de tranche une mesure de la position d'éléments mécaniques ("tiges de commande" – voir figure 2) avant la fermeture du couvercle de cuve. Il s'agit dans ce cas de mesurer la position des 50 sommets des tiges et de la comparer aux trous correspondants du couvercle.

Les mesures sont réalisées en quelques minutes, sans le moindre contact, permettant ainsi de réduire considérablement la dosimétrie. Les résultats fournis en quasi temps réel permettent de détecter une position hors tolérance et d'y remédier en évitant tout problème. Ils permettent aussi d'anticiper en identifiant d'éventuelles tendances (voir figure 3 : résultats).

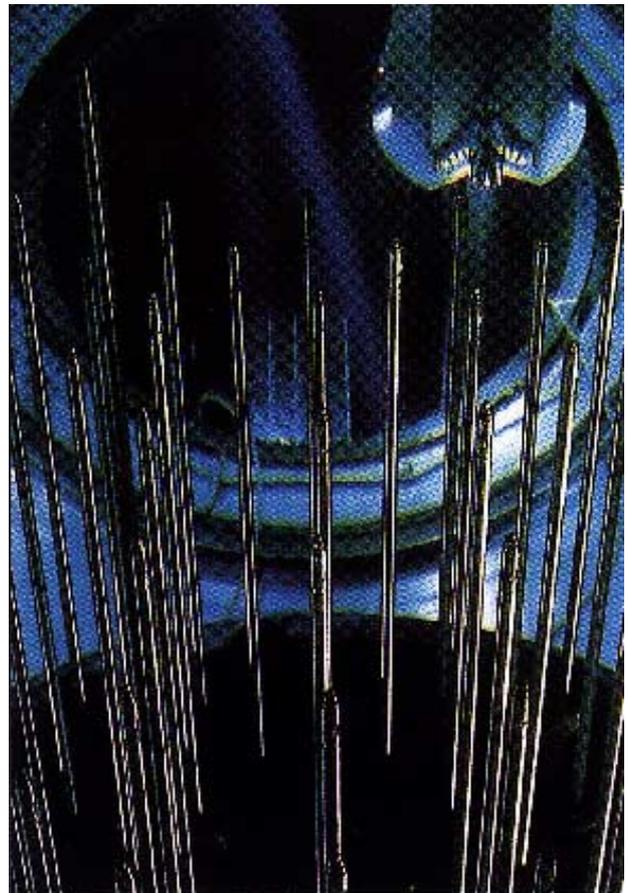
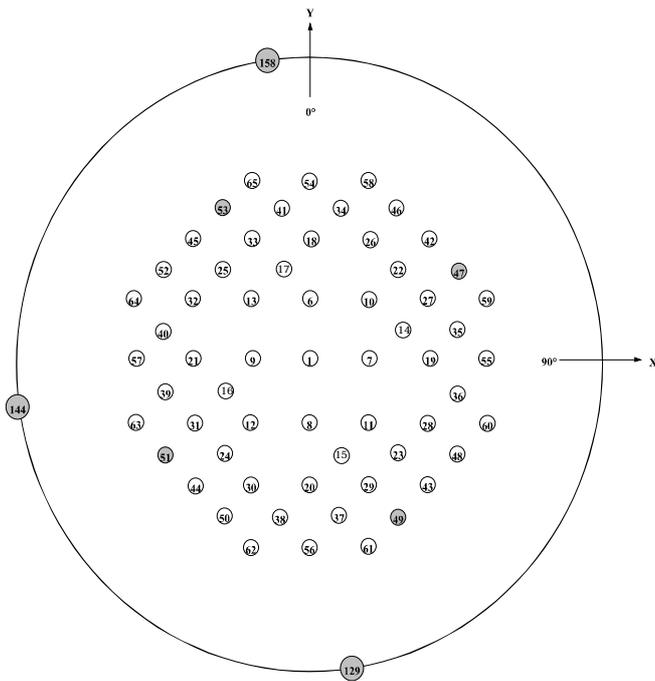


Figure 2: tiges de commande



| No | THEORIQUE | | MESURE | | dX | dY | dCY |
|----|-----------|------|--------|------|-----|-----|-------|
| | X1 | Y1 | X2 | Y2 | | | |
| 1 | 0 | 0 | -4 | 5 | -4 | 5 | 8 |
| 6 | 0 | 430 | -4 | 427 | -4 | -3 | 7 |
| 7 | 430 | 0 | 397 | -29 | -39 | -29 | 48(1) |
| 8 | 0 | -430 | 2 | -430 | 2 | 0 | 2 |
| 9 | -430 | 0 | -426 | 4 | 4 | 4 | 5 |
| 10 | 430 | 430 | 447 | 430 | 16 | 0 | 16 |
| 11 | 430 | -430 | 433 | -450 | 3 | -20 | 20 |
| 12 | -430 | -430 | -453 | -450 | -23 | -20 | 30 |
| 13 | -430 | 430 | -432 | 417 | -2 | -13 | 13 |
| 18 | 0 | 860 | 32 | 859 | 32 | -1 | 32 |
| 19 | 860 | 0 | 852 | 6 | -8 | 6 | 10 |
| 20 | 0 | -860 | 14 | -865 | 14 | -5 | 15 |
| 21 | -860 | 0 | -884 | -29 | -23 | -29 | 38(1) |
| 22 | 645 | 645 | 645 | 643 | 0 | -2 | 2 |
| 23 | 645 | -645 | 618 | -685 | -27 | -40 | 48(1) |
| 24 | -645 | -645 | -623 | -628 | 22 | 17 | 28 |
| 25 | -645 | 645 | -614 | 655 | 31 | 10 | 33 |

Figure 3: résultats

2.3 Quand modélisation CAO 3D et mesure 3D de précision se combinent

En 1999, ESIC SN a participé à un grand projet de maintenance et de modification d'une installation de l'usine de LA HAGUE, pour le compte de COGEMA (voir figure 4). L'objectif était double : d'une part préparer l'intervention au travers d'une simulation basée sur le modèle CAO 3D et, d'autre part, valider l'interchangeabilité de certains équipements au travers de la mesure de précision des interfaces mécaniques.

Cette installation fait partie des installations ayant fait l'objet de relevés photogrammétriques de 1989 à 1994 : c'est à partir de 600 photos prises lors de ces relevés que la modèle 3D a pu être élaboré avec une incertitude de mesure de l'ordre de ± 5 mm, suffisante pour les besoins de la simulation.



Figure 4: modèle 3D (photogrammétrie)

Afin de valider l'interchangeabilité de certains équipements, des mesures plus précises ont été réalisées à l'aide d'une caméra à tube utilisée normalement à des fins de vision. Ces mesures présentaient en outre l'avantage de prendre en compte une vraisemblable évolution dimensionnelle de l'installation depuis la base de relevés photogrammétriques citée précédemment. Le traitement d'une dizaine d'images sur un volume d'environ 1 m^3 a permis d'obtenir une incertitude de mesure locale de l'ordre du mm.

Cette application a montré, si besoin était, que les phases les plus longues d'une mesure photogrammétrique sont le ciblage et la mesure de points non ciblés.

Pour travailler sur ces deux aspects, il fut décidé d'étudier la possibilité d'implémenter des outils de détection de contour dans le processus de traitement des images, permettant ainsi de mesurer automatiquement des points non ciblés et de réduire considérablement le temps de traitement des images.

3. AOMS : UN OUTIL DE PHOTOGRAMMETRIE AUTOMATISE

Les développements regroupés sous le label AOMS (As-built On-line Modelling System) qui ont été effectués conjointement par le CEA, COGEMA et ESIC SN partent du principe de base suivant, sans doute à l'origine du succès de la photogrammétrie : les images d'un objet possèdent toutes les informations nécessaires au dimensionnement de cet objet. Jusqu'à maintenant ces informations étaient recherchées et identifiées par un opérateur : l'introduction de procédés d'analyse d'image pour partie existants mais peu répandus dans le domaine de la photogrammétrie doit permettre d'automatiser cette tâche et par là même de faire entrer la photogrammétrie industrielle dans une nouvelle ère : c'est tout le défi d'AOMS.

3.1 Présentation d'AOMS

L'outil AOMS permet de modéliser en 3D des scènes industrielles à partir d'images numériques en réduisant considérablement les temps de modélisation 3D de l'installation. Les systèmes commerciaux existant en photogrammétrie font essentiellement appel aux compétences d'un opérateur qui identifie et détecte avec minutie les objets sur les images et injecte ces données dans des logiciels de calcul. De plus, ils nécessitent encore trop souvent de mettre en place des cibles artificielles dans la scène à modéliser.

L'innovation du système AOMS réside dans le couplage d'un module de calcul 3D photogrammétrique et d'un module de traitement d'image. Le gain de temps apporté par l'automatisation partielle de la phase de détection des objets ainsi qu'un module de reconstruction itératif permettent d'obtenir sur le site un modèle 3D de l'environnement tout en s'affranchissant de la mise en place de cibles spécifiques sur la scène. L'analyse de ce modèle 3D permet d'acquérir des images supplémentaires des zones incomplètes ou imprécises.

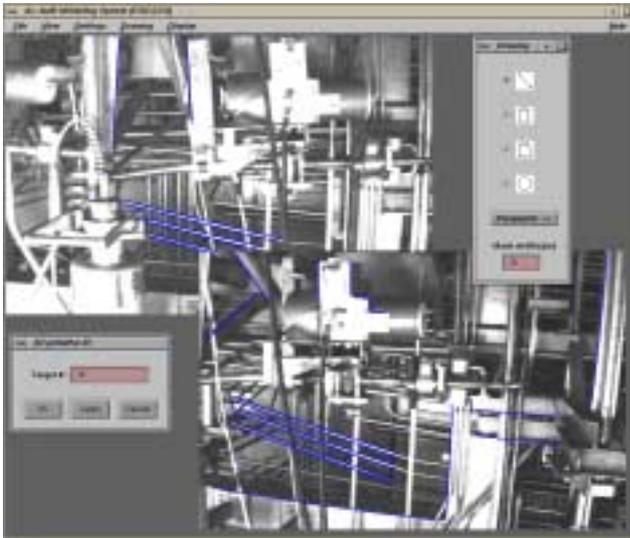


Figure 5 : L'interface d'AOMS

A travers l'interface, l'opérateur choisit le type de primitive (point, droite, cylindre, ellipse) et sélectionne dans les images la primitive à détecter au moyen de la souris. L'entité géométrique est alors automatiquement détectée avec précision dans les images puis transmise au module de reconstruction 3D dynamique.

L'outil AOMS permet de relever, à partir d'au moins deux images¹, délivrées par une ou plusieurs caméras calibrées² des points 3D ou des primitives plus complexes, telles que des droites 3D, des cylindres 3D, des cercles 3D....

Les résultats présentés dans cet article sont obtenus par la mise en œuvre d'une base stéréoscopique équipée de deux caméras réalisant des couples de prises de vues traitées en mode convergent qui est une solution optimale pour la précision tridimensionnelle.

A partir des primitives perçues dans les deux premières images, l'algorithme de reconstruction détermine par triangulation les paramètres géométriques des objets (position, orientation, dimensions). Lorsque le capteur se déplace et fait une nouvelle acquisition, les nouvelles primitives détectées ainsi que le modèle préreconstruit sont utilisés pour déterminer la nouvelle position du capteur et affiner le modèle incrémental de la scène. Puis après le traitement de l'ensemble de la séquence d'images, un calcul en bloc,

¹ un plus grand nombre d'images permet d'accroître la précision tridimensionnelle

²Pour retrouver l'échelle des objets perçus, il est nécessaire de connaître précisément les situations relatives des caméras dans le cas d'un système multicaméra ou de disposer d'un mètre étalon dans la scène dans le cas d'un système monocaméra.

plus lourd numériquement, est exécuté. Il réalise un calcul photogrammétrique par ajustement de faisceaux sur toutes les images pour consolider le modèle et en augmenter sa précision.

Pour réduire encore l'intervention de l'opérateur, nous développons actuellement un module d'identification et de détection automatique des objets dont le but est d'exploiter les sélections effectuées sur les premières images pour rechercher l'information dans la nouvelle image traitée.

3.2 Application à la reconstruction 3D de lignes de tuyauteries

L'application que nous présentons porte sur la modélisation de lignes de tuyauteries tirées de deux scènes représentatives des installations cibles. L'évaluation quantitative des reconstructions porte donc sur la modélisation de cylindres et a été réalisée en comparant le modèle obtenu avec AOMS à des modèles de référence obtenus avec des moyens de modélisation photogrammétrique conventionnels décrits au paragraphe 2. Sans être des étalons de mesures parfaits, ces modèles de référence représentent ce que l'on peut obtenir de plus précis avec les outils existants, dans le contexte choisi. Les maquettes reconstruites et de référence sont reportées dans un référentiel commun propre à la scène.

La première scène reconstruite occupe un volume d'environ 6 m^3 . Le modèle de référence a été construit en s'aidant de cibles artificielles et en exploitant 40 images acquises par un appareil photographique numérique très haute résolution (KODAK DCS 460, 6.2 Millions de pixels). On peut estimer que la précision de ce modèle est de 0.1 à 0.2 mm sur les rayons et de 1 mm sur le positionnement des tuyaux. La modélisation en employant l'outil AOMS a été réalisée en employant des moyens équivalents à ceux utilisables dans une intervention : aucune cible artificielle et exploitation d'un capteur stéréoscopique constitué de deux caméras vidéo SONY de résolution standard (750×512 pixels) équipées d'objectifs 6 mm et formant une base stéréoscopique horizontale de 500 mm. Dix paires d'images ont été saisies en déplaçant le capteur sur une trajectoire demi-circulaire autour de la scène à une distance de 3m.

Parmi les objets présents, 7 tuyaux, dont les rayons varient de 6,8 mm à 348,7 mm ont été sélectionnés pour évaluer l'outil AOMS. A titre d'exemple, la Figure 6 présente une image de la séquence et le modèle 3D reconstruit.

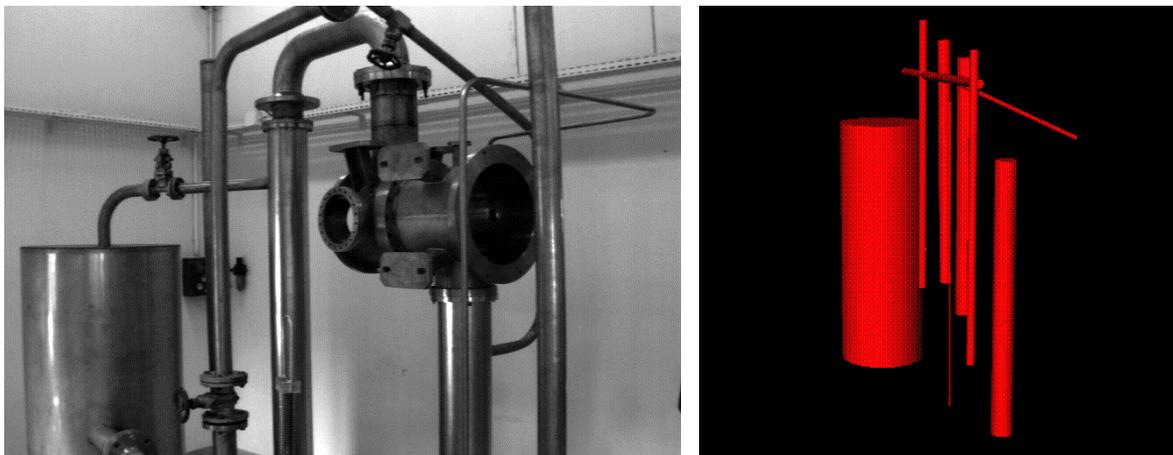


Figure 6 : Vue de la scène 1 - Modèle 3D reconstruit

L'analyse sur les écarts entre le modèle reconstruit et celui de référence porte d'une part sur un défaut de positionnement (moyenne des distances entre les extrémités du tuyau considéré et le tuyau de référence), un défaut d'orientation (écart angulaire entre le tuyau considéré et le tuyau de référence) et l'erreur sur les rayons. Les erreurs quadratiques moyennes (rms) obtenues sont présentées sur le tableau suivant :

| | Position | Orientation | Rayon |
|-----|----------|-------------|--------|
| rms | 6.2 mm | 0.2 deg | 0.3 mm |

La seconde scène a été reconstruite à partir de la digitalisation de 7 paires de clichés photogrammétriques tirés du contexte décrit au paragraphe 2.3. L'incertitude de mesure sur le modèle de référence est estimée à ± 5 mm. La scène occupe un volume de 3m x 1m x 0,4 m. La ligne modélisée comprend 23 cylindres dont les rayons varient de 17mm à 170mm. L'erreur quadratique moyenne (rms) sur le rayon est présentée dans le tableau suivant :

| | Position | Rayon |
|-----|----------|--------|
| rms | 11.3 mm | 3.1 mm |

Ces évaluations expérimentales montrent que l'outil utilisé avec des moyens de vision standards répond aux exigences de précision d'une prestation en modélisation de scènes industrielles.

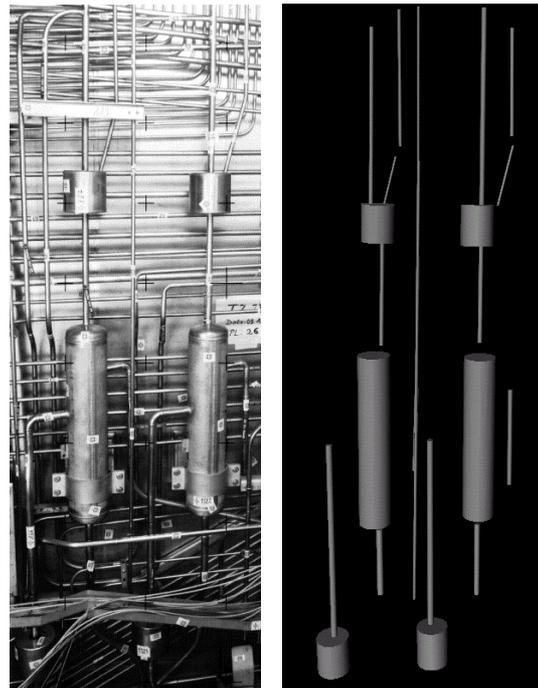


Figure 7 : Vue de la scène 2 - Modèle 3D reconstruit

En exploitant des points naturels, AOMS permet de s'affranchir de la mise en place de cibles spécifiques sur la scène à modéliser. Il peut s'adapter à des volumes de travail divers, de quelques dizaines de centimètres, jusqu'à plusieurs dizaines de mètres. Il est capable de traiter efficacement des scènes industrielles constituées d'objets présentant des surfaces variées, diffusantes ou spéculaires (inox poli).

AOMS ne se limite pas seulement à relever quelques points caractéristiques des objets pour ensuite les modéliser par des entités géométriques plus complexes, mais exploite toute l'information visible issue du capteur d'images. Cette approche garantit une bonne résolution spatiale, qui n'est limitée que par le capteur utilisé et non par le projecteur de lumière.

Utilisé sur site, il permet de générer un modèle 3D, dont l'analyse permet d'interagir sur l'acquisition afin de compléter ou d'affiner la modélisation. L'exploitation d'images numériques par le procédé permet de disposer d'archives exploitables a posteriori pour compléter les premiers relevés. Cette capacité de dépouillement est particulièrement intéressante lors de la mise au point de prototypes industriels.

4. CONCLUSION

La photogrammétrie est sans doute une des techniques de mesure 3D par procédés optiques ayant le plus fort potentiel d'automatisation : une image contient en elle-même énormément d'informations que l'on peut détecter ou apprendre à détecter par des processus d'apprentissage.

Les développements réalisés dans le cadre d'AOMS en collaboration entre COGMA, ESIC SN et le CEA montrent qu'un seul et même outil doit pouvoir répondre aux différentes applications de la photogrammétrie industrielle (contrôle 3D de précision/modélisation CAO 3D), en remplaçant tout ou partie des tâches d'identification de l'opérateur par une forme d'intelligence artificielle.

L'objectif à court terme est de permettre à ESIC SN d'exploiter l'outil AOMS dans le cadre de ses prestations de mesure sur sites industriels. Par ailleurs, ActiCM une société essaimée du CEA a été récemment créée pour développer et commercialiser des produits de mesures dimensionnelles basés sur cette technologie.