

Utilisation en métrologie industrielle du stéréorestituteur analytique TRASTER.

Au cours des dernières décennies, la cartographie a fait un appel de plus en plus large à la photogrammétrie, à un tel point, que de nos jours, cette méthode est universelle. On peut sans doute expliquer son succès par un bilan économique bien supérieur à celui des mesures directes sur le terrain, accompagné d'une précision sans cesse améliorée.

La recherche continue des constructeurs a conduit à une amélioration constante des performances des matériels de cartographie, grâce à un usage de plus en plus large des progrès technologiques. Les moyens de métrologie fine ont apporté la précision, l'électronique et l'informatique ont permis une meilleure productivité en même temps que l'élargissement du domaine d'application de la photogrammétrie. Associées plus étroitement, les technologies modernes ont conduit à la réalisation des stéréorestituteurs analytiques où un système de mesure de haute qualité, une électronique et un ordinateur autorisent une métrologie à la fois précise, rapide et facile.

Par principe, le stéréorestituteur analytique n'est qu'un moyen nouveau de métrologie tridimensionnelle où l'objet à mesurer a été remplacé par son image sur film : le terrain survolé par un avion est simplement un objet de grandes dimensions dont on établira le plan à une échelle réduite. Ainsi on est naturellement conduit à penser que la photogrammétrie analytique a un vaste champ d'application, la cartographie n'étant qu'un cas particulier.

MATRA, en construisant le stéréorestituteur analytique TRASTER, tente de répondre à cet autre domaine d'application de la photogrammétrie qu'est la métrologie industrielle.

I. INTERET DE LA PHOTOGRAMMETRIE EN MILIEU INDUSTRIEL

Utiliser la photogrammétrie représente pour l'utilisateur un investissement qui ne sera intéressant que si, comme en cartographie, les sommes engagées sont rentables, par un gain en productivité ou en qualité de la mesure.

Il s'agit donc, par le jeu de considérations sur cette nouvelle méthode, de justifier son intérêt en analysant les principaux critères de choix dont voici un bref résumé.

1.1. La précision demandée :

Partant de photographies, la photogrammétrie garantira une mesure ramenée à l'échelle de prise de vue. Cela revient à dire que la limite de précision évolue en même temps que les dimensions de l'objet à mesurer. Pour le cas du Traster, capable d'une précision de 1,4 micron en moyenne quadratique, la multiplication par l'échelle de prise de vue indiquera la limite vraie 0,028mm pour des clichés au 1/20e par exemple (ceci étant pris dans le cas idéal, on verra que des influences extérieures viennent perturber les mesures).

1.2. La forme de l'objet

En règle générale, ce sera un élément ou un ensemble complexe mal commode mesurer avec les méthodes classiques et où, par sa forme même, la saisie d'un grand nombre de points est indispensable. Un avion ou sa maquette, une portière d'automobile ou une hélice de bateau en sont des exemples représentatifs.

1.3. La pérennité de l'archive

Dans de nombreux cas l'objet est précieux par sa qualité d'étalon, il représente une archive et sa perte est souvent grave. Les photographies prises pour ce traitement photogrammétrique sont des archives secondaires qui rendent moins catastrophiques les accidents possibles.

1.4. L'immobilisation de l'objet

En photogrammétrie, le temps d'immobilisation est réduit à la séquence de prise de vue et, est par suite, minimisé. Cet avantage est important dans le cas des prototypes, citons par exemple, le cas des avions où les temps d'immobilisation représentent des sommes considérables.

1.5. Les investissements :

Lorsque l'industriel ou le laboratoire doit s'équiper, il devra comparer les investissements à financer. Sur ce point, il est important de noter que les appareils de photogrammétrie sont très compétitifs, particulièrement pour la mesure d'objets volumineux. Par ailleurs, ils s'accrochent de la mesure d'objets de tailles très variables.

1.6. La productivité :

La démarche usuelle en photogrammétrie conduit à une exploitation en deux phases. La première est un étalonnage conduisant à une immobilisation du Traster pendant moins d'une demi heure. La seconde est l'exploitation proprement dite où, selon les cas, la saisie des points mesurés est faite à une cadence pouvant varier de 100 à 1000 points heure ou plus.

1.7. La reprise des mesures :

Citons enfin l'avantage intrinsèque du support photographique : à tout moment et sans avoir d'immobilisation supplémentaire de l'objet, il est possible de reprendre des mesures, de les compléter. Les résultats seront directement exploités dans le référentiel d'origine, avec la même précision.

A ces critères directement liés à l'objet, il convient d'ajouter d'autres certes moins directs, mais gages d'une utilisation meilleure des moyens.

1.8. L'autonomie :

Le photorestituteur analytique est autonome grâce à son ordinateur et à ses périphériques. C'est à dire qu'il possède les moyens de traitement

mathématique suffisants pour l'exploitation des résultats, sous forme de dessin ou de fichier de sortie.

1.9. Les facultés d'évolution

Comme en photogrammétrie analytique, le coeur de la saisie est une transformation mathématique traitée par logiciel, le photorestituteur est capable d'évoluer : il suffit pour cela de créer un logiciel nouveau.

1.10. Les facilités d'apprentissage et d'emploi :

L'ordinateur de conduite est en même temps un guide dans l'utilisation par l'exécution de dialogues et de commentaires aidant l'opérateur pendant le déroulement des travaux. Cette particularité des photorestituteurs analytiques, entraîne un temps de formation du personnel remarquablement bref, où l'élève n'a aucun besoin de connaissances en photogrammétrie. Par ailleurs le Traster se détache des autres photorestituteurs grâce à la projection sur écran, en offrant la possibilité à un instructeur d'observer la qualité du pointé fait.

1.11. Les possibilités de traitement sélectif :

Il est possible en photogrammétrie de faire les photos d'un grand nombre d'objets, dans le cas d'une série par exemple, puis de faire des mesures par prélèvement tout en conservant la possibilité d'un contrôle total pour le cas où celui-ci s'avèrerait nécessaire.

II. LES CONTRAINTES

Toute technique de mesure a des contraintes et la photogrammétrie n'y échappe pas. En effet, évoquer les avantages du photorestituteur analytique conduit à masquer le fait que la photogrammétrie est un processus où la prise de vue revêt une importance capitale.

L'exemple de la photogrammétrie aérienne illustre bien ce propos : c'est par l'étude des influences extérieures que la précision de la restitution est parvenue au voisinage de 0,002%. Ces influences portant sur les propriétés métriques des caméras, la réfraction atmosphérique, la courbure terrestre etc... sont compensés automatiquement par l'ordinateur.

On est ainsi amené à décrire les contraintes inhérentes à la prise de vue en notant que la précision finale obtenue dépend étroitement des solutions trouvées pour réduire ou éliminer leurs effets.

2.1. Le local de prise de vue :

Doit être suffisamment vaste pour loger l'ensemble du matériel de prise de vue et d'éclairage. Sa température doit être constante.

2.2. La profondeur relative de l'objet

Au contraire des photos aériennes, prises à l'infini au sens des objectifs, les appareils de prise de vue sont situés à courte distance de l'objet. Les problèmes de la profondeur de champ peut alors devenir important lorsque la profondeur relative de la pièce à photographier est importante, les détails éloignés du plan de mise au point devenant flous. Les solutions communément admises consistent à utiliser des objectifs de faible ouverture numérique et à réaliser plusieurs couples de clichés.

2.3. L'état de surface de l'objet

L'oeil humain ne sait apprécier un relief que lorsqu'un détail visible lui permet de situer correctement le repère de mesure. Une surface polie et vide de repères ponctuels est difficilement mesurée par photogrammétrie. Pratiquement, cette contrainte conduit à équiper l'objet de mires, de lignes etc... Notons que les surfaces complexes équipées de visserie, etc.. n'ont, en général, pas besoin d'équipement particulier de par leur bonne visibilité.

2.4. Les étalons de longueur

Par principe, la photogrammétrie fournit des résultats relatifs à des points aussi bien connus que possible. Repères géodésiques en cartographie en points, sont le plus souvent remplacés par des étalons de longueur en environnement industriel. Cela conduit l'entreprise à se munir de règles de haute précision, généralement en invar.

2.5. Les propriétés métriques de la caméra

On touche ici au problème le plus délicat de la photogrammétrie par l'étroite association entre la précision finale et la connaissance des paramètres de la caméra. En effet, il est nécessaire de connaître, avec finesse, la distance focale (ou le tirage pour une distance donnée), la courbe de distorsion et l'éventuel décentrement de l'objectif. La détermination de l'ensemble de ces paramètres va nécessiter une campagne de mesure importante avant la mise en service de la caméra.

Puis, pendant sa phase d'utilisation, la caméra restera un matériel fragile qui ne supportera aucun choc. La meilleure précaution sera d'employer des montages fixes dans la mesure du possible, évitant ainsi les ré-étalonnages fastidieux.

2.6. Les propriétés métriques des films

Cette contrainte fut longtemps importante, les films se déformant au cours du temps. Le problème est actuellement résolu depuis l'utilisation des supports stables de type ESTAR. Toutefois, le photographe devra veiller à développer les clichés dans les conditions préconisées par le fournisseur.

2.7. Le local de restitution photogrammétrique

Citons enfin que le photorestituteur analytique semblable à tous les instruments de haute précision, nécessite un environnement privilégié en température, hygrométrie et niveau de poussières.

3 - DESCRIPTION DU TRASTER

Dans tout stéréorestituteur analytique, l'association de la mesure brute (les déplacements en X et Y de chacun des clichés) avec la mesure calculée (les déplacements en XYZ du modèle stéréoscopique observé) repose sur un certain nombre de sous-ensembles dont les principaux sont :

- une structure générale
- un système de mesure et de motorisation
- un bloc optique de visée
- une électronique d'asservissement
- un ensemble de servitude
- un ordinateur
- un pupitre de commande

Le TRASTER réunit ces différents éléments avec des principes constructifs assurant la précision et le confort d'emploi.

3.1. La structure générale

Un appareil de métrologie fine doit garantir la stabilité des mesures. Cette stabilité a été acquise par l'adoption d'une structure en granite supportant le système de mesure et le bloc optique. Les différents capotages sont découplés mécaniquement de la structure.

3.2. Le système de mesure et de motorisation

En premier lieu, il est important de s'assurer que la mesure aura un seuil aussi réduit que possible. C'est par l'usage de patins à air au niveau des porte-clichés, d'accouplements à roulements spéciaux et de liaisons magnétiques qu'on a un seuil inférieur à la résolution (donc inférieur au micron). Le système de mesure est un jeu de règles codées convergent vers l'axe optique (principe d'Abbe). Rappelons l'intérêt du principe d'Abbe, garantissant la stricte indépendance des axes et, par suite, éliminant l'influence des imperfections de guidage. La motorisation est simplement un moteur asservi accouplé à un système vis écrou sans jeu.

3.3. Le bloc optique

Tous les appareils analytiques possèdent des systèmes de visée à oculaires et TRASTER s'est signalé en montrant une projection sur écran. Les utilisateurs reconnaissent, tous, l'avantage de ce principe nouveau qui entraîne un grand confort de l'opérateur, un vaste champ de visée, une excellente mobilité et la possibilité d'observation à plusieurs personnes.

Suivant ce principe, le bloc optique est simplement une source lumineuse un objectif de projection et un jeu de miroirs de renvois.

L'observation est rendue possible par l'utilisation de filtres polarisants croisés, l'opérateur portant des lunettes également à polariseurs croisés.

3.4. L'électronique d'asservissement

Sa seule particularité est de résoudre le difficile problème de la stabilité (meilleure que le micron) associé à une vitesse maximale élevée (20mm/seconde).

3.5. L'ensemble de servitude

Ce bloc comprend les différentes alimentations, en air et en énergie électrique.

3.6. L'ordinateur

Sur le plan fonctionnel, l'ordinateur a des vocations multiples. Son rôle principal est bien entendu, le traitement en temps réel qui transforme les coordonnées du trièdre objet en déplacement dans l'espace des clichés par l'envoi de consignes aux asservissements ; mais par sa puissance, il a des fonctions complémentaires importantes pour le contrôle d'état (apparition de butées de fin de course par exemple), le dialogue avec l'opérateur, le pré-traitement des informations de sortie puis leur stockage. Notons, enfin, l'avantage important de l'ordinateur qui confère au TRASTER d'excellentes propriétés d'autonomie par ses possibilités de traitement en temps différé sur les données enregistrées.

3.7. Le pupitre de commande

Le pupitre regroupe les fonctions de pilotage avec une boule sur coussin d'air pour les déplacements en XY et un cylindre pour le déplacement en Z, le clavier d'entrée des commandes et des données pour l'ordinateur, la visualisation alpha numérique d'édition des messages, les pédales d'envoi de points et les touches de fonctions.

3.8. Les moyens de sortie

Les mesures sont éditées suivant deux classes distinctes. La première est graphique : le document produit est alors tracé sur la table à dessin. La seconde est numérique et les résultats sont des fichiers de points supportés par une bande magnétique, un disque ou un ruban papier. Dans tous les cas, l'utilisation d'une imprimante permet l'édition, en clair, du traitement effectué.

Notons pour terminer ce bref descriptif du TRASTER, qu'un soin tout particulier a été apporté aux conditions ergonomiques d'emploi et à l'esthétique. Par une intégration poussée de ses différents composants, l'appareil a une présentation compacte où l'opérateur a une vision globale de son travail, sans aucun déplacement inutile, sans problème d'accommodation visuelle. La console, par exemple, regroupe dans un espace réduit l'écran de visée, les commandes XYZ, le clavier, le terminal alpha numérique, les touches de fonction et l'option de suivi télévisé de la table à dessin.

Note sur les caractéristiques essentielles du TRASTER :

- format maximal des clichés : 240x240mm
- grossissement d'observation : 9X, 15X et 27X
- champ d'observation : 40mm à 9X
- vitesse maximale de positionnement : 20mm s^{-1}
- vitesse maximale de suivi : 4mm/s
- résolution : 1 micron
- précision : 1,4 micron sur toute la course, en moyenne quadratique
- seuil : non observable (inférieur à la résolution).

La précision obtenue est donnée pour un fonctionnement en atmosphère régulée en température, après un temps de chauffe de 20 minutes. La précision en atmosphère non régulée et sans temps de chauffe est de l'ordre de 5 microns en moyenne quadratique.

4. UTILISATION DU TRASTER

L'expérience montre que les différences entre les exploitation en cartographie conventionnelle et en métrologie, sont réduites et que, dans tous les cas, ces différences sont assimilables par le logiciel (convergence des axes de prise de vue, mesures de longueurs, etc...) ainsi, la démarche déjà éprouvée en cartographie a été translatée sans effort important vers les applications industrielles.

Les différentes étapes de l'exploitation sont les suivantes :

4.1. L'étalonnage du stéréo restituteur

A la mise en service de l'appareil, on procède à son étalonnage par la mesure d'un réseau connu à mieux que le micron. Un contrôle de l'étalonnage tous les six mois est suffisant

4.2. La formation du modèle stéréoscopique

Chaque couple de cliché est mis en place dans l'appareil et, pour le cas où une nouvelle caméra a été utilisée, ses paramètres sont introduits dans l'ordinateur. L'opérateur vise ensuite entre 6 et 30 points homologues sur chaque cliché. Ces points sont automatiquement traités par l'ordinateur qui, à la fin des calculs, éditera l'indice de valeur du modèle formé sous la forme de résidus de mesures, rejettera les points faux et transmettra les paramètres de transformation. A l'issue de cette étape, l'opérateur travaillera sur un modèle stéréoscopique, c'est à dire, qu'il verra une image tridimensionnelle.

4.3. La mise à l'échelle

Par le pointé additionnel de références connues (les étalons de longueur) l'opérateur procède à l'étalonnage final de ses clichés. L'ordinateur va opérer comme précédemment, par les éditions de résidus, les éventuels rejets de l'ajustement des paramètres pour que les coordonnées affichées soient normées (notons que, comme en cartographie, la mise à l'échelle peut aisément s'accompagner d'un basculement, c'est à dire, que le modèle est ajusté sur un référentiel connu ; il suffit pour cela d'introduire dans le calcul les coordonnées des étalons à la place de leur longueur).

Les étapes 4.2. et 4.3. demandent un temps de travail variable en fonction du nombre de points pris. On note couramment des durées inférieures à la demi-heure pour une exécution soignée.

4.4. L'exploitation proprement dite

Sa description est malaisée, les variétés de types étant nombreuses. Nous nous cantonnerons dans l'énumération des principales d'entre elles, en notant que les mixages sont toujours possibles.

a) les deux classes fondamentales :

- le tracé de plan, où l'opérateur mesure les détails caractéristiques
- le modèle mathématique, où l'opérateur crée la volumétrie générale

b) les types de saisie :

- ponctuel : mesure des points en statique
- linéaire : suivi d'une courbe

c) les modes d'enregistrement :

- fonction de l'opérateur par l'envoi de point
- fonction du temps
- fonction de la distance

d) les moyens de sortie :

- dessin
- fichier de points

e) les codes d'enregistrement :

- avec identificateur global
- avec identificateur par point, séquentiel, arbitraire etc....

f) les types de dessins :

- plans
- coupes
- interpolation ou non.

Le TRASTER possède en outre les outils de calcul en temps différé pour les traitements complémentaires (tous programmables en FORTRAN). Ces calculs peuvent être effectués en simultanéité avec l'exploitation sur un autre couple de clichés et la table à dessin peut être indifféremment affectée au travail de saisie ou à l'édition des résultats du temps différé en même temps que la saisie.

5 - LE FUTUR

En l'état actuel, on peut conclure que le stéréorestituteur analytique est un outil de métrologie puissant et doué de possibilités de traitement importantes.

Or l'informatique, par ces capacités d'évolution rapide tant du point de vue des coûts, que de celui des performances, laisse penser que dans un avenir proche, la Photogrammétrie va se prolonger par des perfectionnements sensibles vers le dessin final et vers l'interactivité, aboutissant ainsi vers des systèmes totalement intégrés de conception assistée par ordinateur. MATRA a déjà orienté ses recherches dans ce sens.