

Utilisation de plusieurs techniques de mesure pour enrichir une méthodologie

■ Alain MARTIN-RABAUD

Les techniques de mesure 3D par procédés optiques sont restées pendant de nombreuses années les techniques privilégiées, voire exclusives, du monde de la géodésie. Depuis les années 1980, elles sont entrées dans l'industrie avec beaucoup de difficultés et de méfiance d'abord, pour s'imposer maintenant dans de nombreux domaines. Alors que les techniques de mesure 3D traditionnelles ne sont pas très coopératives entre elles, la force des mesures par procédés optiques provient de cette coopération qui permet d'allier les atouts de chacune des méthodes pour rendre le procédé plus adapté au besoin. La présentation de ces techniques n'a pas la prétention d'être exhaustive, mais elle permet de donner un aperçu des méthodes, de leurs avantages et de leurs limites. Et comment, en associant plusieurs méthodes, il est possible de garantir le niveau d'incertitude requis.

Aperçu des techniques de mesure 3D utilisées dans l'industrie

La majeure partie des techniques de mesure 3D s'appuie sur un ensemble de capteurs élémentaires relativement conventionnels. Il s'agit essentiellement de capteurs de distance ou d'angle :

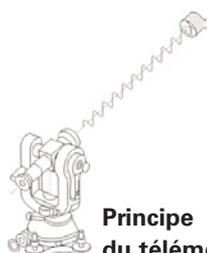
■ **Télémètre** : distancemètre utilisant un laser pour compter la durée du faisceau aller et retour entre le capteur et la cible (réflecteur ou cible naturelle) – il s'agit d'une mesure de distance absolue

■ **Interféromètre** : mesure du déplacement d'un réflecteur par analyse des franges d'interférence entre le chemin parcouru par un faisceau de référence et le réflecteur mobile – il s'agit d'une mesure relative de la distance, qui nécessite une mesure en continu (toute rupture de la mesure impose de repartir de la référence)

■ **Codeur angulaire** : mesure angulaire par relevé sur un cercle optique, avec calcul d'interpolation entre plusieurs séries de graduation

■ **Caméra linéaire** : mesure angulaire par utilisation d'une optique classique ou cylindrique et d'un capteur CCD ne comprenant qu'une ligne

■ **Caméra matricielle** : identique à la caméra linéaire, mais avec un capteur CCD matriciel



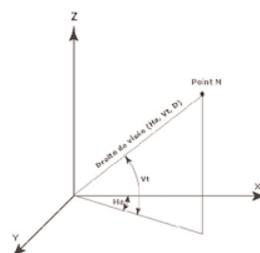
Principe

du télémètre.



Principe de la caméra matricielle.

A partir de ces différents capteurs élémentaires, la mesure 3D est effectuée par composition selon deux principes :



■ **Calcul polaire** : Il s'agit de la composition de deux mesures d'angle (H_a et V_t) et une mesure de distance (D) selon la formule ci-contre.

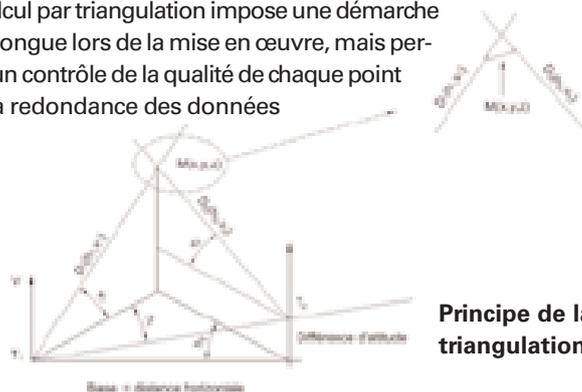
$$\begin{aligned} X_i &= D \cdot \cos(H_a) \cdot \cos(V_a) \\ Y_i &= D \cdot \sin(H_a) \cdot \cos(V_a) \\ Z_i &= D \cdot \sin(V_a) \end{aligned}$$

La détermination des coordonnées est immédiate, mais il n'y a pas de vérification de la qualité de la mesure

■ **Calcul par triangulation** : Seules des mesures angulaires sont réalisées, ce qui impose une procédure de détermination du processus de mesure en deux étapes :

- L'orientation relative qui détermine la position des appareils entre eux par la visée réciproque des appareils entre eux (possible uniquement avec les théodolites), soit en visant des points homologues (ajustement de faisceaux des droites de visées).
- Puis la phase de mise à l'échelle qui est réalisée généralement par la visée sur des règles étalons, mais peut se faire aussi sur des points connus préalablement.

Le calcul par triangulation impose une démarche plus longue lors de la mise en œuvre, mais permet un contrôle de la qualité de chaque point par la redondance des données



Principe de la triangulation.

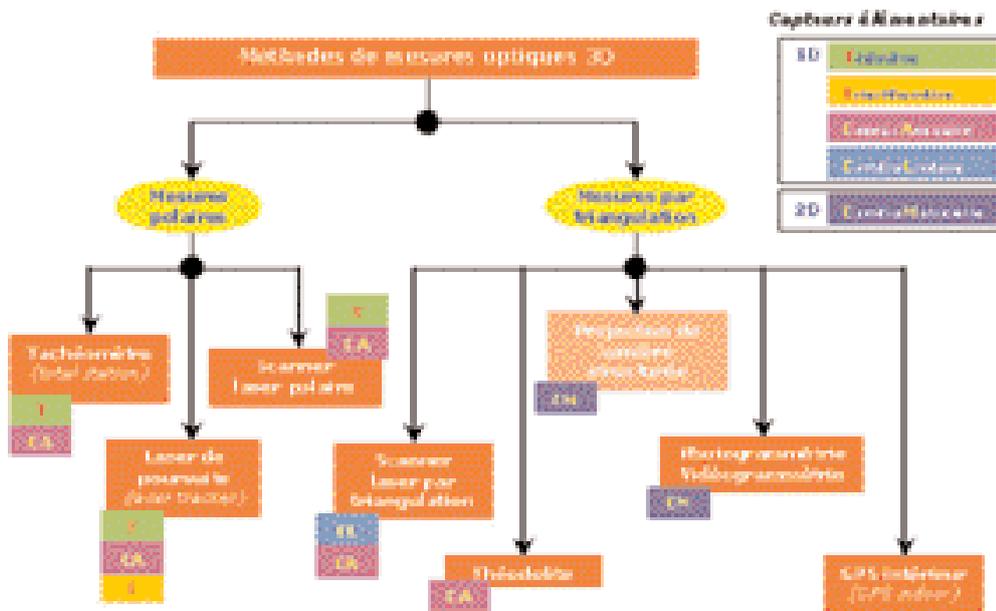


Tableau récapitulatif des différentes méthodes.

(4 angles au minimum pour déterminer les 3 coordonnées d'un point). A partir de ces éléments, nous décrivons ici l'ensemble des différents systèmes de mesure 3D en définissant les grands principes, les éléments d'incertitude de base, les principaux fournisseurs et les principales applications. Pour résumer, le tableau récapitulatif ci-dessus donne un aperçu des grandes familles de ces méthodes.

■ **Le théodolite** : Il s'agit d'un capteur uniquement angulaire comprenant deux codeurs installés sur deux axes perpendiculaires :

- l'axe vertical pour la mesure de l'angle horizontal
- l'axe des tourillons pour la mesure de l'angle vertical
- L'axe de visée (la lunette) constitue le troisième axe de cet appareil, dont la principale qualité réside dans le montage mécanique de ces différents axes et dont les éventuels défauts doivent être pris en compte et corrigés lorsque le niveau d'incertitude recherché est important.

Ces appareils sont généralement reliés à la gravité par une nivelle électronique bidirectionnelle de très grande qualité.

Les meilleures spécifications des théodolites sont :

- Incertitude angulaire des codeurs : 2,4 μ rad (0,15 mgon ou 0,5") selon la norme ISO 17123-3
- Incertitude de la nivelle électronique : 0,5 μ rad (0,03 mgon ou 0,1")
- Plage de mesure : 360° en horizontal, de -45° à 60° en vertical

La cadence d'acquisition dépendra essentiellement de la qualité de l'opérateur, du type de mesures à réaliser. Dans les meilleurs cas, il est possible de réaliser de l'ordre de 100 points en une heure. Les principaux fabricants de ces appareils sont LEICA et TRIMBLE. L'utilisation du théodolite a tendance à se réduire, mais on en trouve encore l'intérêt pour réaliser des relevés 3D dans l'industrie mécanique de grandes dimensions, souvent lorsque les grandes machines à mesurer 3D ne sont pas jugées rentables en investissement.

■ **Le tachéomètre** : C'est la même base d'appareil sur lequel a été rajoutée une mesure de distance, maintenant intégrée dans la lunette de visée. De ce fait, le tachéomètre devient une vraie machine à mesurer 3D portable. Aux caractéristiques du théodolite, s'ajoute donc celle du distancemètre l'incertitude

en distance :

- 0,5 mm pour les meilleurs tachéomètres pour les mesures avec réflecteur jusqu'à 50 m
- 3 mm pour les mesures sur cible naturelle

Comme pour le théodolite, la cadence d'acquisition dépendra des conditions de mesure. Dans les meilleurs cas, en mesure automatique, la cadence n'excède pas un point toutes les 5 secondes, soit 700 points en une heure. Les principaux fabricants pour les appareils que l'on trouve dans l'industrie sont LEICA, SOKKIA et TRIMBLE. On trouvera cet instrument dans les applications de contrôle 3D d'objets de grandes dimensions, lors du réglage de grandes pièces mécaniques ou pour la surveillance d'installations.

■ **Le laser de poursuite (ou laser tracker)** : il s'agit d'un tachéomètre auquel a été ajoutée une mesure de distance par interférométrie, avec un dispositif d'asservissement de la tête de mesure à la position du réflecteur pour assurer la poursuite. Ce complément de mesure de distance, associé à des codeurs angulaires rapides, permet deux améliorations majeures :

- La cadence d'acquisition est bien plus rapide (de l'ordre de 100 points / s)
 - L'incertitude en distance est grandement améliorée
- Les spécifications des lasers de poursuite sont approximativement :
- Incertitude angulaire des codeurs : 2,4 μ rad (0,15 mgon ou 0,5") selon la norme ISO 17123-3
 - Incertitude de la distance : 0,05 mm
 - Plage de mesure : 360° en horizontal, de $\pm 45^\circ$ en vertical, de 2 à 35 m en distance
 - Les constructeurs des lasers de poursuite sont API, FARO et LEICA.

Ces instruments sont utilisés dans l'industrie pour les relevés de géométrie 3D, les réglages de robots industriels et les relevés en dynamique, ainsi que pour les relevés de formes complexes.



Réglage de bâtis pour l'Airbus A 380 à l'aide d'un tachéomètre TDA 5005 de LEICA avec le logiciel Métride Dim Master.



Scanner laser
TRIMBLE S25.



Scanner laser
IMAGER 5003 de
Zoller+ Fröhlich.



Capteur de vidéo-
grammétrie de NDI.

■ **Les scanners lasers** : A l'inverse des lasers de poursuite, les scanners lasers ne sont pas des appareils de mesure d'un grand niveau d'exactitude, mais plutôt des appareils utiles pour mesurer des grandes quantités de points.

Deux familles d'instruments peuvent être distinguées :

- Les scanners lasers à base de triangulation, qui sont historiquement les plus anciens
- Les scanners lasers polaires, qui sont des tachéomètres à grande cadence d'acquisition

Ces deux familles d'instruments sont très différentes au niveau de la conception, mais le traitement des points est ensuite très proche, du fait du grand nombre de points.

Les scanners lasers par triangulation : Le principe de base de ces scanners est de réaliser un calcul de triangulation entre un laser qui émet soit un faisceau linéaire ou plan et une caméra qui perçoit la position de l'impact de ce faisceau sur l'objet. Dans le cas où le faisceau est uniquement linéaire et que la caméra est aussi linéaire, le plan de triangulation nécessite l'adjonction d'un troisième capteur (un codeur angulaire) pour obtenir la troisième donnée nécessaire à la détermination des points en 3D. Si le faisceau est plan, la caméra sera matricielle et les données seront directement traduites en coordonnées 3D. Les caractéristiques de ces instruments sont très variables, du fait que la géométrie de l'instrument (avec, en particulier, la base de triangulation) est essentielle sur ces données :

- L'incertitude spatiale est de l'ordre de 1 mm à 10 m
- La cadence d'acquisition est de l'ordre de 100 points/s
- L'étendue de mesure est de l'ordre de 0,8 à 25 m

Les principaux fabricants de ce type de scanner sont KONICA et TRIMBLE.

Les scanners lasers polaires : Comme indiqué plus haut, ce sont des tachéomètres dont la technologie des capteurs élémentaires a été modifiée pour obtenir des cadences d'acquisition bien supérieures :

- Le codeur angulaire est souvent un codeur galvanométrique
- Le distancemètre, bien que reposant sur le même principe de mesure par temps de vol d'une onde lumineuse, permet une fréquence d'acquisition très rapide, pour des mesures sur cible naturelle.

De ce fait, les spécifications de ces capteurs sont les suivantes :

- Incertitude angulaire de l'ordre de 24 à 50 μ rad
- Incertitude en distance de l'ordre de 3 à 12 mm
- Cadence d'acquisition de 1 à 2 kHz

Les principaux constructeurs de ces capteurs sont CALLIDUS,

LEICA, RIEGL, TRIMBLE et Zoller+Fröhlich. Les principales applications de ces scanners concernent les grandes installations industrielles pour établir les plans tels que construits, l'architecture et l'archéologie.

■ **La photogrammétrie et la vidéogrammétrie** : Ces deux méthodes de mesure 3D reposent sur la même technique de base : l'acquisition d'images par un procédé conventionnel (support argentique) ou numérique, puis le traitement des mesures par calcul de triangulation.

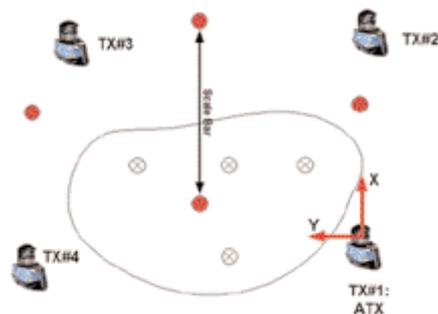
Depuis les années 1990, la photogrammétrie est devenue essentiellement numérique pour les applications industrielles, ce qui impose de travailler sur cibles rétro-réfléchissantes. Le temps de saisie et de traitement a incité les fabricants de capteurs à proposer des solutions en temps réel, que l'on nomme souvent des systèmes de vidéogrammétrie, où la cible dite passive est remplacée par une cible active, c'est-à-dire qu'elle s'éclaire automatiquement à la demande du logiciel de pilotage du système de vidéogrammétrie, pour différencier plus facilement chacun des points mesurés. Souvent aussi, ces systèmes de vidéogrammétrie sont proposés sous forme d'un capteur complet étalonné. La qualité de la mesure et surtout le niveau d'incertitude atteint dépendent très fortement d'un grand nombre de paramètres qui sont variables d'une application à l'autre ; en effet, un des intérêts de ces méthodes (comme les méthodes de triangulation par théodolite) provient de leur grande flexibilité : la disposition des capteurs, le nombre de capteurs utilisés, la méthode d'étalonnage... seront choisis selon l'objet à mesurer et les caractéristiques recherchées.

Les principales généralités que l'on peut donner en matière de caractéristiques sont les suivantes :

- Incertitude d'un point 3D sur l'objet : de l'ordre de 10^{-5} par rapport à la distance à l'objet
- Etendue de mesure : de 0,5 m à 1 000 m (voire au-delà dans les applications de cartographie)

Les principaux fabricants de ces moyens de mesure sont : ActiCM, AICON, GOM, GSI, IMETRIC, KRYPTON, METRONOR, NDI. Les applications sont très importantes, depuis le relevé 3D de grandes installations jusqu'aux essais en dynamique de produits manufacturés (portes, tiroirs...).

■ **GPS intérieur (GPS Indoor)** : Il s'agit d'un type de mesure très nouveau, qui repose sur l'idée des positionnements par satellites (GPS, Gallileo), bien que s'appuyant sur la triangulation et non pas la trilatération des systèmes par satellites. Le principe repose sur l'installation de capteurs dits satellites (pour respecter l'analogie) qui émettent des faisceaux lasers plans dans toutes les directions. Une procédure d'initialisation



Disposition des satellites pour le GPS Indoor.



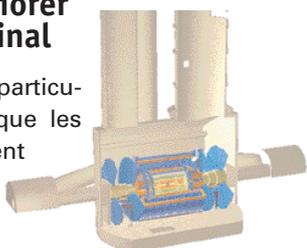
Exemple d'application du GPS Indoor dans l'industrie aéronautique.

(l'orientation relative et la mise à l'échelle de la triangulation) est nécessaire lors de l'installation de ces satellites. Et des moyens de vérification régulière sont installés pour que ce système soit contrôlé en permanence sur le site où il est installé.

Les mesures sont réalisées au moyen de palpeurs qui interceptent les faisceaux lasers et dès que le nombre suffisant de satellites est intercepté, la mesure 3D est accessible. Le seul fabricant identifié à l'heure actuelle est ArcSecond. Ce principe a pour avantage de mettre à disposition d'un ensemble de contrôleurs qui travaillent dans le même bâtiment, un moyen de relevé 3D, dont le niveau d'incertitude semble particulièrement prometteur puisque les constructeurs annoncent une incertitude de l'ordre de 0,15 mm pour un volume de 10 x 5 x 3 m, avec une cadence d'acquisition de 70 à 100 Hz. Les applications sont limitées, pour l'instant, aux grandes installations industrielles comme l'automobile, l'aéronautique où les besoins en relevé 3D sont importants et multiples, ce qui autorise ce type d'investissement qui reste encore lourd.

Combinaison de plusieurs techniques de mesure 3D pour améliorer le niveau d'incertitude final

Lors d'applications industriels particulières, il est souvent constaté que les méthodes de mesure 3D peuvent avoir des limites tant sur le niveau d'incertitude, que sur la faisabilité ou le temps nécessaire pour l'opération proprement dite. De



Caverne ATLAS de l'accélérateur LHC du CERN. ce fait, il est courant que l'on combine un certain nombre de techniques de mesure 3D pour correspondre au mieux au besoin exprimé.

Les objectifs les plus courants correspondent à :

- L'amélioration du niveau d'incertitude final de l'opération
- L'optimisation de la durée et/ou des coûts de l'opération
- La simplification du traitement des données pour définir le mesurande final

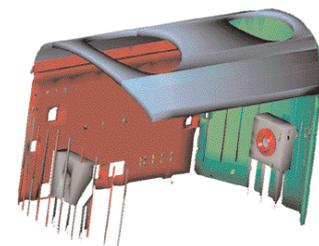
Un exemple de ce type de travail est présenté ici : il s'agit du relevé 3D d'une caverne du nouvel accélérateur de particules du CERN (dimensions : longueur 60 m, largeur 40 m, hauteur 35 m). L'objectif de ce relevé consiste à obtenir le modèle réel

de la caverne, y compris tous les points d'ancrage des éléments de l'expérience à installer, pour définir un scénario de maintenance des équipements le plus adapté et le plus fiable possible. L'incertitude de la représentativité du modèle doit être inférieure à 10 mm, sachant que les points d'ancrage doivent être connus à 5 mm. Le principe de mesure retenu est le suivant :

- Numérisation globale à l'aide d'un scanner laser GS100 de TRIMBLE
- Raccordement et relevé des points caractéristiques (les points d'ancrage des équipements) à l'aide d'un tachéomètre LEICATCRA1101+
- Le raccordement entre les deux systèmes de mesure est réalisé à l'aide de sphères, relevées par le tachéomètre. 1 mm.

Le bilan présenté ci-contre montre le gain sur l'incertitude de modèle construit sans recours à une autre méthode de mesure que le scanner laser par rapport à la méthode choisie. On remarque que dans ce cas présent, le gain est très important puisque l'incertitude finale est divisée par deux. Cette démarche a permis aussi de réaliser ce relevé en un temps remarquable : une seule journée pour relever 10 millions de points.

Bilan des incertitudes	
- Sans recalage par tachéomètre	
• Scanner :	7 mm en moyenne
• 3 stations :	
- Sphères de recalage :	3 mm
- Point courant :	7 mm
- Bilan sur les points de l'ensemble du maillage :	13,2 mm
- Avec recalage par tachéomètre	
• Scanner :	7 mm en moyenne
• Tachéomètre :	
- recalage :	1 mm
- relevés de sphères :	1 mm
• 3 stations :	
- Sphères de recalage :	3 mm
- Point courant :	7 mm
- Bilan sur les points de l'ensemble du maillage :	7,8 mm



Modèle CAO issu de la numérisation de la caverne ATLAS.

Conclusion

En final, il faut noter que les industriels disposent à l'heure actuelle d'un nombre très important de moyens de mesure 3D.

Lors de l'analyse d'un besoin, il est important d'identifier les caractéristiques à atteindre pour faciliter le choix des moyens de mesure : en effet, l'optimisation de ces moyens et éventuellement leur combinaison permet un gain très important sur les performances tant en termes d'incertitude que de temps de mesure et de traitement, avec, comme paramètre supplémentaire à surveiller, le coût d'investissement ou de location, selon le cas. Cette démarche est même à l'heure actuelle prise en compte par les constructeurs puisque l'on voit apparaître des instruments qui combinent plusieurs méthodes de mesure 3D, comme le laser de poursuite de LEICA, le LTD800 associé aux T-Scan (scanner laser) et T-Probe (outil 6D).



Laser de poursuite LEICA LTD800 et le scanner T-Scan.

Contact

Alain MARTIN-RABAUD

Métride s.a. 444, rue des Jonchères – 69730 GENAY (France)
Téléphone : 04 72 08 77 77 – Fax : 04 72 08 77 79
email : info@metride.fr – Site Web : www.metride.fr