

NOUVEAUX DÉVELOPPEMENTS EN PHOTOGRAMMÉTRIE NUMÉRIQUE RAPPROCHÉE

Prof. Dr. A. Gruen

Institut de Géodésie et de Photogrammétrie, ETH Zurich, Suisse

Résumé

Les techniques numériques rapprochées ont ouvert de nouvelles perspectives en photogrammétrie en ce qui concerne le développement de systèmes, la recherche d'algorithmes et leurs applications. Cet article passe brièvement en revue la précision de tels systèmes, l'acquisition des images et les aspects de leur traitement, les nouveaux développements d'algorithmes et quelques projets pilotes qui permettent d'évaluer le large potentiel d'applications envisageables.

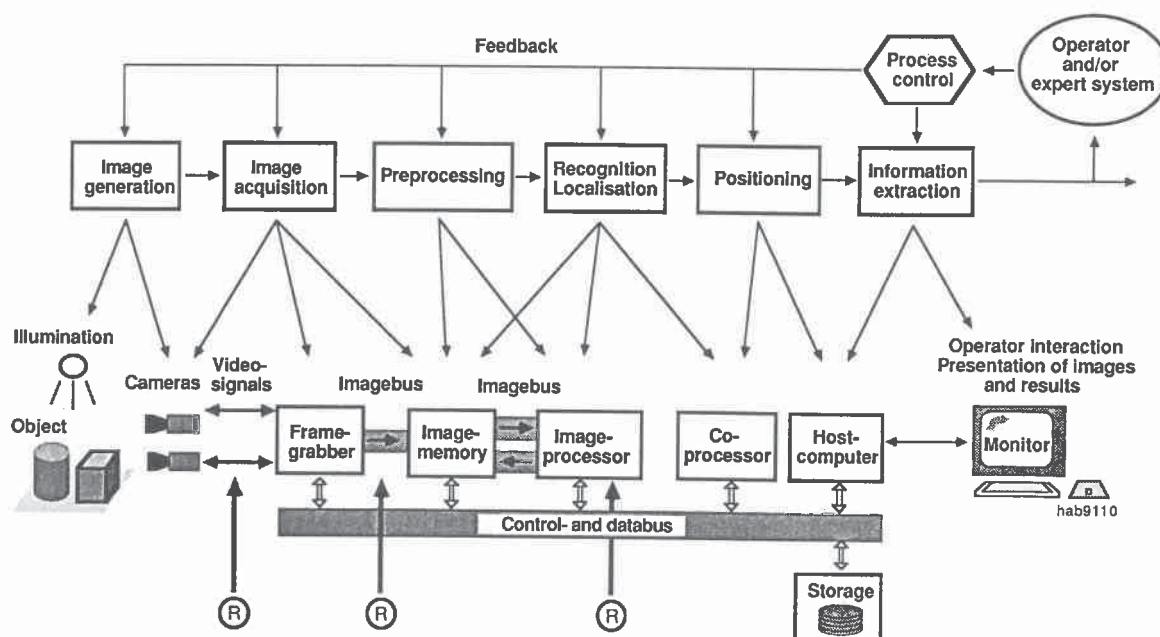
I. DÉVELOPPEMENTS EN PHOTOGRAMMÉTRIE RAPPROCHÉE : ANALOGIQUE / ANALYTIQUE - HYBRIDE - NUMÉRIQUE

La photogrammétrie rapprochée a subi de grands changements ces dernières années. Les techniques de photogrammétrie analytique se sont extrêmement développées et des instruments puissants, tels que les restituteurs analytiques, sont déjà disponibles et offrent à l'opérateur des outils flexibles pour le traitement photogramétrique analogique. Un grand nombre de caméras non métriques, semi-métriques et métriques, aux caractéristiques et aux coûts divers, sont utilisables. Le contrôle soigneux de la précision du système, de sa fiabilité et des différents autres paramètres du projet, permet une grande précision dans le positionnement du point. Celle-ci peut être

caractérisée par un écart-type des coordonnées de l'image de $s_0 = 2\mu\text{m}$ et une précision relative dans l'espace objet de 1 : 100 000 et mieux.

Ce niveau de précision a été poussé au point d'atteindre les niveaux 1:500'000 et même 1:1'000'000 grâce à l'utilisation de systèmes hybrides (Fraser, 1991). Néanmoins, un certain nombre de précautions doivent être prises pour atteindre une telle précision : photographie de grand format ($23 \times 23 \text{ cm}^2$) avec fond de chambre ultra plat à succion et réseau projeté à l'arrière, monocomparateur de haute précision ($0.1 \mu\text{m}$) avec mesure automatique par vidéo camera de cibles rétro-réfléchissantes, compensation par faisceaux avec étalonnage automatique, réseau de contrôle très consistant avec une redondance exceptionnellement grande.

Figure 1 : Structure fonctionnelle et composants d'un système en temps réel. Intégration du système pour traitement rapide (en robotique).



Les développements récents, l'apparition de caméras CCD bon marché et le faible coût des logiciels de saisie et de traitement d'image ont provoqué un remarquable essor du concept de systèmes entièrement numériques. Le développement de systèmes, logiciels et algorithmes associés offre couramment un grand nombre d'applications nouvelles dans différents domaines scientifiques et techniques. L'impact majeur vient donc du fait que les systèmes entièrement numériques peuvent apporter des réponses "on line" ou même en temps réel.

Les composants des systèmes photogramétriques en temps réel, c'est-à-dire détecteurs et caméras, transfert des données et digitalisation de l'image, outils, processeurs d'image, mémoire d'image, image bus et image output sont décrits en détail dans le rapport Gruen, 1988, ainsi que quelques systèmes disponibles, avec leurs caractéristiques photogrammétriques et leurs performances. La figure 1 montre la structure fonctionnelle d'un tel système et ses composants.

Ce système n'est pas, comme cette figure pourrait le suggérer, limité à une approche stéréo. Grâce à la possibilité d'acquisition et de traitement d'image rapide, le concept multi-stations et multi-images peut être réalisé encore plus facilement et plus économiquement qu'avec des systèmes basés sur le film. Cela aura un sérieux impact sur la précision obtenue comme il le sera démontré dans le chapitre 2.

On trouve des applications importantes de ces systèmes en robotique. Dans ce contexte, un traitement très rapide est essentiel si l'action du robot doit être contrôlée par le système de vision. Le traitement au rythme proche de la vidéo peut seulement être effectué en mettant les algorithmes appropriés dans le système. Ceci s'applique tout spécialement aux phases de traitement dans lesquelles l'image entière doit être manipulée - par exemple pour l'extraction des coordonnées de l'image de cibles et

autres objets. Comme indiqué dans la figure 1, ce système peut être intégré à divers stades du traitement.

II. PRÉCISION DES SYSTEMES NUMÉRIQUES

Jusqu'à présent, seuls quelques tests sur la précision du système sont disponibles, utilisant les données d'une zone test 3-D et déduisant les mesures de précision des coordonnées de l'objet 3-D sur les points contrôlés. Beyer, 1987 décrit une vraie zone test 3-D en se restreignant toutefois à l'utilisation de deux caméras CCD. La figure 2 montre les caméras connexes et l'organisation de la zone test. Le tableau 1 indique les résultats du contrôle. Une précision de 0.09 mm sur les coordonnées X, Y a été obtenue pour un gros objet de 50 x 50 x 50 cm³. En précision relative, cela représente environ 1:5'000. La précision de la profondeur (Z) est de 0.07 mm, soit 0.03 % de la profondeur moyenne.

Ces résultats ont été obtenus en utilisant une méthode de compensation globale avec étalonnage automatique. Des facteurs d'amélioration de 2.5 à 5.7 sont obtenus en modélisant les erreurs systématiques de l'étalonnage automatique. Les erreurs systématiques jouent un rôle majeur dans les systèmes de caméras CCD et la perfection de leur modélisation et compensation est cruciale pour obtenir des résultats d'une grande précision.

Grâce à un meilleur contrôle de la ligne vidéo et en générant un réseau plus consistant, une précision relative de 1:10'000 peut être considérée comme le niveau de précision type des années 80. Cependant, en utilisant une saisie synchrone des pixels et des réseaux géométriques très redondants (plus de 30 rayons intersectant un point particulier de l'objet), une précision relative de 1:40'000 pourrait être obtenue dans des conditions de laboratoire (comparer Beyer, 1991a).

Tableau 1 : Résultats d'une compensation globale avec et sans étalonnage automatique du réseau de la figure 2.

Version	AP	# co	# ch	r	sig o (μ m)	Object Space							
						RMSE				Standard Deviation			
						μ X (μ m)	μ Y (μ m)	μ XY (μ m)	μ Z (μ m)	sig X (μ m)	sig Y (μ m)	sig XY (μ m)	sig Z (μ m)
1	0	27	46	144	1.20	302	201	257	401	336	225	286	398
2	8	27	46	135	0.22	121	45	92	70	64	48	57	73
					5.5	2.5	4.5	2.8	5.7	5.3	4.7	5.0	5.5

AP : number of additional parameters
co : number of control points
ch : number of check points
r : redundancy

sig o ... : standard deviation of image coordinates a posteriori
 μ ... : RMSE (computed from check point residuals)
sig ... : standard deviation (computed from the inversion of normal equations)

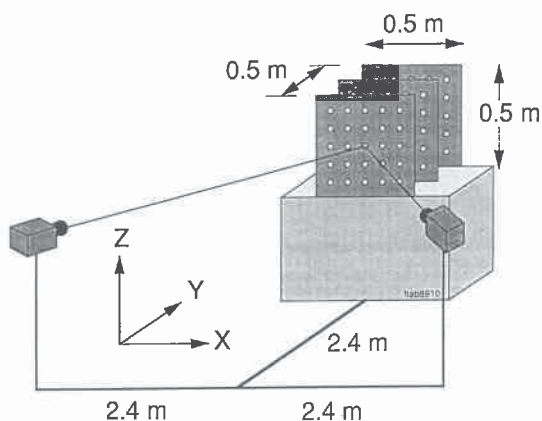


Figure 2 : Disposition de caméras CCD et zone test pour contrôle de précision

Ce potentiel de haute précision associé à la vitesse d'acquisition et du traitement des données ouvre à la photogrammétrie numérique rapprochée un très large champ d'applications. Le chapitre 5 traite de quelques-uns des travaux qui ont été réalisés dernièrement à l'Institut de Géodésie et de Photogrammétrie de l'ETH à Zürich.

III. STATION PHOTOGRAMMÉTRIQUE NUMÉRIQUE DIPS II

III.1. Plateforme de calcul

Le concept d'une station de travail photogrammétrique entièrement numérique est relativement nouveau. Son importance pour le futur de la photogrammétrie est corroborée par le fait qu'un grand nombre de groupes de recherche et de développement ont activement travaillé dans ce sens depuis quelques années.

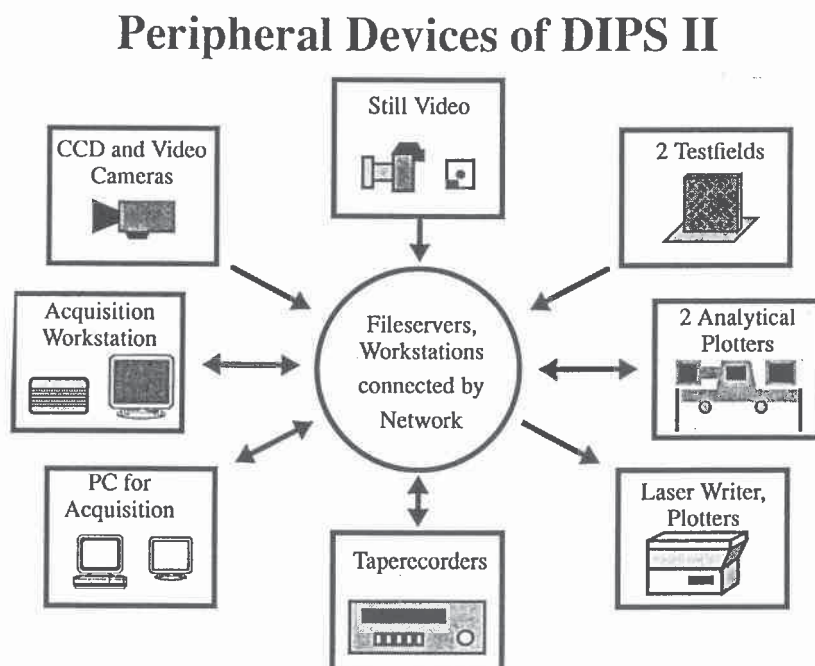
En 1985, notre groupe a commencé par un premier prototype utilisant un système de traitement d'image du commerce comme noyau central. Comme ce système "clé en main" s'avéra trop restrictif par rapport aux développements des logiciels et aux additions en matériel, nous avons changé peu après la philosophie de base du système pour une approche modulaire (Gruen, 1989). Modularité signifie ouverture tant du côté système que logiciel. Elle représente aussi la flexibilité et l'adaptabilité par rapport aux coûts et fonctionnalités.

Le changement pour un concept nouveau et modulaire était risqué et lourd de conséquences. L'idée de base était d'obtenir un système pouvant être utilisé par le plus grand nombre et de façon flexible, qui s'adapte au plus grand éventail possible de matériels et de logiciels, qui puisse grandir et devenir un système permettant à l'utilisateur de progresser rapidement, en lui apportant continuellement de nouvelles fonctionnalités, plus de vitesse de traitement et d'espace mémoire et / ou en lui donnant un accès rapide à ses propres outils et produits.

Le concept vers lequel nous cherchions à nous diriger était d'utiliser un système basé sur une station de travail travaillant sous UNIX, avec ses vraies qualités multi-tâches et multi-utilisateurs, ses outils de programmation avancés, un système de fenêtre puissant, un système d'écran rapide et de haute résolution, un accès rapide à une large mémoire et la capacité de se relier à d'autres systèmes et instruments. Lorsque nous avons décidé de cet achat en 1986, les stations de travail de Sun Microsystems offraient toutes les spécifications requises à un prix raisonnable.

Notre deuxième génération de stations numériques DIPS II est basé sur un nombre extensible de stations de travail Sun-3 et Sun-4, reliées les unes aux autres par Ethernet et équipées de composants standards pour l'acquisition et le traitement d'images numériques (Figure 3).

Figure 3 : Périphériques de DIPS II.



DIPS II Image Acquisition Workstation

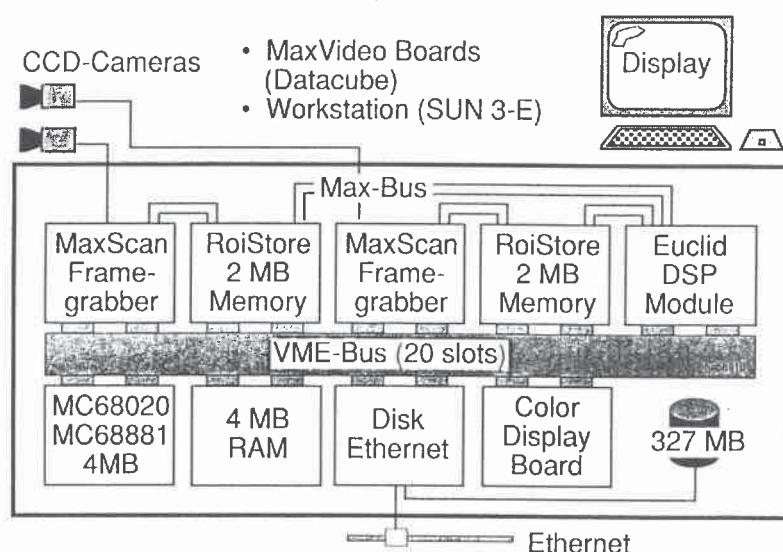


Figure 4 : système d'acquisition d'image DIPS II basé sur Datacube.

Aujourd'hui, le système consiste en deux serveurs et neuf stations de travail (Sun-3, Sun-4 /Sparcstation 1 GX). Il est projeté de transformer les Sun-3 en Sun-4/Sparcstation afin d'avoir un environnement unique pour de meilleures gestion et compatibilité. Il y a une station de travail qui restera au niveau original Sun-3 : une Sun-3/E équipée d'extensions Datacube pour l'acquisition générale et le pré-traitement des images. (Figure 4).

III.2 Acquisition d'image

DIPS II comporte une variété d'options pour l'acquisition d'images :

- Acquisition directe avec caméras CCD par le système Datacube en mode mono et stéréo (Figure 4).
- Acquisition directe avec caméras CCD par l'intermédiaire d'enregistreurs de bandes vidéo et d'un PC-AT équipé d'une carte Matrix MVP-AT. Jusqu'à présent, une configuration maximum de trois caméras CCD avec enregistrement simultané sur trois enregistreurs de bande vidéo a été utilisée dans les projets tels que des mesures de flux turbulent et des études des mouvements biomécaniques humains.
- La conservation de bandes vidéo intermédiaires dans une forme analogue et la digitalisation différée sont également possibles avec des données venant d'une caméra vidéo JVC GR-S774 (S-VHS).
- Conversion d'images en utilisant des caméras CCD comme instruments de digitalisation sur

les reconstituteurs WILD AC1 et Prime Wild S9-Ap (Wilkins, 1990). Chacun de ces reconstituteurs analytiques est équipé d'adaptateurs opto-mécaniques qui acceptent des caméras sur les deux plateaux. Pour l'acquisition par AC1, on utilise le système Datacube, tandis que pour l'acquisition par S9-AP, de nouveaux outils avec saisie d'image séparée sont prévus pour de futures installations.

- L'acquisition directe au moyen d'une caméra vidéo CANON RC701 et un enregistreur vidéo ; ce système sera bientôt remplacé par une caméra à plus haute résolution.

III.3. DEDIP

DEDIP (Environnement de développement pour la photogrammétrie digitale), développé par notre groupe, est un gros programme écrit en C, qui apporte un environnement unifié pour le développement de logiciels et un interface pour utilisateur avancé basé sur le système de fenêtre SunView. Des routines de base pour la gestion des mémoires d'images et autres structures de données, fonctions entrée/sortie, fonctions utilitaires pour SunView, ainsi qu'une gestion d'écran avec liste d'affichage des images et d'autres caractéristiques forment l'essentiel de DEDIP. Une utilisation extensive des structures de données facilite la programmation.

A l'heure actuelle, DEDIP comprend des fonctions telles que :

- Acquisition interactive de la saisie d'image avec contrôle des écarts et gains;
- Lecture et écriture d'images de dimensions variables, avec leurs zones d'intérêt;
- Affichage et manipulation sur écran (manipulation LUT, sélection de curseur, etc.);
- Vues monoscopique et stéréoscopique;
- Traitement standard d'image et fonctions analyse d'image;
- Outil de mesure interactive monoscopique avec gabarit de corrélation;
- Corrélation du gabarit et de l'image avec positionnement de points simultanés;
- Recherche de cible en séquence d'images en mode multi-cibles;
- Redressement analytique;
- Analyse radiométrique et géométrique d'image, détermination MTF;
- Fonctions de visualisation pour l'analyse de la qualité des images;

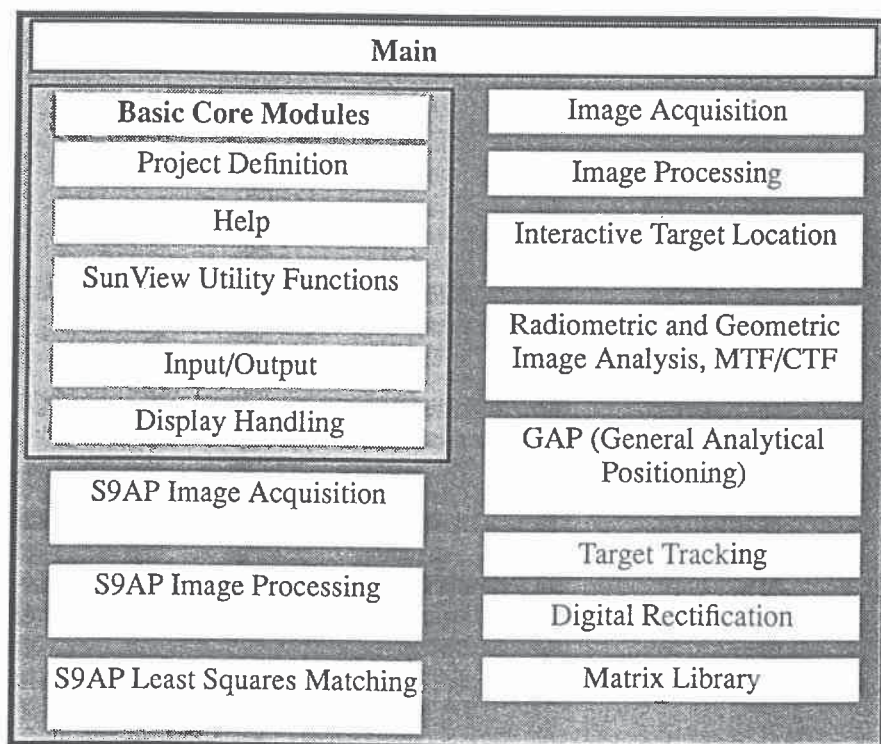


Figure 5 : Modules principaux de DEDIP.

- Compensation globale avec étalonnage automatique spécifiquement destinée aux applications rapprochées et à l'usage de caméras CCD, avec outils de visualisation pour l'analyse des résultats.

La figure 5 montre quelques-uns des outils de DEDIP.

DEDIP comprend environ 150'000 lignes de code C. Il est sans arrêt en expansion du fait de l'apport de nouvelles fonctions et de nouveaux algorithmes développés pour la recherche et les projets pilotes.

Pour certaines analyses et la photogrammétrie de base, certains programmes extérieurs de DEDIP - dont la plupart sont écrits en Fortran - offrent des fonctions d'analyse d'image telles que :

- DTMZ, un programme numérique de modèle de terrain utilisant l'interpolation d'éléments finis dans un réseau triangulaire Delaunay;
- DTMSY, qui utilise un modèle de surface numérique produit par DTMS afin de dériver des images synthétiques par recouvrement pixel en projection parallèle;
- BUND, un programme de compensation globale avec étalonnage automatique et quelques caractéristiques adaptées à la triangulation aérienne;
- CORGEO, un programme de corrélation gabarit-image qui comporte une variété de modèles d'ajustement pour l'adaptation de multi-photos géométriquement contraintes

par moindres carrés (Gruen, 1985, Gruen, Baltsavias, 1988a);

- Programme de traitement de séquences vidéo CCD pour les études des mouvements humains (Baltsavias, Stallmann, 1990);
- MMPP, un module d'observation et de positionnement de points multimédia, développé pour un projet de mesures de flux turbulent 3-D (Papantoniou, Maas, 1990), qui comprend l'étalonnage d'un système de trois caméras CCD, l'observation et le positionnement de points homologues dans le but de déterminer les vecteurs de vitesse dans un flux turbulent;
- OLT, un programme pour la triangulation globale en continu, qui utilise les transformations de Givens pour l'ajustement séquentiel.

IV. QUELQUES ASPECTS DES ALGORITHMES

La photogrammétrie numérique de base permet le traitement automatique des données d'image. Pour le transfert d'informations symboliques et non structurées, un grand nombre d'algorithmes - tirés du traitement de l'image, de son analyse et de son interprétation - sont disponibles. Cependant, si dans une application particulière l'emphasis est mise sur la haute précision des résultats et sur le traitement adéquat des erreurs d'un système de mesures incluant des moyens performants d'auto-diagnostic, ces algorithmes traditionnels n'offrent qu'un très maigre apport. De nouveaux algorithmes ont dû alors être développés durant ces dernières années en tenant compte de la connaissance photogramétrique en matière de modélisation, de capteurs et de réseaux.

IV.1 Corrélation multi-photos contraintes géométriquement (MPGC)

Cet algorithme de corrélation d'image a été développé à partir de l'algorithme de corrélation par moindres carrés (LSM) pour devenir une technique capable de traiter une grande variété de contraintes géométriques connues d'un système de capteurs, et corréler un nombre quelconque d'images simultanées (Gruen, 1985). Comme le montre la figure 6,

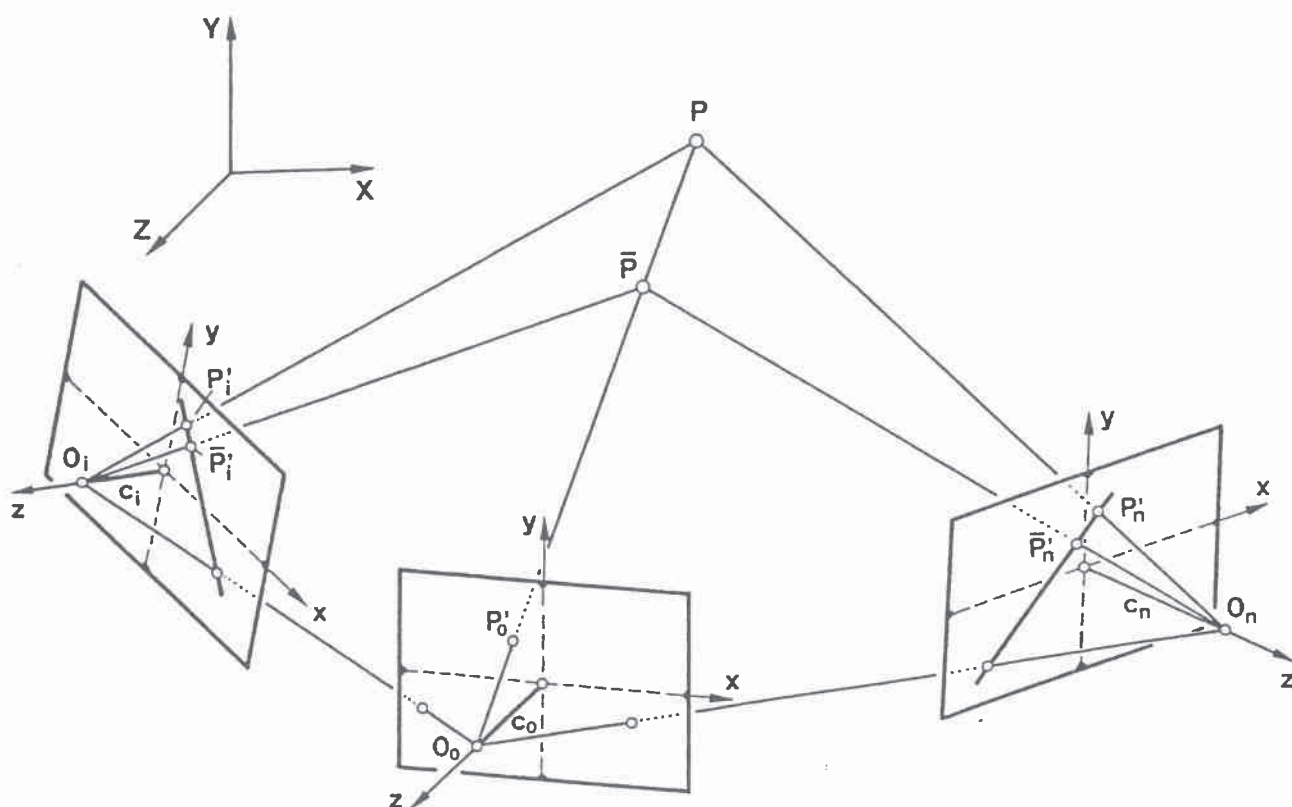


Figure 6 : corrélation multi-photos contraintes géométriquement

Exemple : contraintes de colinéarité par rapport à P_o' .

ceci permet d'éviter les restrictions stéréo de l'opérateur et conduit à améliorer la précision et la fiabilité de la corrélation. Un grand nombre d'autres avantages et exemples de cette procédure de corrélation est indiquée dans le rapport Gruen, Baltsavias, 1988a.

Le modèle mathématique de corrélation MPGC permet l'estimation simultanée des paramètres de corrélation et des coordonnées des points ou lignes caractéristiques de l'objet. La méthode a jusqu'à maintenant été utilisée à titre préliminaire pour la mesure de surfaces et de points cibles individuels.

IV.2 Mesure de haute précision des contours d'objets

Un raffinement supplémentaire et une extension de cette technique sont maintenant disponibles pour la mesure précise des contours d'objets non ciblés (Gruen, Stallmann, 1991). Ceci permet un grand nombre de contrôles de qualité dans l'industrie et donne le moyen de résoudre efficacement certains problèmes de robotique. En fonction de la qualité de définition du contour de l'objet, on peut atteindre une précision de 1:25'000.

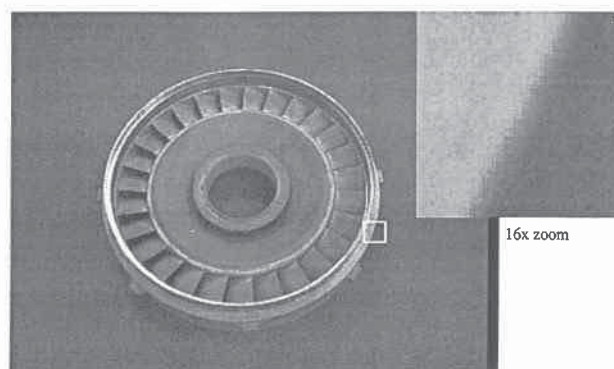


Figure 7a : Tuyère de moteur à réaction. Les lignes circulaires doivent être mesurées.

La figure 7a montre un composant industriel à mesurer (tuyère de moteur d'avion). La figure 7b permet de visualiser la technique de corrélation utilisant quatre parties de différentes images CCD et un gabarit synthétique de contour d'image, utilisé comme jauge automatique de mesure.

V. APPLICATIONS ET PROJETS PILOTES

Les nouveaux systèmes décrits ci-dessus ont été testés en contrôle dimensionnel, mesure de surface, observation d'objet, robotique, etc, dans un grand nombre de projets différents - comme, par exemple :

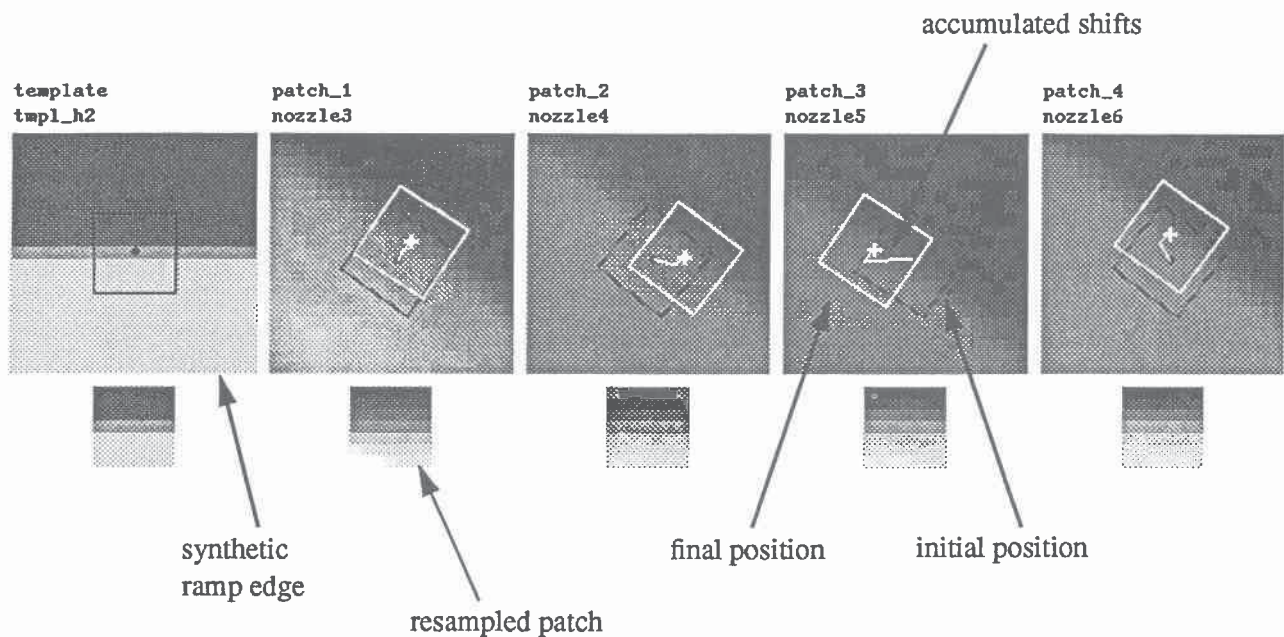


Figure 7b : appariement de contours circulaires utilisant des extraits d'image venant de quatre différentes cameras CCD; position approximative (en noir) et finale (en blanc).

- Mesure automobile (dessin, CFAO et contrôle qualité);
- Contrôle des surfaces des avions et des moteurs (vérification et test du matériel);
- Structures architecturales (architecture, restauration de monument);
- Remodelage de visage (médecine);
- Mesure des dents (dentisterie, vidéodontographie);
- Etude des mouvements humains (biomécanique);
- Détermination de la trajectoire des insectes (biologie, pharmacie);
- Mesure 3-D haute résolution des champs d'écoulement rapide en flux turbulents (hydromécanique);
- Robots pour tennis de table (robotique).

V.1. Contrôle dimensionnel d'un véhicule préparé pour un test de collision

Un rapport détaillé de ce projet figure dans Beyer, 1991b. Dans ce projet pilote, un fourgon a été préparé pour un test de collision et marqué de 78 cibles rétro-réfléchissantes (59 cibles à l'extérieur, dans les zones moteur et portes, et 19 cibles dans la partie passagers). Le but principal de ce test était de vérifier la méthodologie de la mesure et les performances du système. Le second objectif était de montrer que la résolution et la précision des caméras bon marché de type CCTV sont adéquates. Les tolérances de précision requièrent un écart-type de 1 mm

pour chaque axe de coordonnées dans un volume de mesure de $5 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$.

Trois caméras SONY-XC77XE CD furent utilisées en des points donnés (Figure 8). Les caméras 1 et 2 fournissaient une vue d'ensemble du véhicule tandis que la caméra 3 était utilisée pour l'image des cibles à l'intérieur de la voiture. L'imagerie du contrôle fut acquise en faisant tourner le véhicule sur une plateforme à incrémentations de 30 grades et en prenant des images avec toutes les caméras en chacune de ces positions.

Les cibles rétro-réfléchissantes étaient utilisées pour éliminer le problème des réflexions sur la surface du véhicule. Pour garantir une meilleure qualité géométrique et radiométrique de l'image, une saisie des pixels en mode synchrone avec un système capteur MAX-SCAN (Datacube) fut utilisé. La configuration du capteur de vues fut en sorte d'assurer qu'une image avec des zones de 728×568 pixels espacés de $11 \times 11 \mu\text{m}$ serait obtenue.

Le capteur de vues et la mémoire d'image sont intégrés dans un châssis VME 21 avec une station de travail SUN-3E comme ordinateur hôte.

Les résultats de la compensation globale et la comparaison avec les coordonnées de référence sont donnés dans le tableau 2. Les coordonnées de référence ont été mesurées avec des théodolites par Volkswagen AG en ce qui concerne 44 des 78 points de l'objet. La version 1 comprend seulement 24 images pour

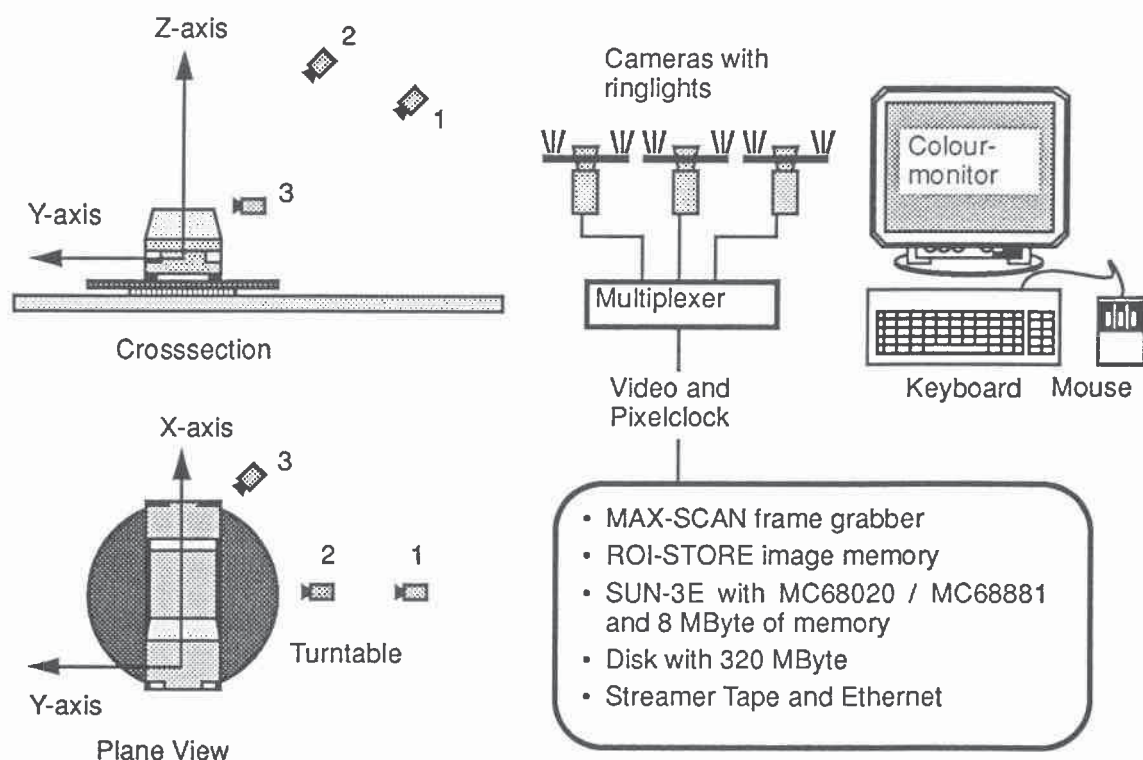


Figure 8 : configuration de la mesure pour une position du véhicule sur la plateforme tournante et système d'acquisition de l'image.

les caméras 1 et 2. Les versions 2 et 3 comprennent un total de 32 images avec les trois caméras, avec la version 2 calculée et la version 3 sans auto-étalonnage. Un ensemble de paramètres additionnels par caméra fut utilisé dans les versions 1 et 2.

Les résultats des versions 1 et 2 montrent que les tolérances de précision ont été respectées. La dégradation entre la version 1 et la version 2 vient des points situés à l'intérieur du véhicule. La géométrie du réseau intérieur de la voiture et sa connexion avec l'extérieur sont très faibles. La précision empirique de 1/10e de pixel en espace image est très bonne dans de telles circonstances. La précision peut être améliorée, comme le montre la différence entre les valeurs théoriques de précision issue de la compensation des faisceaux (s_x , s_y , s_z) et les précisions empiriques (μ_x , μ_y , μ_z) obtenues par compa-

raison avec les mesures au théodolite. Ceci est dû à plusieurs facteurs indépendants de la faiblesse de la géométrie à l'intérieur du véhicule. Un grand nombre de fautes diminuent la précision, mais elles ne furent pas éliminées pour vérifier l'efficacité de la technique de mesure. De nombreuses cibles sont très petites. Plusieurs ne furent que partiellement visibles et/ou pas nettes. L'effet de diffusion sur les cibles rétro-réfléchissantes a conduit à une image légèrement asymétrique.

Results of Car Measurement

V	AP	Co	Ch	r	$\hat{\sigma}_0$	$\hat{\sigma}_x$	$\hat{\sigma}_y$	$\hat{\sigma}_z$	μ_x	μ_y	μ_z	μ_x	μ_y
					[μm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[μm]	[μm]
1	20	8	30	762	0.93	0.36	0.32	0.46	0.55	0.51	0.93	0.9	1.0
2	30	8	36	1144	1.01	0.38	0.35	0.46	0.64	0.53	1.12	1.1	1.8
3	0	8	36	1144	4.28	1.60	1.48	1.94	5.51	4.19	11.1	10.3	19.1
Improvement 3/2					4.2	4.2	4.2	4.2	8.3	7.9	9.6	9.4	10.6
AP					Number of additional parameters								
Co					Number of control points								
Ch					Number of check points								
r					Redundancy (degree of freedom)								
$\hat{\sigma}_0$					Standard Deviation of unit weight a posteriori								
$\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y, \hat{\sigma}_z$					Precision of check points								
μ_x, μ_y, μ_z					Accuracy of check points (RMS values from comparison)								
μ_x, μ_y					Accuracy from check point comparison in image space								

Tableau 2 : Résultats de la compensation globale.

La version 3 utilise les valeurs de la base d'étalonnage pour l'orientation interne et l'espacement des pixels, sans aucun paramètre additionnel. La comparaison de la mesure de précision des versions 2 et 3 indique une amélioration du fait de l'étalonnage automatique par des facteurs allant jusqu'à 10. L'effet des erreurs systématiques compensées par des paramètres additionnels atteint $100\text{ }\mu\text{m}$ à un rayon de 1.8 mm à partir du centre de l'image (version 2)

V.2 Mesures de surfaces

Dans Gruen, Baltsavias, 1988b, un rapport relate la reconstruction d'un visage en appliquant des techniques spéciales d'extraction de traits et la corrélation d'image par moindres carrés sur une paire de caméras CCD stéréo. La figure 9b montre une des images originales et des produits dérivés (quadrillage et modèle ombré de Gouraud) assemblés sur un cube. On notera que, pour ce traitement, des images illuminées en lumière structurée ont été utilisées.

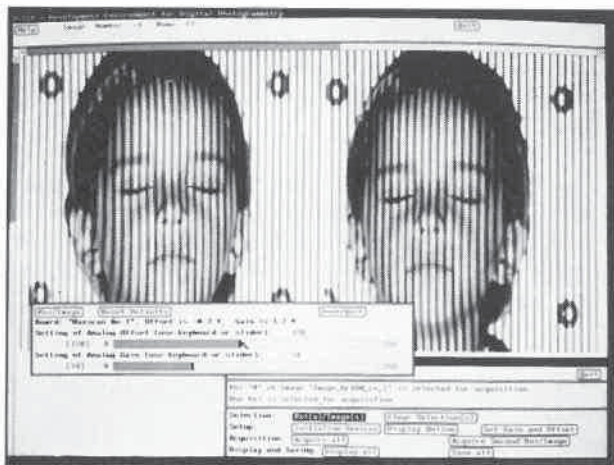
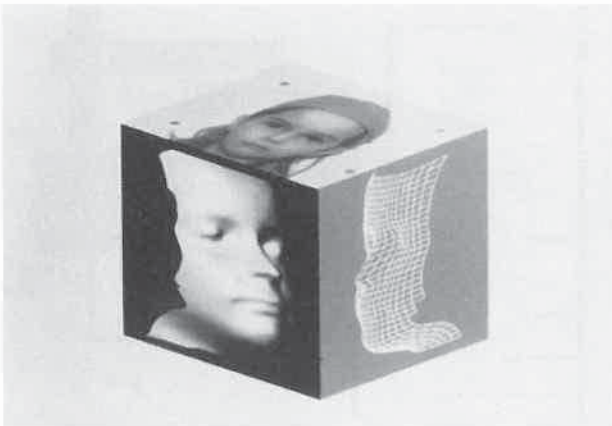


Figure 9a : Vues CCD en stéréo d'un visage humain illuminé en lumière structurée.

Figure 9b : Reconstitution de visage. Assemblage de l'image originale avec le modèle quadrillé et le modèle ombré de Gouraud sur un cube.



Une autre technique pour les mesures de surface est basée sur la méthodologie développée sur notre projet de flux turbulent 3-D (cf. chapitre 5.3). Une grille de points lumineux est projetée sur la surface, et l'algorithme de mesure de particules multivues est appliqué à la mesure de l'image et aux coordonnées spatiales de l'objet sur ces points. Un champ dense allant jusqu'à 5000 points de surface peut être généré en 20 secondes de calcul, avec une précision de profondeur de 0.01% (Maas, 1991).

V.3 Observation d'objets

Deux projets différents montrent le potentiel des méthodes utilisant les caméras CCD pour l'observation d'objets.

Pour la détermination 3-D des champs de vitesse des flux turbulents, une configuration de trois caméras CCD a été utilisée pour enregistrer des particules illuminées par laser dans un canal d'eau en laboratoire (Papantoniou, Maas, 1990).

La technique, entièrement automatique, utilise une approche photogrammétrique multi-média et permet d'observer les particules avec une haute précision spatiale et une grande fiabilité, avec de très bonnes résolutions temporelles et spatiales. Environ 1000 particules peuvent être positionnées et observées sur 350 cycles vidéo avec une précision mesurée de $\mu_x = 0.05\text{ mm}$ and $\mu_z = 0.2\text{ mm}$ dans un volume spatial de l'objet de $150 \times 150 \times 15\text{ mm}^3$.

La figure 10 montre le système d'acquisition des données. L'utilisation simultanée de trois caméras conduit à une amélioration décisive de la précision du positionnement des points et accroît le nombre de particules observées.

Dans le contexte d'applications biomécaniques (Baltsavias, Stallmann, 1990) une personne a été équipée de cibles rétro-réfléchissantes. Passant alors à travers notre grande zone de test, les trajectoires de ces marques ont été déterminées par trois caméras CCD, dont les vues étaient acquises simultanément et enregistrées sur vidéo.

La figure 11a montre la configuration géométrique. La figure 11b montre les trajectoires couvrant une séquence d'images. Les problèmes d'occlusion ou d'image partielle des cibles méritent une considération particulière. La personne portait une règle de 50 cm de long avec une marque à chaque extrémité. Un écart-type de 1.7 mm a été obtenu dans la comparaison avec la valeur vraie de la distance pour 93 positions de règle.

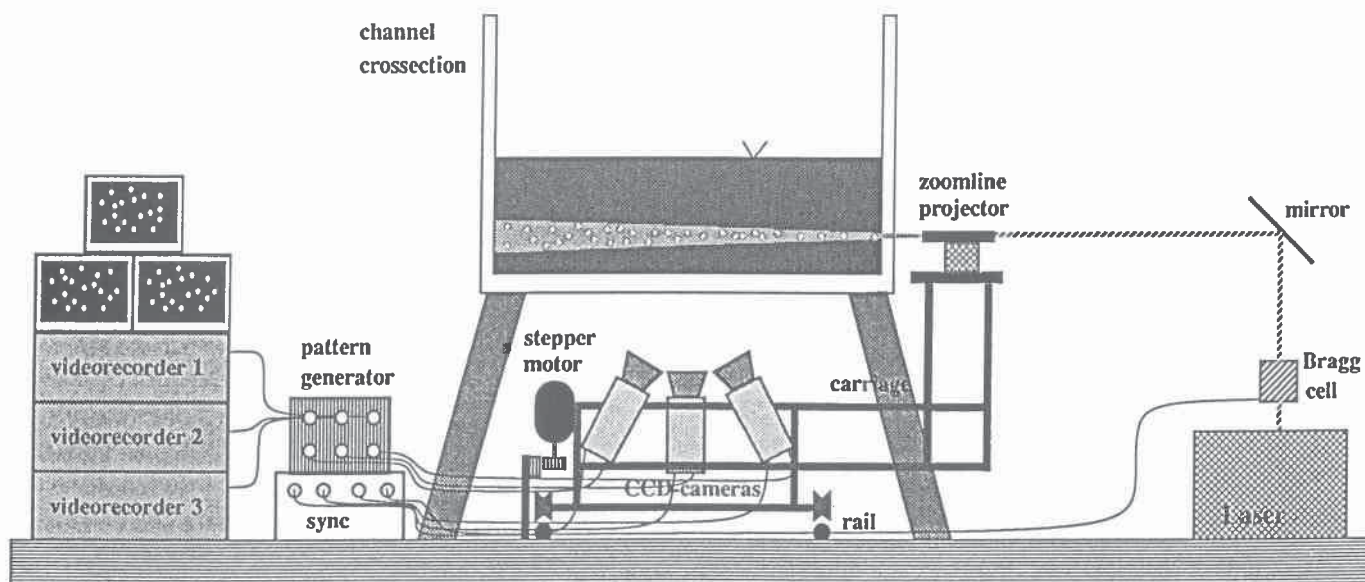


Figure 10 : Système d'acquisition de données pour mesure 3-D de flux turbulent.

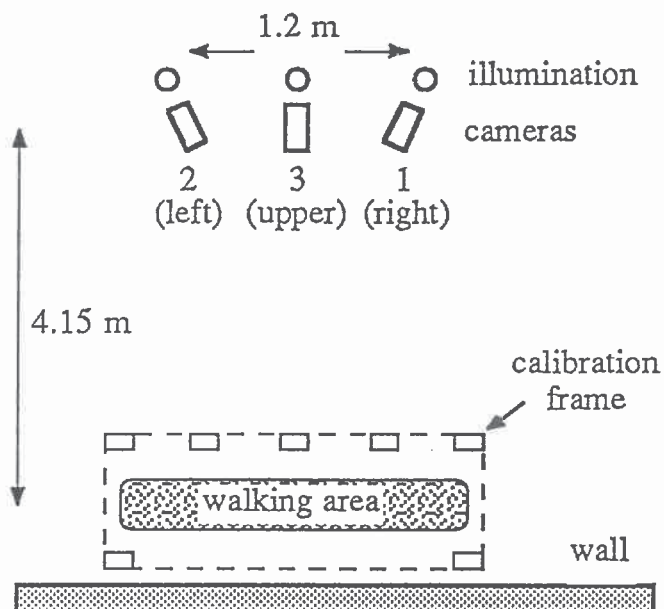
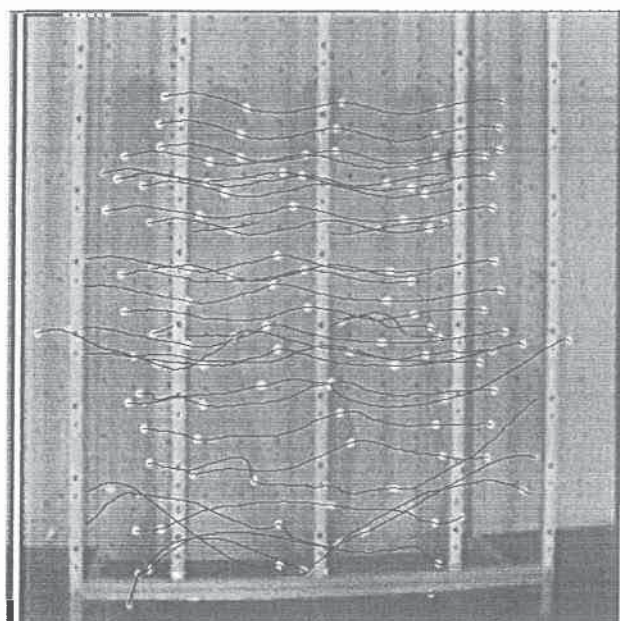


Figure 11a.

Figure 11b.

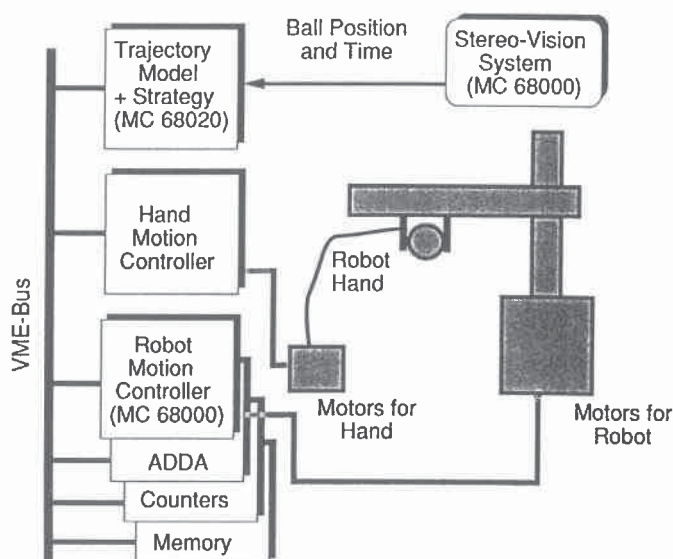


V.4 Système de vision pour robot de tennis de table

Un système de vision pour robot de tennis de table est décrit dans Beyer, Faessler, Wen, 1989. Il comprend deux caméras CCD et d'autres composants tels que le montre les figures 12 et 13.

La figure 13 montre les fonctions de traitement et le système associé. La latence du système est de 80 ms, et les coordonnées 3-D de la position d'une balle le long de sa trajectoire sont obtenues dans un cycle de temps de 40 ms. Il faut noter que l'extraction des coordonnées de l'image de la balle est faite dans le système de façon à obtenir un cycle de temps de 20 ms.

Figure 12 : Acquisition de données stéréo et détermination des éléments d'un robot de tennis de table.



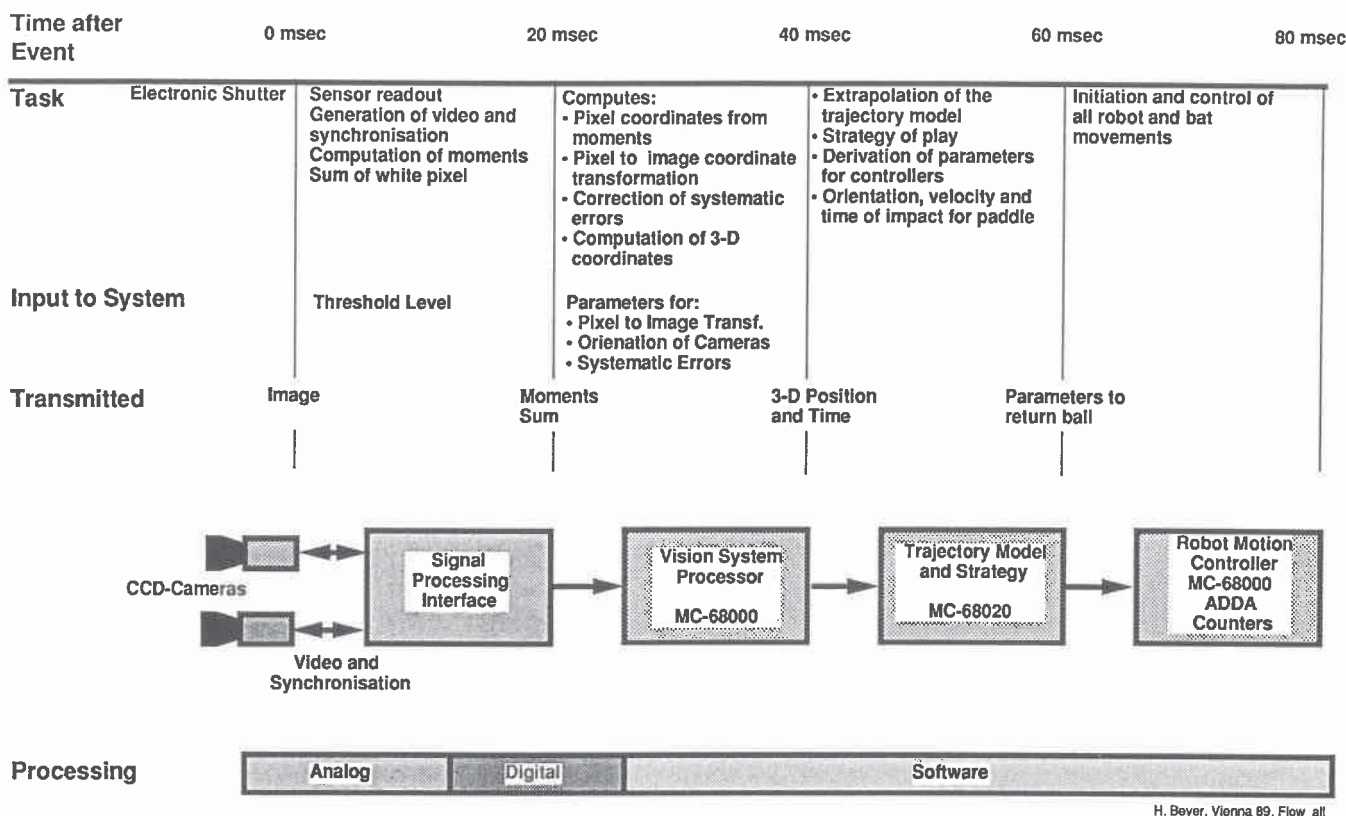


Figure 13 : Tâches, temps et système connexe de vision d'un robot de tennis de table.

VI. CONCLUSION

Comme le montrent les projets décrits dans cet article, ainsi que beaucoup d'autres dans la littérature spécialisée, la photogrammétrie numérique rapprochée est un outil performant pour les mesures de haute précision sans contact. L'utilisation d'équipements standards (caméras CCD, capteurs de vues, ordinateurs personnels, stations de travail) permet un développement peu onéreux du système. Les capacités de traitement en continu et même en temps réel ouvrent de nouveaux champs d'application. En particulier, le remplacement des machines de mesures mécaniques 3-D dans la mesure industrielle par des systèmes basés sur la vision est maintenant devenu une perspective réaliste.

Il n'est pas rare de se trouver au début d'une période de développement intéressant, avec de grands potentiels pour le futur. Le grand défi consiste dans la recherche et le développement d'algorithmes, de techniques et de systèmes qui permettent d'atteindre un degré encore supérieur de précision et d'automatisation, plus spécialement dans les cas où les images ne sont pas bien structurées et détériorées par des déformations, occlusions et autres effets perturbateurs qui requièrent des techniques d'analyse d'image automatique encore plus puissantes.

BIBLIOGRAPHIE

- Baltsavias E., Stallmann D., 1990** : Trinocular vision for automatic and robust 3-D determination of the trajectories of moving objects. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Zurich, Vol. 28-5/1.
- Beyer H., 1987** : Some aspects of the geometric calibration of CCD-cameras. *Proceedings International Conference on "Fast Processing of Photogrammetric Data"*, Interlaken, June 2-4, pp. 68-81.
- Beyer H., 1991a** : Geometric and radiometric analysis of a photogrammetric real-time system. Ph. D. Thesis (Draft version), ETH Zürich.
- Beyer H., 1991b** : Photogrammetric on-line inspection for car crash analysis: results of a pilot project. *Proceedings "First Australian Photogrammetric Conference"*, Sydney, November 7-9.
- Beyer H., Faessler H.P., Wen J., 1989** : Real-time photogrammetry in high-speed robotics. *Proceedings of the Conference "Optical 3-D Measurement Techniques"*, Vienna, September 18-20, Wichmann Verlag, pp. 271-280.
- Fraser C., 1991** : A summary of the industrial applications of photogrammetry. *Proceedings "First Australian Photogrammetric Conference"*, Sydney, November 7-9.
- Gruen A., 1985** : Adaptive least squares correlation - a powerful image matching technique. *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography*, 14(3), pp. 175-187.
- Gruen A., 1988** : Towards real-time photogrammetry. *Photogrammetria*, 42, pp 209-244.

Gruen A., 1989 : Digital photogrammetric processing systems : Current status and prospects. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 55, No 5, May, pp. 581-586.

Gruen A., Baltasvias E., 1988a : Geometrically constrained multiphoto matching. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 54, No 5, May, pp 633-641.

Gruen A., Baltasvias E., 1988b : Automatic 3-D measurement of human faces with CCD-cameras. SPIE Proceedings, Vol. 1030, "Biostereometrics 88", Basel, November 14-17, pp. 106-116.

Gruen A., Stallmann D., 1991 : High accuracy edge matching with an extension of the MPGC-matching algorithm. SPIE Proceedings, "Industrial Vision Metrology", Vol. 1526, Winnipeg, July 11-12, pp. 42-55.

Maas H.-G., 1991 : Automated photogrammetric surface reconstruction with structured light. SPIE Proceedings "Industrial Vision Metrology", Vol. 1526, Winnipeg, July 11-12, pp. 70-77.

Papantoniou D., Maas H.-G., 1990 : Recent advances in 3-D particle tracking velocimetry. Proceedings 5. International Symposium on Applications of Laser Techniques in Fluid Mechanics, Lisbon, July 9-13.

Wilkins D., 1990 : Digital photogrammetric applications with the Prime-Wild S9 analytical plotter. Proceedings ISPRS Commission II Symposium, Dresden, September 8-12.

REMERCIEMENTS

Le comité de rédaction de la revue remercie Madame S. Beauquis et Monsieur M. Mayoud pour la traduction (difficile...) de cet article.

CURVIMETRE MESUREUR







MODELE UNIVERSEL N° 650



Permet de mesurer
toutes surfaces sur
tous matériaux
en toutes circonstances.

Précis au cm,
remise à zéro
du compteur,
cet appareil vous
permet de préparer
des devis précis

VOUS SOUHAITEZ MESURER RAPIDEMENT

des emplacements de parking	la hauteur des murs d'intérieur	des plans de bâtiments travaux publics, cadastre
 BURNAT	 BURNAT	 BURNAT
odomètre pour terrains déjà aménagés	Curvimètre mesureur	Curvimètre
des travaux de voirie	des terrains non aménagés	des sols des plafonds des escaliers
 BURNAT	 BURNAT	 BURNAT
odomètre	odomètre à fil	Curvimètre (jusqu'à 3 mètres sans échelle)

Etablissements BURNAT - 89, rue d'Hauteville - 75010 Paris
Téléphone : (1) 47 70 09 73 - Télécopie : (1) 48 24 03 41

Objets de marine, instruments scientifiques,
haute curiosité, armes anciennes

La Fille du Pirate



Le Louvre des Antiquaires

2, pl. du Palais-Royal, Paris 1^{er}
1, allée Weisweiler (sur rue Saint-Honoré)
Tél. : (1) 42.97.38.70

Aux Armes de Furstenberg

1, rue Furstenberg
angle 3, rue Jacob Paris 6^e
Tél. : 43.29.79.51

Promenade des Antiquaires

7, promenade des Anglais. Magasin : 7, rue Massenet
06000 Nice. Tél. : 93.82.00.02.

Ets DIEUTEGARD S.a.r.l. Tél. bureau : (1) 42.93.42.01