

CONSIDÉRATIONS SUR LES APPLICATIONS ET LA PRÉCISION DU SYSTÈME PHOTOGRAMMÉTRIQUE EN TEMPS RÉEL MNS

Alf Pettersen, Directeur Technique, Metronor AS (Norvège)

Résumé

Un nouveau concept de métrologie utilise des caméras CCD à haute résolution pour mesurer les coordonnées des impacts laser ou des diodes émettrices de lumière. Le système, basé sur la photogrammétrie, est un système de mesure en ligne présentant des résultats immédiats, point par point. Une technique brevetée pour l'étalonnage des caméras, ainsi qu'une analyse très performante des signaux assurent une précision de 0.1 mm pour un volume de mesure de $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{ m}^3$. Le crayon lumineux, un palpeur mécanique, transforme le système en une machine de mesure de coordonnées qui tient dans la main. Un module CAO permet de relier directement toutes les mesures au modèle CAO comme déviations au point le plus proche. Le système a un grand nombre d'applications dans l'industrie automobile et aérospatiale. Ce rapport traite des limites de précision, des contrôles et du résultat des tests de précision effectués par Volvo et Renault.

I - INTRODUCTION

Le système «Metrology Norway» (MNS) présente un concept totalement nouveau pour la métrologie industrielle. Il s'agit d'un système qui assure une précision satisfaisant la plupart des applications en métrologie, tout en conservant les avantages d'une collecte rapide des données sur un large volume, qui est un système portable et qui garantit une adaptabilité maximum à grand nombre d'applications.

Ce système est développé en coopération étroite avec Volvo, département de technologie de production. Ceci garantit qu'il est conçu pour les besoins industriels.

Le système est basé sur des caméras CCD spécialement fabriquées et étalonnées. L'étalonnage unique en usine transforme chaque caméra en une caméra photogrammétrique pouvant travailler en temps réel. MNS mesure les coordonnées spatiales (XYZ) de diodes émettrices de lumière infrarouge (IR LEDs) spéciales, ou éventuellement, de points de lumière laser IR réfléchi.

II - LE CONCEPT MNS

2.1 Photogrammétrie

MNS est intrinsèquement un système photogrammétrique basé sur des caméras CCD de haute résolution (Videk MegaPlus). Les caméras sont reliées à un ordinateur VME assurant une analyse très performante des signaux et donnant une résolution fractionnaire de 0.01 pixel.

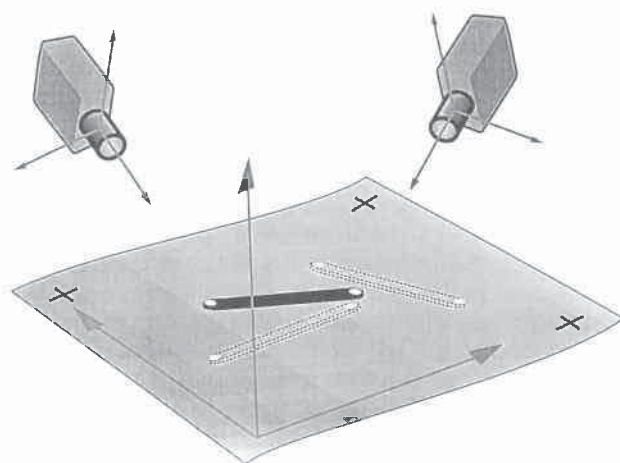


Fig 1. Camera setup and exterior orientation.

Pour obtenir une précision optimale et pour rendre le système aisément opérationnel, les caméras sont étalonnées en usine. L'étalonnage comprend un relevé complet de tous les capteurs, donnant une description détaillée des distorsions optiques, de la géométrie des capteurs ainsi que de leurs défauts. Le résultat de l'étalonnage d'une caméra, c'est-à-dire son orientation intérieure, est stocké dans le système de l'ordinateur et est utilisé pour corriger chaque coordonnée image observée par rapport à celle de la caméra photogrammétrique «idéale». La méthode d'étalonnage est une technique unique, développée et brevetée par Metronor, qui ne sera pas davantage détaillée dans ce papier.

L'étalonnage en usine permet d'utiliser la caméra en tout lieu, sans autre étalonnage durant la mise en œuvre des mesures. Une simple procédure de mise en marche est nécessaire pour

déterminer la position relative des deux caméras et de l'objet considéré :

- Les caméras sont facilement pointées vers l'objet de telle façon que le champ de vision de la caméra recouvre largement le volume qui contient ou contiendra l'objet à mesurer. L'utilisateur peut voir les images prises par les caméras sur un moniteur noir et blanc inclus dans le système.

- L'orientation extérieure des caméras, c'est-à-dire leur position et orientation relative, est déterminée par une barre de référence (Figure 1). La barre de référence contient plusieurs LEDs infrarouges (IR) insérées dans un barreau invar et elle est connectée à la console du système MNS par un câble multi-usages. La barre de référence est dirigée de telle sorte que les deux caméras puissent voir les LEDs. Presser le bouton situé à l'extrémité de la barre entraîne le déclenchement de la mesure. L'utilisateur change ensuite l'orientation de la barre et presse à nouveau le bouton. Pour un résultat optimum, les mesures sont prises à l'intérieur de tout le volume de mesure concerné. Ceci permet une redondance maximum dans les procédures d'initialisation.

- Les positions et orientations des caméras sont ensuite calculées par la méthode d'ajustement des faisceaux. Ceci est essentiellement un traitement par moindres carrés pour ajuster les distances données entre les sources de lumière dans toutes les positions de la barre avec les positions et orientations calculées des caméras. La procédure de calcul donne les écarts maxima et moyens par rapport à la longueur théorique. L'algorithme d'ajustement des faisceaux ne requiert pas de valeurs initiales pour aucun des paramètres à déterminer.

- Les résultats de l'orientation extérieure définissent un système global de coordonnées. Pour relier toutes les mesures à un système local de coordonnées, des points de référence parfaitement connus sont nécessaires. Deux options sont possibles : trois points de référence donnés par leurs coordonnées x, y, z , ou un maximum de six points donnés par le système 3/2/1. Un système de référence 3/2/1 (tri-dimensionnel libre) peut par exemple être donné comme trois points définis par leur valeur z , deux points définis par leur valeur y et le dernier point défini par sa valeur x . Les points de référence sont uniquement des surfaces planes ou des trous. Un instrument simple permettant de mesurer les points de référence est le « crayon lumineux » décrit ci-dessous.

Le système comprend une station de travail UNIX, comportant des logiciels spécifiques à certaines applications et une interface utilisateur.

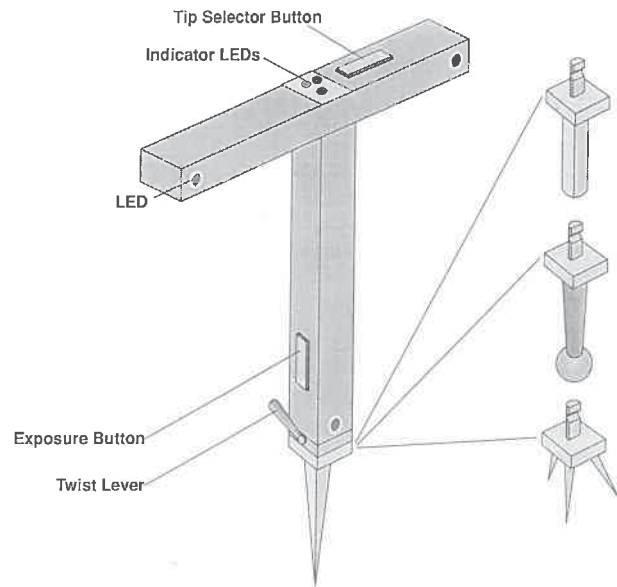


Fig. 2

2.2 Le Crayon Lumineux

MNS possède un système breveté de crayon lumineux (Figure 2) qui fait de lui un système transportable de mesure de coordonnées pour les applications requérant des précisions de l'ordre de 0.1 mm. Le crayon lumineux est un instrument offrant à l'utilisateur la liberté de digitaliser tout point sélectionné sur un objet. L'utilisateur place la pointe du crayon sur le point choisi, s'assure que les caméras peuvent voir les LEDs et presse le bouton d'exposition sur le crayon. Les coordonnées de la pointe du crayon lumineux sont immédiatement affichées sur l'écran de l'ordinateur.

Le crayon lumineux contient trois LEDs dont les coordonnées sont bien connues dans le système de coordonnées local du crayon. Connaissant la géométrie du crayon lumineux, MNS calcule aisément les coordonnées spatiales de la tête de lecture de la pointe du crayon en mesurant les coordonnées spatiales des trois LEDs de ce dernier.

La pointe interchangeable du crayon est analogue à une combinaison sonde/stylet de machine à mesurer les coordonnées. Chaque outil a été préalablement étalonné, soit par Metronor, soit par l'utilisateur, et les coordonnées de la tête de lecture par rapport au système local de coordonnées du crayon sont emmagasinées dans MNS. L'utilisateur peut créer une tête de lecture spécialement adaptée pour des mesures dans des zones difficiles d'accès. Pour prendre la mesure, les caméras n'ont besoin que de voir les LEDs et non la pointe du crayon. Par exemple, si l'utilisateur veut mesurer un point situé en-dessous de la surface d'un objet, une tête de lecture peut être pliée en forme de crochet.

Le crayon lumineux permet les mesures suivantes :

- jeu de coordonnées XYZ,
- distance entre deux points,
- trous - diamètre, coordonnées du centre,
- planéité - distance et angle relatif entre deux surfaces,
- intervalle - distance entre deux lignes ou deux bords.

Le crayon lumineux est un outil important pour mesurer les coordonnées des points de référence.

2.3 Projection de points lumineux laser

Divers systèmes de projection laser sont également disponibles. Le projecteur laser (Laser Projector Gun) est un outil idéal pour les mesures mettant en œuvre des matériaux mous (par exemple ceux que l'on trouve dans les intérieurs automobiles) qui se déformeraient s'ils étaient mesurés avec des méthodes de contact conventionnelles. Comme MNS mesure les coordonnées spatiales des points de lumière infrarouge (invisible à l'œil), le projecteur laser envoie deux lasers visibles en même temps que le laser invisible qui est mesuré. Les lasers visibles sont nécessaires pour déterminer correctement la mise au point et la cible, car il est essentiel que la tache laser soit focalisée le mieux possible pour réduire ou éliminer les effets de tacheture.

Des lasers à point unique, qui sont de simples diodes laser projetant un seul impact à mesurer, sont également disponibles. L'utilisateur monte et dirige individuellement ces lasers pour mesurer des points particuliers sur la surface d'un objet.

Le scanner laser bi-axial est un produit indépendant qui peut être intégré sous contrôle MNS. Il projette un faisceau de lumière laser infrarouge à point unique sur l'objet. MNS mesure les coordonnées spatiales de ce point réfléchi en lumière diffuse. À l'intérieur du scanner se trouve une source laser et deux miroirs - dont l'orientation est contrôlée avec précision, qui dirigent le faisceau sur le point à mesurer sur l'objet. Le scanner reçoit de MNS les commandes de positionnement des miroirs. Il comprend également une fonction de mise au point automatique du faisceau laser.

2.4 Interface CAO

MNS est capable de relier les données de mesure au modèle nominal CAO de l'objet considéré. Ceci s'effectue par la comparaison du point le plus proche (perpendiculaire à la surface) des données physiquement mesurées avec le point correspondant sur la surface nominale CAO.

L'échange des données avec le système CAO est basé sur l'utilisation du format standard VDA-FS d'échange de données géométriques. Le modèle VDA-FS est transféré par une liaison Ethernet et stocké localement dans la station de travail MNS. MNS convertit ensuite ce modèle VDA-FS en une représentation B-spline de la surface.

Durant les mesures des points les plus proches, la représentation CAO filaire apparaît dans une fenêtre sur l'écran couleur haute résolution dans une orientation sélectionnable par l'utilisateur. Une fois la mesure effectuée, les coordonnées XYZ ainsi que le point le plus proche de la référence nominale CAO, sont affichés numériquement et graphiquement sur la représentation filaire CAO.

Le logiciel «Point le plus proche» (Closest Point Software) peut traiter des mesures pour un seul point (applications du crayon lumineux) aussi bien que la mesure simultanée de points multiples (application des projections d'un semis de points).

2.5 Logiciel «Six Degrés de Liberté»

Ce logiciel permet à l'utilisateur de mesurer la position et l'orientation d'un objet par rapport à celles d'un autre objet, ou tout système de référence de base.

III - APPLICATIONS

MNS est un système général de mesure géométrique destiné à des applications industrielles. Son adaptabilité et sa souplesse offrent des solutions à grand nombre de problèmes de mesure.

• Contrôle qualité des découpes (off-line QC) : une des applications premières de MNS est la mesure des emboutissages des pièces d'automobiles (figure 3). Après un changement d'étampe sur une ligne d'emboutissage, quelques premières pièces de la ligne sont examinées pour quantifier les déformations qui existent par rapport à la forme idéale (First-Off stamped part inspection). MNS est une méthode plus rapide et plus efficace pour cette opération, en éliminant le recours à des appareillages de référence coûteux. L'utilisation du crayon lumineux pour la mesure du point le plus proche permet d'obtenir un tracé rapide de toutes les déviations par rapport au modèle CAO.

• Mesure des déplacements et des déformations : MNS est également utilisé comme technique pratique pour mesurer des déplacements relatifs dans l'espace. Ceci est très utile pour quantifier les déformations en tant que fonction de diverses forces. L'une des applications est la vérification et l'étalonnage des modèles d'ordi-

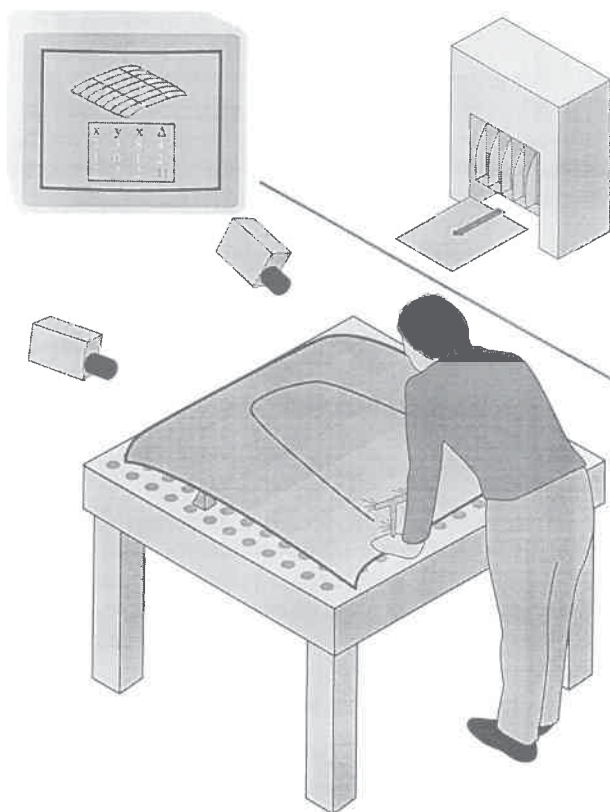


Fig. 3. Off line quality control.

nateur, générés par la méthode des éléments finis, pour les carrosseries. L'exemple montré dans la figure 4 est celui de la mesure de la variation de la ligne de découpe d'une porte de véhicule, la carrosserie étant soumise à diverses forces. D'autres applications sont possibles pour les tests de collision.

Des séries de diodes lumineuses (LED) réutilisables sont collées sur l'objet à des endroits choisis. MNS mesure simultanément le déplacement individuel de chaque LED à une fréquence de mesure maximum de 2 Hz. Les mesures sont initialisées par l'opérateur sur le clavier MNS, ou déclenchées extérieurement par un signal TTL pour synchronisation avec les forces appliquées.

- **Assemblage de prototype :** MNS a la capacité de mesurer la position et l'orientation d'objets par rapport à tout système de référence de base défini par l'utilisateur. L'exemple de la figure 5 montre la détermination de la position et de l'orientation d'une aile pendant l'assemblage du prototype. Le système de référence devra être le système de coordonnées de l'automobile. Trois LEDs sont fixées sur l'aile. MNS est capable de mesurer et de stocker instantanément l'emplacement de ces LEDs par rapport au système de coordonnées de l'aile qui est défini par des points de référence, comme décrit dans la section 2.1. Ces

LEDs agissent alors comme des points de référence de secours pour le processus d'assemblage. Pour effectuer les mesures par rapport au système de coordonnées de l'automobile (en utilisant de nouveaux points de référence), MNS est capable de déterminer la position actuelle du pré-assemblage de l'aile et l'orientation par rapport au système de coordonnées du véhicule en contrôlant les LEDs.

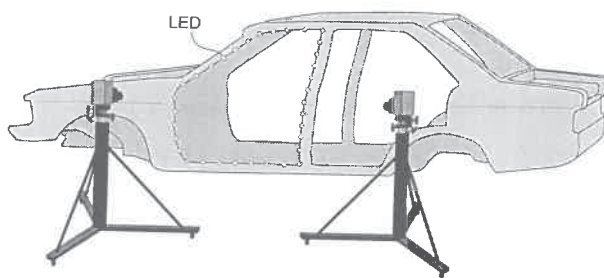


Fig. 4. Measurement of physical displacements.

- **Digitalisation des surfaces à forme libre :** MNS peut rapidement numériser un modèle entier de carrosserie automobile en utilisant un scanneur laser (Section 2.3) comme le montre la Figure 6.

Le scanneur laser envoie pas-à-pas un point de lumière laser infrarouge sur la surface du véhicule. La distance linéaire d'incrémentement (distance entre les points individuels) peut être définie par l'utilisateur ou MNS peut adapter l'incrémentement à la courbure de l'objet. La vitesse d'acquisition des données sera en général légèrement inférieure à deux mesures par seconde, ou approximativement 5 000 points à l'heure.

L'utilisateur peut placer le scanneur laser à sa position optimale en fonction des dimensions et de la forme de l'objet. MNS peut calculer la position du scanneur, comme dans l'initialisation photogrammétrique utilisée pour déterminer la localisation des caméras, en envoyant des commandes angulaires pré-définies aux miroirs du scanneur et en mesurant les positions XYZ correspondantes de l'impact sur le véhicule.

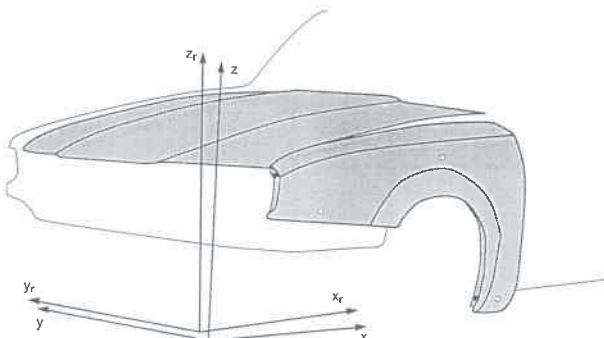


Fig. 5. Measurement of object position and orientation.

Le crayon lumineux permet de donner des informations complémentaires non négligeables en digitalisant les lignes particulières et les discontinuités (trous, bords).

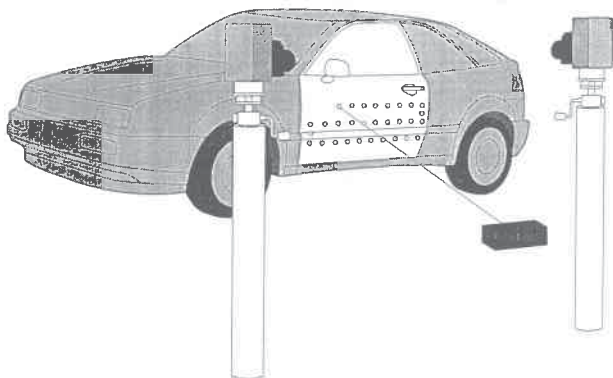


Fig. 6. Digitizing of car body.

- Contrôle en continu des étampages : en projetant un grand nombre de points laser (semis) sur une surface, MNS peut dessiner toute déviation par rapport au modèle CAO en quelques secondes.

- Contrôle des cellules de production :
 - alignement des installations
 - alignement des outils d'emboutissage et d'étampage.

- Programmation des robots.

- Test en soufflerie : Mesure avec six degrés de liberté, numérisation.

IV - LIMITES DE PRÉCISION

La précision des mesures du Système MNS dépend des éléments suivants :

- Résolution des capteurs : les matrices CCD MegaPlus comportent 1350 x 1035 pixels. Cependant, en utilisant une analyse statistique des images du point, une résolution fractionnaire de 0.01 pixel est obtenue. Cette résolution de grande qualité dépend de l'optimisation de la dimension du point lumineux (c'est-à-dire sa qualité optique) et du rapport signal/bruit (c'est-à-dire le contrôle d'exposition).

- Etalonnage de la caméra : il permet de considérer la caméra comme une caméra photogrammétrique idéale, l'orientation interne de cette dernière étant déterminée une fois pour toutes.

- Géométrie des mesures : la répétabilité est proportionnelle à la dimension du volume à mesurer. Une petite intersection angulaire produit une précision médiocre en éloignement (selon l'axe moyen). Un système à deux caméras donne toujours une meilleure précision verticale du fait de la redondance. L'introduction d'une troisième caméra augmenterait la précision de façon significative.

- Application : pour celles du crayon lumineux, la précision dépend de la dimension et de la forme du crayon lumineux en fonction du volume de la mesure et de la distance de la pointe du crayon à la source de lumière. Pour obtenir une précision maximum dans les applications laser, le laser est focalisé jusqu'à élimination de tout problème de tacheture. Des démonstrations de mesures de précision ont été faites pour des matériaux difficiles, comme l'acier non peint, l'aluminium et les plastiques noirs.

V - TESTS DE PRÉCISION

La précision et la sûreté des mesures étant les points cruciaux de ce système, la précision peut être vérifiée par différentes méthodes :

- Etalonnage de la caméra : l'instrument de référence utilisé pour l'étalonnage de la caméra vient du National Bureau of Standards. Sur l'ensemble du capteur, chaque pixel est calibré en fonction de ses variations et de ses défauts.

- Vérification de la précision in-situ : la barre de précision utilisée pour déterminer l'orientation extérieure a une longueur dont la précision est garantie à 3 μm . Chaque procédure de mise en place se termine par un affichage de la précision durant l'installation, par comparaison de la valeur mesurée à la valeur garantie. Mesurer la longueur de la barre de référence à tout endroit, à tout moment après une initialisation, permet de vérifier que la position spatiale calculée et l'orientation de la caméra sont toujours bonnes. Il n'est pas possible d'effectuer des lectures de distance correctes, en toute position arbitraire dans le volume de mesure, si des erreurs sont intervenues et influencent la précision ou la mise en place des caméras.

- Test du système suivant les instructions VDI : le crayon lumineux permet de vérifier la précision du système par des méthodes utilisées par les machines à mesurer, suivant les instructions du VDI Allemand (VDI/VDE 2617). MNS est le seul système photogrammétrique ayant cette particularité. Celle-ci permet la vérification entière de la précision 3D.

VI - TESTS DE PRÉCISION RENAULT/VOLVO

Des tests de précision minutieux ont été effectués en avril 1991. Ils furent effectués après qu'une nouvelle solution ait été trouvée en ce qui concerne les erreurs systématiques. Les améliorations qui s'ensuivirent ont abouti à une diminution d'environ 30% des erreurs systématiques. La procédure de test suit les normes Renault pour les tests de machines à mesurer.

Le système a été installé pour un volume de mesure de $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{ m}^3$ minimum. L'angle d'intersection de la caméra est d'environ 60 degrés.

Les résultats les plus significatifs de ces tests, exprimés en erreurs U95 (soit environ 2σ) ont été les suivants :

Répétabilité des mesures au crayon lumineux meilleure que :

- dans le plan (horizontal) de la caméra : 0.077 mm
- verticalement : 0.020 mm

Mesures de longueur verticales, de 0 à 300 mm, en cinq points du volume de mesure :

- précision : 0.028 mm

- incertitude des mesures : 0.092 mm

Mesures de longueur de la barre diagonale, sur les quatre diagonales du volume de mesure, longueur de la barre 1000 mm :

- précision : 0.054 mm
- incertitude des mesures : 0.178 mm

Ces valeurs représentent la dispersion statistique des mesures sur les deux côtés de la barre. Les résultats montrent que les écarts systématiques sont très petits. Les travaux futurs seront concentrés sur l'amélioration de la répétabilité.

VII - CONCLUSION

MNS est le seul système photogrammétrique «on line» constituant un système de mesure de coordonnées qui satisfait les spécifications de précision exigées par l'industrie automobile pour les mesures de carrosserie.

Cette grande précision, ainsi que la portabilité du système, en font un instrument unique pour grand nombre d'applications qui sont hors de portée des systèmes actuels de mesure de coordonnées.

ASSUREZ VOS POSITIONS... PAR SATELLITES GPS

Aujourd'hui GEO.SAT vous offre la productivité : 8 points par jour avec la précision centimétrique en X,Y,Z

GEO.SAT met à votre service :

- matériels : 3 récepteurs GPS, calculateur, véhicule
- opérateur : topographe spécialement formé à la technique du GPS
- compétences : pour réaliser vos triangulations, stéréopréparations, densification de canevas, etc...

POSITIONNEZ-VOUS... en réservant dès aujourd'hui

Attention : nouvelle adresse

GEO.SAT 2 bis, Parc BUROSPACE - 91571 BIEVRES CEDEX
Tél. : (1) 69.41.27.88

Fax : (1) 69.41.28.20