Contribution à la micro vision robotique.

Sounkalo Dembélé

▶ **To cite this version:**

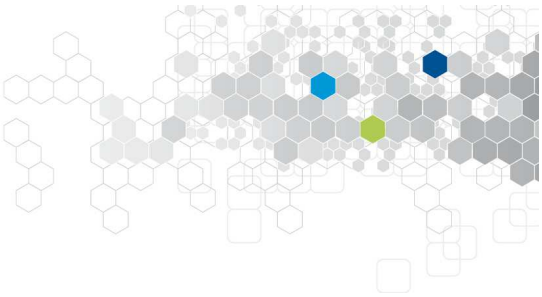
Sounkalo Dembélé. Contribution à la micro vision robotique.. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur et Microtechniques., 2013. tel-00913341

HAL Id: tel-00913341
https://theses.hal.science/tel-00913341

Submitted on 3 Dec 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Habilitation à Diriger des Recherches

présentée à

Ecole Doctorale Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques
Université de Franche-Comté

Contribution à la micro vision robotique

par

Sounkalo Dembélé
Maître de Conférences à l'Université de Besançon
Institut FEMTO-ST / département AS2M, Besançon

Soutenue le 03 avril 2013 devant la commission d'examen :
Président :
Jacques Gangloff Professeur, Université de Strasbourg
Rapporteurs :
François Chaumette Directeur de recherche INRIA, IRISA et INRIA Rennes
Michel Paindavoine Professeur, Université de Dijon
Hervé Tanneguy Redarce Professeur, I.N.S.A. Lyon
Examinateurs :
Nicolas Andreff Professeur, Université de Besançon
Jacques Jacot Professeur, E.P.F.L. Lausanne
Directrice :
Nadine Le Fort-Piat Professeur, E.N.S.M.M. de Besançon

***

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB), aujourd'hui département Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques (AS2M) de l'institut FEMTO-ST, sous la supervision de Nadine Piat, professeur à l'E.N.S.M.M. Besançon. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour son soutien sans faille.

Je remercie vivement François Chaumette, Michel Paindavoine et Tanneguy Redarce de l'honneur qu'ils me font en acceptant de rapporter sur ce travail en dépit de leurs charges multiples.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les autres membres du jury de l'intérêt qu'ils portent à ces travaux en acceptant de les examiner :
- Jacques Jacot,
- Jacques Gangloff,
- Nadine Piat,
- Nicolas Andreff.

Je tiens à remercier tous les étudiants qui ont participé à ces travaux, particulièrement Jean-Christophe Ravassard, Karima Rochdi, Julien Bert, Guillaume Fortier, Brahim Tamadazte, Abed Malti, Naresh Marturi.

Je tiens à témoigner ma sympathie à tous mes collègues pendant ces longues années pour la bonne atmosphère dans laquelle se sont déroulés ces travaux.

Merci à Cathy.

***

L'expérience des cas particuliers aussi passe pour une forme de courage. Voilà pourquoi Socrate croyait que le courage est une science.

ARISTOTE. Ethique à Nicomaque, Livre 3.

Table des matières

1 Synthèse des activités **1**
1.1 Curriculum vitae . . . 1
1.1.1 Etat civil . . . 1
1.1.2 Parcours académique . . . 1
1.1.3 Parcours professionnel . . . 1
1.1.4 Faits marquants . . . 2
1.2 Travaux de thèse . . . 3
1.3 Travaux post thèse . . . 4
1.3.1 Introduction . . . 4
1.3.2 Micro robotique collective . . . 6
1.3.3 Micro vision robotique . . . 6
1.4 Insertion dans l'équipe de recherche . . . 12
1.4.1 Animation d'équipe . . . 12
1.4.2 Coopérations . . . 13
1.4.3 Contrats de recherche . . . 13
1.4.4 Organisation de manifestations . . . 16
1.4.5 Insertion dans des réseaux . . . 16
1.5 Encadrement . . . 16
1.5.1 Thèses soutenues . . . 17
1.5.2 Thèses en-cours . . . 17
1.5.3 Post doctorants co-encadrés . . . 18
1.5.4 Stages de recherche . . . 18
1.6 Autres activités . . . 18
1.6.1 Activité d'intérêt collectif . . . 18
1.6.2 Activité d'enseignement . . . 19
1.6.3 Activité de consulting . . . 21
1.7 Publications de thèse . . . 22
1.7.1 Revues . . . 22
1.7.2 Conférences internationales . . . 22
1.7.3 Conférences nationales . . . 22
1.8 Publications post thèse . . . 23
1.8.1 Revues internationales . . . 23

1.8.2 Chapitres de livres 24
1.8.3 Conférences internationales à fort impact et workshop 24
1.8.4 Autres conférences internationales 26
1.8.5 Conférences nationales 27

2 Introduction à la micro vision robotique 29
2.1 Introduction 29
2.2 Propriétés de l'échelle micrométrique 30
2.3 La manipulation 33
2.4 La micro vision robotique 35
2.5 Notre ambition 36
2.6 Conclusion 37

3 Imagerie 39
3.1 Introduction 39
3.2 De l'imagerie en micro-robotique 40
3.3 Challenges scientifiques et techniques 43
3.4 Propriétés du microscope optique 45
3.4.1 Distance de travail faible 45
3.4.2 Profondeur de champ faible 46
3.4.3 Grandissement faible 46
3.4.4 Pouvoir de résolution et résolution sub-micrométriques . . . 48
3.4.5 Contraste faible et instable 49
3.4.6 Distorsion et dérive faibles 51
3.4.7 Illustration 51
3.5 Propriétés du microscope électronique à balayage 52
3.6 Étalonnage de la dérive 54
3.7 Étalonnage monofocal multi-échelle 56
3.7.1 Modélisation géométrique 56
3.7.2 Estimation des paramètres 59
3.7.3 La mire 61
3.7.4 Application 61
3.8 Étalonnage multifocal 64
3.8.1 Géométrie épipolaire 64
3.8.2 Géométrie trifocale 66
3.8.3 Calcul de la matrice d'homographie 68
3.8.4 Calcul de la matrice fondamentale 69
3.8.5 Calcul des points 70
3.8.6 Mise en correspondance robuste des points 72
3.8.7 Application 76
3.9 Conclusion 78

4 Synthèse d'images virtuelles **81**
4.1 Introduction . . . 81
4.2 De la synthèse d'images en micro-robotique . . . 82
4.3 Challenges scientifiques et techniques . . . 82
4.4 Reconstruction 3D par analyse de la netteté . . . 83
4.4.1 Estimation de la netteté . . . 83
4.4.2 Description de la méthode . . . 84
4.4.3 Application . . . 86
4.5 Synthèse d'images par mosaïquage . . . 89
4.5.1 Recalage . . . 91
4.5.2 Description de la méthode . . . 91
4.5.3 Application . . . 92
4.6 Synthèse de flux d'images par transfert trifocal . . . 92
4.6.1 Le principe . . . 92
4.6.2 Description de la méthode . . . 93
4.6.3 Applications . . . 95
4.7 Conclusion . . . 97

5 Asservissement visuel **101**
5.1 Introduction . . . 101
5.2 De l'asservissement visuel en micro-robotique . . . 103
5.3 Challenges scientifiques et technologiques . . . 104
5.4 Asservissement visuel et correction de la trajectoire d'un micro-robot mobile . . . 105
5.4.1 Suivi de la position d'une cible en franges . . . 106
5.4.2 Application . . . 112
5.5 Asservissement visuel et micro-manipulation . . . 115
5.5.1 Asservissement 2D multi-échelle . . . 115
5.5.2 Asservissement 3D . . . 119
5.5.3 Application élémentaire . . . 122
5.5.4 Application évoluée . . . 131
5.6 Conclusion . . . 132

6 Conclusion **135**
6.1 Rappel de l'objectif . . . 135
6.2 Bilan critique . . . 136
6.3 Perspectives . . . 137
6.3.1 Micro-nano vision robotique . . . 138
6.3.2 Nano vision robotique . . . 143

Table des figures

1.1 Un graphe "énergétique" causal représentant un atelier d'assemblage, piloté en flux tiré, de trois composants A, B et C fournis par lots de 50 individus toutes les 100 mn ; les lots sont degroupés, assemblés puis regroupés par lots de 50 individus. 4
1.2 Une image du robot à micromoteur linéaire ultrasonore (64 mm (longueur) × 38 mm (largeur) × 20 mm (hauteur), gauche) et du robot à micromoteur magnétique (90 mm (diamètre) × 120 mm (hauteur), droite). 7
1.3 Illustration de l'assemblage 3D à réaliser. 7
1.4 Tumeurs bénignes des cordes vocales [images "μRALP"]. 8
1.5 Reconstruction 3D par stéréoscopie (haut) et par analyse de la netteté (bas) de deux scènes avec des doigts de pince. 10
1.6 Assemblage final obtenu : 5 pièces de 400 μm × 400 μm × 100 μm sur 3 niveaux. 12
1.7 La répartion des enseignements par contenu, niveau et type respectivement. 20

2.1 Evolution des forces agissant sur un objet sphérique en fonction de son rayon (d'après [186]). 31
2.2 Ménisque de liquide sur un objet plan. 32
2.3 Manipulation par pince à contact. 34
2.4 Échec de la prise à cause de la force électrostatique poussant la cible. 34
2.5 Un micro-robot considéré d'un point de vue système. 36

3.1 Classification des imageries selon leur résolution (MEB : microscope électronique à transmission, TEM : microscope électronique à transmission, TAP : sonde atomique tomographique), d'après [188]. . . . 41
3.2 Schéma de principe d'un microscope optique en réflexion. 43
3.3 Les éléments constitutifs d'un microscope électronique à balayage d'ancienne génération. 44
3.4 Effet de la faiblesse de la profondeur de champ : l'assemblage 3D n'est jamais net complètement. 46

3.5 Images d'un assemblage par un vidéo microscope, les pièces mesurent 400 μm x 400 μm pour une épaisseur de 100 μm : grandissement 3× (gauche), grandissement 7× (droite). 50
3.6 Evolution du contraste en fonction de la position spatiale de la cible : pièce en silicium et éclairage épiscopique axial. 50
3.7 Séquence d'images illustrant l'instabilité du contraste en fonction de la position spatiale de la cible : pièce en silicium et éclairage épiscopique axial. 51
3.8 Interaction rayonnement - matière [d'après [188]]. 53
3.9 Les possibilités d'imagerie du microscope électronique à balayage [d'après [188]]. 53
3.10 Evolution du rapport signal sur bruit en fonction du temps à 5000× pour le modèle JSM 820. 54
3.11 Transformation de Fourier inverse de la corrélation de phase entre deux images : les coordonnées du pic définissent la dérive globale selon les axes X et Y. 55
3.12 Evolution de la dérive en fonction du temps et l'agrandisssement pour le microscope à filament de tungstène (Jeol JSM 820). 57
3.13 Modélisation géométrique du vidéo-microscope : (C, X_c, Y_c, Z_c) est le repère associé à la caméra ; (O, x, y) est le repère associé à l'image. 58
3.14 La plateforme expérimentale du projet SAMMI comprenant un microscope positionné verticalement (Leica), un microscope positionné latéralement (Navitar), un positionneur, un manipulateur et une pince. 62
3.15 Mires avec des motifs de 100 μm × 100 μm : mire réelle (gauche), mire virtuelle (droite). 63
3.16 Étalonnage multi-échelle du microscope Leica MZ16A. 64
3.17 Géométrie épipolaire : deux caméras observent le même point P ; p est l'image de P dans la caméra gauche et p' est l'image de de P dans la caméra droite ; $\mathbf{A}$ est l'homographie induite par le plan π entre les deux images. 65
3.18 Géométrie trifocale. 67
3.19 Réponse du détecteur de Harris : définition du sommet constituant le point d'intérêt. 72
3.20 Schéma illustrant le fonctionnement de la méthode "Harris simplexe" garantissant le nombre de points détectés N_p^* sur n'importe quelle image suffisamment texturée I. 73
3.21 Comparaison des erreurs d'appariement des fenêtres rectangulaire (□) et échantillonnée (∘, Cha) en fonction de la taille de la taille de la dite fenêtre. 74
3.22 Montage expérimental avec deux microscopes TIMM 400. 76
3.23 Trois images de la mire de 300 μm sur trois niveaux. 77

3.24 La mise en correspondance des points d'intérêt : (a), (b) et (c) les couples des couches 1, 2 et 3, respectivement ; (d) le regroupement de tous les couples. 77

4.1 Comparaison des estimateurs : □ : variance ; ∘ : ondelette de Daubechies ; × : ondelette de Haar ; + : auto-corrélation. 84
4.2 Estimation de la netteté : de gauche à droite une image avant la valeur maximale de l'estimateur, à la valeur maximale de l'estimateur et après la valeur maximale de l'estimateur, respectivement. 85
4.3 A droite : illustration des deux axes factoriels d'un nuage de points ; à gauche : illustration du principe du filtrage. 86
4.4 Des vues de la plate-forme expérimentale ayant permis la reconstruction 3D. 87
4.5 De gauche à droite et de haut en bas, les images de la série respectivement. 88
4.6 Le modèle 3D des embouts de pince : les échelles des axes x, y et z sont respectivement de 3.45 μm, 3.45 μm et 10 μm. 88
4.7 Définition des angles d'élévation (El) et d'azimut (Az) d'une droite. 89
4.8 Modèle 1D et alignement des embouts de pince : doigt gauche (El = 25°, Az = 69°) ; doigt droite (El = 31°, Az = 111°). 89
4.9 Illustration de doigts de pince alignés (haut) et non alignés (bas). . 90
4.10 Panorama de 1315 × 986 pixels obtenu par mosaïquage de 4 × 4 images de 640 × 480 pixels ; le champ de vision est de 11.17 mm × 8.37 mm. 92
4.11 Configuration du système pour le transfert trifocal. $\mathcal{R}_1$, $\mathcal{R}_2$, $\mathcal{R}_3$, $\mathcal{R}_4$ et $\mathcal{R}_s$ sont les repères associés aux microscope gauche, droite, virtuel, un objet et la scène, respectivement. 94
4.12 A droite les images réelles d'objets en plastique clair, à gauche le transfert des contours dans les images virtuelles pour un angle α variant de 0° à 80° : la roue est bien positionnée entre les deux doigts de la pince. 95
4.13 En haut les images réelles d'objets en silicium, en bas le transfert des contours dans les images virtuelles pour un angle α variant de 0° à 80° : la pièce est bien positionnée au dessus des deux doigts de la pince. 96
4.14 Le schéma-bloc de l'asservissement visuel dans les images virtuelles. 97
4.15 Positionnement de la pince par rapport à la pièce : (a) les vues initiales virtuelle et réelle, respectivement ; (b) les vues finales virtuelle et réelle, respectivement. 98
4.16 Positionnement de la pince par rapport à la pièce : évolution de l'erreur en fonction du numéro d'itération. 98

5.1 Le principe de l'asservissement visuel. 101

5.2 Illustration de la tâche générique d'assemblage : cibles cylindriques (à gauche) et prismatiques (à droite) 105
5.3 Hypothèses expérimentales du suivi du micro-robot mobile. 106
5.4 Principe du suivi des coordonnées de P. 107
5.5 Plateforme expérimentale d'étude du micro-moteur linéaire ultra-sonore. 109
5.6 Le signal $s(x)$ d'une colonne. 110
5.7 L'amplitude de la transformée en ondelette longue du signal $s(x)$. . 110
5.8 La phase de la transformée en ondelette longue du signal $s(x)$. . . . 111
5.9 Les droites médianes des deux réseaux imprimées sur l'image de la cible. 111
5.10 Les composants du micro-moteur ultra-sonore. 112
5.11 Le mode de déplacement du micro-moteur : stick-slip. 113
5.12 Schéma-bloc du micro-robot. 114
5.13 Un exemple de trajectoire corrigée : les valeurs maximales de l'erreur sont 1 μm selon, l'axe X, 3 μm selon l'axe Y et 0.4° selon l'orientation. 114
5.14 Suivi 2D avec ESM et contrainte géométrique illustré sur une image de structure 400 μm $\times$ 400 μm $\times$ 100 μm et les doigts d'une pince, obtenue par le microscope Leica MZ16A. 116
5.15 Suivi 2D avec SIFT et appariement illustré sur deux images d'une fibre optique de 250 μm de diamètre, obtenues par le microscope Leica MZ16A. 117
5.16 Structure 3D à réaliser par insertion verticale de deux structures de 400 μm $\times$ 400 μm $\times$ 100 μm $\pm$ 1.5 μm par leurs tranchées de 100 μm $\times$ 100 μm $\times$ 100 μm $\pm$ 1.5 μm 122
5.17 Réseaux de Petri décrivant la séquence d'assemblage de **B** avec **A**. . 124
5.18 Réseaux de Petri décrivant les séquences de positionnement de **A** (gauche) et **B** (droite). 125
5.19 La séquence de tâches pour la prise de la pièce **B** 126
5.20 Estimation de la profondeur $Z*$ par analyse de la netteté : elle correspond à la distance entre les deux pics les plus élevés. 127
5.21 Des images de la scène pendant la tâche de prise illustrant la commande multi-échelle 129
5.22 Evolution de l'erreur de prise : position (à gauche), orientation (à droite) 129
5.23 Quelques images de la scène pendant les déplacements des pièces . . 130
5.24 Évolutions des erreurs de déplacement pour le positionneur (gauche) et le manipulateur (droite). 130
5.25 Des images obtenues avec le microscope électronique à balayage de la structure finale illustrant la pertinence des développements. . . . 131

5.26 Illustration de l'échec du lâcher : les forces d'adhésion maintienent la micro-structure (400 μm $\times$ 400 μm $\times$ 100 μm) sur le doigt de la pince. 132
5.27 Assemblage de cinq pièces sur trois niveaux. 133

6.1 Structures usinées au faisceau d'ions et manipulées par micro-robot, à l'intérieur du microscope [document Carl Zeiss]. 139
6.2 Structures en chrome obtenues par pulvérisation, nécessitant un polissage [document Nicolas Martin de FEMTO-ST/MN2S]. 139
6.3 Visualisation de franges d'interférence au microscope : (a) ondes acoustiques progressives, (b) ondes acoustiques stationnaires [72]. . 140
6.4 Structures en silicium de 6 μm (longueur) $\times$ 6 μm (largeur) $\times$ 2 μm (épaisseur) devant être extraites et assemblées par insertion . . 140
6.5 Structure en phosphure d'indium (InP) de 20 μm (longueur) $\times$ 1.5 μm (hauteur) $\times$ 200 nm (épaisseur) devant être extraite et assemblée par soudage [document Remy Braive du LPN-Marcoussis]. . . . 141
6.6 Le microscope de la future plateforme expérimentale de micro-nano vision robotique. 142

Chapitre 1

Synthèse des activités

1.1 Curriculum vitae

1.1.1 Etat civil

46 ans, nationalité française, marié, trois enfants

1.1.2 Parcours académique

- **Baccalauréat** série E, Lycée technique, Bamako, 1984.
- **DEUG** Sciences, option Sciences pour l'ingénieur, Université de Franche Comté, Besançon, 1986.
- **Licence** d'Electronique, Electrotechnique et Automatique, Université de Franche Comté, Besançon, 1987.
- **Maîtrise** d'Electronique, Electrotechnique et Automatique, Université de Franche Comté, Besançon, 1988, avec la mention "Assez bien".
- **DEA** spécialité Automatique, Informatique et Robotique, Université de Franche Comté, Besançon, 1989, avec la mention "Assez bien".
- **Doctorat** spécialité Automatique et Informatique, Université de Franche Comté, 1993, avec la mention "très honorable avec félicitations".

1.1.3 Parcours professionnel

- **Enseignant auxilliaire**, Lycée Professionnel, Grand Charmont (25), de 1988 à 1989 : enseignement de l'électronique et des mathématiques dans une classe de BEP [1] en électronique.
- **Enseignant vacataire**, Université de Franche Comté, Besançon, de 1990 à 1991 : enseignement des matières de la 61^e section.
- **ATER**, Université de Franche Comté, Besançon, de 1991 à 1992 et de 1993 à 1994 : travail de thèse, enseignement des matières de la 61^e section.

1. Brevet d'Etudes Professionnelles

- **Post-doctorat**, Laboratoire d'automatique de Besançon, de 1994 à 1995 : développement d'un robot mobile autonome.
- **Maître de Conférences**, Université de Franche Comté, Besançon, de 1995 à 2008 : enseignement et recherche en 61^e section.
- **Consultant**, Guadeloupe et Martinique, de 2008 à 2010, suite à une prise de disponibilité : prestations de service en informatique.
- **Maître de Conférences**, Université de Franche Comté, Besançon, depuis 2010 : enseignement et recherche en 61^e section.

1.1.4 Faits marquants

- **Thèses soutenues :** Karima Rochdi en 2003, Julien Bert en 2007, Brahim Tamadazte en 2009
- **Production depuis récrutement :** 11 revues, 3 chapitres de livres, 30 conférences internationales.
- **Distinction :** la thèse de Brahim Tamadazte sur le microassemblage a été consacrée prix 2010 de la meilleure thèse de l'université de Franche comté, second prix 2010 de la meilleure thèse de France du GDR Robotique.
- **Projets de recherche :** 3 projets européens, 2 projets ANR, 7 projets régionaux.
- **Evaluation de papiers :** International Journal of Optomechatronics, IEEE ROBIO 2012, IEEE ICRA 2012.
- **Evaluation de projets :** ANR Emergence.

1.2 Travaux de thèse

Nous avons réalisé ces travaux au laboratoire d'automatique de Besançon, aujourd'hui département AS2M de l'institut FEMTO-ST. Ils relevaient du domaine de la production industrielle de biens et traitaient plus particulièrement de la modélisation "énergétique" des flux de production. Jusqu'alors, ceux-ci étaient modélisés à l'aide des Réseaux de Petri et de files d'attente qui décrivent efficacement l'aspect temporel. Mais ils ne prennent pas en compte entièrement la sémantique des phénomènes d'écoulement de flux, et n'ont donc pas toute la vertu explicative nécessaire à l'interprétation des fonctions de production. A l'inverse, le formalisme des Bond Graphs de modélisation des systèmes physiques multitechnologiques fournit des modèles à la fois quantitatifs et qualitatifs. Il se fonde sur la description des échanges énergétiques internes aux systèmes qui s'articulent autour de la production, de la perte, du transfert, de la conversion et du stockage d'énergie. L'énergie échangée entre deux systèmes est l'intégrale, sur l'horizon temporel considéré, de la puissance échangée entre ces deux systèmes, laquelle est toujours descriptible par le produit de deux variables duales : tension et courant, force et vitesse, ...

Nos recherches ont permis de définir "l'énergie" et la "puissance" échangées entre deux systèmes de production respectivement par le débit $Q(t)$ (en nombre d'individus par seconde) et par le volume $V(t)$ (en nombre d'individus transportés), les variables duales étant l'effectif moyen $M(t)$ des individus et leur fréquence moyenne $F(t)$:

$$Q(t) = M(t).F(t) \qquad V(t) = \int_0^t Q(s)\,\mathrm{d}s \tag{1.1}$$

Il en a résulté la détermination des éléments "énergétiques" de modélisation des systèmes de production manufacturière, source S, puits P, stock Σ, résistance R, transformateur TF, gyrateur GY, assortie des lois de comportement et des causalités correspondantes. Les modèles "énergétiques" obtenus sont utiles aussi bien en conception qu'en exploitation car d'une part, ils donnent une vision très fonctionnelle du système, et d'autre part permettent de calculer les données manquantes à partir des équations de fonctionnement (figure 1.1).

Nos recherches ont trouvé des prolongements dans l'équipe du professeur Gerard Morel au CRAN [2]-Nancy, et ont fait l'objet des publications suivantes :

- revue :[1] ;
- conférences internationales :[2], [3],[4], [5], [6] ;
- conférences nationales :[8], [7].

2. Centre de Recherche en Automatique de Nancy

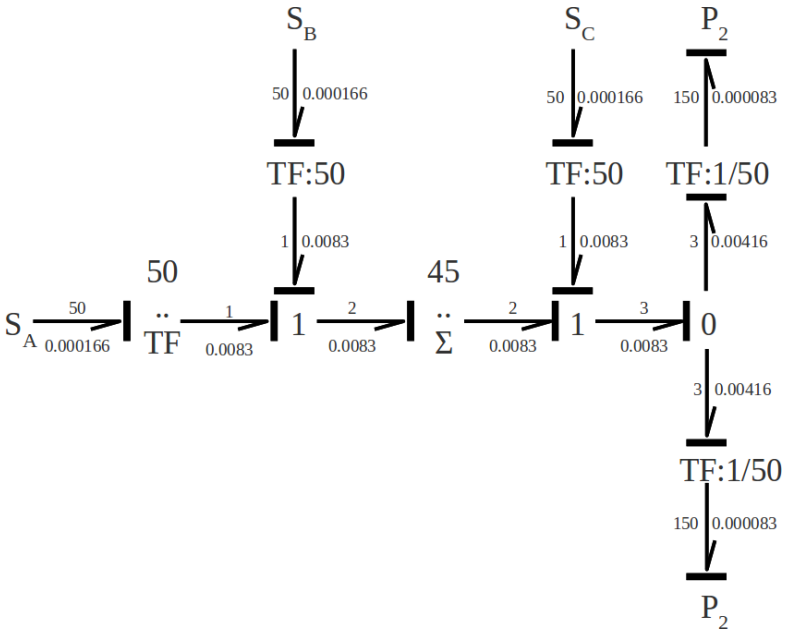


FIGURE 1.1 – Un graphe "énergétique" causal représentant un atelier d'assemblage, piloté en flux tiré, de trois composants A, B et C fournis par lots de 50 individus toutes les 100 mn ; les lots sont degroupés, assemblés puis regroupés par lots de 50 individus.

1.3 Travaux post thèse

1.3.1 Introduction

Les travaux réalisés relèvent de la robotique et plus particulièrement de la "micro-nano-robotique" ciblant les applications de caractérisation et d'assemblage dans les secteurs scientifique et industriel, et les applications de phonomicrochirurgie laser dans le secteur chirurgical. Les défis scientifiques et technologiques sont de trois ordres :

- développement de plate-formes physiques permettant la manipulation et l'assemblage de structures micro-nano-métriques (plus petite dimension comprise entre 500 μm et 50 μm) ;
- développement de algorithmes de traitement des images et de vision artificielle permettant d'exploiter au mieux les images provenant des microscopes ;
- développement de lois de commande robustes et précises pour les micro-nano-robots.

Deux grandes thématiques sont étudiées.

- La première thématique est celle de la **micro robotique collective** avec comme application cible le transport de charges dans les futures usines-sur-table (également appelées "micro-usines"), par une équipe de robots mobiles. L'idée était que la taille de ces robots ne permettrait de les doter que d'une capacité perceptive à portée locale et d'une capacité décisionnelle limitée. Mais, leurs interactions (intra et extra) permettraient de faire émerger un comportement collectif "intelligent". L'idée préfigurait les travaux actuels sur les "smart surfaces" [3]. Cependant, la pratique a vite montré la nécessité d'une coordination minimale entre les robots à partir de la connaissance de la position spatiale de chaque robot et de celle de la charge. La recherche de solution à ce problème nous a conduit à la vision dont les énormes potentialités nous ont convaicu de basculer complètement sur la thématique de la micro vision robotique.

- La deuxième thématique est celle de la **micro vision robotique** dont les résultats ont permis de faire de l'équipe un acteur reconnu du domaine.
La principale application ciblée est l'assemblage de structures en 3 dimensions. Depuis longtemps, la technologie des MEMS [4] réalise l'assemblage par empilement de couches réalisées dans la même technologie : structures ou MEMS monolithiques de type 2D. Mais on pressentait l'émergence de structures faisant intervenir plusieurs technologies, microélectronique mais aussi micromécanique : structures ou MEMS hybrides. Ils sont en 3 dimensions et nécessitent des manipulations dans l'espace 3D et pas seulement 2D. Nous avons choisi de traiter cette application sous l'angle de la vision et de l'asservissement visuel. La vision permet d'obtenir un retour visuel interprétable du champ de travail de même que le suivi des cibles définies (objets, pince). L'asservissement visuel permet d'utiliser la mesure générée par le suivi pour élaborer des lois de commande précises, répétables et robustes. **Les travaux ont donné d'excellents résultats couronnés par le prix 2010 de la meilleure thèse de l'université de Franche Comté et le deuxième prix 2010 de la meilleure thèse en robotique en France attribué par le GDR robotique, décernés à Brahim Tamadazte pour son travail sur cette thématique**.
Les autres applications étudiées sont la caractérisation de micro-structures et la phonomicrochirurgie laser. Dans le dernier cas, il s'agit d'une série de techniques de chirurgie otorhinolaryngologique utilisant un faisceau laser pour le traitement des atteintes aux tissus du larynx, les cordes vocales notamment. La taille du spot sur les cordes est du même ordre de grandeur que les micro-structures manipulées. La vision robotique est également d'un grand intérêt dans ce cas : précision de l'intervention.

3. surfaces composées de centaines d'actionneurs et de capteurs permettant le transport et le tri de pièces de manière distribuée

4. Micro Electro Mechanical Systems

1.3.2 Micro robotique collective

La micro robotique collective vise la résolution de problèmes par une équipe de micro robots "élémentaires". L'application générique ayant servi de fil conducteur à nos travaux a été le positionnement précis par poussée d'une charge impossible à déplacer par chaque micro robot individuel. Les problématiques sont de deux ordres.

La première problématique concerne la conception des robots. Ils sont caractérisés par une taille réduite au minimum mais ils sont dotés d'actionneurs permettant de générer une force de poussée suffisante, de capteurs extéroceptifs de portée suffisante, et d'un niveau "d'intelligence" suffisant.
La deuxième problématique concerne le développement des lois et architectures de commande permettant de faire émerger le positionnement de la charge par les interactions intra robots (entre robots) et extra robots (entre robots et environnement).

A l'époque beaucoup d'équipes s'intéressaient à ces problèmes mais peu de résultat tangible était encore obtenu. Les travaux engagés ont permis la conception et la réalisation de deux types de robots mobiles (à minimoteur électromagnétique et à mninomoteur linéaire ultrasonore, figure 1.2), le développment d'une architecture de commande de type stimulus-réponse et enfin la mise au point d'une méthode qui, à partir de la définition du comportement global souhaité pour l'équipe de robots, correspondant à la tâche à réaliser, permet de déterminer les comportements individuels nécessaires. La méthode comprend deux phases :

1. on commence par décrire le comportement collectif sous la forme de structures spatio-temporelles d'interaction entre les membres de l'équipe et le milieu (par exemple la formation d'une chaîne autour de la charge à déplacer) ;
2. on élucide la cohérence des structures (formation et maintien en l'état), ce qui permet de déterminer les comportements individuels.

Les travaux ont donné lieu à l'encadrement de cinq étudiants de DEA et permis les publications suivantes :
- conférences internationales : [37], [38], [39] ;
- conférences nationales : [49], [51], [50].

1.3.3 Micro vision robotique

Cette thématique vise :
- le développement de systèmes micro-robotiques complets, c'est-à-dire comportant des micro-robots équipés de pinces de manipulation, et des microscopes d'observation,

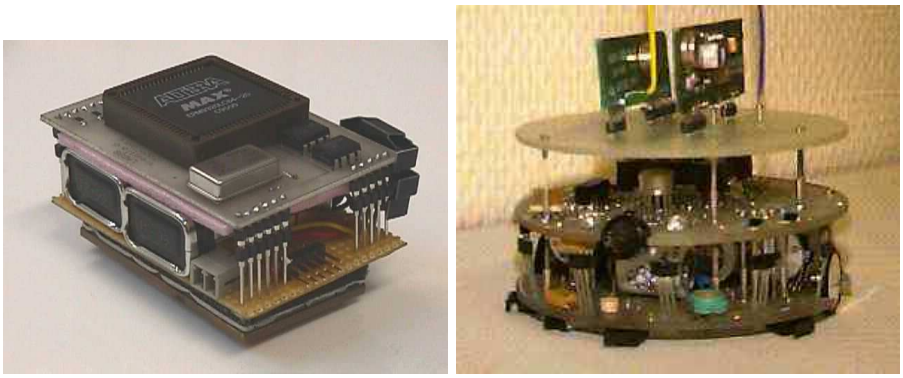


FIGURE 1.2 – Une image du robot à micromoteur linéaire ultrasonore (64 mm (longueur) × 38 mm (largeur) × 20 mm (hauteur), gauche) et du robot à micromoteur magnétique (90 mm (diamètre) × 120 mm (hauteur), droite).

- le traitement des images et la vision,
- le développement de lois de commande précises, robustes et répétables.

La principale application ayant servi de support aux travaux est l'insertion par leurs rainures respectives de $100\mu m \times 100\mu m \times 100\mu m \pm 1.5\mu m$ de pièces en silicium de dimensions $400\mu m \times 400\mu m \times 100\mu m \pm 1.5\mu m$ (figure 1.3). La tolérance d'assemblage varie alors entre $-3\mu m$ et $+3\mu m$. Pour ce faire un dispositif expéri-

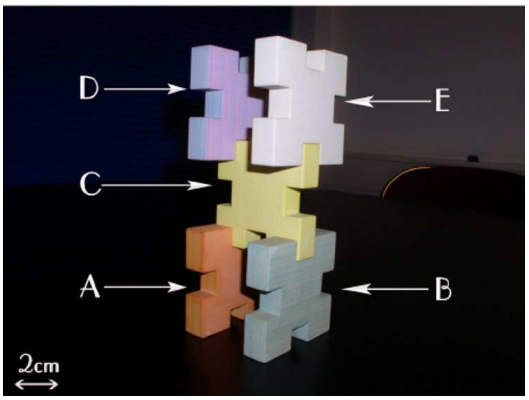


FIGURE 1.3 – Illustration de l'assemblage 3D à réaliser.

mental a été constitué avec le soutien de deux ingénieurs financés par des projets. Il comprend les éléments suivants disposés dans une enceinte à environnement controlé sur une table anti-vibrations : un microscope optique positionné verticalement (grandissement variable de 0.1 à 11×), un microscope optique positionné latéralement à 45°de la verticale (grandissement variable de 0.1 à 7×), une table à 3 degrés de libertés ($xy\alpha$), un manipulateur à 2 degrés de liberté ($z\varphi$) muni d'une

pince à deux doigts actifs indépendants, un éclairage en lumière blanche.

La seconde application vise l'assemblage de structures de plus faibles dimensions, autour de 40 μm. Le dispositif expérimental comprend : un microscope électronique à balayage (grandissement variable de 10 $\times$ à 300000$\times$), une table à 3 degrés de libertés (xyz), un manipulateur à 3 degrés de liberté ($\alpha\beta z$) muni d'une pince à deux doigts avec capteur de force.

La troisième application vise le pilotage d'un spot laser sur les tissus des cordes vocales (figure 1.4). Le dispositif expérimental comprend : deux fibroscopes reliés à une caméra rapide et un mirroir piloté par un micro-robot pan-tilt.

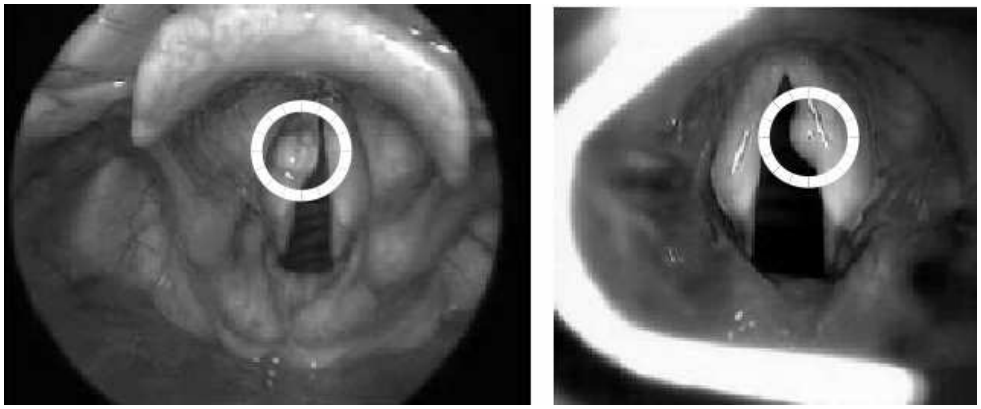


FIGURE 1.4 – Tumeurs bénignes des cordes vocales [images "μRALP"].

Les problématiques sont de trois ordres : imagerie, synthèse d'images virtuelles et asservissement visuel à l'échelle micrométrique.

Imagerie

Avant nos travaux, peu de recherches avaient traitées de la vision à des fins de microassemblage hormis ceux de Jacques Jacot en Suisse ([83], [89]) et ceux de Bradley Nelson, à l'époque aux USA ([94], [202], [92], [106], [102], [99]). Par rapport à l'imagerie classique de la robotique (la caméra munie d'objectif standard), le microscope (optique et électronique) a des propriétés particulières qui imposent de réadapter, voire créer de nouveaux algorithmes de vision.

Le challenge identifié et traité concerne l'étalonnage (ou calibrage ou encore calibration) c'est-à-dire le calcul des paramètres intrinsèques d'un microscope (calibrage monofocal) ou croisés de deux microscopes (calibrage bifocal ou stéréoscopique). Les méthodes habituelles ne sont plus applicables *in extenso* du fait de la

faible valeur de la profondeur de champ. De nouvelles méthodes utilisant des mires réelles spécifiques ou des mires virtuelles ont été mises au point et appliquées avec succès aux microscopes de l'application.

Les travaux sur le microscope optique ont fait l'objet des thèses de Julien Bert et de Brahim Tamadazte ; ceux sur le microscope électronique à balayage ont fait l'objet du post-doctorat de Abed Malti, des master de Alyassin El Ayouch et Andres Marina-Diaz, de la thèse de Naresh Marturi. Ils ont donné lieu aux publications suivantes :

- revue : [17], [16] ;
- conférences internationales : [48], [35] ;
- conférences nationales : [64].

Les travaux sur le fibroscope font l'objet de la thèse de Zille Husnain.

Synthèse d'images virtuelles

Le verrou est relatif à la synthèse d'images virtuelles à partir d'images réelles de microscopes optiques : reconstruction 2D et 3D en temps réel et différé. En déhors des applications biomédicales ces problèmes sont peu étudiés, or ils permettent de resoudre le problème de l'encombrement de l'espace de travail. Plusieurs méthodes ont été mises au point : reconstruction 3D du champ de travail par analyse de la mise au point du microscope, reconstruction 3D par stéréoscopie (figure 1.5), synthèse de microscope à large champ de vision par assemblage d'images(construction de mosaïque), synthèse de microscope par transfert de pixels (transfert trifocal).

Ces travaux ont fait l'objet des thèses de Karima Rochdi, Julien Bert, Brahim Tamadazte et de nombreux DEA/Master et de projets de fin d'études d'ingénieurs. Ils ont donné lieu aux publications suivantes :

- revues : [9], [10], [12], [11], [14], [13], [15] ;
- chapitre d'ouvrages :[20], [21] ;
- conférences internationales à fort impact et workshop : [22], [24], [23], [25], [26], [27],[30], [29], [28], [32], [31], [33] ;
- autres conférences internationales : [41], [40], [42], [43], [46], [45], [63] ;
- conférences nationales : [52], [53], [54], [56], [55], [44], [57], [58],[60],[59].

Asservissement visuel

La commande par asservissement visuel sans modèle du microscope ("look-then-move") est majoritairement utilisée, or celle-ci est connue pour son manque de précision et de robustesse aux aléas. A contrario, l'asservissement visuel avec modèle est précis, robuste et flexible.
Les problèmes scientifiques identifiés et traités ont été le suivi d'informations

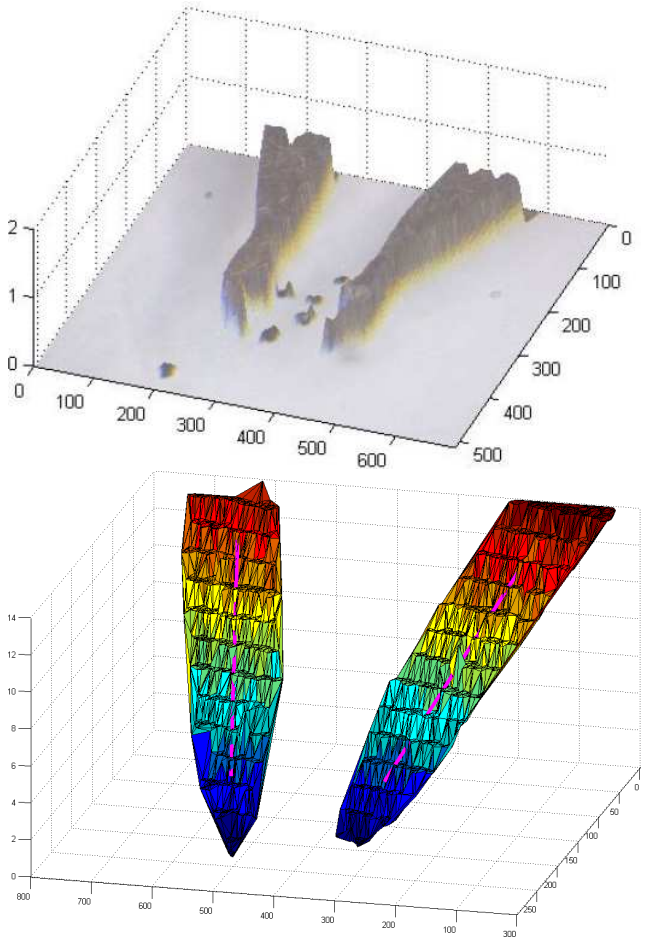


FIGURE 1.5 – Reconstruction 3D par stéréoscopie (haut) et par analyse de la netteté (bas) de deux scènes avec des doigts de pince.

dans les images de microscope d'une part, et le développement de lois de commande d'asservissement visuel avec modèle adaptées aux applications de micromanipulation et de micro-assemblage d'autre part.

Le suivi d'informations dans les images de microscope, notamment la position d'une cible, indispensable à la commande par asservissement visuel, est difficile du fait de la faiblesse du contraste des images et de la profondeur de champ du microscope. Les travaux ont permis, en collaboration avec Patrick Sandoz (chargé de recherches CNRS à FEMTO-ST), la mise au point d'une méthode de suivi de la position d'une cible en franges, à résolution sub-pixellaire, utilisant le calcul de phase par transformation en ondelettes. Ils ont également permis la validation à l'échelle micrométrique de deux méthodes de suivi développées par des collègues à l'échelle macroscopique : la méthode de suivi 2D de Ezio Malis de l'IRISA/LAGADIC-Rennes utilisant un critère de minimisation d'ordre 2 entre les images, et surtout la méthode de suivi 3D d'Eric Marchand du même institut, fondée sur la comparaison entre des droites extraites du modèle CAO et de celles extraites de l'image.

Une loi de commande d'asservissement visuel 2D adaptée à la prise de pièce a été développée. Elle consiste en une régulation à zéro de l'erreur entre la position 2D courante $s = (x, y)^\top$ et la position 2D consigne $s* = (x*, y*)^\top$ de points définis sur la pièce.

Une autre loi, mais d'asservissement visuel 3D, adaptée au déplacement après prise des pièces, a été développée. Elle consiste en une régulation à zéro de l'erreur entre la position 3D courante de la pièce $s = ({}^F t, \theta u)^\top$ et la position 3D consigne de la pièce $s = ({}^F t*, 0)^\top$ où ${}^F t$ est la position et θu l'orientation.

Dans les deux cas, la commande qui correspond au torseur cinématique $(v, \omega)^\top$ du robot impliqué (table ou manipulateur) est alors :

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = -\lambda \mathbf{L}^+ (s - s*) \tag{1.2}$$

avec $\mathbf{L}^+$ la pseudo-inverse de la matrice d'interaction du système et λ le gain de la commande.

Les performances sur notre plateforme expérimentale ont été :
- précision : erreur de positionement maximale de 3.5μm, erreur d'orientation maximale de 0.3×10^{-2} radian ;
- robustesse : robuste aux occlusions partielles des pièces ;
- vitesse : 15 fois plus rapide qu'un opérateur humain entraîné.

Ces performances sont tout à fait remarquables et permettent d'envisager une utilisation industrielle des développements réalisés. L'image de la figure 1.6 montre le résultat de l'application test : une première mondiale !.

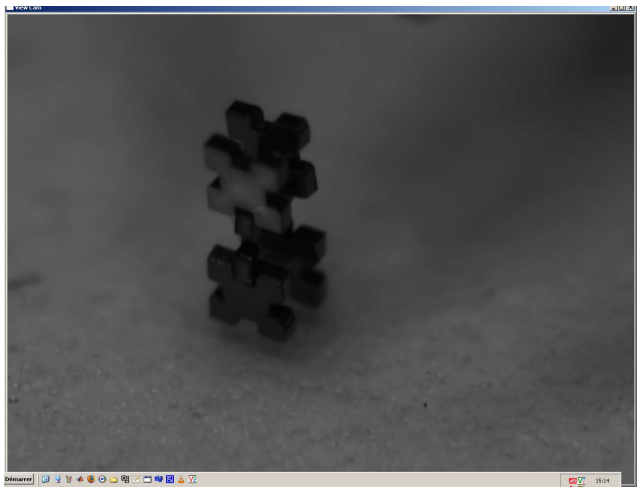


FIGURE 1.6 – Assemblage final obtenu : 5 pièces de 400 μm $\times$ 400 μm $\times$ 100 μm sur 3 niveaux.

Ces travaux ont fait l'objet de la thèse de Brahim Tamadazte et de nombreux DEA/Master et de projets de fin d'études d'ingénieurs. Ils se poursuivent avec les thèses de Naresh Marturi et Zille Husnain. Ils ont donné lieu aux publications suivantes :

- revues :[12], [11], [14], [13], [15], [18] ;
- conférences internationales à fort impact et workshops : [30], [32], [31], [33], [34], [36] ;
- autres conférences internationales :[47] ;
- conférences nationales : [62], [61].

Ces travaux intéressent au premier chef la société Percipio Robotics, spin-off du département AS2M, qui a déjà réalisé un projet maturation sur financement OSEO en 2010 porté par Brahim Tamadazte, après avoir fait l'objet du projet jeune OSEO en 2007 porté par Laurent Lebocq alors étudiant en master.

1.4 Insertion dans l'équipe de recherche

1.4.1 Animation d'équipe

- De 1995 à 1998, nous avons animé l'équipe "Microrobotique collective" du LAB dont les problématiques ont été exposées plus haut. L'équipe a comporté jusqu'à

trois maîtres de conférences, trois doctorants (y compris Jean-Christophe Ravassard dont j'assurais le co-encadrement), deux ingénieurs à mi-temps.
Pendant la même période, le LAB a mis sur pied le pôle "Microrobotique et microsystèmes" de l'axe "Machines Intelligentes" du CNRS. Nous avons participé activement à l'organisation des réunions nationales de mise en place de ce pôle. Elles ont abouti à la création du projet "Microrobotique Collective" autour de cinq laboratoires français (LAB, LRP [5], CRAN [6], CRI [7], GRACSY Amiens) et d'un laboratoire suisse (IIIA [8]). Nous avons animé ce projet avec Dominique Duhaut du LRP et Jean-Pierre Müller de IIIA, jusqu'à sa dissolution en 1998.

1.4.2 Coopérations

- Patrice Le Moal, chargé de recherches du CNRS à FEMTO-ST (1995-2003) : commande du micromoteur ultrasonore pour le positionnement de charge dans le cadre de la thèse de Karima Rochdi.

- Patrick Sandoz chargé de recherches du CNRS à FEMTO-ST (1998-2007) : suivi de cible en motif à franges dans le cadre de la thèse de Jean-Christophe Ravassard.

- Eric Marchand de IRISA/LAGADIC Rennes (depuis 2008) : extension du suivi 3D à partir de modèle CAO de l'échelle macroscopique à l'échelle microscopique et application avec succès ces principes à l'assemblage 3D, thèse de Brahim Tamadazte et thèse en co-encadrement prévue dans le projet ANR P2N NANO-ROBUST.

- Claire Arnoult du CRP Henri Tudor Luxembourg (2011) : calibrage du MEB financé par un projet BQR de l'université de Franche Comté.

1.4.3 Contrats de recherche

Au niveau local

- Développement d'une plate forme de travail nanométrée pour les microtechnologies (1999)
Ce projet a été proposé en collaboration avec Patrick Sandoz et financé par l'IMFC à hauteur de 50 KF. Il portait sur la construction d'un banc d'essai permettant d'évaluer les performances de la méthode de suivi.

5. Laboratoire de Robotique de Paris
6. Centre de Recherche en Automatique de Nancy
7. Centre de Recherche en Informatique de La Rochelle
8. Institut d'Informatique et d'Intelligence Artificielle de l'université de Neuchâtel

- Conception d'un microrobot volant (2001)
Ce projet a bénéficié d'un financement de l'IMFC à hauteur de 25 KF et portait sur la conception d'un microrobot s'inspirant du vol de la libellule.

- Etude du silicone dopé pour les applications biomédicales (2001). Ce projet qui a bénéficié d'un financement IMFC de 35 KF et du soutien logistique de la société Statice Développement à Besançon, consistait à étudier les propriétés rhéologiques et de biocompatibilité du silicone dopé à la limaille de fer.

- Microcaméra pour la micromanipulation (2002)
Ce projet a été déposé avec Michel Spajer du LOPMD et a bénéficié d'un financement IMFC de 5 KE et consistait à la réalisation d'un imageur à plusieurs têtes déportées reliées à un seul capteur d'images de type CCD.

- Implémentation rapide d'algoritmes de rendu (2007)
Ce projet a bénéficié d'un financement de OSEO-ANVAR, comme projet "Jeune" à hauteur de 2.2 KEuros, avec pour porteur Laurent Lebocq, élève ingénieur ENSMM et a consisté à implémenter sur un processeur FPGA à coeur DSP, les algorithmes de rendu par transfert trifocal développés dans la thèse de Julien Bert.

- Implémentation rapide d'algoritmes de calibragre (2011)
Ce projet a bénéficié d'un financement de l'université par le biais d'un BQR à hauteur de 10 KEuros avec Claire Arnoult du CRT Henri Tudor et de Laurent Philippe du LIFC

Au niveau national

- PRincipe et Outils NOuveaux pour le MIcroassemblage Automatisé (ANR Blanc PRONOMIA, 2006-2008)
Ce projet qui a réuni le LAB et ISIR[9] a bénéficié d'un financement de l'ANR (projet blanc) à hauteur de 300 KE, et a porté sur le développement du microassemblage automatisé de composants en silicium de 40 μm x 40 μm x 10 μm en utilisant le milieu liquide. **Nous avions la charge du work-package traitant de la vision**.

- Caractérisation multiphysique de nano-objets et manipulation robotisée sous environnement de microscope électronique à balayage (ANR P2N NANOROBUST, 2011-2015)
Le projet NanoRobust propose de résoudre des aspects de recherche fondamentaux pour proposer une plate-forme robotisée de nanomanipulation et de caractérisation

9. Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique, Paris

physique sous microscope électronique à balayage. Cette plate-forme vise à lever des verrous de caractérisation à l'échelle nanométrique et d'apporter des solutions à des cas d'études concrets. Il bénéficie d'un financement ANR de l'appel P2N (Programme Nanosciences et Nanotechnologies) pour un montant de 60 KE sur 48 mois. Le porteur est FEMTO-ST avec les partenaires suivant : ISIR-Paris, LPN-Marcousis, IRISA-Rennes.**Nous sommes en charge de la tâche 4 traitant de la vision du microscope électronique à balayage et sommes fortement impliqués dans la tâche 5 traitant de la commande par asservissement visuel**.

Au niveau international

- Procope (2004)
Nous avons effectué deux séjours d'une semaine en 2004 à l'université de Oldenbourg, Allemagne, dans le cadre du programme européen Procope avec le laboratoire AMIR de Serguej Fatikow. Auparavant Torsten Sievers et Marco Jähnisch de ce laboratoire avaient séjournés une semaine à Besançon. Ces séjours ont permis de partager les expériences dans le domaine de la vision pour le microassemblage.

- Microvision 3D (2007)
Ce projet a été proposé en coopération avec Heinz Hügli de l'université de Neuchâtel et a bénéfié d'un financement du LEA Microtechnique, et portait sur la mise en oeuvre et la comparaison d'algorithmes de reconstruction d'images 3D à l'échelle micrométrique. **Nous avions la charge de la reconstruction 3D par analyse de la mise au point et par stéréoscopie.**

- Hybrid ultra precision manufacturing process based on positional and self-assembly for complex micro-products (FP6-ICT HYDROMEL, 2006-2010, http ://www.hydromel-project.com/).
Il s'agissait d'un projet IP FP6-ICT qui regroupaient 24 partenaires européens. Il a porté sur le microassemblage de micro composants. Son objectif était le développement d'outils et de méthodes permettant d'automatiser l'assemblage de composants micrométriques de différentes natures : mécaniques, optiques, biologiques. **Notre intervention dans le projet a porté sur la commande de robots par vision et asservissement visuel. Cela a fait l'objet de la thèse de Brahim Tamadazte, financée entièrement par le projet.**

- Micro-technologies and systems for robot-assisted laser phonomicrochirurgy (μRALP, 2012-2014, http ://www.microralp.eu/).
Il s'agit d'un projet STREP du FP7-ICT-2011-7 avec IIT-Gènes, IMS-Hannovre, DISC-Gènes et INSERM CIT 808-Besançon. Son objectif est le développement d'un nouvel équipement minimalement invasif qui pourra passer dans la gorge pour approcher la tête laser d'intervention au plus près des cordes vocales. Il

comprendra également le développement d'une interface ergonomique à base de vision et d'asservissement visuel. Il permettra d'augmenter la surêté, l'efficacité et la qualité des actes chirurgicaux. **Nous sommes en charge de la conception des systèmes d'imagerie pour le chirurgien et le suivi du faisceau laser, leur étalonnage, et la commande du faisceau laser par asservissement visuel. Le projet finance la thèse de Syed Zille Hussnain.**

1.4.4 Organisation de manifestations

Dans le cadre du LEA [10] Microtechnique, le LAB a participé à l'école d'été "Highlights in Microtechnology" de 2005 à 2010. Il organisait une journée complète comprenant des cours et des TP sur le thème "Design and use of micro and nano robots : applications for microfactories, MOEMS and nanotechnologies". Outre le cours sur "Vision and control for microassembly", nous avons assuré la responsabilité de l'organisation de cette école au LAB de 2006 à 2008.

Nous avons également participé à l'école doctorale "Nano and Micro Systems" entre EPF Lausane et FEMTO-ST, pour faire un travail pratique sur le microassemblage par vision et asservissement visuel, en septembre 2011.

1.4.5 Insertion dans des réseaux

- Membre du GDR ISIS [11] de 2005 à 2008 avec participation aux journées technique "Métrologie et analyse d'images" du 27 janvier 2006 à ENSEIRB à Bordeaux ([58]), "Modélisation 3D à partir d'images" du 15 novembre 2006 à ENST Paris, "Détection et reconnaissance d'objets dans les images" du 10 juillet 2007 à ENST Paris.

- Membre du GDR Robotique depuis 2006 (GT "Manipulation multi-échelle") et participation active aux différentes manifestations dont les journées techniques ([59]) et les journées nationales de la recherche en robotique.

- Membre du réseau des AIP-PRIMECA [12] avec participation aux différentes manifestations ([60]).

1.5 Encadrement

Au total, nous avons participé à l'encadrement de :

10. Laboratoire Européen Associé
11. Information Signal Images viSion
12. Ateliers Inter-établissements de Productique - Pôle de Recherche en Informatique pour la MECAnique

- post-doc : 1 ;
- thèses soutenues : 3 ;
- thèses en cours : 2 ;
- stages et projets de niveau master : 21.

1.5.1 Thèses soutenues

1. **Karima Rochdi**, co-encadré à 70% avec Pr. Nadine Piat,"Etude, commande et applications du translateur piézoélectrique en basses tensions", thèse de l'université de Franche Comté sur financement de la région de Franche Comté, débutée en 1999 et soutenue en 2003 devant le jury composé de Philippe Martinet (professeur, rapporteur), Tanneguy Redarce (professeur, rapporteur), Antoine Ferreira (maître de conférences), Patrice Lemoal (chargé de recherche), Nadine Le Fort-Piat (professeur, directeur), Sounkalo Dembélé (maître de conférences, co-directeur), actuellement enseignante contractuelle au CFAI-Besançon.
2. **Julien Bert**, co-encadré à 70% avec Pr. Nadine Piat, "Synthèse de vues à partir d'images de microscopes photoniques pour la micromanipulation", thèse de l'université de Franche Comté sur financement du ministère, débutée en octobre 2004 et soutenue le 17 octobre 2007 devant le jury composé de André Crosnier (professeur, rapporteur), Jean-Marc Lavest (professeur, rapporteur), Jacques Jacquot (professeur), Michel Paindavoine (professeur), Nadine Le Fort-Piat (professeur, directeur), Sounkalo Dembélé (maître de conférences, co-directeur), deux ans de postdoc aux USA, actuellement ingénieur de recherche au LATIM-Brest.
3. **Brahim Tamadazte**, co-encadré à 70% avec Pr. Nadine Piat, "Vision 3D et Commande par asservissements visuels pour la micromanipulation et le micro-assemblage de MEMS", thèse sur financement du projet européen HYDROMEL, débutée en 2006 et soutenue le 26 novembre 2009 devant le jury composé de Jacques Gangloff (professeur, rapporteur), Heinz Hügli (professeur, rapporteur), Jean-Marc Breguet (chargé de recherche), Eric Marchand (professeur), Michel Paindavoine (professeur), Nadine Le Fort-Piat (professeur,directeur), Sounkalo Dembélé (maître de conférences, co-directeur) , après un post-doctorat de deux ans au TIMA-Grenoble il est actuellement chargé de recherches CNRS parmi nous à FEMTO-ST/AS2M.

1.5.2 Thèses en-cours

1. Naresh Marturi, co-encadré à 70% avec Pr. Nadine Piat, "Contribution à la micro-nano vision robotique pour l'instrumentation scientifique et industrielle : étalonnage et asservissement visuel utilisant l'information spectrale", sur financement du ministère, débutée en novembre 2010.

2. Syed Zille Hussnain, co-encadré à 50% avec Pr. Nicolas Andreff, "Phonomicrochirurgie laser par vision et asservissement visuel", thèse sur financement du projet européen "μRALP", débutée en février 2012.
3. Le Cui, co-encadré à 25% avec Pr. Eric Marchand (50%) et Pr. Nadine Piat (25%), "Contribution à la micro-nano vision robotique pour l'instrumentation scientifique et industrielle : étalonnage et asservissement visuel utilisant l'information géométrique", thèse sur financement du projet ANR P2N NANOROBUST, débutée en novembre 2012.

1.5.3 Post doctorants co-encadrés

1. Abed Malti, co-encadré à 70% avec Pr. Nadine Piat, "Calibrage de microscope électronique à balayage", sur financement du projet européen "HYDROMEL", 10 mois en 2010.

1.5.4 Stages de recherche

Ils ont été encadrés à 100% :

1. 20 étudiants en DEA/Master.
2. 1 ingénieur.

1.6 Autres activités

1.6.1 Activité d'intérêt collectif

Formation permanente

De 1996 à 2004, nous avons été chargé de l'organisation et du suivi de la formation permanente au LAB. Nous assurions l'interface entre le personnel du LAB et les organismes en charge de la formation, notamment le bureau de formation permanente du CNRS. Le CNRS a en effet décidé de rationaliser la formation de ses agents dans les laboratoires en instituant un interlocuteur unique en charge de ce domaine. Notre travail a consisté :

- à catalyser et à collecter les besoins de formations du personnel en regard des thématiques développés au LAB, puis à rediger le plan de formation,
- à le faire valider par le conseil de laboratoire en l'exposant et en l'expliquant par rapport aux grandes lignes fixées par le CNRS,
- avant de l'envoyer au bureau de formation de la délégation nord-est, à porter à la connaissance du personnel les annonces de stages émanant du CNRS, de l'université ou des organismes de formation,
- à sélectionner et à inscrire les agents intéressés par ces annonces, puis à envoyer le dossier aux organismes, à monter des formations sur mesure pour le

laboratoire.

Ainsi, pendant toute la période où nous avons eu cette charge, une trentaine de formation allant de l'initiation aux microtechniques à la bureautique, ont été suivies par une quarantaine d'agents.

1.6.2 Activité d'enseignement

Enseignement avant récrutement

Au lycée professionnel de Grand-Charmont (25) et l'université de Franche Comté, UFR Sciences et Techniques :

- mathématiques : fonctions linéaires, équations, géométrie ;
- électronique : électricité, fonctions numériques et analogiques ;
- automatismes : description par grafcet et graphe des états, synthèse ;
- automatique : modélisation entrées/sorties et d'état, analyse temporelle et harmonique, commandes ;
- vision : prétraitement, segmentation, asservissement visuel.

Enseignement après récrutement

A l'université de Franche Comté, UFR Sciences et Techniques (61^e section) :

- automatismes : description par grafcet et graphe des états, synthèse ;
- automatique : modélisation entrées/sorties et d'état, analyse temporelle et harmonique, commandes ;
- vision : prétraitement, segmentation, asservissement visuel ;
- informatique industrielle : programmation C++ et application à la commande.

La répartition correspondante est respectivement 35%/20%/35%/10%.
La répartition licence/master est de 70%/30%.
La répartition CM/TD/TP est d'environ 20%/50%/30%.
Toutes ces données sont représentées à la figure 1.7.
Notons également :

- notre participation au programme Erasmus entre l'université de Franche Comté et l'université de Targoviste en Roumanie avec deux séjours de 1 semaine en 2000 et 2007, pour donner des cours de vision ;
- notre participation aux écoles d'été "Highlights in Microtechnology" du laboratoire européen associé "Microtechnique" Franche-Suisse sur les aspects "Microrobotics for microfactories MOEMS and Nanotechnologies", pour donner un cours sur le microassemblage par vision et asservissement visuel, en 2006, 2007 et 2008, à Besançon.

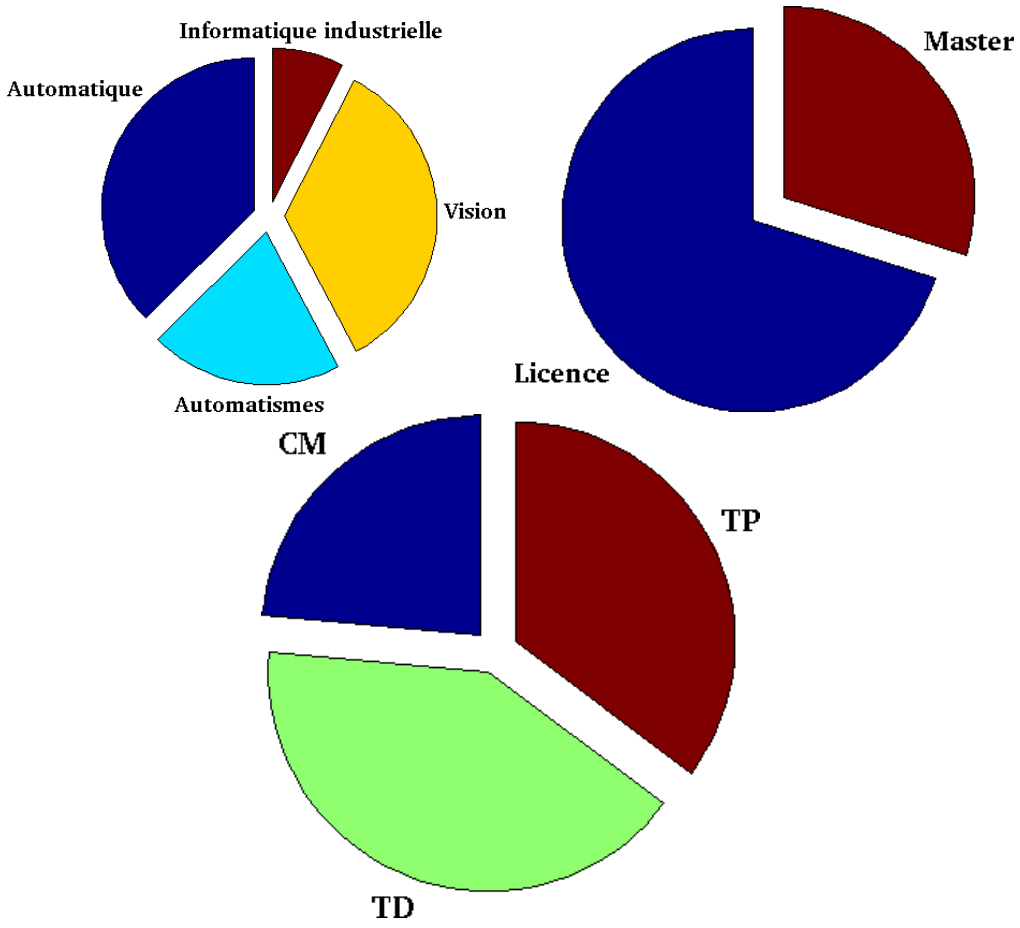


FIGURE 1.7 – La répartion des enseignements par contenu, niveau et type respectivement.

Responsabilités pédagogiques

De 1998 à 2003, nous avons assuré la responsabilité pédagogique de la 3e année de la licence EEA. Ensuite nous repris en 2006 la responsabilité de la 2e année de la même licence EEA jusqu'en 2008.
Nous avons assuré la responsabilité de plusieurs unités d'enseignement : vision, automatique, automatismes.
Nous avons monté une multitude de travaux pratiques : vision, automatique, automatismes.
En tant que responsable de la plateforme vision de l'AIP-PRIMECA Franche Comté, nous avons participé activement à la mise en place de celle-ci en coordination avec les autres AIP-PRIMECA : choix du logiciel servant de support aux TP.

1.6.3 Activité de consulting

Pendant nos deux années de disponibilité, nous avons développé une activité de prestations de service en informatique sur les Antilles (Guadeloupe et Martinique) : informatique industrielle, bureautique, bases de données, réseaux.

Publications

1.7 Publications de thèse

1.7.1 Revues

[1] Sounkalo Dembélé and François Lhote. Analyse et représentation par bond graphs des fonctions d'écoulement de flux de produits manufacturés. *RAIRO APII*, 29(1) :105–123, 1995.

1.7.2 Conférences internationales

[2] Sounkalo Dembélé and François Lhote. Products and equipments united modelling : making cycles and flows generation in evidence. In *7th IFAC/IFIP Symposium on Information Control Problems in Manufacturing Technology, may, 25-27, 1992, Toronto, Canada, pp. 245-550*, 1992.

[3] Sounkalo Dembélé and François Lhote. Proposition of manufacturing systems modelling by bond graphs. In *IEEE Internatonal Conference on Systems, Man and Cybernetics, october 17-20, 1993, Le Touquet, France, pp. 262-267*, 1993.

[4] Sounkalo Dembélé and François Lhote. Modelling of containers flows in a workshop : a bond graphs approach. In *2nd IFAC Congress on Intelligent Manufacturing Systems, june, 13-15, 1994, Vienna, Austria, pp. 110-114*, 1994.

[5] François Lhote, Maryvonne Dulmet, Sylvie Jacqmart, and Sounkalo Dembélé. Valeur sémantique d'un produit industriel et communication sociotechnique. In *2e Colloque Transfrontalier, Lausanne, Suisse, 22-23 septembre*, 1994.

[6] Maryvonne Dulmet, Sounkalo Dembélé, François Lhote, and Javier Oriz-Hernandez. Process analysis as an aid in ressources allocation and reengineering in automated manufacturing units. In *Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology, CIMAT 98, october 7-9 1998, Troy, New York (CD-ROM, 10 pages)*, 1998.

1.7.3 Conférences nationales

[7] S. Dembélé, J.P.Bourrières, and O. Barakat. Méthodologie d'élaboration du grafcet : approche basée sur une modélisation conjointe des produits et des équipements. In *Congrès AFCET sur le GRAFCET, 1992, Paris, France, pp. 39-47*, 1992.

[8] Sounkalo Dembélé, Jean-Paul Bourrières, and François Lhote. Systemic modelization of material flows in manufacturing workshop. In *Congrès AFCET*

sur l'Automatisation Des Procédés Mixtes Continus et Séquentiels, 29-30, janvier, 1992, Paris, France, pp. 153-160, 1992.

1.8 Publications post thèse

1.8.1 Revues internationales

[9] Patrick Sandoz, Jean Christophe Ravassard, Sounkalo Dembélé, and Andre Janex. Phase-sensitive vision technique for high accuracy position measurement of moving targets. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 49(4) :867–872, 2000.

[10] Sounkalo Dembélé and Karima Rochdi. A three dof linear ultrasonic motor for transport and micropositioning. *Sensors and Actuators A*, 125 :486–493, 2006.

[11] Brahim Tamadazte, Sounkalo Dembélé, Guillaume Fortier, and Nadine Le Fort-Piat. Robotic micromanipulation for microassembly : Modelling by sequencial function chart and achievement by multiple scale visual servoings. *Journal of Micro-Nano Mechatronics*, 5(1-2) :1–14, 2009.

[12] Brahim Tamadazte, Sounkalo Dembélé, and Nadine Piat. A multiscale calibration of a photon video microscope for visual servo control : Application to mems micromanipulation and microassembly. *Sensors & Transducers Journal (Special issue in Robotics and Sensors Environments)*, 5 :37–52, 2009.

[13] Sounkalo Dembélé, Julien Bert, Brahim Tamadazte, and Nadine Piat. A trifocal transfer based virtual microscope for robotic manipulation of mems components. *International Journal of Optomechatronics*, 4(4) :342–361, 2010.

[14] Brahim Tamadazte, Eric Marchand, Nadine Lefort-Piat, and Sounkalo Dembélé. Cad model based tracking and 3d visual-based control for mems microassembly. *International Journal of Robotics Research*, 29(11) :1416–1434, 2010.

[15] Brahim Tamadazte, Nadine Lefort-Piat, and Sounkalo Dembélé. Robotic micromanipulation and microassembly using mono-view and multi-scale visual servoing. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 16(2) :277 – 287, 2011.

[16] Abed C. Malti, Sounkalo Dembélé, Nadine Le-Fort-Piat, Patrick Rougeot, and Roland Salut. Magnification-continuous static calibration model of a scanning electron microscope. *Journal of electronic imaging*, 21(3) :033020, 2012.

[17] Abed C. Malti, Sounkalo Dembélé, Nadine Piat, Claire Arnoult, and Naresh Marturi. Toward fast calibration of global drift in scanning electron

microscopes with respect to time and magnification. *International Journal of Optomechatronics*, 6(1) :1–16, 2012.

[18] Joel Agnus, Nicolas Chaillet, Cedric Clévy, Sounkalo Dembélé, Michael Gauthier, Yassine Haddab, Guillaume Laurent, Philipe Lutz, Nadine Piat, Kanty Rabenorosoa, Micky Rakotondrabe, and Brahim Tamadatze. Robotic microassembly and micromanipulation at femto-st. *Journal of Micro-Bio Robotics*, 10.1007/s12213-013-0065-5, 2013.

1.8.2 Chapitres de livres

[19] Joël Agnus, Mehdi Boukallel, Lionel Buchaillot, Nicolas Chaillet, Cédric Clevy, Sounkalo Dembélé, Etienne Dombre, Michaël Gauthier, Moustapha Hafez, Pierre Lambert, Philippe Lutz, and Stéphane Régnier. *La microrobotique : applications à la micromanipulation*. Hermes Lavoisier, 2008.

[20] Joel Agnus, Mehdi Boukallel, Cedric Clévy, Sounkalo Dembélé, and Stephane Régnier. *La microrobotique : applications à la micromanipulation*, chapter Architecture d'une station de micromanipulation, pages 298–322. Hermès Science/Lavoisier, 2008.

[21] Joel Agnus, Mehdi Boukallel, Cedric Clévy, Sounkalo Dembélé, and Stephane Régnier. *Microrobotics for Micromanipulation*, chapter Architecture of micromanipulation station, pages 298–322. ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc, 2010.

1.8.3 Conférences internationales à fort impact et workshop

[22] Jean-Christophe Ravassard, Sounkalo Dembélé, Patrick Sandoz, André Janex, and Nadine Piat. A localisation method of microrobots using vision system and wavelet transform. In *SPIE Conference on Microrobots and Microassembly, Boston, Massachusetts, september 1999, pp. 23-28*, 1999.

[23] Sounkalo Dembélé, Karima Rochdi, Patrick Sandoz, and Patrice Lemoal. Development of a microrobot based micropositioning station : the microrobot and its position and orientation measurement method. In *Microrobotics and microassembly III, Proceedings of SPIE Vol. 4568, 2001*, 2001.

[24] Karima Rochdi and Sounkalo Dembélé. Static behavior of a piezoelectric microrobot. In *1st IEEE conference on nanotechnology, IEEE-NANO 2001, 28-30 October 2001, Maui, Hawaii, USA*, 2001.

[25] Julien Bert, Sounkalo Dembélé, and Nadine Lefort-Piat. Synthesizing a virtual imager with a large field of view and a high resolution for micromanipulation. In *5th International Workshop on MicroFactories, IWMF'2006, Besançon, France,october 25-27*, pages 230–238, 2006.

[26] Julien Bert, Sounkalo Dembélé, and Nadine Lefort-Piat. Virtual camera synthesis for micromanipulation and microassembly. In *IEEE International Conference on Intelligents Robotics and Systems (IROS'2006), Beijing, China, October 9-15*, 2006.

[27] Julien Bert, Sounkalo Dembélé, and Nadine Lefort-Piat. Performing weak calibration at the microscale, application to micromanipulation. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'2007), Roma, Italy, April*, 2007.

[28] Guillaume Fortier, Brahim Tamadazte, Sounkalo Dembélé, and Nadine Le Fort-Piat. Estimating the 3d orientation of a microgripper by processing the focus data from the images delivered by a videomicroscope. In *ROSE 2008 - IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments, Ottawa, Canada, 17-18 October 2008*, 2008.

[29] Brahim Tamadazte, Sounkalo Dembélé, and Nadine Le Fort-Piat. A multiscale calibration of a photon video microscope for visual servo control : Application to micromanipulation. In *ROSE 2008 - IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments, Ottawa, Canada, 17-18 October*, 2008.

[30] Brahim Tamadazte, Sounkalo Dembélé, Guillaume Fortier, and Nadine Le Fort-Piat. Automatic micromanipulation using multiscale visual servoing. In *IEEE CASE 2008 (International Conference on Automation Science and Engineering), Washington DC, USA*, 2008.

[31] Brahim Tamadazte, Thomas Arnould, Sounkalo Dembélé Nadine Le Fort-Piat, and Eric Marchand. Real-time vision-based microassembly of 3d mems. In *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM'09., Singapour : Singapore (2009)*, 2009.

[32] Brahim Tamadazte, Nadine Le Fort-Piat, Eric Marchand, and Sounkalo Dembélé. Microassembly of complex and solid 3d mems by 3d vision-based control. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'09, Saint-Louis, Missouri : United States*, pages 3284–3289, 2009.

[33] Brahim Tamadazte, Nadine Lefort-Piat, and Sounkalo Dembélé. Robust trajectory tracking and visual servoing schemes for mems manipulation. In *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM'10., Canada*, 2010.

[34] M. Gauthier, C. Clévy, S. Dembélé, B. Tamadazte, K. Rabenorosoa, N. Piat, and P. Lutz. Overview of out of plane mems assembly techniques. In *IEEE ICRA*, 2011.

[35] Naresh Marturi, Sounkalo Dembélé, Claire Arnoult, and Nadine Piat. Peformance evaluation of scanning electron microscopes using signal-to-noise ratio. In *8th International Workshop on Microfactories*, 2012.

[36] Sounkalo Dembélé Zill e Hussnain and Nicolas Andreff. Visual servoing in medical robotics. In *IEEE International Workshop on Biomedical Robotics and Biomechatronics June 24*, 2012.

1.8.4 Autres conférences internationales

[37] Ouiddad Labbani, Sounkalo Dembélé, André Janex, and Alain Bourjault. A behavior-based architecture for controlling a mobile minirobot. In *International Symposium on Microsystems, Intelligent Materials and Robots*, pages 540–543, 1995.

[38] Sounkalo Dembélé, Ouiddad Labbani, André Janex, and Franç Hamelin. A behavior-based control system for miniature robots. In *3rd France-Japan Congress on Mecatronics*, pages 571–573, 1996.

[39] Yassine Haddab, Jean-Christophe Ravassard, Sounkalo Dembélé, Patrice Lemoal, and Alain Bourjault. Hamro : A holonomic autonomous mobile robot for precise positioning. In *4th France-Japan Congress on Mecatronics, Mecatronics 98, 6-8 october 1998, Kitakyushu, Fukuoka, Japan, pp. 332-336*, 1998.

[40] Jean-Christophe Ravassard, Joel Abadie, Jacques Duffaud, Jean-Claude Ferniot, Patrice Lemoal, Nicolas Chaillet, and Sounkalo Dembélé. Realisation and control of autonomous microconveyors with piezoelectric actuators. In *INCOM 98, june 24-26 1998, Nancy, France, pp. 217-222*, 1998.

[41] Jean-Christophe Ravassard, Sounkalo Dembélé, Patrick Sandoz, and André Janex. Accurate position measurement using vision and wavelet transform. In *International Symposium on Robotics and Automation, ISRA 98*, pages 289–291, 1998.

[42] Patrick Sandoz, Rafael Escalona, Vincent Bonnans, and Sounkalo Dembélé. From interferometry to image processing : phase measurement vision method for high accuracy position sensing of rigid targets. In P. Jacquot and J.M. Fournier, editors, *Interferometry in Speckle Light, Theory and Applications*, pages 421–428. Springer, 2000.

[43] Karima Rochdi and Sounkalo Dembélé. Longitudinal movement study of a xyq micro-translator : longitudinal movement. In *Mecatronics'01, 9-11 october, 2001, Besançon, France*, 2001.

[44] Karima Rochdi, Yassine Haddab, Sounkal Dembele, and Nicolas Chaillet. A microassembly workcell. In *International Precision Assembly Seminar, IPAS'2003, Bad Hofgastein, Austria, 17-19 March 2003*, 2003.

[45] Julien Bert, Sounkalo Dembélé, and Nadine Lefort-Piat. Toward the vision based supervision of microfactories through images mosaicing. In Svetan Ratchev, editor, *Modular assembly systems and control applications*, pages 239–250, 2006.

[46] Julien Bert, Sounkalo Dembélé, and Nadine Lefort-Piat. Trifocal transfert based novel view synthesis for micromanipulation. In G. Bebis et al., editor, *Advances in visual computing, LNCS*, volume 4291, pages 411–420. Springer, 2006.

[47] G. Duceux, B. Tamadazte, N. Le-Fort Piat, E. Marchand, G. Fortier, and S. Dembélé. Autofocusing-based visual servoing : application to mems micromanipulation. In *ISOT 2010 International Symposium on Optomechatronic Technologies 25-27 October 2010, Toronto, Canada*, 2010.

[48] Abed C. Malti, Sounkalo Dembélé, Nadine Piat, Andres Marina Diaz, and Naresh Marturi. Towards real time calibration of the drift in a scanning electron microscope with respect to time and magnification. In *6th International Precision Assembly Seminar, IPAS*, 2012.

1.8.5 Conférences nationales

[49] Joel Agnus, Patrick Rougeot, Andre Janex, and Sounkalo Dembélé. Conception de messor : un minirobot mobile autonome à rouesmul. In *1eres Journées du Pôle Microrobotique*, pages 67–72, 1998.

[50] Yassine Haddab, Sounkalo Dembélé, Patrice Lemoal, and Alain Bourjault. Robot mobile autonome pour la navigation et le positionnement précis. In *1er Colloque National sur la Productique, CNP'98, 30-31, mai, 1998, Tizi-Ouzou, Algérie, pp. 178-182*, 1998.

[51] Jean-Pierre Müller, Jean-François Petin, Gerard Morel, Bertrand Varchon, Claude Pegard, Eric Brassart, Nicolas Hutin, Sounkalo Dembélé, Andre Janex, Brigitte Morello, Jean-Christophe Ravassard, and Alain Bourjault. Conception de systèmes de transport collectif d'objets. In *1eres Journées du Pôle Microrobotique*, pages 61–66, 1998.

[52] Jean-Christophe Ravassard, Sounkalo Dembélé, Patrick Sandoz, Andre Janex, and Nadine Piat. Mesure précise de position avec caméra et transformation par ondelettes. In *2es journées du Pôle Microrobotique*, pages 9–13, 1999.

[53] Sounkalo Dembélé, Patrick Sandoz, and Jean-Christophe Ravassard. Mesurer et calibrer conjointement avec une mire. In *Mali Symposium on Applied Science, MSAS 2000, august, 7-9, 2000, Bamako, Mali*, 2000.

[54] Karima Rochdi and Sounkalo Dembélé. Etude du mouvement longitudinal d'un micro-positionneur xyq. In *14es Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique, JJCR 14, 31 mai-1er juin, 2001, Evry, France, pp. 2-8*, 2001.

[55] Sounkalo Dembélé and Karima Rochdi. Etude d'un micromoteur linéaire piézoélectrique grande course grande résolution. In *Mali Symposium on Applied Sciences, MSAS'2002, july, 8-12, Bamako, Mali*, 2002.

[56] Karima Rochdi, Yassine Haddab, Sounkalo Dembélé, and Nicolas Chaillet. Développement d'une cellule de microassemblage. In *5es Journées du pôle microrobotique, 6-7 novembre 2002, Rennes*, 2002.

[57] Sounkalo Dembélé and Karima Rochdi. Analysis and applications of a 3 dof linear ultrasonic motor. In *Mali Symposium on Applied Sciences, MSAS'2004, august, 2-5, 2004, Bamako, Mali*, 2004.

[58] Sounkalo Dembélé, Julien Bert, and Patrick Sandoz. Localisation subpixellaire de cibles en franges par détection de phase. In *Journée Image et métrologie, GDR ISIS, 27 janvier, 2006, Bordeaux, France*, 2006.

[59] Sounkalo Dembélé. Algorithmes de rendu de vues pour le microassemblage. In *1ere Journée du GT "Micromanipulation Multi-échelle" du GDR Robotique, Paris, 16 mars*, 2007.

[60] Sounkalo Dembélé. Algorithmes de rendu pour le microassemblage. In *Journées thématiques AIP-PRIMECA "De la macro vers la micro manipulation", 13, 14 juin 2007, Besançon, France*, 2007.

[61] Brahim Tamadazte, Sounkalo Dembélé, Benoit Ballarin, and Nadine Lefort-Piat. Microassemblage par asservissements visuels. In *6es journées nationales de la recherche en robotique, JNRR'07, Octobre 2007, Obernai, France - session poster*, 2007.

[62] Brahim Tamadazte, Sounkalo Dembélé, Benoit Ballarin, and Nadine Lefort-Piat. Microassemblage par asservissements visuels. In *Ateliers LEA, Arc-et-senans, France, Septembre 2007*, 2007.

[63] Sounkalo Dembélé, Julien Bert, Nadine Lefort-Piat, and Kya Abraham Berthé. Constructing a novel view by backward mapping in the tensor based approach. In *MSAS 2008 (Mali Symposium on Applied Sciences), Bamako, August, 3-8*, 2008.

[64] Abed Malti, Sounkalo Dembélé, and Nadine Lefort-Piat. Multi-scale calibration of a scanning electron microscope in se imaging using pda. In *Atelier conjoint des GDR Mecano et MCIMS sur Mesures de champs, 9-10 décembre 2010, Besançon*, 2010.

Chapitre 2

Introduction à la micro vision robotique

2.1 Introduction

La micro-robotique est une extension de la robotique à l'échelle micro-métrique. Sa naissance remonte au début des années 1990 et fait suite à celle des micro structures et systèmes (MEMS [1] et MOEMS [2]) au tournant des années 80, une dizaine d'années plutôt, pour l'industrie. La fabrication de structures et systèmes par les technologies inspirées de la micro-électronique a permis de poser le problème de leur manipulation à des fins de caractérisation, de packaging voire d'assemblage. A coté de ces cibles artificielles, on peut ajouter la manipulation de cibles biologiques (cellules notamment, dont les ovocytes) ou, en chirurgie, l'exploration du corps humain par des appareils adaptés (endoscopes ou cathéters).

Selon une étude de la société Yole Development, publiée cette année [183], le chiffre d'affaires du marché des micro-systèmes a été en 2011 de 10 Milliards de Dollars reparti de la manière suivante :

1. industrie grand public, appareils nomades principalement (50%),
2. industrie médicale (15%),
3. reste, comprenant télécommunications, aéronautique, défense, ... (35%).

Les ventes du marché grand public sont concentrées autour de quatre produits : accéléromètres, gyroscopes, magnétomètres et microphones. L'étude estime le packaging, l'assemblage et le test à 40% du coût total du produit fini. Elle montre également que la tendance est à la réduction de la taille des puces, au développement de l'intégration au niveau du système et au niveau du wafer (dont le TSV [3])

1. Micro Electro Mechanical System
2. Micro Opto Electro Mechanical System
3. Through Silicon Vias

et à un rapprochement avec la technologie CMOS. Avec un taux de progression de 13% depuis 2009, le marché des microsystème dépasserait 20 Milliards de Dollars en 2017.

La recherche en micro-robotique est très active depuis le début, même si une quinzaine d'années après, les espoirs industriels suscités sont aujourd'hui très nuancés du fait de la limitation des dispositifs au type 2D, 2D 1/2 tout au plus, et du développement de solutions *ad hoc* contournant la manipulation individuelle de structures et systèmes, comme le montre l'analyse du marché avec notamment l'intégration au niveau du wafer [174]. Elle nourrit cependant les solutions *ad hoc* de ses avancées [88], [186], [111], [119], [161], [201], [19], [193]. Elle a permis :

- de développer des capteurs et actionneurs utilisant notamment la piézo-électricité, l'électrostatique ou l'électromagnétisme,
- de développer des structures mécaniques originales d'amplification de mouvement,
- de réaliser l'intégration des éléments précédents en de microrobots aujourd'hui commercialisés,
- de commencer à regrouper les micro-robots pour former des systèmes permettant de réaliser des applications concrètes de type preuve de concept.

Nous avons fait le pari de l'approche système une quinzaine d'années plus tôt, alors même que l'approche composant était encore bien loin de donner des résultats commerciaux. De ce point de vue, on peut distinguer deux modes de fonctionnement : manuel où le système est télé-opéré par l'intermédiaire d'une interface haptique, et automatique où le système fonctionne en autonomie à la suite de la définition de consignes directement ou à travers une trajectoire. On trouve évidemment le cas semi-automatique qui marie les deux modes. Tous ces modes font appel à des degrés divers à la micro vision robotique qui se décline en imagerie, synthèse d'images et asservissement visuel.

2.2 Propriétés de l'échelle micrométrique

De manière plus judicieuse on peut définir l'échelle d'intervention de la micro-robotique à partir du pouvoir de résolution limite de l'œuil au *ponctum proximum*[4], c'est-à-dire aux alentours de 25 cm. Pour un pouvoir de résolution moyen de 0.02°, cela donne environ 100 μm, qui correspond par ailleurs à la taille moyenne d'un grain de sable ([187]). Il est ainsi admis de considérer la manipulation de cibles de 500 μm à 50 μm comme relevant de la micro-robotique, la définition des limites étant toujours arbitraire.

4. distance minimale de vision nette

L'échelle de la limite de résolution de l'œuil est intéressante car elle pose clairement la nécessité d'une imagerie haute résolution comme un microscope optique ou électronique, et ce d'autant plus qu'il faut considérer également les tolérances des dimensions. A cette échelle, on reste naturellement dans les lois physiques classiques. Il y a cependant une propriété particulière qui a un impact très élevé sur la manipulation : les forces de surface sont plus importantes que les forces de volume (figure 2.1) ([186]). On constate même que la force de gravité devient la plus faible pour un objet spérique de rayon inférieur à 10 μm.

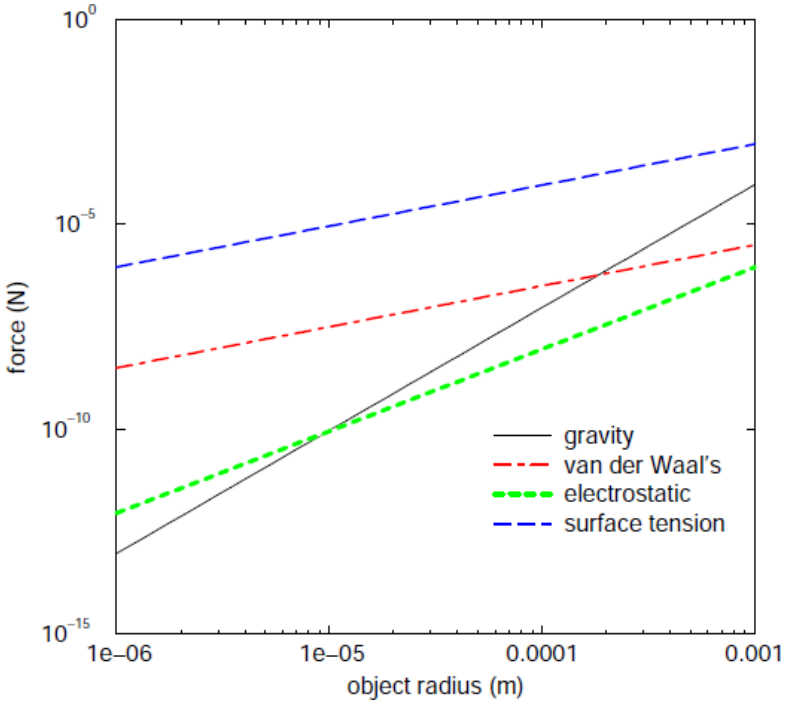


FIGURE 2.1 – Evolution des forces agissant sur un objet sphérique en fonction de son rayon (d'après [186]).

Soit un objet micrométrique, forcément disposé dans un environnement en interaction avec d'autres objets. La force de gravité F_{gra} constitue la seule force volumique à laquelle il est soumis :

$$F_{gra} = V\rho g \tag{2.1}$$

avec :
– V le volume de l'objet,
– g l'accélération de la pesanteur,

– ρ la masse volumique de l'objet.

Les forces surfaciques sont par contre plus nombreuses : force capillaire, force électrostatique, force de van der Waals.

Supposons que la surface de l'objet comporte un ménisque de liquide faisant un angle θ avec cette surface (figure 2.2).

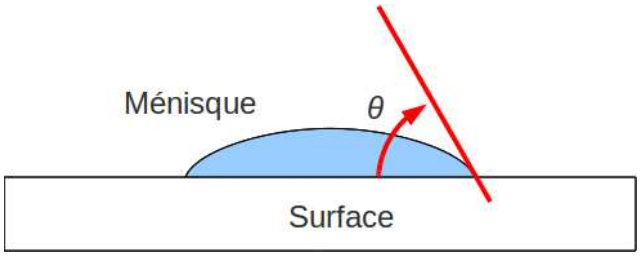


FIGURE 2.2 – Ménisque de liquide sur un objet plan.

Soit γ la tension de surface à l'interface liquide-air (l'objet est supposé dans l'air). La force capillaire F_{cap} à laquelle est soumise l'objet est proportionnelle à γ et $\cos\theta$:

$$F_{cap} \propto \gamma \cos\theta \tag{2.2}$$

Un mouvement d'approche d'un autre objet va avoir pour effet d'aplatir le ménisque et donc de diminuer θ vers 0 : donc d'augmenter F_{cap} jusqu'à un maximum atteignant 6 mN. Inversement un mouvement de retrait va augmenter θ vers $\frac{\pi}{2}$: donc annuler F_{cap}.

La force électrostatique F_{els} entre l'objet cible et un autre objet correspond à la force de Coulomb entre ces deux objets du fait de la présence de charges à leurs surfaces :

$$F_{els} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 a^2} \tag{2.3}$$

avec :

– q_1 (respectivement q_2) les charges à la surface de l'objet cible (respectivement l'autre objet),
– a la distance séparant les deux surfaces,
– ϵ_0 la permittivité du vide.

Il reste alors le problème de l'estimation des charges q_1 et q_2 pendant l'interaction.

La force de van der Waals F_{vdw} provient des interactions entre les molécules de l'objet et de celles de tout autre surface en contact. En effet ces molécules créent un champ électrique dans lequel se trouvent les molécules de la cible. Elle

s'exprime en fonction du potentiel d'interaction $w(a)$ par :

$$F_{vdw} = -\frac{dw(a)}{da} \tag{2.4}$$

$w(a)$ s'exprime en fonction de la géométrie des surfaces et de leurs matériaux.

A ces quatre forces d'adhésion, il faut éventuellement ajouter les forces de contact du fait des déformations éventuelles des surfaces pendant l'interaction, en raison de leur fragilité.

Toutes ces forces ne sont pas sans incidence sur la manipulation.
Les références suivantes donnent les détails sur les forces : [75], [186], [19].

2.3 La manipulation

La manipulation d'une cible implique trois opérations réalisées de manière séquentielle :
- la prise de la cible en contraignant ces mouvements,
- le déplacement de la cible,
- le lâcher de la cible.

Dans cette séquence les opérations de prise et lâcher sont critiques, et elles doivent être bien étudiées pour garantir la réussite de la manipulation. On peut distinguer deux grandes familles de solutions.

La famille historique, héritée de la robotique, consiste en un contact mécanique direct entre la pince et la cible. On est immédiatement sous la coupe des propriétés décrites plus haut. Les forces capillaire, de van der Waals et de contact auront tendance à maintenir fortement la cible contre la pince jusqu'à rendre impossible son lâcher (figure 2.3).

Pour y remédier, il faut faire appel à des stratégies de réduction des forces d'adhésion : réduire l'humidité en contrôlant l'hygrométrie du milieu, diminuer les surfaces en interaction en agissant sur les états de surface, appliquer des impulsions de mouvement à la pince.

De manière inverse, la force électrostatique aura tendance à repousser la cible (figure 2.4) ; dans ce cas une solution peut consister en une évacuation des charges aux surfaces en interaction.

Une solution intermédiaire consiste à introduire un média dans l'interaction que l'on pourra commander au besoin : aspiration/expiration d'air, gel/dégel de

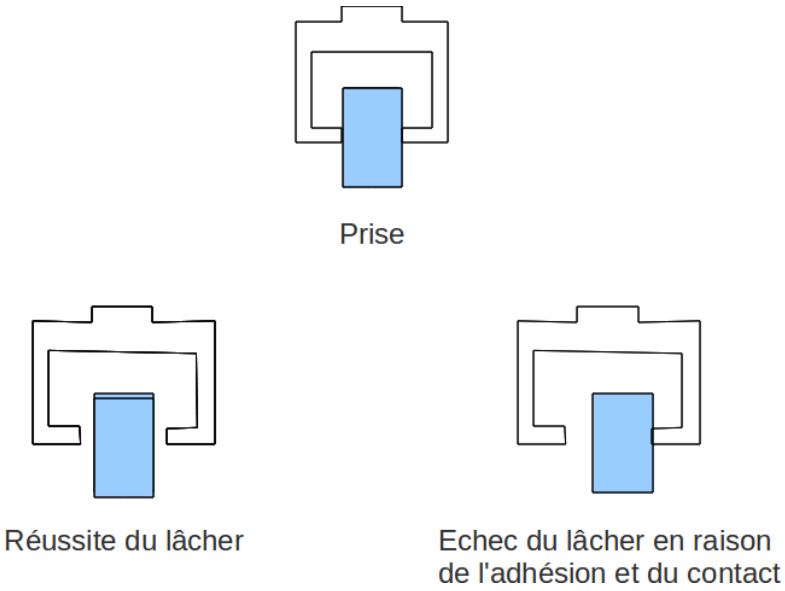


FIGURE 2.3 – Manipulation par pince à contact.

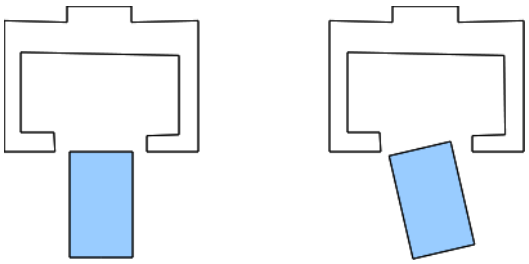


FIGURE 2.4 – Échec de la prise à cause de la force électrostatique poussant la cible.

goutte de liquide, apport/enlèvement de charges, ...

La seconde famille de solutions comprend les solutions sans contact mécanique direct :
- maintien et déplacement de cibles magnétiques par un champ magnétique,
- maintien et déplacement de cibles diélectriques par un champ électrique (diélectrophorèse),
- maintien et déplacement de cibles diélectriques par un faisceau laser,
- maintien et déplacement de cibles par un changement des propriétés chimiques du milieu (pH par exemple).

Ces solutions sont la base de ce qui est appelé auto-assemblage dans la littérature, par opposition aux solutions précédentes qualifiées d'assemblage robotique. L'avantage de ces dernières est de pouvoir générer un niveau de force de contact important, niveau requis pour les applications d'insertion.

On peut trouver plus de détails sur les stratégies de manipulation dans les références suivantes : [88], [161] [19].

2.4 La micro vision robotique

Nous définissons la micro vision robotique par la vision robotique à l'échelle micrométrique pour élargir le champ des deux spécialités ou apporter des solutions originales à des problèmes connus. De manière formelle : la robotique traite de la génération de mouvement, la vision traite de l'analyse d'images pour extraire des informations sur une scène, tandis que l'imagerie traite de la formation des images par l'interaction rayonnement - matière de la scène.

A l'image du robot, le micro-robot générique comprend une structure mécanique, des actionneurs, des capteurs proprioceptifs et une unité de commande que l'on peut qualifier de bas niveau. Le point de vue système permet d'ajouter l'imagerie et la vision comme capteur extéroceptif, et ainsi conduire à une boucle de commande de haut niveau, dont les intérêts sont multiples.
Elle aboutit à une commande en cascade à l'impact très positif sur la rapidité et l'amortissement du système. Elle permet de compenser les imperfections de la boucle bas niveau. Il est à noter que les matériaux actifs utilisés sont caractérisés par un comportement non linéaire qu'il est difficile de prendre en compte dans la commande : zone morte, hystéresis, dérive thermique, ...
Elle permet d'agir au plus près de l'application (figure 2.5).

Cependant l'intégration de l'imagerie, de la vision et de la robotique, pose le problème de l'architecture informatique qui est loin d'être triviale : il faut faire communiquer un ensemble hétérogène de manière sûre.

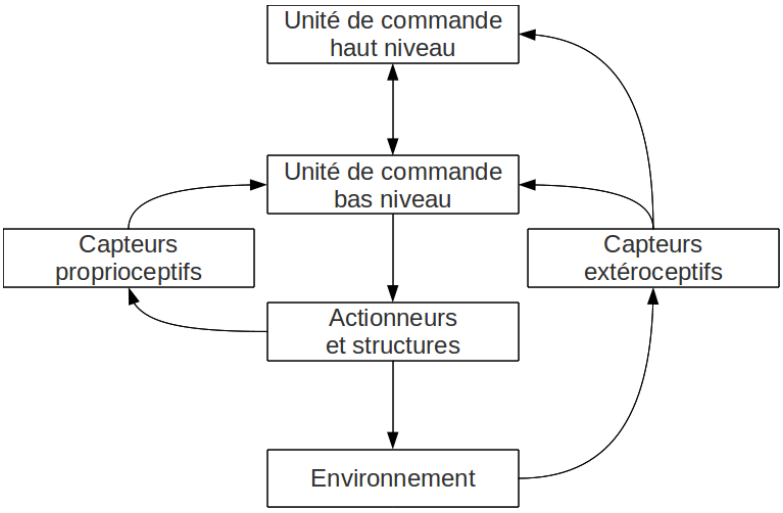


FIGURE 2.5 – Un micro-robot considéré d'un point de vue système.

2.5 Notre ambition

A partir de 1995, nous avons contribué au lancement de la micro-robotique en animant la thématique de la "Microrobotique Collective" au niveau local (Besançon) et national (avec quatre autres laboratoires). Elle visait le développement de micro-robots embarquant leurs équipements d'énergie et de calcul d'une part, et le développement d'architectures de commande permettant de faire émerger un comportement collectif intelligent, d'autre part. Ces travaux ont montré la nécessité d'un minimum de coordination qui commence par la connaissance à tout instant de la position spatiale du maximum de micro-robots participants. Or cette information peut être obtenue facilement par l'imagerie et la vision. Nous avons alors choisi de nous orienter sur la micro vision robotique.

En 1998, le domaine émergeait à peine :
- à partir de 1995 Sato et al., au Japon, commencent à publier sur l'utilisation du retour visuel par microscope électronique à balayage pour réaliser des manipulations automatiques [76], [91] ;
- à partir de 1997, apparaissent les publications de l'équipe de Jacques Jacot en Suisse sur le retour visuel par microscope optique pour assembler un micromoteur [83], [89], [85] ;
- en 1998, Feddema et al. aux USA, publient un article extrêmement intéressant développant une théorie de l'utilisation du modèle CAO en asservissement visuel à des fins de micro-assemblage [87] ;
- en 1998 nous publions notre premier papier sur la mesure exacte de position par analyse d'images de franges ;

- à partir de 1999 commencent les publications de l'équipe de Nelson sur l'étalonnage du microscope optique [95], le micropositionnement par asservissement visuel [94], le retour de force et de vision pour la micromanipulation [202] et la conception pour l'assemblage par asservissement visuel [92] ;
- à partir de 1999 commencent également les publications de l'équipe Sergej Fatikow [90].

Aujourd'hui une quantité importante de publications ont été réalisées dans le domaine relatant des résultats plus ou moins intéressants. Notre ambition, dès le départ, a été de participé à ce mouvement :

contribuer au développement de la micro vision robotique pour en faire un sous-domaine clé de la micro-robotique en ciblant les applications de manipulation pour l'assemblage.

Les problématiques que nous avons identifiées et étudiées se déclinent en trois parties :
- l'imagerie avec l'étalonnage dans des conditions particulières,
- la synthèse d'images virtuelles avec le développement de méthodes robustes et rapides,
- l'asservissement visuel avec le développement de méthodes de suivi et commande précises et robustes aux aléas.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre introductif de ce mémoire nous avons défini le cadre de nos recherches : la micro vision robotique. Il s'agit d'un mariage judicieux entre vision et robotique à l'échelle micrométrique pour apporter des solutions originales aux applications de manipulation pour l'assemblage. Les chapitres suivants vont développer nos résultats qui ont permis à l'équipe de devenir un acteur reconnu dans le domaine. Ils se déclinent en imagerie, synthèse d'images et asservissement visuel.

Chapitre 3

Imagerie

3.1 Introduction

A l'inverse de la robotique classique (macro-robotique) où l'imagerie n'est qu'une option permettant d'élargir le champ d'application, en micro-robotique l'imagerie joue un rôle primordial. Deux raisons permettent d'expliquer cet état de fait.

La première raison tient à la résolution de l'imagerie, parfaitement adaptée à la taille des objets ciblés : 200 nm pour le microscope optique, 1 nm pour le microscope électronique à balayage. L'imagerie rend visible aussi bien les pièces que les pinces destinées à les manipuler. Les moyens de perception classiques (œuil humain, détecteur magnétique, détecteur ultra-sonore ou infra-rouge) sont loins de ces niveaux de résolution.

La seconde raison de la centralité de l'imagerie en micro-robotique tient à la richesse en informations de l'image. D'une seule image, on peut estimer la disposition d'un composant ou sa longueur, la distance relative entre un composant et une pince, l'état de surface d'un composant, ... D'un flot d'images, on peut estimer le déplacement d'un composant, la vitesse d'une pince, la structure de la scène, etc. Ces informations directement obtenues des images peuvent servir à estimer d'autres informations, l'effort notamment. Par exemple, si l'on observe une poutre, soumise à des efforts de flexion, dont on connaît le modèle de comportement mécanique, il est possible de déduire des déplacements calculés par la vision le profil de la force à laquelle cette poutre est soumise : le résultat est un capteur d'effort. Ce principe est mis en œuvre par l'équipe de Bradley J. Nelson dans plusieurs expérimentations ([94], [106], [202], [102], [129]). Les informations tirées des images sont explicites lorsque la manipulation est automatique ou semi-automatique ; elles sont par contre implicites dans le cadre de la manipulation manuelle ou téléopérée.

L'imagerie permet la surveillance de l'activité, le contrôle qualité et la commande. La maîtrise de son utilisation est une clé du succès de la micro-robotique. Celle-ci passe par la connaissance approfondie des propriétés de l'imagerie et de son étalonnage le plus précis possible.

3.2 De l'imagerie en micro-robotique

Les principaux types d'imagerie scientifique et industrielle sont (figure 3.1) ([110], [188], [201]) :

1. l'imagerie à base de photons dans laquelle la formation des images provient de l'interaction de la matière avec les photons : caméra conventionnelle, microscope optique,
2. l'imagerie à base d'électrons où les images proviennent de l'interaction de la matière avec les électrons : microscope électronique à balayage (MEB), microscope électronique à transmission (TEM),
3. l'imagerie à sonde locale où les images sont produites par l'interaction d'une sonde avec la matière : microscope à force atomique (AFM), microscope à effet tunnel (STM), sonde atomique tomographique (TAP).

Dans la littérature de la micro-robotique de manipulation et d'assemblage de composants artificiels, on trouve les imageries suivantes : la caméra conventionnelle, la caméra à tête déportée par l'intermédiaire d'un faisceau de fibres optiques (fibroscope), le microscope optique, le microscope électronique ([110]).

Le microscope optique (photonique) peut être considéré comme l'imagerie de la micro-robotique. Son niveau de résolution (200 nm), la diversité de ses conditions d'utilisation (milieu ambiant, humide, liquide et vide) et sa facilité d'utilisation (coût abordable, robustesse) en font une imagerie quasiment incontournable. C'est de loin l'imagerie utilisée en micro-robotique. Il a néanmoins contre lui une faible profondeur de champ. On le trouve dans les plateformes expérimentales de :

- Bradley J. Nelson aux USA et en Suisse ([94], [106], [202], [102], [125], [150], [178]),
- K.I.S.T. [1] en Corée ([109], [118], [117], [154]),
- H.I.T. [2] en Chine ([126], [147]),
- Nicolas Dechev à l'université de Toronto ([127])
- ...

Le microscope électronique à balayage a un pouvoir de résolution d'environ 1 nm, ce qui lui permet d'imager des objets aussi bien à l'échelle micro-métrique

1. Korean Institute of Science and Technology
2. Harbin Institute of Technology

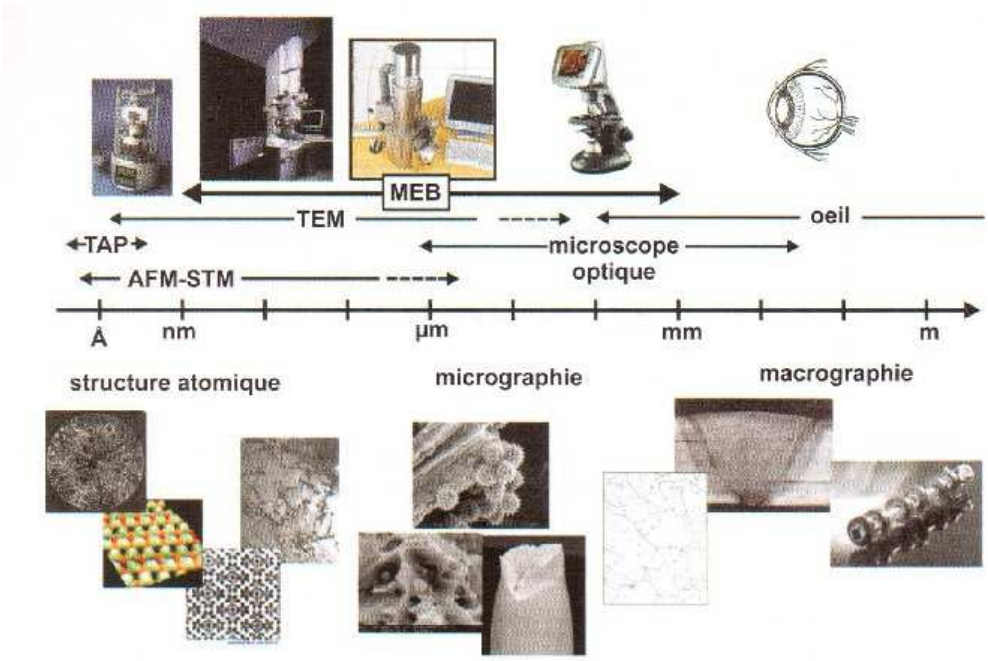


FIGURE 3.1 – Classification des imageries selon leur résolution (MEB : microscope électronique à transmission, TEM : microscope électronique à transmission, TAP : sonde atomique tomographique), d'après [188].

que nano-métrique : on pourrait dire qu'il est une imagerie pour la micro-nano-robotique. Comparativement au microscope optique, il est peu utilisé en micro-robotique, on le trouve dans les plateformes expérimentales de :

- Sergej Fatikow en Allemagne ([146], [158], [166], [163], [173], [192]),
- Bradley J. Nelson en Suisse ([177]),
- Toshio Fukuda au Japon ([179], [181]),
- Yotaro Hatamura au Japon ([76], [93]),
- Tomomasa Sato ([91], [130]),
- ...

Le fibroscope est constitué d'un faisceau de fibres optiques lentillés aux deux extrémités, qui permet de transporter l'image de la scène vers une caméra située plus loin. Son intérêt par rapport aux deux imageries précédentes est le faible encombrement de sa tête. La résolution et la qualité des images sont par contre nettement moins bonnes. Il est peu utilisé en micro-robotique :

- Tohyama et ses collègues au Japon ([105], [104]) utilisent une paire de fibroscopes avec un dispositif d'orientation pour observer leur scène de travail,
- M. Weck et C. Peschke en Allemagne utilisent un fibroscope comme capteur de présence d'objets entre les deux doigts d'une pince ([136]).

La caméra dans son assertion commune est dotée d'un objectif conventionnel, ce qui conduit à un champ de vision large pour un niveau de résolution faible, si on le compare aux imageries précédentes. Ces performances sont utiles en micro-robotique car elles permettent de réaliser la surveillance de l'activité. La caméra se retrouve donc largement utilisée du fait qu'elle délivre des vues globales en complément des vues locales du microscope.

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de cet état de l'art succinct.
Le premier enseignement est la grande variété des imageries utilisées : microscope optique, microscope électronique à balayage, fibroscope, caméra. Le choix du type d'imagerie est dicté par la résolution des objets ciblés, les conditions de travail et le champ de vision souhaité. Les imageries sont mêmes souvent combinées pour bénéficier de leurs avantages respectifs, typiquement le microscope pour la résolution et la caméra pour le champ de vision.
Le second enseignement est la prédominance du microscope optique sur les autres imageries. Cela provient sans doute du fait qu'il établit un bon compromis entre la résolution, les conditions de travail et la facilité de mise en œuvre : le microscope optique est l'emblème de la micro-robotique.
Le troisième enseignement est la présence fréquente de plusieurs microscopes (au dessus, en dessous, de coté) afin de rendre accessible le maximum d'informations sur la scène de travail : système multivue ou multifocal. Ces enseignements nous

ont conduit à développer des plateformes à un ou deux microscopes et donc à étudier dans le détail les imageries optique et électronique.

3.3 Challenges scientifiques et techniques

Il existe une grande diversité de microscopes optiques exploitant tel ou tel aspect de l'interaction rayonnement-matière : microscope en réflexion, microscope en transmission, microscope à contraste, microscope à fluorescence, microscope confocal ([190]). La majeure partie de ces appareils est utilisée presque exclusivement dans le domaine bio-médical. Comme présenté plus haut, le microscope en réflexion a également trouvé une place importante dans le domaine scientifique et industriel, et notamment en micro-robotique de manipulation et d'assemblage, d'où la circonscription de notre réflexion à celui-ci.

En tant que système d'imagerie complet, le microscope en réflexion comprend ([190]) (figure 3.2) :
- un éclairage, typiquement de la lumière blanche,
- un porte-échantillon,
- un objectif de focalisation du rayonnement sur le capteur,
- une caméra à capteur matriciel convertissant le rayonnement en signal électrique échantillonné spatialement et numérisé pour donner l'image.

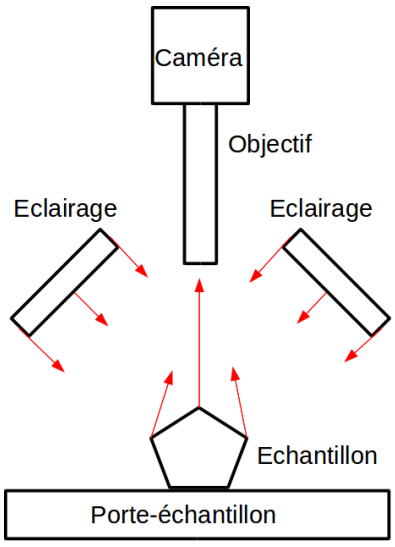


FIGURE 3.2 – Schéma de principe d'un microscope optique en réflexion.

L'élément central est l'objectif, forcément convergent, et constitué d'un empilement de lentilles. Il détermine les performances de l'appareil tant au niveau

géométrique (agrandissement, distance focale, ...) que physique (distorsion, aberration, ...).

Le microscope électronique à balayage se distingue du microscope optique par l'absence de capteur d'image matriciel (de type CCD ou CMOS) : les images sont obtenues par un balayage de la scène de travail avec un faisceau d'électrons, et une détection des électrons générés. Il comprend typiquement (figure 3.3) :

- un canon à électrons pour générer le faisceau d'électrons jouant le rôle de sonde,
- un condenseur et un diaphragme pour affiner le faisceau,
- des bobines de balayage,
- un objectif pour focaliser le faisceau sur l'échantillon à imager.

On notera que le condenseur et l'objectif sont électromagnétiques c'est-à-dire des bobines.

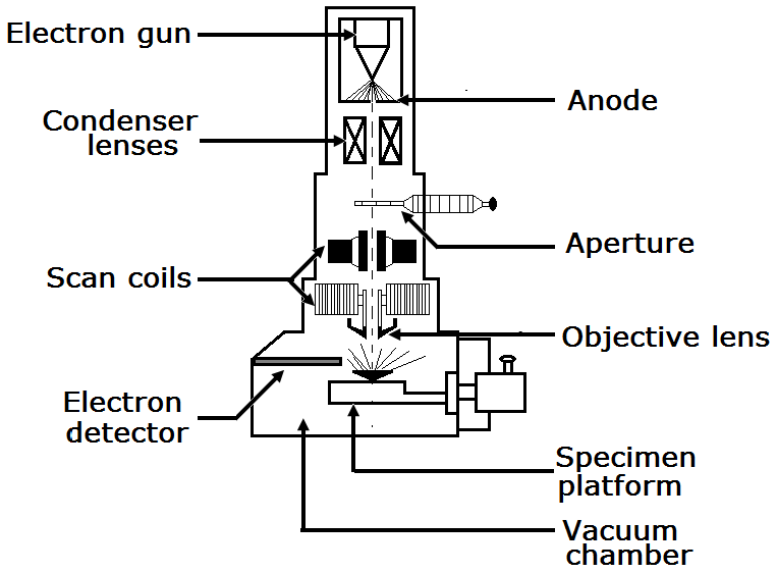


FIGURE 3.3 – Les éléments constitutifs d'un microscope électronique à balayage d'ancienne génération.

Le grand challenge relatif l'utilisation de ces appareils en micro-robotique est leur étalonnage. Il s'agit de savoir quels modèles de projection, de distorsion et de dérive utilisés. Puis ces modèles définis, il faut trouver comment les calculer étant donné les propriétés très particulières de ces microscopes.

3.4 Propriétés du microscope optique

Les conditions de l'approximation de Gauss définissent les conditions idéales de travail de toute source photonique d'images ; malheureusement, elles ne sont pas remplies en pratique, ce qui explique les propriétés de l'imagerie en question.

La première condition de Gauss stipule que l'*ouverture* du système optique doit être petite. Il en résulte que les angles d'incidence des rayons sont très faibles et donc les rayons sont quasi normaux aux surfaces des composants optiques d'entrée. Cette ouverture détermine également la quantité de lumière reçue par le système. Pour le microscope on préfère utiliser l'*ouverture numérique* N définie par le produit de l'indice de réfraction du milieu d'entrée n par le sinus du demi-angle α sous lequel le système est vu depuis le foyer focal objet :

$$N = n \sin \alpha \tag{3.1}$$

En pratique, l'ouverture est proportionnelle à l'ouverture du diaphragme situé dans le plan focal arrière, cette dernière étant généralement ajustable. Plus l'ouverture numérique est grande, meilleure est l'optique en terme de résolution et de contraste, et plus le grandissement peut être important. Cette augmentation est obtenue en accroissant l'indice de réfraction par immersion des lentilles, par exemple, dans un liquide, et/ou en accroissant le demi-angle, en réduisant la distance focale (celle-ci est de quelques millimètres). La valeur limite du demi-angle est de $\frac{\pi}{2}$. Le dernier choix éloigne de la condition de Gauss ! Il en ressort que pour un objectif fonctionnant dans l'air, l'ouverture numérique est au plus de 0.7.

La seconde condition de Gauss exige que les rayons utiles, c'est-à-dire ceux qui traversent le système, soient paraxiaux (peu inclinés par rapport à l'axe optique). Cela veut dire que les objets à imager doivent être placés au voisinage de l'axe optique et être de petites dimensions transverses. Ainsi, l'angle sous lequel ils sont vus depuis le système ou diamètre angulaire est faible.

3.4.1 Distance de travail faible

C'est la conséquence directe des conditions de Gauss énoncés ci-haut. Par exemple, on trouve les chiffres suivants pour les meilleures optiques du commerce : 34 mm pour 2×, 6 mm pour 100×. La distance de travail doit être suffisante pour que les outils puissent accéder aux composants et les manipuler. Cela constitue une limitation avec laquelle il faut composer.

3.4.2 Profondeur de champ faible

La *profondeur de champ*[3] traduit la marge de liberté dans la formation des images, il s'agit de la distance sur laquelle on peut déplacer un objet en gardant une image nette sur le capteur. Cette distance, D_{of} dépend de l'ouverture du faisceau entrant ([150]) :

$$D_{of} = n\frac{\lambda}{N^2} \tag{3.2}$$

où λ est la longueur d'onde du rayonnement.

En se plaçant dans les conditions normales d'utilisation du vidéo microscope (air, lumière visible, grande ouverture numérique, grandissement important), la profondeur apparaît faible voire très faible. Une caméra 1/2" de 1024 × 768 pixels, associée à un objectif 10× dans l'air et en considérant la plus petite longueur d'onde du visible (rayonnement violet de longueur d'onde égale à 400 μm) conduit à une profondeur d'environ 2.5 μm . On se retrouve face à un dilemme résolution-profondeur de champ : les deux grandeurs évoluent de manières opposées. Ainsi, il peut ne pas être possible d'avoir dans la même image la pince et le composant apparaissant nettement (figure 3.4).

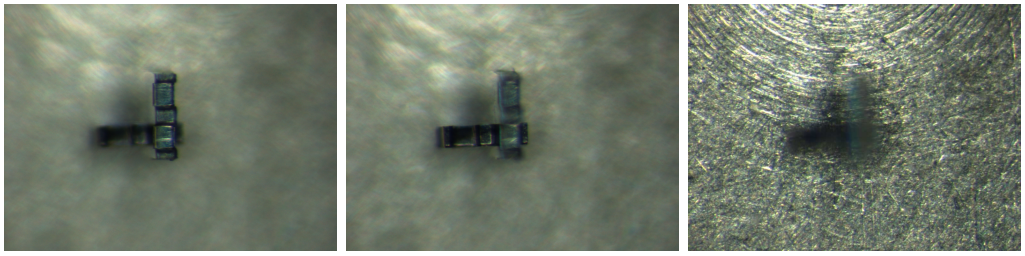


FIGURE 3.4 – Effet de la faiblesse de la profondeur de champ : l'assemblage 3D n'est jamais net complètement.

On définit, de même, une *profondeur de mise au point*[4] par la distance sur laquelle on peut déplacer le plan image en gardant une image nette. Il est utile de ne pas confondre celle-ci avec la profondeur de champ. Ces grandeurs caractérisent la résolution longitudinale de l'imageur.

3.4.3 Grandissement faible

Le *grandissement transversal* Γ est le rapport entre la dimension transversale de l'image d'un objet L' et la dimension transversale de cet objet L :

3. depth of field en anglais
4. depth of focus en anglais

$$\Gamma = \frac{L'}{L} \tag{3.3}$$

La transversalité se définit par rapport à l'axe optique, le système étant par ailleurs supposé centré [5]. Cette grandeur dépend naturellement de l'optique mais également de la *distance de travail*. Le grandissement maximal est obtenu pour la distance minimale de travail, inversement le grandissement minimal est obtenu pour la distance maximale de travail.

En imagerie numérique qui est le domaine que nous traitons exclusivement, l'image est formée sur le capteur et est observée sur un écran. L'objet est ainsi agrandi deux fois : un grandissement primaire Γ_p dû à l'objectif et un grandissement secondaire Γ_s dû au processus de visualisation. Le grandissement Γ du système est alors le produit de ces deux grandissements :

$$\Gamma = \Gamma_p \Gamma_s \tag{3.4}$$

Le processus électronique de visualisation remplace, de fait, celui par l'oculaire.

En considérant la lentille mince convergente comme modèle du microscope, la relation de conjugaison (formule de Descartes) lie la distance focale f, la distance de travail d (distance objet-lentille frontale) et le tirage t (distance lentille arrière - plan image) :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{t} + \frac{1}{d} \tag{3.5}$$

Cela permet par le jeu des relations géométriques de reformuler le grandissement :

$$\Gamma = \frac{t}{d} = \frac{f}{d - f} \tag{3.6}$$

Sachant que le tirage minimal correspond à la distance focale (formation de l'image d'un objet à l'infini), le grandissement minimal est obtenu pour cette configuration. On notera que la valeur de la distance focale est d'à peine quelques millimètres.

5. On définit de même un grandissement longitudinal ou axial par le rapport des dimensions longitudinales de l'image et de l'objet

3.4.4 Pouvoir de résolution et résolution sub-micrométriques

La *résolution* intrinsèque R est le niveau de détail limite que peut révéler les images fournies par le système optique. Elle s'explique essentiellement par la diffraction du rayonnement. En effet, en réduisant la taille d'une source lumineuse, il arrive un moment où l'image obtenue (dans le plan transverse à l'axe optique) n'est plus une tache unique mais une tache centrale entourée de trois anneaux que l'on appelle tache d'Airy dont la taille est plus grande que celle de la source et indépendante de celle-ci :

$$S_{Airy} = \frac{\lambda}{N^2} \tag{3.7}$$

Il est quasiment impossible d'estimer la résolution, aussi préfère t'on utiliser *le pouvoir de résolution* ou *de séparation* R_{pwr} qui spécifie la capacité du système à former deux images séparées de deux sources ponctuelles séparées dans l'espace. Plus précisément, il s'agit de la distance minimale entre les deux sources ponctuelles pour laquelle on peut distinguer les deux taches d'Airy correspondantes. Pour des raisons de commodité on utilise pour ce faire le critère empirique de Rayleigh qui dit que les deux taches sont résolues si le maximum principal d'éclairement d'une tache se trouve sur le premier minimum de l'autre. Dans ces conditions, la distance entre les deux sources vaut ([150]) :

$$R_{pwr} = 0.47\frac{\lambda}{N} \tag{3.8}$$

La plus petite longueur d'onde dans le visible étant d'environ 400 nm (violet) et l'ouverture numérique maximale de 1 dans l'air, le pouvoir de résolution du microscope est d'environ : 0.2 μm.

La résolution R et le pouvoir de résolution R_{pwr} sont différents. Par exemple, on sait imager des billes de Polystyrène de 0.13 μm de diamètre, mais on ne sait pas les résoudre (séparer) puisqu'on ne sait pas distinguer une paire d'une unité [203]. La résolution intrinsèque du microscope est suffisamment élevée pour permettre l'observation d'un grand nombre de pièces et justifie son utilisation massive. Elle est forcément liée à celle de la caméra.

La résolution r de la caméra correspond à celle du capteur qui en est l'élément central. Ce capteur comprend un nombre plus ou moins important de cellules photosensibles appelées photosites qui sont échantillonnées en pixels image. La lumière collectée par chaque photosite est convertie en signal électrique. Aujourd'hui la maîtrise des processus de fabrication des capteurs a conduit à des pixels quasi carrés dont le coté peut être inférieur à 5 μm. Les pixels sont généralement de dimensions supérieures aux photosites.

On définit la résolution r par le double de la taille d'un pixel S_{pixel} :

$$r = 2S_{pixel} \tag{3.9}$$

Le grandissement Γ établit le lien entre la résolution concrète du microscope R et celle de la caméra r :

$$R = \frac{r}{\Gamma} \tag{3.10}$$

La caméra délivre une image en deux dimensions, donc de laquelle il n'est possible d'obtenir que des informations de dimension deux. Pour accéder aux informations de troisième dimension, la profondeur ou le relief, il est indispensable de mettre en œuvre une stratégie adaptée, notamment la stéréovision à une ou plusieurs sources d'images.

3.4.5 Contraste faible et instable

Le *contraste* indique la qualité de l'image obtenue, il est directement lié à l'interaction du rayonnement photonique avec les matériaux de la scène. L'image obtenue sera complètement différente selon que le matériau est absorbant, réfléchissant, phosphorescent ou fluorescent, et nécessitera la mise en œuvre d'un éclairage adéquat. Une image sur-exposée ou sous-exposée est faiblement contrastée et on ne "voit" pas les détails alors que ceux-ci existent bel et bien. Il est possible de séparer le contraste en contraste d'amplitude relatif à la variation d'amplitude donc de l'intensité du rayonnement, et en contraste de phase relatif à la variation de phase du rayonnement et à l'apparition d'interférence. Il existe ainsi toute une panoplie de techniques ou de microscopies traitant de l'un ou l'autre de ces aspects : microscopie à contraste de phase, microscopie à contraste interférentiel, ... Dans un sens qualitatif, le contraste traduit la variation de l'intensité lumineuse dans l'image, entre les objets et le fond. On le quantifie en considérant la variation relative d'intensité lumineuse :

$$C_{tr} = \frac{\Delta I}{I} = \frac{I_B - I_S}{I_B} \tag{3.11}$$

avec I_B l'intensité du fond ou du faisceau incident et I_S l'intensité d'un point de l'échantillon.

Le contraste est proportionnel à l'ouverture numérique et inversement proportionnel au grandissement :

$$C_{tr} \prec \frac{N}{\Gamma} \tag{3.12}$$

Plus le grandissement est élevé, plus faible est alors le contraste des images obtenues ; leur interprétation devient de ce fait difficile (figure 3.5).

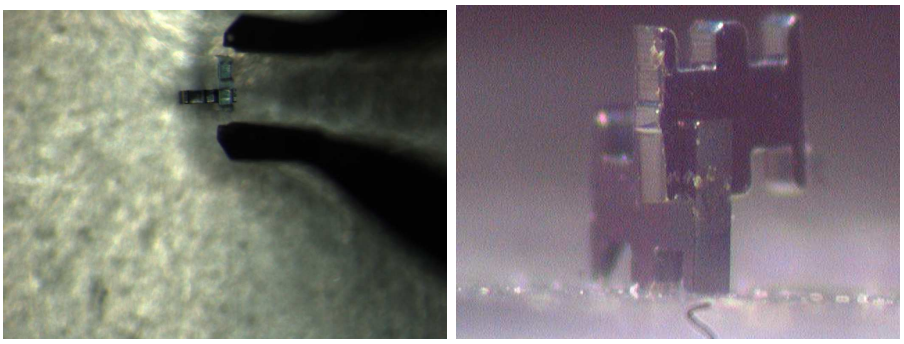


FIGURE 3.5 – Images d'un assemblage par un vidéo microscope, les pièces mesurent 400 μm x 400 μm pour une épaisseur de 100 μm : grandissement 3× (gauche), grandissement 7× (droite).

On note également une très grande sensibilité du contraste à la position de la cible : figures 3.6 et 3.7.

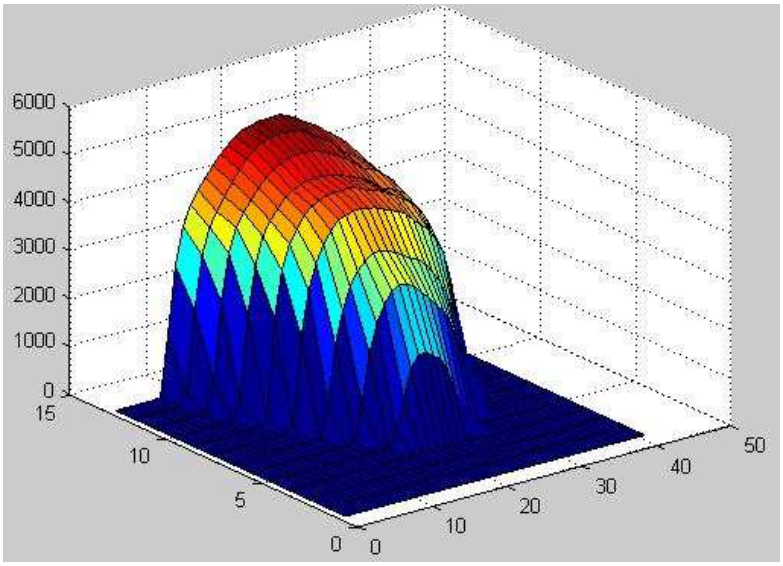


FIGURE 3.6 – Evolution du contraste en fonction de la position spatiale de la cible : pièce en silicium et éclairage épiscopique axial.

Habituellement en microscopie, on cherche à imager un échantillon unique et pour ce faire il est possible de concevoir l'éclairage correspondant donnant la meilleure image possible. Dans le cadre de la micromanipulation, la scène comprend un nombre important d'objets de différentes natures et de différentes pro-

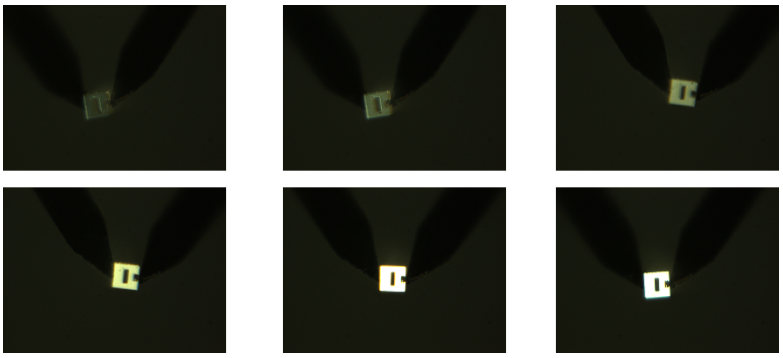


FIGURE 3.7 – Séquence d'images illustrant l'instabilité du contraste en fonction de la position spatiale de la cible : pièce en silicium et éclairage épiscopique axial.

priétés, il n'est alors pas possible de concevoir un éclairage satisfaisant à toutes ces contraintes. Il en résulte que l'image de la scène se retrouve perturbée par les éclairages parasites provenant des divers objets de la scène. Il est donc indispensable d'avoir une réflexion approfondie sur l'éclairage quand on conçoit le système de manipulation.

3.4.6 Distorsion et dérive faibles

Le non respect des conditions de Gauss énoncées plus haut, et les aberrations des lentilles introduisent des imperfections dans la formation des images. Les autres sources d'imperfection sont l'instabilité du rayonnement d'illumination, la dispersion et diffusion du rayonnement au niveau des objets et les bruits inhérents à la chaîne électronique. Il en résulte un décalage de certains points images par rapport à leur position normale. La composante statique (indépendante du temps) de ce décalage constitue la *distorsion* tandis que la composante dynamique constitue la *dérive*.
La distorsion est telle que, les pixels proches de l'axe optique sont peu déviés, par contre, plus on s'éloigne de l'axe optique et plus la déviation est importante. Le phénomène est généralement négligeable pour les optiques de bonne qualité. En fonctionnement normal, le microscope optique ne présente pas de dérive.

3.4.7 Illustration

Le tableau 3.1 présente les valeurs des principales caractéristiques pour les objectifs Mitutoyo qui font partie des meilleurs du marché.

Grandissement, Γ	2×	5×	10×	20×	50×	100×
Ouverture numérique, N	0.055	0.14	0.28	0.42	0.55	0.70
Distance de travail, d [mm]	34	34	33.5	20	13	6
Distance focale,f [mm]	100	40	20	10	4	2
Pouvoir de résolution, r [μm]	5	2	1	0.7	0.5	0.4
Profondeur de champ, D_{of} [μm]	91	14	3.5	1.6	0.9	0.6
Champ de vision (capteur 1/2“), F_{ov} [mm×mm]	3.2×2.4	1.28×0.96	0.64×0.48	0.32×0.24	0.13×0.1	0.06×0.05

TABLE 3.1 – Paramètres de microscopes de la marque Mitutoyo.

3.5 Propriétés du microscope électronique à balayage

Le bombardement d'un échantillon par un faisceau d'électrons de grande énergie (que l'on qualifie de primaires), sous vide secondaire, provoque (figure 3.8) :
- des modifications de l'échantillon (agitation thermique, absorption d'électrons, création de paires électron-trou, ...),
- des émissions d'électrons (secondaires SE, rétrodiffusés BSE, transmis et Auger),
- des émissions de photons (rayons X, UV, visible, IR, ...).

Naturellement les caractéristiques de la région d'interaction dépendent de l'énergie des électrons primaires et du nombre atomique Z du matériau.

Le balayage de l'échantillon par la sonde, la détection de l'émission et son amplification conduit à une imagerie particulière avec ses avantages et ses inconvénients (figure 3.9). Dans ce mémoire nous nous limitons à l'imagerie de contraste topographique due aux électrons secondaires.

Les propriétés du microscope électronique à balayage sont :
- un grandissement (jusqu'à $10^6\times$),
- un pouvoir de résolution extrême : en dessous de 1 nm (il est déterminé par la relation 3.8),
- une profondeur de champ élevée,
- une distance de travail relativement importante,
- un contraste et un rapport signal sur bruit très variable, en fonction notamment de la vitesse de balayage,

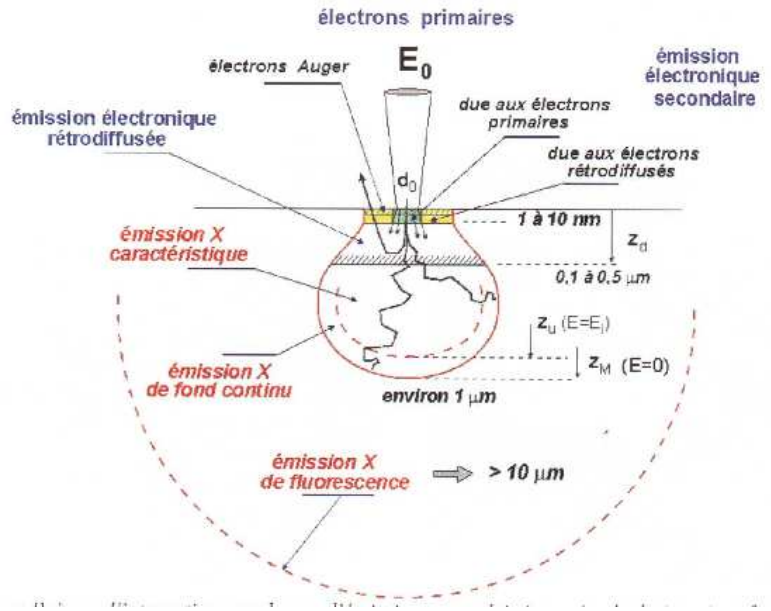


FIGURE 3.8 – Interaction rayonnement - matière [d'après [188]].

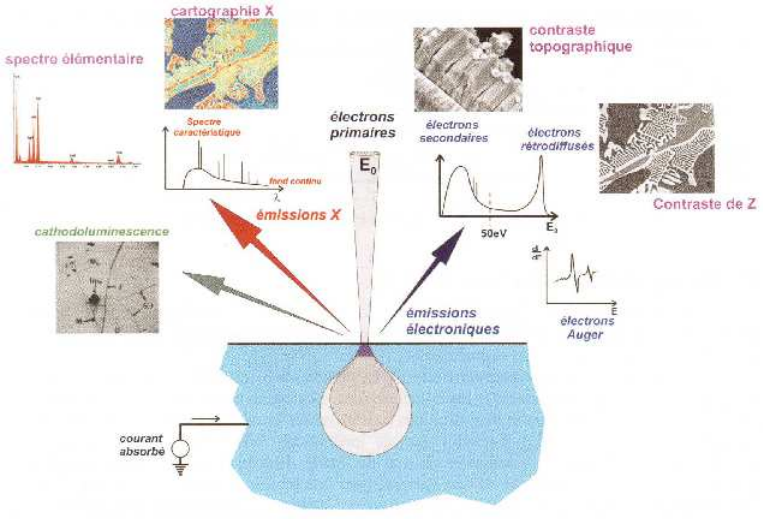


FIGURE 3.9 – Les possibilités d'imagerie du microscope électronique à balayage [d'après [188]].

– une distorsion non négligeable,
– une dérive importante.

Considérons le modèle JSM 820 (marque Jeol) du département. Sa source d'électrons (canon) est à base de filament de tungstène. Ses spécifications, pour une tension d'accélération de 30 kV, sont :
– un grandissement variant de 10× à 300000×,
– un pouvoir de résolution de 5 nm,
– une profondeur de champ pouvant atteindre 900 nm,
– une distance de travail variant de 5 mm à 50 mm,
– un rapport signal sur bruit variant de à 16 dB à 21 dB (figure 3.10),
– une dérive atteignant 200 pixels au bout de 30 mn.

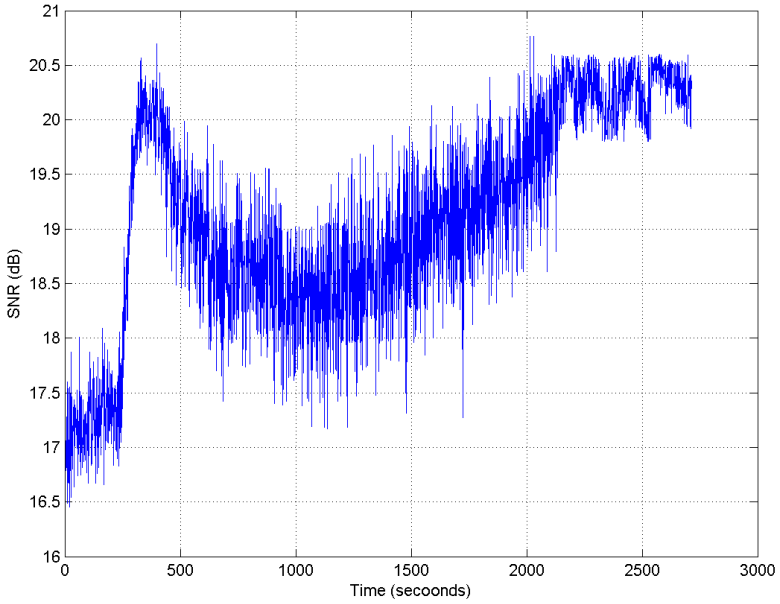


FIGURE 3.10 – Evolution du rapport signal sur bruit en fonction du temps à 5000× pour le modèle JSM 820.

3.6 Étalonnage de la dérive

Des travaux existent sur l'étalonnage de la dérive du microscope électronique, notamment chez X. Li en Caroline du sud et J. J Orteu en France. A la différence de ceux-ci, nous nous focalisons sur l'aspect temps réel et avons déjà développé trois méthodes de compensation de la composante globale de la dérive.
La dérive correspond au décalage dans le temps de la position des pixels. Soient

$I(x, y)$ et $I'(x, y)$ deux fenêtres appartenant à deux images décalées l'une par à l'autre de $\delta = (\delta_x, \delta_y)^\top$:

$$I'(x, y) = I(x - \delta_x, y - \delta_y) \tag{3.13}$$

Soient $F(u, v)$ et $F'(u, v)$ les transformées de Fourier de $I(x, y)$ et $I'(x, y)$. Il vient :

$$F'(u, v) = F(u, v) \exp[-j2\pi(\frac{u}{M}\delta_x + \frac{v}{N}\delta_y)] \tag{3.14}$$

avec $M \times N$ la taille de la fenêtre.

La corrélation de phase entre $F(u, v)$ et $F'(u, v)$ s'écrit :

$$R(u, v) = \frac{F(u, v)\overline{F'(u, v)}}{|F(u, v)\overline{F'(u, v)}|} = \exp[-j2\pi(\frac{u}{M}\delta_x + \frac{v}{N}\delta_y)] \tag{3.15}$$

La transformation de Fourier inverse de $R(u, v)$ correspond à une impulsion de Dirac décalée de $\delta = (\delta_x, \delta_y)^\top$.
La répétition de ce calcul sur l'ensemble des fenêtres de chaque image conduit à un histogramme H de deux variables δ_x et δ_y (figure 3.11). La position du maximum de cet histogramme défini la dérive globle entre les deux images de départ (elle correspond au mouvement dominant de l'image courante par rapport à l'image de référence) :
$\Delta = (\Delta_x, \Delta_y)^\top$.

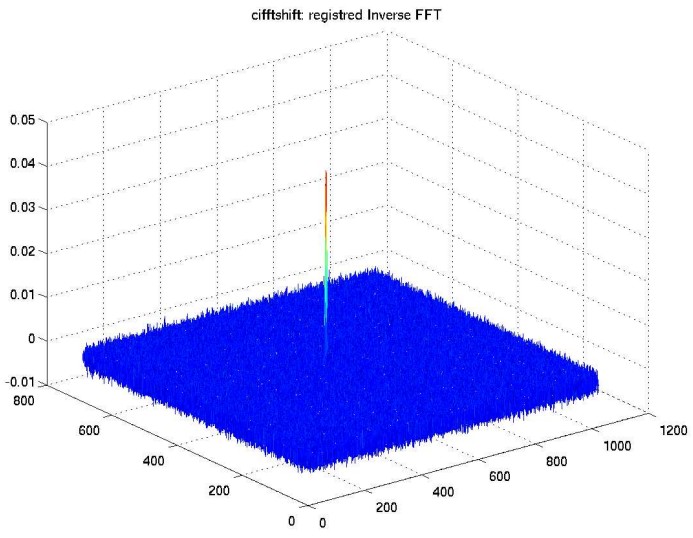


FIGURE 3.11 – Transformation de Fourier inverse de la corrélation de phase entre deux images : les coordonnées du pic définissent la dérive globale selon les axes X et Y.

L'application de cette méthode aux images du microscope JSM 820 a permis de quantifier l'évolution de la dérive globale de ce microscope en fonction du temps et du grandissement (figure 3.12).
La compensation de la dérive revient à réaliser une opération de recalage. Soient I et I' l'image de référence et l'image courante, respectivement. La valeur de la dérive permet de calculer une matrice d'homographie H réduite à une translation, puis on multiplie I' par H^{-1} pour compenser la dérive dans I'.
La première méthode de compensation de la dérive consiste à estimer la dérive globale entre l'image courante et l'image de référence, puis à l'enlever dans l'image courante : la méthode est lente mais robuste. Dans le second cas, un modèle d'état du comportement de la dérive est établi, puis un filtre de Kalman est utilisé pour corriger la valeur de la dérive mesurée, et enfin la valeur obtenue est enlevée de l'image : la méthode est rapide mais peu robuste puisque le modèle doit être redéfini pour chaque expérience du fait de la liaison très forte entre le matériau imagé et la qualité de l'image. Dans le troisième cas, un modèle polynomial en fonction du temps est établi, qui est ensuite utilisé en temps réel pour estimer la valeur de la dérive et la compenser : la méthode est plus robuste que la première méthode mais moins robuste que la séconde, elle est par contre plus rapide que les deux autres.

3.7 Étalonnage monofocal multi-échelle

3.7.1 Modélisation géométrique

Soit P un point de l'espace et p son image. A partir de ce qui est dit plus haut, on peut écrire :

$$p = Projection(P) + Distorsion(P) \tag{3.16}$$

où $Projection$ et $Distorsion$ sont respectivement des applications linéaire et non linéaire de P.

Modélisation de la projection

Le vidéo-microscope étant une source d'images optique de grandissement faible comparé au microscope électronique (inférieur à 1000×), la projection est descriptible par le modèle central (ou perspective) ([80], [95], [197]) avec :
- le centre de projection correspondant au centre optique, C,
- le point principal correspondant au foyer focal objet, F,
- la distance focale, f,

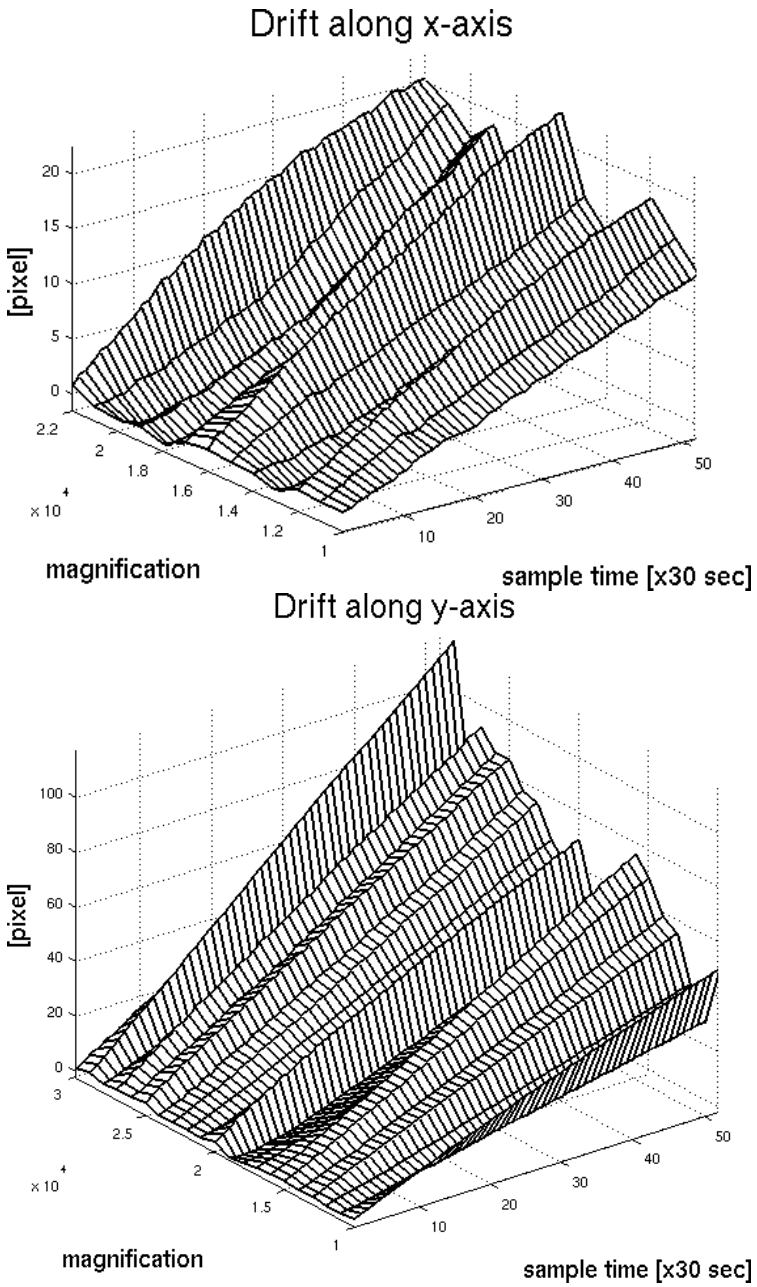


FIGURE 3.12 – Evolution de la dérive en fonction du temps et l'agrandisssement pour le microscope à filament de tungstène (Jeol JSM 820).

– l'hypothèse d'un capteur isotrope et parfaitement orthonormé, ce qui conduit à un nombre de pixels par unité spatiale constant, m [pixel/μm] (figure 3.13).

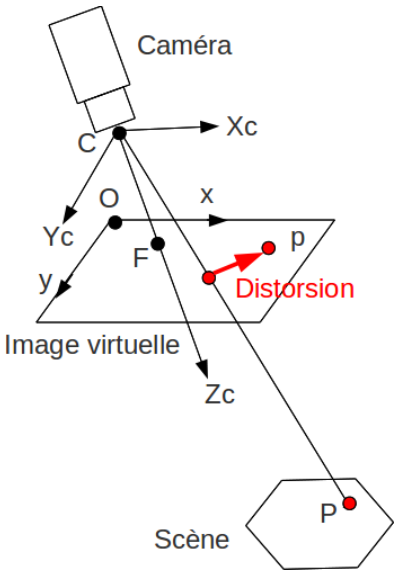


FIGURE 3.13 – Modélisation géométrique du vidéo-microscope : (C, X_c, Y_c, Z_c) est le repère associé à la caméra ; (O, x, y) est le repère associé à l'image.

Il est fréquent qu'un tube allonge, de longueur f_{tb}, soit intercalé entre l'objectif et le plan image. Le tirage est alors augmenté d'autant. Mais comme la distance de travail est généralement nettement plus élevée que le tirage, il est possible d'approximer la distance focale du système par la valeur suivante :

$$f = f_{ob} + f_{tb} \tag{3.17}$$

où f_{ob} est la distance focale de l'objectif seul.

En considérant les coordonnées homogènes de P dans le repère de la caméra et celles de p dans le repère de l'image, respectivement $\hat{P} = (X, Y, Z, 1)^\top$ et $\hat{p} = (x, y, 1)^\top$, il vient :

$$Z\hat{p} = \mathbf{K}[\mathbf{I}|\mathbf{0_{3\times 1}}]\hat{P} \tag{3.18}$$

où $\mathbf{K}$ est la matrice des paramètres intrinsèques :

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} mf & 0 & x_0 \\ 0 & mf & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.19}$$

et $(x_0, y_0)^\top$ les coordonnées du point principal F dans le repère image.

Le terme mf peut s'interpréter comme le facteur d'échelle permettant de réaliser la conversion pixel $\leftrightarrows$ μm.

Le microscope optique à zoom variable est un appareil où la distance focale varie par un déplacement relatif des lentilles constituant l'objectif. Comme la distance focale f détermine le grandissement Γ par l'intermédiaire de la relation de conjugaison (formule de Descartes), il est alors nécessaire d'introduire ce grandissement dans le modèle 3.19 précédent (**modèle multi-échelle**) :

$$\mathbf{K}(\Gamma) = \begin{pmatrix} mf(\Gamma) & 0 & x_0 \\ 0 & mf(\Gamma) & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.20}$$

Modélisation de la distorsion

A l'image de la projection, il est également possible de considérer l'habituel modèle paramétrique pour la distorsion [80], [95], [197]. On suppose que le point p dans le repère caméra (projection centrale de P) subit un décalage $(\Delta_x, \Delta_y)^\top$ avec :

$$\begin{pmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (k_1 r^2 + k_2 r^4 + ...)X + 2k_3 XY + k_4(r^2 + 2X^2) \\ (k_1 r^2 + k_2 r^4 + ...)Y + k_3(r^2 + 2Y^2) + 2k_4 XY \end{pmatrix} \tag{3.21}$$

avec $r = \sqrt{(f\frac{X}{Z})^2 + (f\frac{Y}{Z})^2}$.

La première partie de $(\Delta_x, \Delta_y)^\top$ est proportionnelle à la coordonnée X de p et représente la distorsion radiale : k_1, k_2, ... sont les coefficients de distorsion radiale. On considère que le point principal F est le centre de la distorsion. Des études plus récentes montrent que cela n'est pas forcément le cas [197].

La seconde partie de $(\Delta_x, \Delta_y)^\top$ est une relation non linéaire par rapport aux coordonnées x et y, elle représente la distorsion tangentielle : k_3, k_4 sont les coefficients de distorsion tangentielle.

L'injection de la relation 3.21 dans l'équation 3.18 donne alors :

$$Z\hat{p} = \mathbf{K}[\mathbf{I}|\mathbf{0_{3\times 1}}](\hat{P} + \Delta) \tag{3.22}$$

avec : $\Delta = (\Delta_x, \Delta_y, 0, 0)^\top$.

3.7.2 Estimation des paramètres

Le repère caméra n'étant pas déterminé, le calcul des paramètres nécessite de se référer au repère scène dans lequel les coordonnées de P sont connues avec

précision. Soient $(X_w, Y_w, Z_w, 1)^\top$ ces coordonnées dans leur version homogène (vecteur $\hat{P_w}$) et soit $(\mathbf{R}|\mathbf{t})$ la matrice de passage du repère scène au repère caméra.

La relation 3.22 devient :

$$Z\hat{p} = \mathbf{K}[\mathbf{R}|\mathbf{t}](\hat{P_w} + \hat{\Delta_w}) \tag{3.23}$$

avec $\hat{\Delta_w} = [\mathbf{R}|\mathbf{t}]^+\Delta$ où $[\mathbf{R}|\mathbf{t}]^+$ est la pseudo inverse de $[\mathbf{R}|\mathbf{t}]$

L'estimation des modèles (projection et distorsion) se fait en minimisant par un algorithme de type Levenberg-Marquardt l'erreur E entre les points mesurés p_i^m et leurs estimations p_i^e par l'équation 3.23 ([80], [95], [197]) sous les conditions d'orthogonalité de la matrice de rotation :

$$E = \sum_{i=1}^{N}(p_i^m - p_i^e)^2 = \sum_{i=1}^{N}(x_i^m - x_i^e)^2 + (y_i^m - y_i^e)^2 \tag{3.24}$$

$$r_{11}^2 + r_{21}^2 + r_{31}^2 = 1 \tag{3.25}$$
$$r_{12}^2 + r_{22}^2 + r_{32}^2 = 1 \tag{3.26}$$
$$r_{13}^2 + r_{23}^2 + r_{33}^2 = 1 \tag{3.27}$$
$$r_{11}r_{12} + r_{21}r_{22} + r_{31}r_{32} = 0 \tag{3.28}$$

La valeur initiale de la matrice $\mathbf{M} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]$ est obtenue par la méthode DLT (Direct Linear Transform). Elle consiste à négliger la distorsion dans l'équation 3.23 où on remplace Z par un réel quelconque λ :

$$\lambda\hat{p} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]\hat{P_w} = \mathbf{M}\hat{P_w} \tag{3.29}$$

soit :

$$\lambda \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3.30}$$

On déduit de cette dernière relation deux équations :

$$m_{11}X_w + m_{12}Y_w + m_{13}Z_w + m_{14} - m_{31}X_w x - m_{32}Y_w x - m_{33}Z_w x - m_{34}x = 0 \tag{3.31}$$
$$m_{21}X_w + m_{22}Y_w + m_{23}Z_w + m_{24} - m_{31}X_w y - m_{32}Y_w y - m_{33}Z_w y - m_{34}y = 0 \tag{3.32}$$

L'application de ces relations à N couples de points (P_w, p) conduit à $2N$ équations :

$$\mathbf{Am} = 0 \tag{3.33}$$

avec :

$$\mathbf{A} = \begin{Bmatrix} X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_{w1}x_1 & -Y_{w1}x_1 & -Z_{w1}x_1 & -x_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & -X_{w1}y_1 & -Y_{w1}y_1 & -Z_{w1}y_1 & -y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{wi} & Y_{wi} & Z_{wi} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_{wi}x_i & -Y_{wi}x_i & -Z_{wi}x_i & -x_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{wi} & Y_{wi} & Z_{wi} & 1 & -X_{wi}y_i & -Y_{wi}y_i & -Z_{wi}y_i & -y_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{wN} & Y_{wN} & Z_{wN} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_{wN}x_N & -Y_{wN}x_N & -Z_{wN}x_N & -x_N \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{wN} & Y_{wN} & Z_{wN} & 1 & -X_{wN}y_N & -Y_{wN}y_N & -Z_{wN}y_N & -y_N \end{Bmatrix} \tag{3.34}$$

$$\mathbf{m} = (m_{11}, m_{12}, m_{13}, m_{14}, m_{21}, m_{22}, m_{23}, m_{24}, m_{31}, m_{32}, m_{33}, m_{34})^\top \tag{3.35}$$

Dans le cadre de l'étalonnage multi-échelle, on calcule la distance focale f pour plusieurs valeurs de Γ et on estime expérimentalement la fonction $f(\Gamma)$. Hormis la distance focale, les autres paramètres sont sensés être constants.

3.7.3 La mire

Le microscope est caractérisé par une profondeur de champ faible : inférieure à une centaine de micromètres. Il en résulte une difficulté à prendre en compte l'information de profondeur de la scène : on ne peut prendre que des mires planes (2D) sans avoir la possibilité de leur faire subir des rotations hors plan. Cela conduit à une instabilité dans la résolution des équations et donc à des paramètres avec une faible précision. On distingue deux types de mires à utiliser selon les conditions expérimentales.

La première mire est obtenue par les procédés de micro fabrication : des carrés sont gravés sur un support en silicium.

La seconde mire est virtuelle et obtenue en suivant le mouvement calibré d'une cible dans la scène : à l'aide d'un robot on réalise des déplacements réguliers d'une cible dont on calcule les positions correspondantes dans les images.

3.7.4 Application

Considérons le microscope Leica MZ16A munie d'une caméra IC 3D, d'une de nos stations expérimentales qui comprend également un un microscope Navitar

1-60113, un positionneur à trois degrés de liberté $xy\alpha$, un manipulateur à deux degrés de liberté $z\varphi$, une pince à quatre degrés de liberté (figure 3.14).

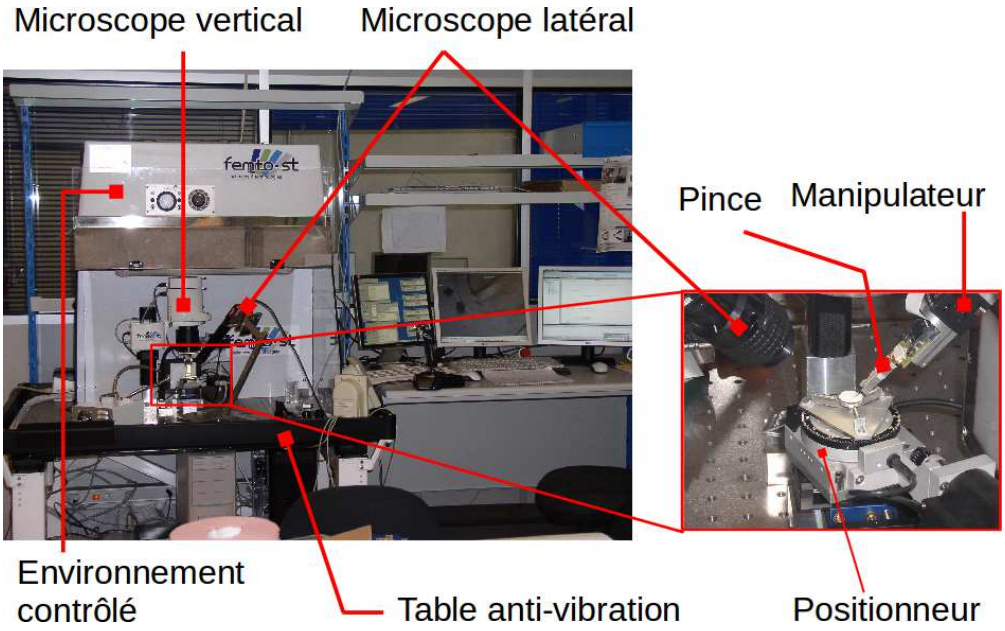


FIGURE 3.14 – La plateforme expérimentale du projet SAMMI comprenant un microscope positionné verticalement (Leica), un microscope positionné latéralement (Navitar), un positionneur, un manipulateur et une pince.

Les spécifications du microscope sont :
- zoom motorisé : 0.65× - 9× ;
- définition des images : 2088 × 1550 pixels ;
- format du capteur : 7.2 mm × 5.35 mm ;
- taille du pixel : 3.45 μm × 3.45 μm ;
- fréquence d'acquisition : 10 Hz ;
- niveau de quantification : 12 bits.

Les spécifications du microscope sont :
- zoom motorisé : 0.65× - 7× ;
- définition des images : 640 × 480 pixels ;
- format du capteur : 6.4 mm × 4.8 mm ;
- taille du pixel : 10 μm × 10 μm ;
- fréquence d'acquisition : 25 Hz ;
- niveau de quantification : 12 bits.

Les spécifications des platines en translation sont :
- résolution : 0.007 μm ;

– incrément : 0.05 μm.

Les spécifications des platines en rotation sont :
– résolution : 26 μrad ;
– incrément : 26 μrad.

Les spécifications des pinces sont :
– course verticale des doigts : 200 μm ;
– course horizontale des doigts : 26 μrad.

Une mire réelle a été réalisée : des carrés de 100 μm de coté et 10 μm de profondeur et espacés de 100 mum ont été gravés sur un support en silicium (figure 3.15).

La configuration matérielle permet donc la mise en œuvre des principes exposés plus haut, notamment l'étalonnage utilisant une mire virtuelle. Un objet de 400 μm $\times$ 400 μm $\times$ 100 μm a été déplacé par pas de 200 μm selon les axes X et Y. La position du centroïde a été déterminée dans les images, ce qui a permis de réaliser la mire virtuelle de la figure 3.15.

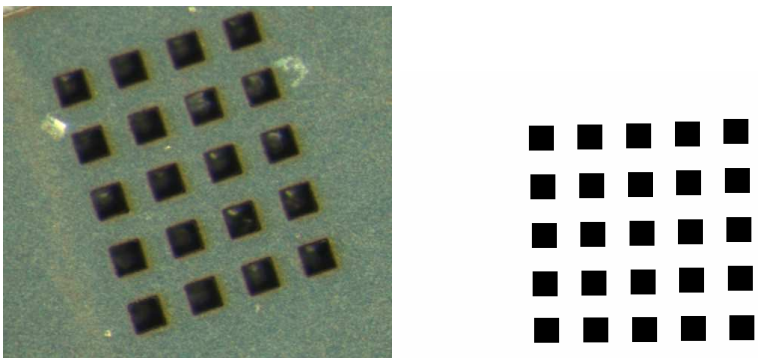


FIGURE 3.15 – Mires avec des motifs de 100 μm $\times$ 100 μm : mire réelle (gauche), mire virtuelle (droite).

La mire virtuelle a donné les meilleurs résultats : une erreur de projection moyenne de 1.5 pixel contre 3.2 pixels pour la mire réelle.

Pour un grandissement de 4$\times$ la matrice K est :

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} 3146 & 0 & 473 \\ 0 & 3146 & 337 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.36}$$

Selon les données de la caméra m vaut 290 pixels/mm, il en résulte que la distance focale vaut 11 mm.

Les coefficients de distorsion sont de l'ordre de 10^{-7}. On en déduit que l'optique du microscope est de bonne qualité. Ce résultat a déjà été montré par les publications [95] et [175].

La figure 3.16 représente le résultat de l'étalonnage multi-échelle : $1\times \preceq \Gamma \preceq 9\times$.

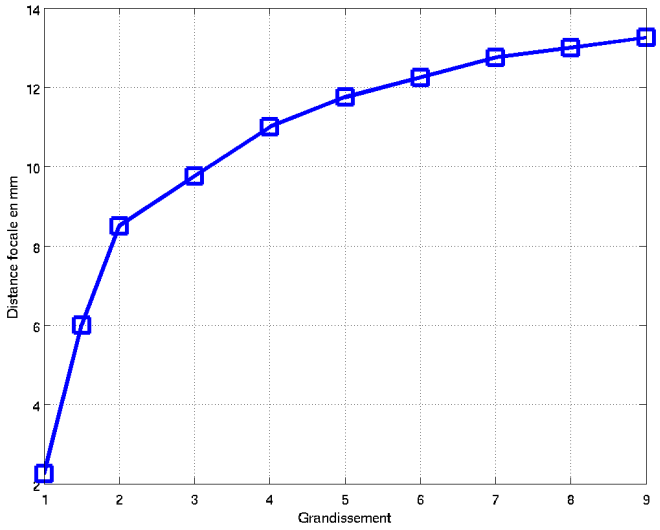


FIGURE 3.16 – Étalonnage multi-échelle du microscope Leica MZ16A.

3.8 Étalonnage multifocal

3.8.1 Géométrie épipolaire

Cette partie est inspirée de [197].

La géométrie épipolaire (ou bifocale) est la géométrie entre deux vues. Elle est indépendante de la structure de la scène ; elle dépend uniquement des paramètres internes des caméras et de leurs positions spatiales relatives. La matrice fondamentale $\mathbf{F}$, une matrice 3×3 de rang 2, encapsule cette géométrie intrinsèque.

Soient deux caméras de centres optiques C et C' observant une scène.

Soient ψ et ψ' les images obtenues par les deux caméras,respectivement.

La droite (CC') définit la ligne de base. Son intersection avec ψ et ψ' définit l'épipôle v de la première caméra et l'épipôle v' de la seconde caméra, respectivement.

Soit un point $P = (X, Y, Z, 1)^\top$ dans l'espace 3D appartenant au plan $\pi = (0, 0, 0, 0)^\top$ non coplanaire avec C et C'. Soit $p = (x, y, 1)^\top$ son image dans ψ et soit $p' = (x', y', 1)^\top$ son image dans ψ' (figure 3.17).

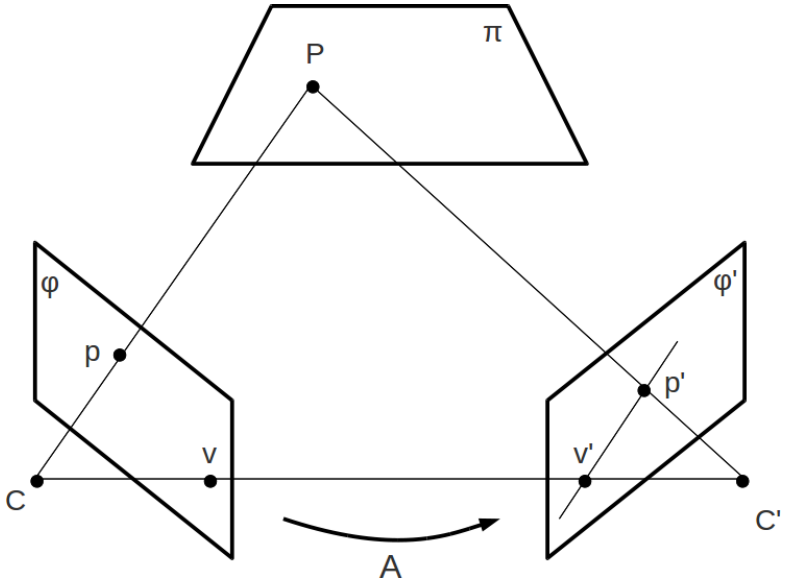


FIGURE 3.17 – Géométrie épipolaire : deux caméras observent le même point P ; p est l'image de P dans la caméra gauche et p' est l'image de de P dans la caméra droite ; $\mathbf{A}$ est l'homographie induite par le plan π entre les deux images.

La droite $l' = (v'p')$ constitue la droite épipolaire de p dans ψ' : c'est l'image de la droite (CP) dans ψ'. Son équation s'écrit :

$$l' = v' \times p' = [v']_\times p' \tag{3.37}$$

avec $\times$ le produit vectoriel et $[v']_\times$ la matrice anti-symmetrique correspondant à v' :

si $v' = \begin{pmatrix} v'^1 \\ v'^2 \\ v'^3 \end{pmatrix}$ alors $[v']_\times = \begin{pmatrix} 0 & -v'^3 & v'^2 \\ v'^3 & 0 & -v'^1 \\ -v'^2 & v'^1 & 0 \end{pmatrix}$.

La transformation $\mathbf{F}$ apparie tout point p de ψ à sa ligne épipolaire l' dans ψ' :

$$l' = \mathbf{F}p \tag{3.38}$$

Soit $\mathbf{A}$ l'homographie 2D induite par π appariant tout point p de ψ à tout point p' de ψ' :

$$p' = \mathbf{A}p \tag{3.39}$$

L'égalité dans l'équation 3.39 est vraie à un facteur λ près : géométriquement, elle signifie que les deux vecteurs projectifs p' et $\mathbf{A}p$ ont la même direction pour des

amplitudes différentes. La propriété correspondante est que leur produit vectoriel est nul c'est-à-dire :

$$p' \times \mathbf{A}p = [p']_\times \mathbf{A}p = \mathbf{0} \tag{3.40}$$

Le report de l'expression 3.39 p' dans l'équation 3.38 conduit à :

$$\mathbf{F} = [v']_\times \mathbf{A} \tag{3.41}$$

Par ailleurs p' appartient à la droite épipolaire l', donc :

$$p'^\top l' = 0 \tag{3.42}$$

Le report de l'équation 3.38 dans cette dernière équation conduit à :

$$p'^\top \mathbf{F}p = 0 \tag{3.43}$$

Cette équation est appelée la contrainte épipolaire : elle exprime le fait que les points p et p' sont les images du même point spatial P.

3.8.2 Géométrie trifocale

Cette partie est inspirée de [197].
La géométrie trifocale est la géométrie entre trois vues. Le tenseur trifocal $\mathcal{T}$, un tableau 3×3×3 , joue pour trois vues un rôle analogue à celui que joue la matrice fondamentale $\mathbf{F}$ pour deux vues. Il encapsule toutes les relations géométriques projectives entre les trois vues. Il est indépendant de la structure de la scène mais dépendant seulement des paramètres internes des caméras et de leurs positions spatiales relatives.

Supposons qu'une troisième caméra de centre C'' soit associée au stéréo-système de la figure 3.17, et soit ψ'' l'image correspondante. L'épipôle v'' dans ψ'' de la première caméra peut être définie comme précédemment tout comme la droite épipolaire l'' de p. Soit $p'' = (x'', y'', 1)^\top$ l'image de P dans ψ'' (figure 3.18).

Soit $\mathbf{B}$ l'homographie 2D induite par π appariant tout point p de ψ à tout point p'' de ψ'' :

$$p'' = \mathbf{B}p \tag{3.44}$$

Pour simplifier les équations, on suppose que la caméra gauche est en configuration canonique, c'est-à-dire située à l'infini. Il vient :

$$p = [\mathbf{I}|0]P \tag{3.45}$$
$$p' = [\mathbf{A}|v']P \tag{3.46}$$
$$p'' = [\mathbf{B}|v'']P \tag{3.47}$$

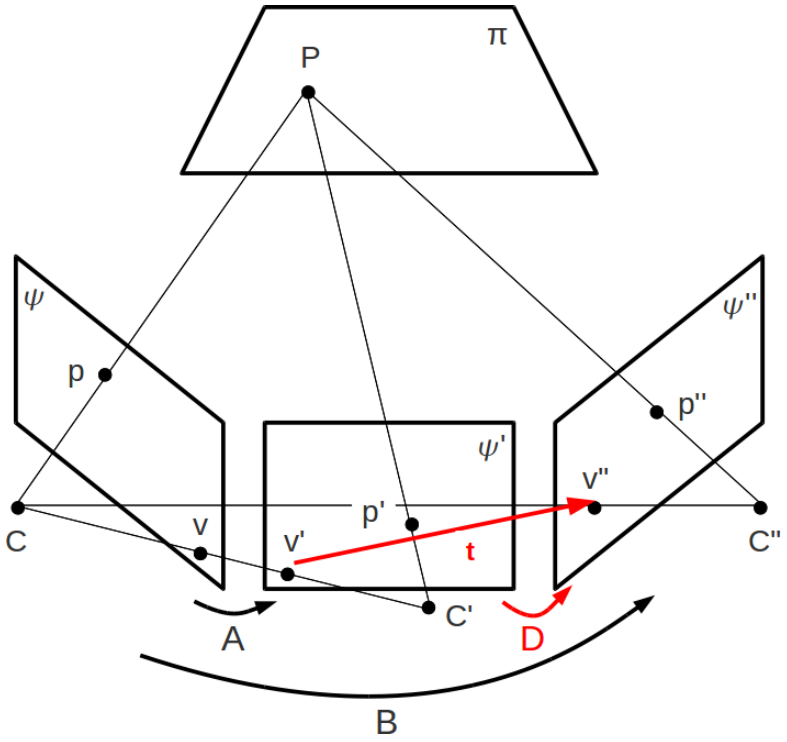


FIGURE 3.18 – Géométrie trifocale.

La combinaison des relations épipolaires entre les trois caméras conduit à la contrainte trifocale entre les points p, p' et p'' :

$$[p']_\times (\sum_{i=1}^{3} p^i \mathbf{T}_i)[p'']_\times = 0_{3\times 3} \tag{3.48}$$

avec :

$$\mathbf{T}_i = a_i v''^\top - v' b_i^\top \tag{3.49}$$

où a_i et b_i sont respectivement les i^{mes} colonnes des homographies $\mathbf{A}$ et $\mathbf{B}$.

L'ensemble des matrices 3×3 $\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \mathbf{T}_3$ représente le tenseur trifocal $\mathcal{T}$.

Les équations 3.48 et 3.49 sont en notation matricielle, cependant pour des raisons pratiques, la notation tensorielle (notation Einstein) est préférable. Elle est fondée sur les conventions suivantes :

- le ij^e élément de la matrice $\mathbf{M}$ est notée m^i_j, l'indice haut $i = 1, 2, 3$ étant l'indice des lignes ou *indice contravariant* et l'indice bas $j = 1, 2, 3$ étant l'indice des colonnes ou *indice covariant* ;
- tout point image est représenté par un vecteur colonne homogène, par exemple $\mathbf{x} = (x^1, x^2, x^3)^\top$;

– dans une expression tout indice répété en position covariante ou contravariante correspond à une sommation sur (1, 2, 3) de cet indice ; par exemple, les trois écritures suivantes sont équivalentes :

$$\mathbf{x}' = \mathbf{M}\mathbf{x} \Longleftrightarrow x'^i = \sum_{j=1}^{3} m^i_j x^j \Longleftrightarrow x'^i = m^i_j x^j$$

La contrainte trifocale et le torseur trifocal deviennent respectivement :

$$p^i(p'^n\epsilon_{njr})(p''^q\epsilon_{qks})\mathcal{T}_i^{jk} = 0_{3\times 3} \tag{3.50}$$

$$\mathcal{T}_i^{jk} = a^j_i v''^k - v'^j b^k_i \tag{3.51}$$

avec :

$$\epsilon_{rst} = \begin{cases} 0 & \text{unless } r, s \text{ and } t \text{ are distinct,} \\ +1 & \text{if } rst \text{ is an even permutation of 123,} \\ -1 & \text{if } rst \text{ is an odd permutation of 123.} \end{cases}$$

Le tenseur $\mathcal{T}$ représente la géométrie des trois vues, il s'agit d'un tableau $3\times3\times3$; il comporte donc 27 éléments, cependant, il comporte seulement 18 degrés de liberté.

La relation conduit à quatre relations indépendantes appelées *trilinéarités*.

3.8.3 Calcul de la matrice d'homographie

Cette partie est inspirée de [197].
La matrice $\mathbf{F}$ (équation 3.41) et le tenseur (équation 3.51) s'expriment en fonction des homographies entre les vues. Il est donc souvent nécessaire de les calculer. Nous avons choisi pour ce calcul, la combinaison des méthodes DLT (Direct Linear Transform) et RANSAC (RANdom SAmple Consensus) :

1. on calcule un ensemble S de couples de points appariés (p_i, p'_i) ;
2. on choisit aléatoirement un sous-ensemble de quatre couples et on estime par DLT une homographie $\hat{\mathbf{A}}$;
3. on utilise l'homographie $\hat{\mathbf{A}}$ pour estimer les points p'_i : $\hat{p}'_i = \hat{\mathbf{A}} p_i$;
4. on calcule l'erreur euclidienne entre chaque point p'_i et $\hat{p}'_i$, si elle est supérieure à un seuil fixé à l'avance, le coupe est retiré de l'ensemble S ;
5. on recommence à la première étape jusqu'à épuisement des couples appariés.

Au fur et à mesure des itérations, l'ensemble S est filtré des faux appariements.

Comme $[p']_\times = \begin{pmatrix} 0 & -1 & y' \\ 1 & 0 & -x' \\ -y' & x' & 0 \end{pmatrix}$, la relation homographique 3.40 entre p et p' se développe comme suit en utilisant la notation Einstein :

$$\begin{pmatrix} 0_{1\times 3} & -p^{i\top} & y'p^{i\top} \\ p^{i\top} & 0_{1\times 3} & -x'p^{i\top} \\ -y'p^{i\top} & x'p^{i\top} & 0_{1\times 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_i^{1\top} \\ a_i^{2\top} \\ a_i^{3\top} \end{pmatrix} = 0 \tag{3.52}$$

Dans ces trois équations, seules deux sont linéairement indépendantes. Il est habituel de considérer uniquement les deux premières, soit :

$$\begin{pmatrix} 0_{1\times 3} & -p^{i\top} & y'p^{i\top} \\ p^{i\top} & 0_{1\times 3} & -x'p^{i\top} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_i^{1\top} \\ a_i^{2\top} \\ a_i^{3\top} \end{pmatrix} = 0 \tag{3.53}$$

ou encore :

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -x & -y & -1 & xy' & yy' & y' \\ x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'x & -x'y & -x' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1^1 \\ a_2^1 \\ \cdots \\ a_3^3 \end{pmatrix} = 0 \tag{3.54}$$

L'homographie $\mathbf{A}$ étant définie à un facteur près (en forme normalisée on prend $a_3^3 = 1$), le système ne compte que huit inconnues. Pour les calculer, il faut donc huit équations, donc quatre paires de points, d'où la DLT :

$$\mathbf{Ga} = 0 \tag{3.55}$$

avec :

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -x_1 & -y_1 & -1 & x_1y'_1 & y_1y'_1 & y'_1 \\ x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_1x_1 & -x'_1y_1 & -x'_1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & -x_4 & -y_4 & -1 & x_4y'_4 & y_4y'_4 & y'_4 \\ x_4 & y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_4x_4 & -x'_4y_4 & -x'_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1^1 \\ a_2^1 \\ \cdots \\ a_3^3 \end{pmatrix} \tag{3.56}$$

$\mathbf{a} = (a_1^1, a_2^1, a_3^1, a_1^2, a_2^2, a_3^2, a_1^3, a_2^3, a_3^3)^\top$

L'équation signifie que $\mathbf{a}$ est le plus petit vecteur propre de $\mathbf{G}$ que l'on obtient par une décomposition en valeurs singulières de $\mathbf{G}$.

3.8.4 Calcul de la matrice fondamentale

Cette partie est inspirée de [197].
Nous avons choisi de calculer la matrice fondamentale de manière similaire à l'ho-

mographie : la combinaison de la DLT et RANSAC.

En développant l'équation de la contrainte épipolaire (équation 3.43) on trouve l'équation suivante :

$$\begin{pmatrix} x'p^{i\top} & y'p^{i\top} & p^{i\top} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_i^{1\top} \\ f_i^{2\top} \\ f_i^{3\top} \end{pmatrix} = 0 \tag{3.57}$$

soit :

$$\begin{pmatrix} xx' & x'y & x' & xy' & yy' & y' & x & y & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1^1 \\ f_2^1 \\ \dots \\ f_3^3 \end{pmatrix} = 0 \tag{3.58}$$

On retrouve bien une DLT. La matrice $\mathbf{F}$ est de rang deux et à huit degrés de liberté, il faut donc avoir un appariement de huit points, ce qui conduit à la DLT :

$$\mathbf{Gf} = 0 \tag{3.59}$$

On effectue une décomposition en valeurs singulières de $\mathbf{G}$:

$$\mathbf{G} = \mathbf{K_G L_G M_G^\top} \tag{3.60}$$

Les éléments de $\mathbf{F}$ se trouvent dans la dernière colonne de $\mathbf{M}$.

On décompose la matrice $\mathbf{F}$ à son tour en valeurs singulières :

$$\mathbf{F} = \mathbf{K_F L_F M_F^\top} \tag{3.61}$$

Soient $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ les trois valeurs singulières de $\mathbf{F}$; elles sont telles que :

$$\mathbf{L_F} = diag(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \tag{3.62}$$

Pour contraindre au rang 2 on prend par exemple $\sigma_3 = 0$:

$$\mathbf{F} = \mathbf{K_F diag}(\sigma_\mathbf{1}, \sigma_\mathbf{2}, \mathbf{0}) \mathbf{M_F^\top} \tag{3.63}$$

3.8.5 Calcul des points

Comme exposé plus haut l'étalonnage multifocal exige le calcul et l'*appariement*, ou mise en correspondance, de points dans les images. Pour avoir un étalonnage précis, il faut une double condition. Premièrement, les points dans chaque image doivent être suffisamment nombreux et uniformément repartis sur l'ensemble de l'image. Deuxièmement la mise en correspondance doit être la plus juste possible.

La mise en correspondance de tous les points de chaque image (mise en correspondance dense) n'est cependant pas nécessaire : la mise en correspondance de points invariants (mise en correspondance éparse) suffit. Les points invariants typiques sont les coins, les sommets, les intersections d'arêtes, ... Une multitude de méthodes a été développé epour les détecter dans les images :

1. le détecteur de Harris fondé sur l'approximation au premier degré d'une fonction d'auto-corrélation,
2. le détecteur SUSAN (Smallest Univalue Assimilating Nucleus) fondé sur une convolution avec un masque circulaire,
3. le détecteur CSS (Curvative Scale Space) utilisant le détecteur de contours de Canny,
4. le calcul de descripteurs SIFT (Scale Invariant Feature Transform) correspondant aux extremum de filtrages DOG (Difference Of Gaussians) de l'image,
5. le calcul de descripteurs SURF (Speeded Up Robust Features) fondé sur une approximation d'ondelettes de Haar.

Nous avons choisi, à l'époque, de modifier le détecteur de Harris pour pouvoir fixer *a priori* un nombre de points désiré suffisamment élevé pour garantir la réussite de l'étalonnage. Ce détecteur est fondé sur la fonction d'auto-corrélation c'est-à-dire les variations spatiales d'intensité lumineuse.

Soit $I(x, y)$ le pixel centre de la fenêtre W. Soit (u, v) une variation spatiale de (x, y). Soit la fonction d'auto-corrélation définit par la somme des différences quadratiques :

$$E(u, v) = \sum_{x \in W_x} \sum_{y \in W_y} (I(x + u, y + v) - I(x, y))^2 \tag{3.64}$$

Pour une petite variation (u, v), $E(u, v)$ peut être approximée par un développement de Taylor au premier degré :

$$E(u, v) = \begin{pmatrix} u & v \end{pmatrix} \sum_{x \in W_x} \sum_{y \in W_y} \begin{pmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u & v \end{pmatrix} M \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \tag{3.65}$$

avec : $I_x = \frac{\partial I(x,y)}{\partial x}$ et $I_y = \frac{\partial I(x,y)}{\partial y}$.
La réponse du détecteur R_H s'écrit :

$$R_H = det(M) - ktrace(M)^2 = \lambda_1 \lambda_2 - k(\lambda_1 + \lambda_2)^2 \tag{3.66}$$

avec k une constante définie de manière empirique à 0.04, λ_1 et λ_2 les valeurs propres de $\mathbf{M}$.

Il a été démontré que :

– si $\lambda_1 << \lambda_2$, $\lambda_1 >> \lambda_2$ et $R_H < 0$ alors le point considéré fait partie d'une arête,

– si $\lambda_1 \sim \lambda_2$ et $|R_H| \sim 0$ alors le point considéré fait partie d'une région plate,
– si $\lambda_1 \sim \lambda_2$ et $R_H > 0$ alors le point considéré est un sommet et constitue un point d'intérêt (figure 3.19).

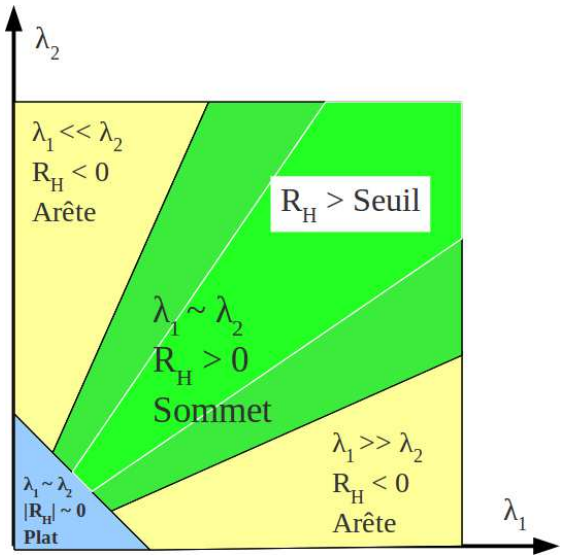


FIGURE 3.19 – Réponse du détecteur de Harris : définition du sommet constituant le point d'intérêt.

Si l'image est texturée, le nombre de sommets N_p peut être très élevé. On introduit alors un seuil S_H pour réduire ce nombre : on ne prend que les points pour lesquels la réponse R_H est supérieure au seuil S_H.

Le problème devient le calcul du seuil S_H^* permettant d'obtenir le nombre de points N_p^* désiré *a priori*. Ce problème peut être formulé comme un problème d'optimisation : trouver le seuil S_H^* minimisant l'erreur $|N_p^* - N_p|$. Nous avons admis que cette erreur était une fonction linéaire de S_H et choisi de résoudre le problème par la méthode du simplexe avec incrémentation de la valeur initiale du seuil jusqu'à convergence.

La méthode de calcul des points comprend deux étapes (figure 3.20, algorithme 1) :

1. on calcule la réponse $R_H(I)$ du détecteur de Harris sur l'image I considérée ;
2. on met en œuvre l'optimisation par simplexe pour trouver le seuil S_H^* donnant le nombre de points désiré N_p^*.

3.8.6 Mise en correspondance robuste des points

La mise en correspondance, ou appariement, de deux points p et p' se fait typiquement en étudiant le coefficient de corrélation entre l'image I d'une fenêtre

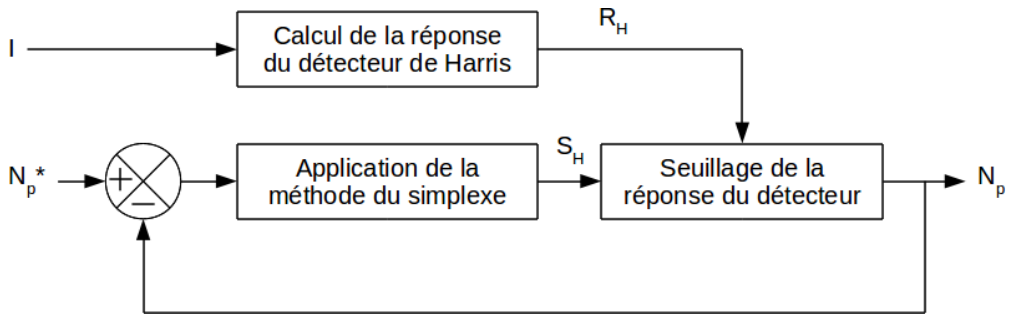


FIGURE 3.20 – Schéma illustrant le fonctionnement de la méthode "Harris simplexe" garantissant le nombre de points détectés N_p^* sur n'importe quelle image suffisamment texturée I.

I : Image de travail ;
N_p^* : Nombre de points désiré ;
k : Coefficient de valeur 0.04 ;
$S_H = 0$;
$R_H = (I_x^2 I_y^2 - I_{xy} I_{xy}) - k(I_x^2 + I_y^2)^2$;
while $Solution = 0$ **do**
  while $FinDeRecherche = 0$ **do**
    $I_s = Seuillage(R_H, S_H)$;
    $P_d = SommetsdeI_s$;
    $N_p = Card(P_d)$;
    $E = |N_p^* - N_p|$;
    $(S_H, FinDeRecherche, Solution) = Simplexe(E)$;
  end
  $S_H = S_h + 0.1$;
end

Algorithm 1: Algorithme "Harris simplexe" de calcul du nombre de points désirés N_p^* dans une image texturée I où P_d est l'ensemble des points détectés.

W centrée sur p et l'image I' de la même fenêtre centrée sur p'. Plusieurs types de corrélation ont été développés pour ce faire. Nous avons opté pour le *ZNSSD* (*Zero-mean Normalized Cross-Correlation*) :

$$c_{xy} = \frac{\sum_{i\in W_x}\sum_{j\in W_y}[(I(x+i,y+j)-\bar{I})-(I'(x'+i,y'+j)-\bar{I'})]^2}{\sqrt{\sum_{i\in W_x}\sum_{j\in W_y}[(I(x+i,y+j)-\bar{I})}\sqrt{\sum_{i\in W_x}\sum_{j\in W_y}[(I(x+i,y+j)-\bar{I'})}} \tag{3.67}$$

avec $\bar{I}$ et $\bar{I'}$ les moyennes des images I et I' respectivement.

Nos études ont montré qu'une fenêtre W échantillonnée donnait de meilleurs résultats que la fenêtre rectangulaire classique (figure 3.21).

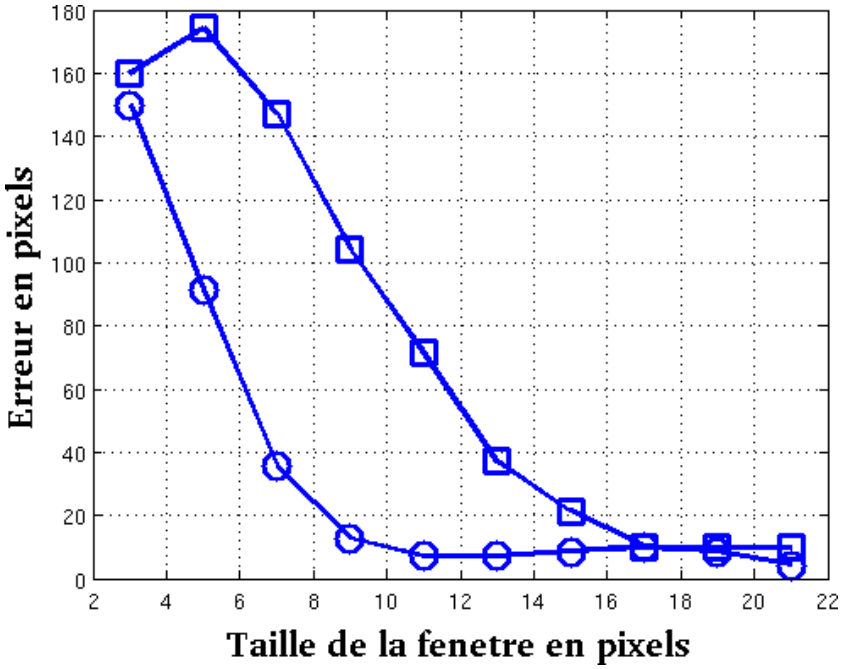


FIGURE 3.21 – Comparaison des erreurs d'appariement des fenêtres rectangulaire (□) et échantillonnée (∘, Cha) en fonction de la taille de la taille de la dite fenêtre.

Nous avons développé une méthode en trois étapes (algorithme 2) :

1. on calcule tous les points p' situés au voisinage de p ;
2. on réalise la corrélation *ZNSSD* avec une fenêtre échantillonnée entre p et chaque point p' voisin ;
3. on choisit le point p' ayant obtenu le coefficient de corrélation le plus élevé.

I : Image de gauche ;
I' : Image de droite ;
p : Ensemble des points d'intérêt de l'image I ;
p' : Ensemble des points d'intérêt de l'image I' ;
p'_c : Ensemble des points d'intérêt appariés de l'image I' avec l'image I ;
nc_{min} : Nombre minimum de points candidats ;
w : Taille de la fenêtre de corrélation ;
for *chaque* p **do**
  // Création de la fenêtre de corrélation autour de p ;
  $W_{cha} = W_w(I, p)$;
  // Calcul de la distance euclidienne entre chaque point ;
  for *chaque point* p' **do**
    $d = dist_E(p, p')$;
  end
  rayon = 0 ;
  // Relaxation du rayon du cercle des candidats ;
  while *Card(candidats)* $\preceq nc_{min}$ **do**
    // Détermination des points candidats ;
    $candidats = trouver(dist_E < rayon)$;
    $rayon = rayon + 1$;
  end
  // Corrélation des candidats ;
  for *chaque point candidat* **do**
    $W_{chac} = W_w(I', candidats)$;
    $c_{xy} = ZNSSD(W_{cha}, W_{chac})$;
  end
  // Choix du point ;
  $p'_c = Max(c_{xy})$;
  $Supprimer p'_c dans p'$;
end

Algorithm 2: Algorithme de mise en correspondance robuste.

3.8.7 Application

Considérons le montage stéréoscopique avec deux microscopes TIMM 400 d'unede nos stations expérimentales (figure 3.22).

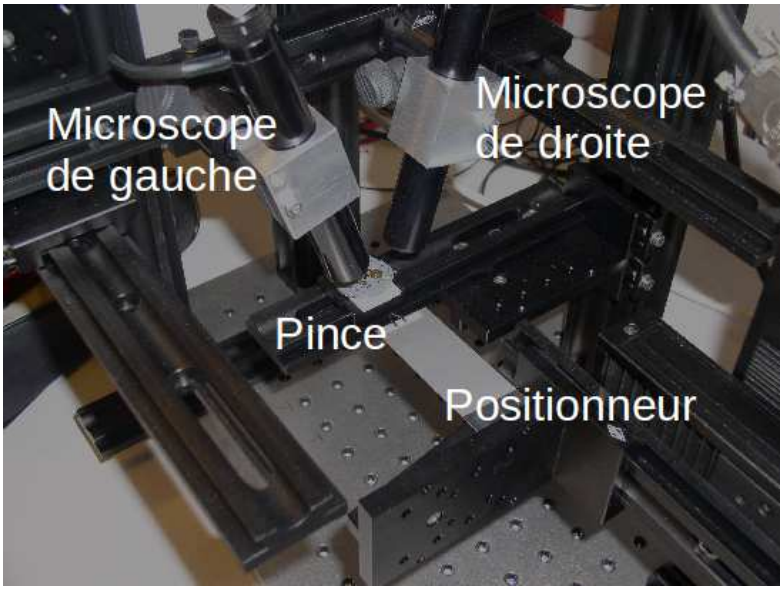


FIGURE 3.22 – Montage expérimental avec deux microscopes TIMM 400.

Les microscopes font un angle d'environ 30° et sont chacun relié à un convertisseur analogique-numérique externe pour en récupérer les images à la définition VGA. Leurs spécifications sont :

- grandissement : 0.01× - 4×
- format des images : 1/4"
- définition des images : 640 × 480 pixels

Une goutte d'eau recouverte de limaille de nickel a été utilisée comme mire : c'est un objet 3D micrométrique (diamètre d'environ 300 μm) donnant des images fortement texturées. La profondeur de champ du microscope étant plus faible que le diamètre de la mire, nous avons acquis une image sur trois niveaux (figure 3.23).

La figure 3.24 montre l'appariement robuste de 500 points.

L'homographie et la matrice fondamentale sont respectivement :

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 9.9479 & 10^{-1} & -7.5460 & 10^{-3} & -1.4087 & 10^{2} \\ -2.8229 & 10^{-2} & 9.0525 & 10^{-1} & -1.4077 & \\ -2.3636 & 10^{-4} & 3.1479 & 10^{-5} & 1.000 & \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 3.0049 & 10^{-9} & 2.0681 & 10^{-6} & -1.2660 & 10^{-4} \\ -1.0739 & 10^{-6} & -6.9987 & 10^{-9} & 3.6982 & 10^{-4} \\ 1.2504 & 10^{-4} & -3.6744 & 10^{-4} & -1.1751 & 10^{-3} \end{pmatrix}$$

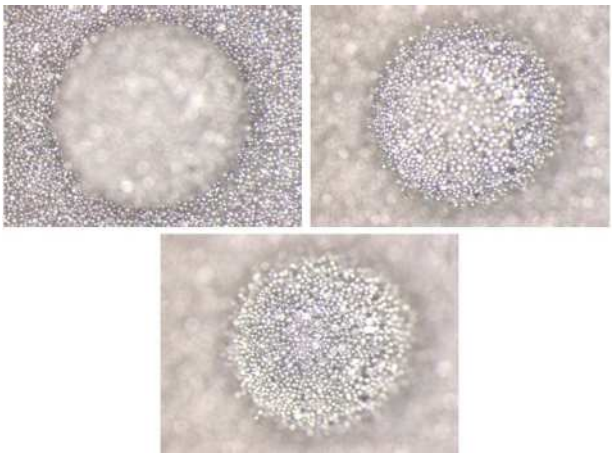


FIGURE 3.23 – Trois images de la mire de 300 μm sur trois niveaux.

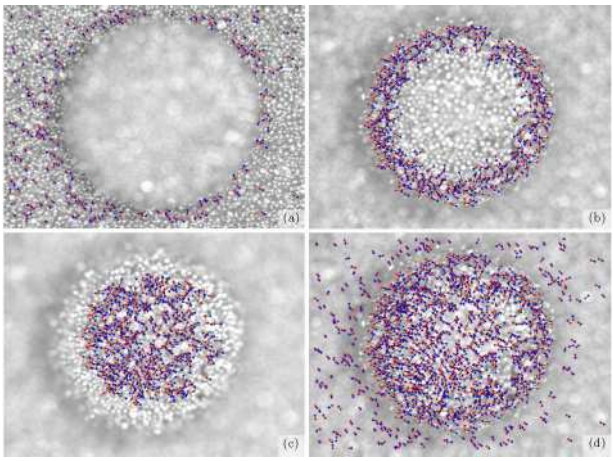


FIGURE 3.24 – La mise en correspondance des points d'intérêt : (a), (b) et (c) les couples des couches 1, 2 et 3, respectivement ; (d) le regroupement de tous les couples.

3.9 Conclusion

La consigne pour cette partie des travaux concernait les verrous scientifiques et technologiques relatifs à l'imagerie principale de l'échelle micrométrique, à savoir le microscope optique en réflexion :

- l'étalonnage monofocal c'est-à-dire l'estimation du modèle géométrique de formation des images,
- l'étalonnage multifocal c'est-à-dire l'estimation du modèle géométrique de contrainte entre les imageries.

Nous avons commencé par exposé les propriétés du microscope optique :

- les conditions de Gauss qui expliquent les faiblesses de la distance de travail, du contraste et de la profondeur de champ ;
- le pouvoir de résolution et la résolution sub-microniques ;
- la dérive négligeable.

Ces propriétés ne sont pas sans conséquence sur les étalonnages.

Nous avons ensuite développé un modèle monofocal multi-échelle : l'équation de la projection centrale avec prise en compte explicite du grandissement. Nous avons aussi considéré le modèle paramétrique pour les distorsions radiales et tangentielles. Nous avons ensuite décrit une méthode d'estimation de ces modèles en utilisant une optimisation non-linéaire initiée par une DLT. Nous avons montré que les propriétés du microscope imposent des mires planes et conduisent à des solutions peu stables, et que ces inconvénients peuvent être évités en utilisant des mires virtuelles.

Nous avons ensuite rappelé les géométries bifocale et trifocale, qui conduisent respectivement aux contraintes épipolaire et trifocale. Les modèles géométriques correspondants, la matrice fondamentale et le tenseur trifocal respectivement, se calculent en utilisant une optimisation non-linéaire et une DLT. Ces méthodes reposent sur une détection et une mise en correspondance de points d'intérêt. Nous avons mis au point :

- une méthode fondée sur le détecteur de Harris qui garantit un nombre de points détecté ;
- une méthode de mise en correspondance robuste combinant une fenêtre de corrélation échantillonnée et une contrainte de voisinage.

Tous ces développements ont été validés sur les microscopes des différentes plateformes expérimentales. Cependant ces résultats ne sont pas exempts de possibilités d'amélioration :

- le modèle monofocal gagnerait à utiliser une approche non paramétrique de la distorsion telle que celle proposée dans [197] ;
- un détecteur robuste et invariant à l'échelle tel que SIFT remplacerait avec intérêt le détecteur de Harris.

L'étalonnage multifocal a été développé dans la thèse de Julien Bert de 2004 à 2007. L'étalonnage monofocal a été développé dans la thèse de Brahim de 2006 à 2009.

Chapitre 4

Synthèse d'images virtuelles

4.1 Introduction

La synthèse d'images virtuelles correspond à la création assistée par ordinateur d'images numériques. C'est un vaste sujet en perpétuelle évolution qui dépasse l'objet de ce mémoire. Nous allons nous limiter à sa composante vision artificielle qui traite de l'obtention de nouvelles images d'une scène à partir d'images préalablement acquises de cette scène.

En fonction de la connaissance sur la géométrie de l'imagerie, Shum and Kang ([103]) proposent une classification en trois parties : synthèse sans géométrie, synthèse avec géométrie implicite et synthèse avec géométrie explicite.

La synthèse d'images avec géométrie explicite de l'imagerie (paramètres intrinsèques) comprend les méthodes plus ou moins classiques de reconstruction 3D par stéréoscopie avec ou sans rendu 2D ([68], [77], [123], [155], [156], [164]). Elle nécessite l'étalonnage de chaque caméra (étalonnage monofocal) et de chaque couple de caméras (étalonnage bifocal). Pour son implantation en temps réel, la tendance aujourd'hui est à l'utilisation des processeurs rapides comme les GPU et les FPGA ([134], [164]).

La synthèse d'images n'utilisant aucune géométrie de l'imagerie rassemble les méthodes de création d'images panoramiques par assemblage d'images de faible définition ([74], [84], [82], [113], [124], [160]). Les anglophones utilisent le terme *mosaicing* que d'aucuns traduisent par *mosaïquage* en français.

La dernière classe de synthèse d'images utilise uniquement la géométrie implicite de l'imagerie (paramètres des contraintes multifocales). Les méthodes typiques de cette classe sont : la ligne-de-mire (line-of-sight), le transfert épipolaire et le transfert trifocal. La méthode de la ligne-de-mire est basée sur le lancer de rayons, c'est-à-dire la simulation du parcours inverse de la lumière. Son inconvénient ré-

side dans le nombre élevé d'images d'entrée requis : au moins une dizaine d'images pour obtenir une nouvelle vue de qualité ([116], [115], [153]).

L'approche du transfert épipolaire a été introduite par Faugeras et Robert : chaque point de la vue virtuelle est à l'intersection de la droite épipolaire de tout point de l'image gauche et la droite épipolaire de son correspondant dans l'image droite en utilisant les matrices fondamentales des couples (image gauche, image virtuelle) et (image droite, image virtuelle) ([71], [115]).

L'approche du transfert trifocal a été développée par Avidan et Shashua : le tenseur entre trois vues est utilisé pour transférer les points des images gauche et droite dans la vue virtuelle ([78], [86], [100], [168]). Naturellement cette approche est similaire au transfert épipolaire : elles utilisent toutes les deux la géométrie de la configuration pour transférer les pixels de deux images vers une troisième. Selon une étude de Barrett et al. ([73]) le transfert trifocal est plus précis et plus robuste : il continue de fonctionner même si les centres des caméras sont colinéaires.

Les domaines d'application de la synthèses d'images virtuelles sont nombreux ([70], [101], [107], [123], [124], [153]) : art numérique, industrie du film, jeux vidéo, architecture et ameublement, ... La micro-robotique apparaît également comme un domaine d'application potentiel : assistance visuelle à la manipulation et à l'assemblage, suivi d'informations pour l'asservissement visuel, apprentissage de consignes d'asservissement visuel.

4.2 De la synthèse d'images en micro-robotique

On trouve évidemment dans littérature la reconstruction 3D du champ de travail à partir de stéréo-microscope : pour la manipulation de pièces [139], [175] ou pour la neurochirurgie [108]. Mais, on trouve également la reconstruction 3D en utilisant la propriété de la profondeur de champ faible du microscope qui permet d'acquérir des images sur plusieurs couches que l'on peut après assembler : [69], [121], [122], [137], [144], [172].

D'autres travaux portent sur la construction de panoramas par mosaïquage pour résoudre le dilemme champ - résolution du microscope : on augmente virtuellement le champ de vision tout en gardant une résolution élevée ([138], [145]). La seconde publication qui est due à Potsaid et al. est particulièrement intéressante. Ils ont breveté un microscope avec miroir piloté permettant d'acquérir des images qui sont assemblés dynamiquement.

4.3 Challenges scientifiques et techniques

La caractéristique fondamentale du microscope est la faiblesse de sa profondeur de champ : environ 3 μm à 10$\times$. Cela a une grande incidence sur le calcul de la géométrie des microscopes utilisés comme exposé plus haut : le calcul est

plus difficile et moins précis. Il en résulte que l'utilisation de ces géométries pour réaliser des images virtuelles exploitables est un grand défi : il faut mettre au point des méthodes robustes aux imprécisions des géométries. A ces difficultés, il faut ajouter l'aspect rapidité des flux d'images. Nous avons développé deux méthodes de synthèse de flux d'images efficaces fondées l'une sur le mosaïquage et l'autre sur le transfert trifocal.

On peut noter cependant que la faiblesse de la profondeur de champ signifie une grande sensibilité de la netteté des images à la position relative du microscope avec la scène : la netteté code la position relative du microscope et peut être utilisée pour déterminer cette dernière. Le défi de cette reconstruction 3D par analyse de la netteté est la détermination d'un estimateur de la netteté discriminant et le filtrage efficace des données 3D. Nous avons mis au point une méthode relevant ce défi.

4.4 Reconstruction 3D par analyse de la netteté

4.4.1 Estimation de la netteté

La netteté d'une image est estimable par la variation des valeurs de ses pixels. L'estimateur idéal atteint un maximum quand l'image est nette. Plusieurs estimateurs de netteté ont été développés, Sun et al. [148] proposent de les classer en trois groupes :

- les estimateurs utilisant les dérivées des images comme les gradients, les laplaciens ou les ondelettes,
- les estimateurs utilisant les descripteurs statistiques comme l'histogramme, la variance, l'écart-type,
- les estimateurs utilisant le seuillage.

Soient les estimateurs suivants :

- l'ondelette de Haar

$$F_{haar}(I) = \frac{1}{XY} \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} [W(x,y) - \bar{I}]^2 \tag{4.1}$$

  avec W la transformée en ondelette de Haar de l'image I ; $\bar{I}$ la moyenne de I, $X \times Y$ la définition de I ;
- l'ondelette de Daubechies

$$F_{daub}(I) = \frac{1}{XY} \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} [W(x,y) - \bar{I}]^2 \tag{4.2}$$

  avec W la transformée en ondelette de Daubechies de I ;

– la variance

$$F_{var}(I) = \frac{1}{XY\bar{I}} \sum_{x \in H} \sum_{y \in Y} [I(x,y) - \bar{I}]^2 \tag{4.3}$$

– l'auto-corrélation

$$F_{cor} = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} [I(x,y)I(x+1,y+1) - I(x,y)I(x+2,y+2)] \tag{4.4}$$

Considérons le microscope inversé Leica MZ16A de la figure 3.14 observant une structure en silicium oxydé de 400 μm $\times$ 400 μm $\times$ 100 μm disposé sur le positionneur. Depuis une position proche du positionneur, éloignons par pas de 10μm la tête du microscope et enregistrons les images. L'analyse des images montrent que tous les estimateurs passent bien par un maximum. La variance a établi un bon compromis entre aspect discriminant et temps de calcul (figures 4.1 et 4.2. Aussi avons nous utilisé celui-ci dans notre reconstruction 3D.

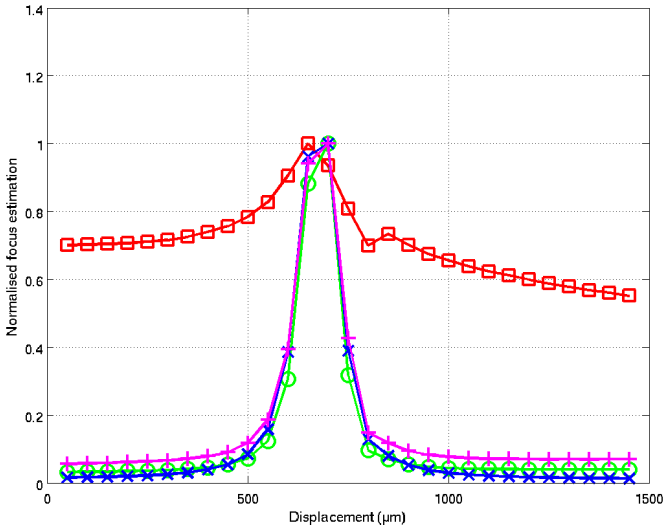


FIGURE 4.1 – Comparaison des estimateurs : □ : variance ; ∘ : ondelette de Daubechies ; × : ondelette de Haar ; + : auto-corrélation.

4.4.2 Description de la méthode

La méthode que nous avons développée comprend sept étapes. Elle considère que le microscope fonctionne avec un grandissement suffisamment élevé pour avoir une profondeur de champ très faible : typiquement plus de 5×.

La première étape consiste à réaliser un déplacement relatif objectif-cible par pas successifs et à acquérir et stocker à chaque pas une image : à chaque pas Δ

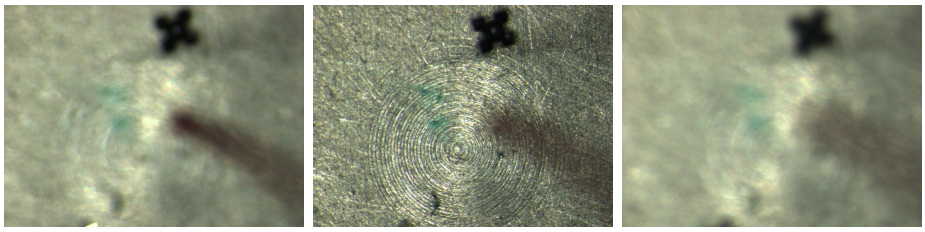


FIGURE 4.2 – Estimation de la netteté : de gauche à droite une image avant la valeur maximale de l'estimateur, à la valeur maximale de l'estimateur et après la valeur maximale de l'estimateur, respectivement.

on acquiert l'image d'indice k ; $k = \{0, 1, .., K\}$. L'indice k permet de remonter à la position z des points de l'image :

$$z = k\Delta \tag{4.5}$$

Le choix de ce pas est très important : il doit être plus grand que la profondeur de champ pour éviter d'avoir des régions nettes communes aux images de deux couches, dans le cas contraire, la reconstruction sera de faible qualité.

La seconde étape consiste à réaliser un nettoyage des images pour éliminer les pixels indésirables, c'est-à-dire ne faisant pas partie d'un objet de la scène. Pour ce faire, on réalise un masque binaire qui permet de ne traiter que les pixels pour lesquels la valeur du masque est 1. Les pixels d'intérêt de chaque couche sont définis par un seuillage. Le masque est défini par les pixels d'intérêt présents dans toutes les couches : une opération ET logique entre les points d'intérêt de toutes les couches.

La troisième étape consiste à évaluer l'estimateur de netteté, non pas de chaque image, mais de chaque pixel $(x, y, k)^\top$, plus précisément de l'image du voisinage $N \times N$ du pixel :

$$F_{var}(x, y, k) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=x-\frac{N-1}{2}}^{x+\frac{N-1}{2}} \sum_{j=y-\frac{N-1}{2}}^{y+\frac{N-1}{2}} \left(I(i, j) - \bar{I}\right)^2 \tag{4.6}$$

avec :
- $F_{var}(x, y, k)$ la variance du pixel $(x, y, k)^\top$ de la couche k,
- $I(i, j)$ correspond au niveau de gris du pixel (i, j),
- $\bar{I}$ est le niveau de gris moyen dans le voisinage $N \times N$ du pixel $(x, y, k)^\top$.

Ensuite pour chaque colonne de pixels on choisit le pixel $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z} = \hat{k}\Delta)$ pour lequel $F_{var}(x, y, k)$ est maximale. A la fin, on récupère un nuage de points 3D.

La quatrième étape consiste à effectuer une analyse factorielle sur chaque couche de points pour en extraire les deux principaux axes (figure 4.3). Ils sont définis par les premier et deuxième vecteurs propres de la matrice de covariance du nuage. Son barycentre et les deux axes définissent le nouveau repère pour le filtrage spatial du nuage.

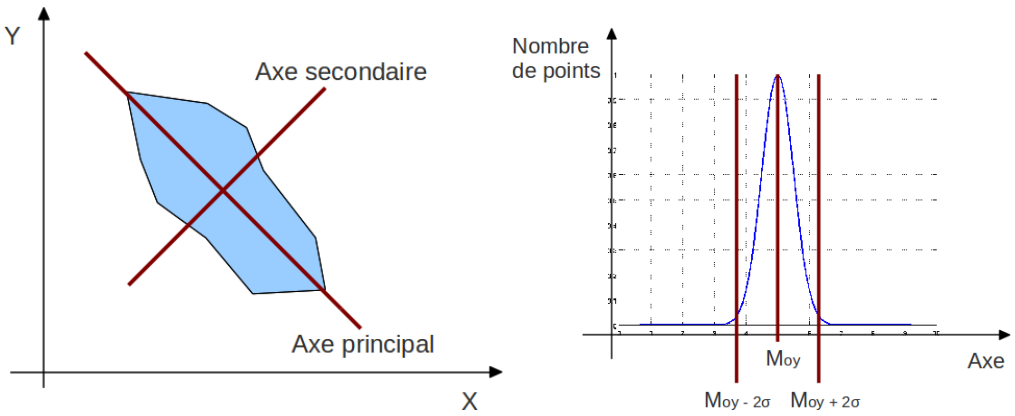


FIGURE 4.3 – A droite : illustration des deux axes factoriels d'un nuage de points ; à gauche : illustration du principe du filtrage.

La cinquième étape consiste à lisser les données en utilisant une approximation polynomiale, puis à les filtrer : seuls les points situés sur l'axe principal (respectivement axe secondaire) dans l'intervalle $[M_{oy} - 2\sigma \quad M_{oy} + 2\sigma]$ sont retenus, où M_{oy} est la valeur moyenne de la distribution selon l'axe principal (respectivement l'axe secondaire) et σ l'écart-type de la même distribution (figure 4.3).

La sixième et dernière partie consiste à reprojeter les points dans le repère initial et à les mailler.

4.4.3 Application

Les concepts ont été appliqués à une de nos plate-formes expérimentales comportant un microscope inversé Leica DM IRBE équipée d'une caméra Leica DFC 320, une table porte-échantillon à trois degrés de liberté $xy\alpha$ et un manipulateur à trois degrés de liberté $\alpha\gamma z$ muni d'une pince à deux doigts.

Les spécifications du microscope sont :

- objectif fixe : $10\times$;
- définition de la caméra : 1044×772 pixels ;
- format du capteur : $8.10\ m\text{m} \times 6.64\ m\text{m}$;
- taille du pixel : $3.45\ \mu\text{m} \times 3.45\ \mu\text{m}$;
- fréquence d'acquisition : 10 Hz ;
- niveau de quantification : 12 bits.

Les spécifications des platines en translation (respectivement rotation) sont :
– résolution : 0.007 μm (respectivement 26 μrad) ;
– incrément : 0.05 μm (respectivement 26 μrad).

Dans l'expérience, le porte-échantillon est vide, et on observe les embouts en silicium oxydé (épaisseur 70μm pour une longueur de 1500 μm) de la pince (figure 4.4).

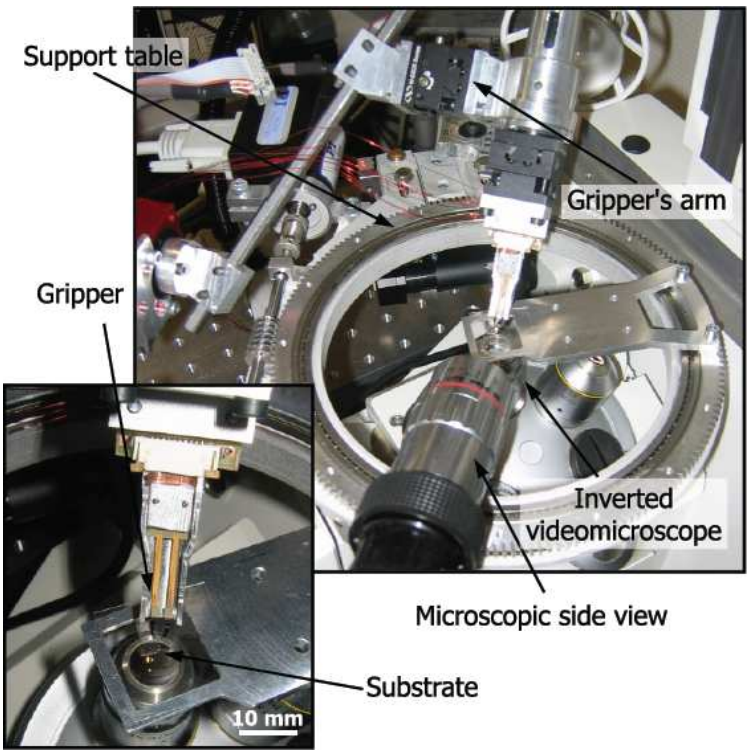


FIGURE 4.4 – Des vues de la plate-forme expérimentale ayant permis la reconstruction 3D.

Depuis une position basse, la pince est déplacée vers le haut par pas Δ de 10 μm et une série de 29 images ($K = 29$) sont acquises : la figure 4.5 en montre quelques unes. On distingue clairement l'évolution de la zone de netteté. Après application de toutes les étapes avec un voisinage 5×5 , on aboutit à l'image de la figure 4.6. Malgré le maillage final, on peut observer sa forme en escalier où chaque marche correspond à un pas.

On voit clairement que cette image peut être utilisée pour mesurer l'alignement des deux embouts de pince. Ceci est une caractéristique très importante, car un niveau élevé de cet non-alignement empêche la prise de pièce. Or il se trouve que du fait de l'hystérésis des actionneurs piézoélectriques utilisés dans les doigts, on

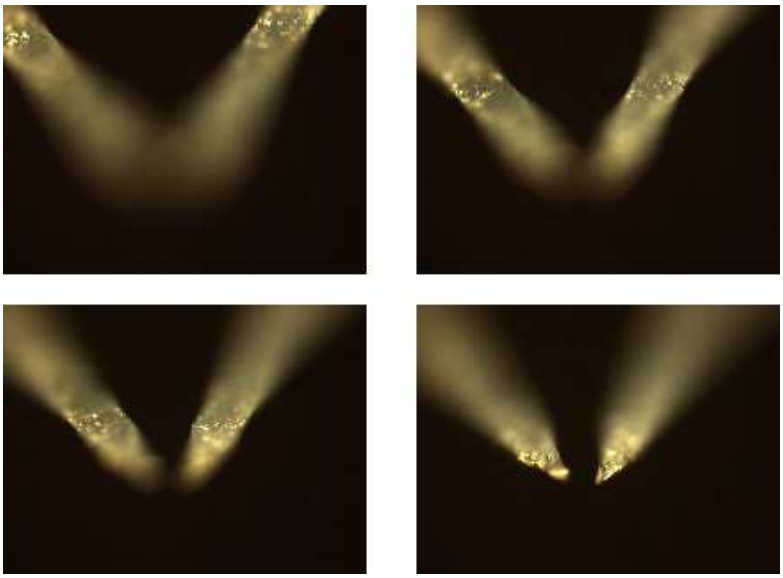


FIGURE 4.5 – De gauche à droite et de haut en bas, les images de la série respectivement.

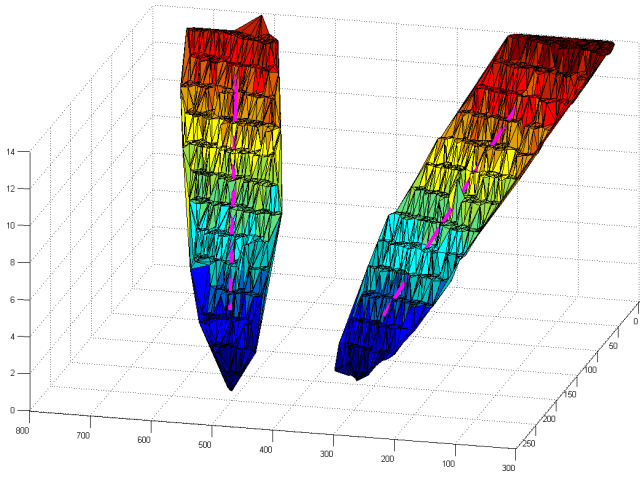


FIGURE 4.6 – Le modèle 3D des embouts de pince : les échelles des axes x, y et z sont respectivement de 3.45 μm, 3.45 μm et 10 μm.

ne peut pas garantir cet alignement avec une commande en boucle ouverte de ces actionneurs.

L'alignement est déterminé par l'élévation El et l'azimut Az (figure 4.7) de chaque doigt que l'on peut calculer, simplement, à partir de la ligne médiane de chaque nuage de points (figure 4.8). La commande de cet alignement peut être utile pour éviter l'échec de la prise (figure 4.9).

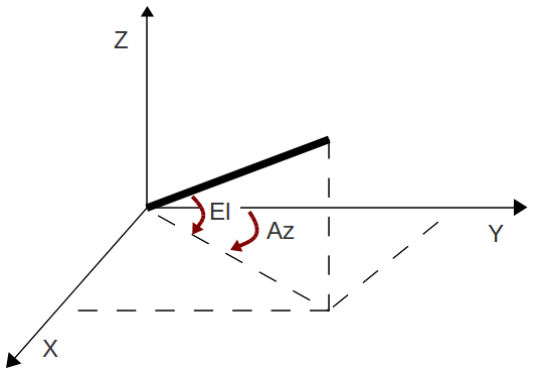


FIGURE 4.7 – Définition des angles d'élévation (El) et d'azimut (Az) d'une droite.

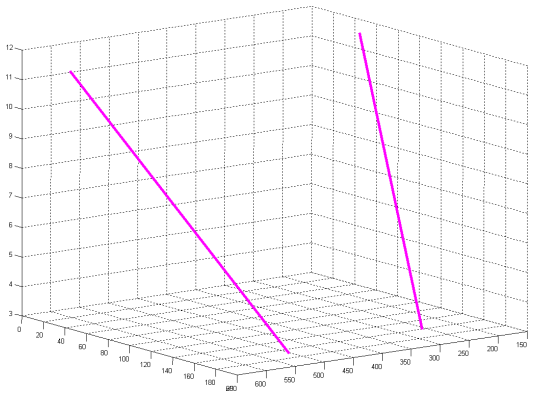


FIGURE 4.8 – Modèle 1D et alignement des embouts de pince : doigt gauche ($El = 25°$, $Az = 69°$) ; doigt droite ($El = 31°$, $Az = 111°$).

4.5 Synthèse d'images par mosaïquage

Le point fondamental du mosaïquage est le recalage d'images. Pour le présenter, il est important de se remémorer la double dimension du pixel p qui comprend sa position $(x, y)^\top$ et son intensité $I(p)$.

FIGURE 4.9 – Illustration de doigts de pince alignés (haut) et non alignés (bas).

4.5.1 Recalage

Soient deux images I_0 et I_1 reliées par une homographie $\mathbf{H}$. Deux pixels appariés $p_0 \in I_0$ et $p_1 \in I_1$, vérifient :

$$p_1 = \mathbf{H} p_0 \tag{4.7}$$

Le recalage de I_1 par rapport à I_0 consiste à corriger la déformation géométrique entre les deux images. Cela peut se faire de deux manières possibles.

Dans le *forward mapping* de I_1 par rapport à I_0, on calcule pour tout pixel p_1, le pixel p_{1r} tel que :

$$p_{1r} = \mathbf{H}^{-1} p_1 \tag{4.8}$$
$$I(p_{1r}) = I_{1r} \tag{4.9}$$

avec I_{1r}, une fonction des intensités dans le voisinage de p_1.
Cette méthode comporte le risque de ne pas attribuer d'intensité à certaines positions du fait des erreurs de calcul de $\mathbf{H}$ et d'arrondi.

Dans le *backward mapping* de I_1 par rapport à I_0, on impose la position du pixel p_{1r} et on calcule le pixel p_1 et l'intensité de p_{1r} tels que :

$$p_1 = \mathbf{H} p_{1r} \tag{4.10}$$
$$I(p_{1r}) = I_{1r} \tag{4.11}$$

Cette méthode n'a pas l'inconvénient de la méthode précédente, mais elle exige par contre le calcul préalable de la position des pixels de l'image recalée.

Une fois que les images sont recalées, on procède à leur fusion totale : une addition pondérée de l'image de référence I_0 et de l'image recalée I_{1r}.

4.5.2 Description de la méthode

Nous avons développé une méthode de calcul de panorama en quatre étapes :

1. on balaie la scène (en mode figé) selon les axes X et Y et on acquiert les images ayant un taux de recouvrement d'au moins 30% ;
2. on calcule les homographies successives ligne par ligne, en utilisant la méthode décrite dans le chapitre 3 ;
3. on réalise le recalage ligne par ligne pour obtenir des bandes qui sont ensuite détourées pour les rendre rectangulaires ;
4. on assemble verticalement les bandes détourées pour obtenir le panorama.

4.5.3 Application

Les concepts ont été appliqués aux images d'un microscope TIMM 400 de nos stations expérimentales. La figure 4.10 représente un panorama de 1315 × 986 pixels obtenu par mosaïquage de 4 × 4 images de 640 × 480 pixels avec un taux de recouvrement de 50%. Le champ de vision correspondant est de 11.17 mm × 8.37 mm.

FIGURE 4.10 – Panorama de 1315 × 986 pixels obtenu par mosaïquage de 4 × 4 images de 640 × 480 pixels ; le champ de vision est de 11.17 mm × 8.37 mm.

Le panorama peut être utilisé pour augmenter virtuellement le champ de vision du microscope sans perte de résolution. Si le microscope est fixe par rapport à la scène : on peut reconnaître la région observée et y incruster en temps réel le flux vidéo. Dans le cas où le microscope se déplace par rapport à la scène pour maintenir par exemple une pince dans son champ de vision, on peut calculer les déplacements de la région d'intérêt dans l'image du microscope puis mettre à jour la position de son incrustation dans l'image.

4.6 Synthèse de flux d'images par transfert trifocal

4.6.1 Le principe

Soient trois caméras de centres optiques C, C' et C''.
Soient ψ, ψ' et ψ'' les images obtenues par les trois caméras,respectivement.

Soient $\mathbf{A}$ et $\mathbf{B}$ les homographies 2D entre les doublets (ψ, ψ') et (ψ', ψ'') respectivement.

Soit $\mathbf{F}$ la matrice fondamentale du doublet (ψ,ψ') : elle contient la géométrie de ce doublet.

Soit $\mathcal{T}$ le tenseur du triplet (ψ, ψ', ψ'') : elle contient la géométrie de ce triplet.

Le triplet peut se décomposer en trois doublets (ψ,ψ'), (ψ,ψ''), (ψ',ψ'') caractérisé chacun par une matrice fondamentale : il en résulte que ces matrices fondamentales sont incluses dans le tenseur.

Considérons le cas particulier du triplet (ψ,ψ',ψ'') où $\psi' = \psi''$. Le tenseur correspondant $\hat{\mathcal{T}}$ s'écrit d'après l'équation 3.51 :

$$\hat{\mathcal{T}}_i^{jk} = a_i^j v'^k - v'^j a_i^k = \epsilon_{rjk}\mathbf{F}_r^i \tag{4.12}$$

Le tenseur $\hat{\mathcal{T}}$ du triplet (ψ,ψ',ψ') est donc totalement déterminé par la matrice fondamentale $\mathbf{F}$ du doublet (ψ, ψ').

Le tenseur peut donc être utilisé pour transférer des points entre trois images : connaissant un doublet de points (p, p') de la paire d'images (ψ,ψ') et un tenseur $\mathcal{T}$, il est possible de calculer la position du point p'' dans une troisième image ψ'' en résolvant l'équation de la contrainte trifocale, soit :

$$p''^k = p^i(p'^n\epsilon_{njr})\mathcal{T}_i^{jk} \tag{4.13}$$

L'intensité du point p'' peut se calculer comme pour le mosaïquage selon l'approche *forward mapping* ou *backward mapping*.

Il reste cependant à définir la position spatiale de la vue virtuelle ψ''. Une solution intuitive d'utilisation suggérée par Avidan et Shashua [86] est de la définir par rapport à la vue ψ' par la matrice de rotation $\mathbf{D}$ et le vecteur translation $\mathbf{t}$. Cela conduit aux relations suivantes :

$$p'' = \mathbf{A}p' \Rightarrow p''^i = a_j^i p'^j \tag{4.14}$$

$$\mathbf{t}^k = v''^k - v''^n d_n^k \Rightarrow \mathbf{t}^k = v'' - v' \tag{4.15}$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{DA} \Rightarrow b_i^k = d_n^k a_i^n \tag{4.16}$$

Le report de ces expressions dans l'équation 4.12 permet de calculer le tenseur en fonction des données $\mathbf{A}$, $\mathbf{D}$ et $\mathbf{t}$:

$$\mathcal{T}_i^{jk} = d_n^k \hat{\mathcal{T}}_i^{jn} + \mathbf{t}^k a_i^j \tag{4.17}$$

4.6.2 Description de la méthode

On se place dans une configuration classique en micro-robotique où les images ψ et ψ' proviennent de deux microscopes observant verticalement la scène de travail.

Il s'agit alors de calculer en temps réel la vue latérale ψ'' de la scène depuis la distance d de la scène et faisant un angle α avec la verticale. Cela revient à calculer un microscope virtuel positionné à la distance d de la scène et un angle α de la verticale, à partir des deux microscopes verticaux (figure 4.11).

Soient $\mathcal{R}_1$, $\mathcal{R}_2$, $\mathcal{R}_3$, $\mathcal{R}_4$ et $\mathcal{R}_s$ les repères attachés aux microscopes gauche, droite, virtuel, un objet de la scène et la scène, respectivement. Le repère $\mathcal{R}_4$ est choisi de manière à définir $\mathbf{D}$ et $\mathbf{t}$ par la matrice de rotation d'angle α et le vecteur de translation d dans $\mathcal{R}_4$, respectivement.

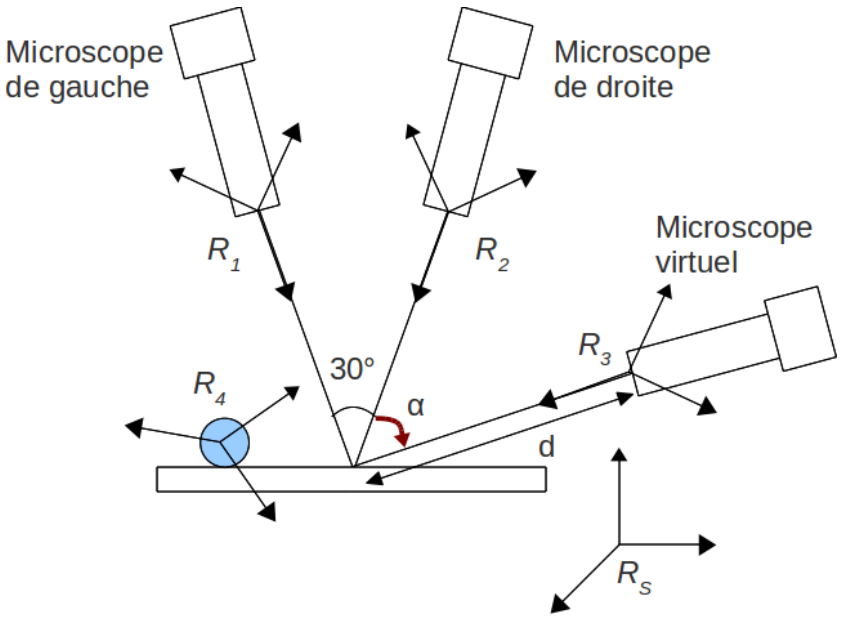


FIGURE 4.11 – Configuration du système pour le transfert trifocal. $\mathcal{R}_1$, $\mathcal{R}_2$, $\mathcal{R}_3$, $\mathcal{R}_4$ et $\mathcal{R}_s$ sont les repères associés aux microscope gauche, droite, virtuel, un objet et la scène, respectivement.

Nous nous sommes limités à transférer les contours des images mais pas leurs intensités.

La méthode que nous avons développé comprend :

1. on calcule la matrice $\mathbf{K}$ des paramètres intrinsèques de chaque microscope ;
2. on réalise la mise en correspondance entre les pixels selon la méthode exposée au chapitre 3 ;
3. on calcule la matrice fondamentale $\mathbf{F}$ selon la méthode exposée au chapitre 3 ;
4. on calcule la matrice $\mathbf{D}$ et le vecteur $\mathbf{t}$;
5. on calcule le tenseur d'amorçage $\hat{\mathcal{T}}$et le tenseur $\mathcal{T}$;

6. pour chaque paire d'images gauche et droite acquises, on calcule les contours par un détecteur de Sobel, on les met en correspondance et on les transfert dans la nouvelle image.

4.6.3 Applications

Considérons le montage stéréoscopique avec deux microscopes TIMM 400 de la station expérimentale (figure 3.22).

Le calculateur est de type PC (Pentium (R) D, CPU 2.80 GHz, 2 GB of RAM) fonctionnant sous WinXP. Les langages de programmation sont C++ and Matlab (R).

Une première expérience a été réalisée avec les images statiques d'une roue dentée (500 μm de diamètre) entre les doigts d'une pince, en position de prise. Les deux objets sont en plastique clair, alors que le fond est noir : les images délivrées par les microscopes sont donc suffisamment contrastées pour être facilement traitées (figure 4.12).

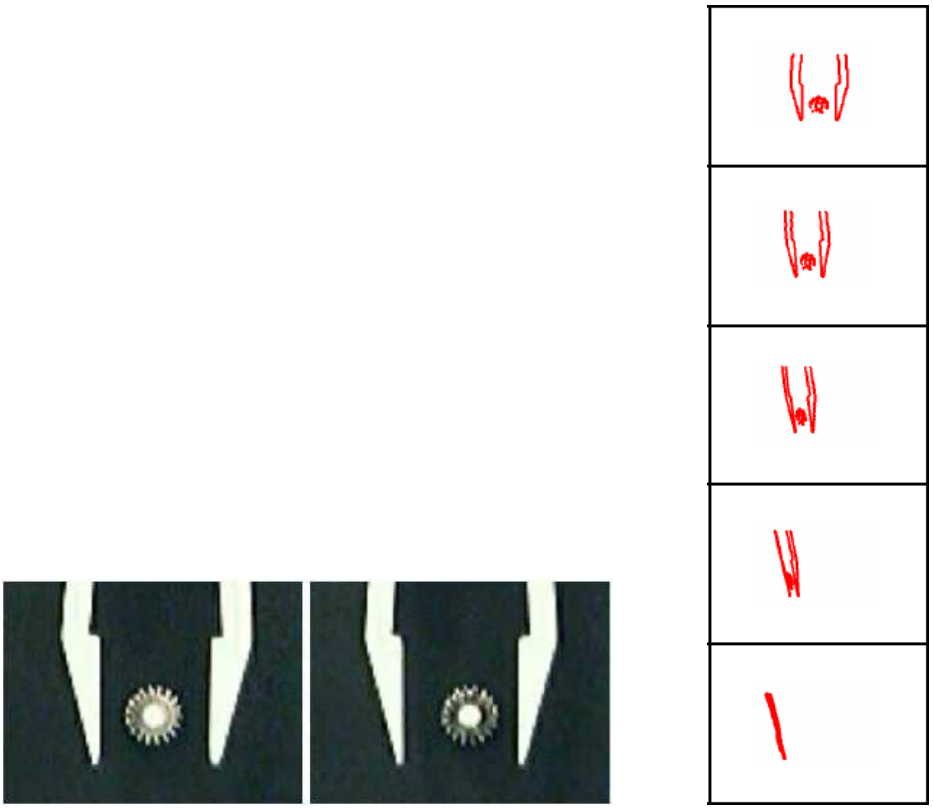


FIGURE 4.12 – A droite les images réelles d'objets en plastique clair, à gauche le transfert des contours dans les images virtuelles pour un angle α variant de 0° à 80° : la roue est bien positionnée entre les deux doigts de la pince.

La deuxième expérience a été réalisée avec une pince et une pièce en silicium oxydé : ils sont de couleur sombre comme le fond de la scène et conduisent à des images moins bien contrastées que précédemment, mais conformes à la réalité de la micro-nano-robotique. La pièce mesure 400 μm $\times$ 400 μm $\times$ 100 μm. La figure 4.13 montre deux images et les contours des images virtuelles pour un angle α variant de 0° à 80°.

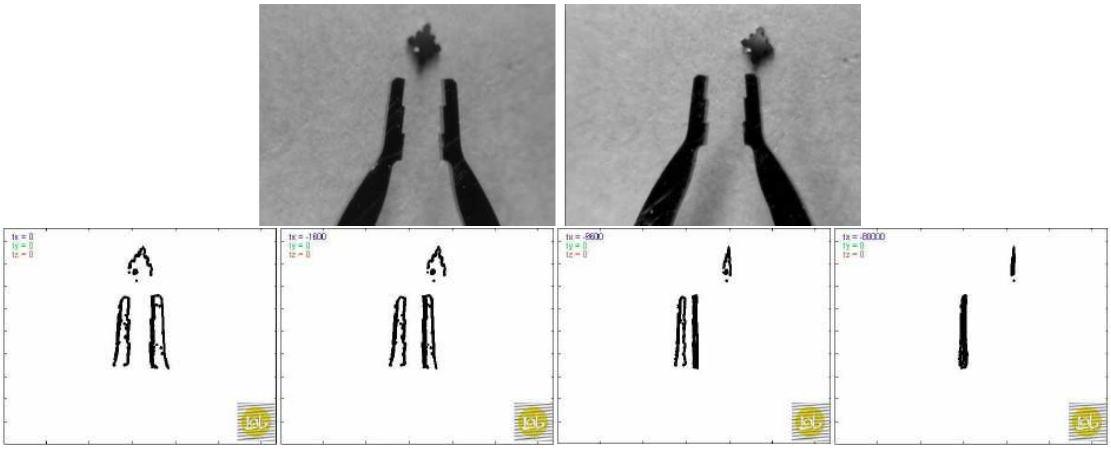


FIGURE 4.13 – En haut les images réelles d'objets en silicium, en bas le transfert des contours dans les images virtuelles pour un angle α variant de 0° à 80° : la pièce est bien positionnée au dessus des deux doigts de la pince.

Ces deux expériences ont permis de montrer que la position $\alpha = 80°$ est idéale pour observer latéralement la scène et en calculer l'information de profondeur, notamment la position relative entre une pince et une cible à attraper. Dans la troisième expérience α est fixé à 80° et un troisième microscope TIMM 400 est positionné latéralement à la même position. Un déplacement de la pince de 424 μm est réalisée, et les images virtuelles générées au départ et à la fin. Le déplacement est estimé dans les images virtuelles et réelles. On a mesuré un déplacement de 39 pixels et 42 pixels entre les images virtuelles et réelles, respectivement. Cela correspond à une erreur relative inférieure à 0.1 pixels. Les vues virtuelles reproduisent bien la géométrie de la scène et peuvent parfaitement être utilisées pour réaliser des mesures.

Dans la quatrième expérience, le montage précédent est conservé. Le flux d'images virtuelles calculées a été utilisé pour réaliser le positionnement précis de la pince par rapport à la pièce suivant une approche d'asservissement visuel : les mesures de position sont effectuées dans le flux d'images virtuelles (figure 4.14). Les spécifications du flux ont été : 640 $\times$ 480 pixels à la cadence de 6 Hz.

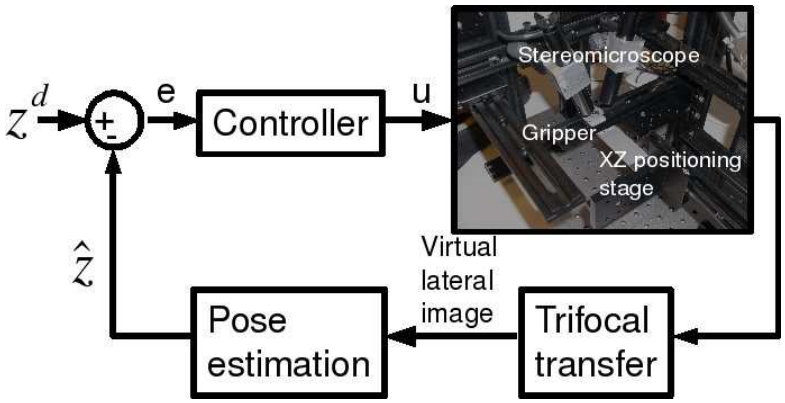


FIGURE 4.14 – Le schéma-bloc de l'asservissement visuel dans les images virtuelles.

La loi de commande $u(kT)$ de la platine est fondée sur la descente polynomiale de l'erreur entre la consigne $z*$ et la mesure $z(kT)$:

$$u(kT) = \frac{z* - z(kT)}{k} \tag{4.18}$$

avec k le numéro d'itération T la période d'échantillonnage.

La figure 4.15 montre les images initiale et finale et les images réelles correspondantes délivrées par le microscope réel positionné latéralement. L'évolution de l'erreur en fonction du numéro d'itération est indiquée à la figure 4.16. On vérifie bien une descente polynomiale vers une erreur finale d'environ 3 μm.

4.7 Conclusion

L'objectif de cette partie des recherches concernait les challenges scientifiques et technologiques en rapport avec la synthèse des images : développement de méthodes de synthèse robustes aux imprécisions des modèles géométriques des imageries.

Nous avons commencé par sélectionner parmi les multiples estimateurs de netteté, un estimateur qui établissait un bon compromis entre précision de mesure et rapidité de calcul : l'estimateur fondé sur la variance. Nous l'avons ensuite utilisé pour calculer la position spatiale des points nets d'une séquence d'images et en déduire le modèle 3D de la surface de la cible imagée. Nous avons ensuite établi que dans le cadre d'une cible allongée le modèle pouvait servir à estimer sa position spatiale de la cible.

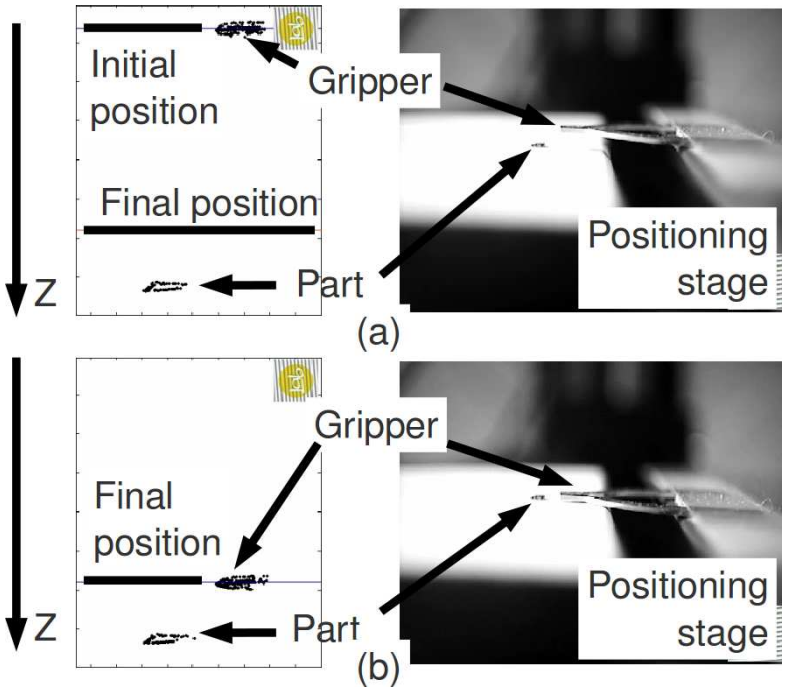
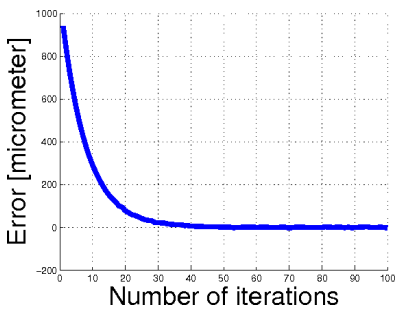
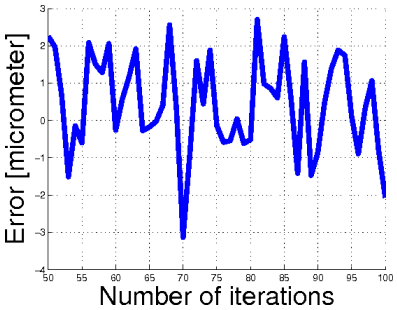


FIGURE 4.15 – Positionnement de la pince par rapport à la pièce : (a) les vues initiales virtuelle et réelle, respectivement ; (b) les vues finales virtuelle et réelle, respectivement.



(a) Evolution de l'erreur sur 100 itérations.



(b) Zoom sur les 50 dernières itérations.

FIGURE 4.16 – Positionnement de la pince par rapport à la pièce : évolution de l'erreur en fonction du numéro d'itération.

Nous avons ensuite décrit comment le mosaïquage peut être utilisé pour construire des microscopes virtuels mariant une grande résolution avec un grand champ de vision. Une image de fond est d'abord construite en recalant et en fusionnant les images successives de la scène. Les flux d'images sont alors projetés en temps réel dans cette image de fond.

Pour finir, nous avons exposé, une méthode de synthèse de microscope virtuel fondée sur le transfert des pixels de deux images dans une troisième en utilisant la contrainte géométrique entre les trois vues. La qualité et la rapidité des flux virtuels sont suffisamment élevées pour pouvoir réaliser le suivi d'informations de même que l'asservissement visuel.

Tous ces développements ont été validés. Cependant, ils gagneraient à un codage optimisé pour pouvoir être utilisés de manière quotidienne.

La synthèse par mosaïquage et par transfert trifocal ont été développées dans la thèse de Julien Bert de 2004 à 2007. Quant à la reconstruction 3D par netteté, elle a été développée dans le cadre de la thèse de Brahim Tamadazte de 2006 à 2009.

Chapitre 5

Asservissement visuel

5.1 Introduction

L'asservissement visuel, également appelé commande référencée vision, désigne l'utilisation d'informations extraites d'un flux d'images pour commander les mouvements d'un robot. A ce titre, il fait intervenir outre un robot, une imagerie, une vision et évidemment un contrôleur (figure 5.1). Le robot peut être un manipulateur ou un positionneur, aux échelles, macro, micro ou nano métrique. L'imagerie peut être n'importe quelle source d'images :caméra, microscope, échographe, fluoroscope, IRM, scanner tomographique, ... Les informations utilisées doivent traduire la position spatiale relative entre l'imagerie et le robot.

L'asservissement visuel est fondamentalement un problème de commande non-linéaire du fait de la non-linéarité du couple (robot, imagerie). A cela, il faut également ajouter l'éventuel retard provenant du temps nécessaire pour acquérir l'image et en tirer les informations [151],[162], [189], [194].

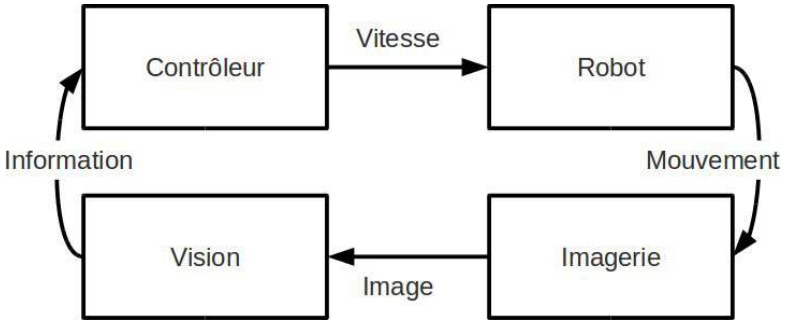


FIGURE 5.1 – Le principe de l'asservissement visuel.

L'asservissement visuel est utilisé avec succès pour automatiser un nombre important d'applications :

- industrielles comme le soudage, l'assemblage, la peinture, le transfert de pièces [196],
- sous-marines ou spatiales comme l'exploration ou la manipulation [207],[185],
- médicales comme la chirurgie [204], [205].

Selon le type de la liaison entre imagerie et robot, deux configurations peuvent être distinguées :

- l'imagerie est portée par le robot, ses déplacements induisent donc ceux de l'imagerie, on parle de configuration *eye-in-hand*,
- la source est fixée dans l'espace et observe les déplacements du robot, on parle de configuration *eye-to-hand*.

La dernière configuration est obligatoire lorsque l'imagerie est trop lourde pour le robot, c'est typiquement le cas du microscope, du CT scanner, de l'IRM. Les développements mathématiques dans les deux configurations sont similaires au signe négatif près.

Le signal de commande délivré par un asservissement visuel est la vitesse spatiale (torseur cinématique) de l'imagerie dans le repère du robot : l'asservissement visuel est une commande cinématique. Cependant, deux cas peuvent être distingués selon le mode opératoire.

- Si le robot dispose d'une baie de commande en position des joints, ce qui est le cas de la plupart des robots commerciaux, la vitesse doit juste être intégrée sur la période d'échantillonnage pour obtenir la position à appliquer sur cette commande. L'avantage de ce mode *cinématique* est le bénéfice d'intégrateur pur dans la boucle. Ces inconvénients sont : la lenteur et la non prise en compte de tout impact de l'échantillonnage, des erreurs de conversion et des effets dynamiques. Cette approche a été utilisée avec succès pour commander des robots aussi bien industriels conventionnels [189] que industriels et scientifiques micro-métriques pour des taches de manipulation et d'assemblage [14].
- D'un autre coté, si le robot ne dispose pas de baie de commande en position des joints, une modélisation dynamique du robot est nécessaire pour établir le lien entre vitesse, position, couple et tension de commande. Les avantages de cette approche sont la rapidité et la prise en compte de l'échantillonnage, de la conversion et des effets dynamiques. Elle a été utilisée avec succès pour les tâches de suivi des déplacements rapides du cœur [143] ou d'un robot parallèle [182].

En fonction du type d'information utilisée, trois cas peuvent être considérés.

- En asservissement visuel 2D ou asservissement visuel référencé image (*IBVS*), l'information utilisée est de type 2D et donc calculée directement dans les images. Il peut s'agir de coordonnées de points d'intérêt, d'équations de droites, d'intensité de pixels, d'entropie, ... Cette approche donne des résultats précis mais souffre du non contrôle de la trajectoire dans l'espace 3D.
- En asservissement visuel 3D ou asservissement visuel référencé position (*PBVS*), l'information est de type 3D et obtenue à partir des informations 2D extraites des images. Il s'agit de la position et l'orientation de la cible. Cette approche permet le contrôle de la trajectoire dans l'espace mais donne des résultats moins précis que précédemment du fait des erreurs d'étalonnage et de calcul.

Il est évidemment possible de combiner les deux approches [97]. Dans tous les cas, le nœud demeure le suivi de l'information dans le flux d'images [189].

5.2 De l'asservissement visuel en micro-robotique

De manière globale, pour le moment il y a peu d'applications industrielles avérées, hormis l'industrie horlogère qui commence à utiliser depuis peu des versions réduites de macro-robots industriels pour réaliser des tâches de transfert entre postes ou d'assemblage, et bien sûr l'industrie électronique qui développe des solutions *ad hoc* pour les MEMS phares que sont les accéléromètres, les gyroscopes, les magnétomètres et les microphones (*flip-chip* notamment) [183]. Les applications demeurent pour le moment au niveau scientifique avec la validation de concepts, notamment pour les produits opto-électroniques.

Beaucoup de travaux ont été faits en micro-robotique (développement de micro-robot, positionnement, manipulation, assemblage, ...) que nous ne souhaitons pas résumer ici, nous limitons notre attention à ceux dans lesquels l'asservissement visuel est mis en œuvre. Dans tous les cas la tâche générique la plus étudiée est l'insertion d'une cheville dans un trou cylindrique.

Les premiers travaux significatifs sont l'œuvre de l'équipe de B. J. Nelson ([94], [106], [202], [102]). Elle a réalisé l'insertion automatisée d'une cheville de 229 μm de diamètre dans un trou de 254 μm de diamètre avec une erreur finale de 2.2 μm. On notera le niveau élevé du jeu mécanique : 25 μm. Dans ce travail un microscope optique avec quatre objectifs de grandissement 2×, 10×, 20× et 50×, est utilisé, permettant aux auteurs de réaliser un asservissement à quatre échelles de grossier à fin : le processus passe successivement de 2× au début à 50× à la fin. Ils ont construit leur loi de commande LQ de chaque boucle par l'utilisation d'une matrice d'interaction intégrant le grandissement et la position normalisée de points dans les images. L'équipe a également réalisé l'assemblage semi-automatique d'un produit pédagogique ([125], [150]). Le cœur du travail est l'insertion de chevilles

de 500 μm $\times$ 100 μm dans une série de trous de 520 μm $\times$ 110 μm à l'aide d'un système comprenant deux robots à quatre degrés de liberté et quatre imageries. Le jeu mécanique varie entre 10 μm et 20 μm.

De même Tao et al. ([149]) ont réalisé l'insertion d'une cheville de 450 μm $\times$ 400 μm $\times$ 300 μm dans un trou de 650 μm $\times$ 500 μm $\times$ 300 μm selon le principe du grossier-à-fin, à la différence près qu'ils utilisent un zoom continu et non discret. On notera cette fois-ci un jeu mécanique encore plus élevé : il est compris entre 100 μm et 200 μm.

Les travaux suivants utilisent une commande hybride force position pour réaliser :

1. l'insertion d'une cheville de 80 μm de diamètre dans un alésage de 100 μm par Chen et al. ([126]),
2. l'insertion d'une cheville de 500 μm $\times$ 20 μm dans un trou de 550 μm $\times$ 500 μm par Enikov et al. ([128]),
3. l'assemblage d'une partie de montre réel comportant six composants (un socle, la roue et le pignon des minutes, la roue et le pignon des heures, une troisième roue et un troisième pignon)([114]),
4. l'assemblage d'un produit pédagogique de diamètre 2 mm comportant neuf pièces (2 arbres, 6 roues dentées, 1 base dentée) ([147],[171]).

La seconde tâche générique étudiée est l'insertion de fibres optiques dans des rainures en V.

Les travaux suivants en parlent : [118], [117], [154], [120].

Outre les cas précédents d'asservissement visuel appliqué, d'autres auteurs ont étudié le suivi d'information et l'asservissement visuel en micro-robotique d'un point de vue théorique. Ces études font surtout ressortir les problèmes de modélisation et d'étalonnage du microscope : [87], [106], [135], [142], [148]. De toutes les façons, comme la micro-robotique est une extension de la robotique, les développements déjà réalises en suivi ([133]) et asservissement visuel ([151], [162]) demeurent tous d'un potentiel intérêt.

D'autres auteurs se sont intéressés à l'organisation optimale de l'architecture de commande en proposant un paradigme multiniveaux : [96], [132].

5.3 Challenges scientifiques et technologiques

Comme beaucoup de nos collègues, nous avons choisi d'étudier la réalisation par asservissement visuel de la tâche d'insertion d'une cheville dans un alesage (figure 5.2). Nous avons, par contre, considéré les hypothèses suivantes :

1. la cheville et l'alésage sont prismatiques ;

2. le jeu mécanique est inférieur à 5 μm ;
3. il n'y a aucun forçage et pas de retour d'effort : on compte sur la précision de l'insertion déterminée par celle de la commande.

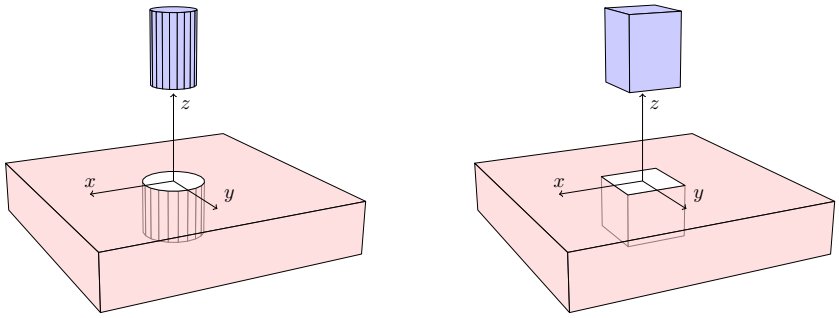


FIGURE 5.2 – Illustration de la tâche générique d'assemblage : cibles cylindriques (à gauche) et prismatiques (à droite)

Dans ces conditions, les défis scientifiques et technologiques sont alors importants :

1. développement de méthodes de suivi robustes, précises et rapides d'information dans les flux d'images des microscopes utilisés,
2. développement de lois de commande robustes, précises et rapides pour tendre vers la satisfaction des exigences exigences.

Pour ce faire, nous avons opté pour la pince à deux doigts comme outil de manipulation et des moyens comprenant deux microscopes optiques, un manipulateur, un positionneur et un robot mobile. Cela pose le problème de l'intégration matérielle et informatique qui a été traitée par les ingénieurs récrutés sur contrat.

5.4 Asservissement visuel et correction de la trajectoire d'un micro-robot mobile

Cette partie des travaux a fait l'objet d'une coopération avec Patrick Sandoz et Patrice Le Moal, tous les deux chargés de recherches CNRS à FEMTO-ST.

Nous nous plaçons dans le cadre général d'un micro-robot mobile évoluant sur une surface plane. Son intérêt réside dans le fait que son domaine atteignable est théoriquement infini. Sa combinaison avec tout positionneur et manipulateur permet d'augmenter mécaniquement le domaine atteignable de ce dernier.

Ce fonctionnement sur scène plane permet de faire porter au micro-robot une cible que l'on peut observer à l'aide d'un microscope de faible grandissement. La

position et l'orientation de la cible dans les images peuvent alors être utilisées pour commander le positionnement du robot (figure 5.3).

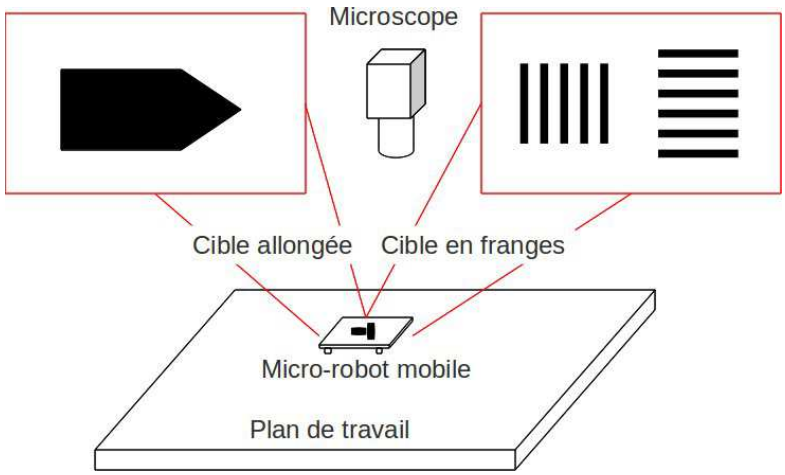


FIGURE 5.3 – Hypothèses expérimentales du suivi du micro-robot mobile.

5.4.1 Suivi de la position d'une cible en franges

Guidés par l'interférométrie où la mesure de franges d'interférence conduit à des performances exceptionnelles de mesure de position et de déplacement, nous avons choisi une cible constituée de deux réseaux P_1 et P_2 de franges d'égale fréquence f. Le suivi de celle-ci permet la commande précise du robot. Les réseaux sont tels que :

1. le nombre de franges N_1 de P_1 est différent du nombre de franges N_2 de P_2 ;
2. les franges de P_2 sont perpendiculaires à ceux de P_1.

Soit $\mathcal{R}_I = (O, X, Y)$, le repère image du microscope.
Soit D_1 (respectivement D_2) la droite médiane du réseau P_1 (respectivement P_2) dans $\mathcal{R}_I$.
Nous avons choisi de définir les coordonnées de la cible par celle du point P à l'intersection de P_1 et P_2 (figure 5.4) :

$$P = D_1 \cap D_2 \tag{5.1}$$

Calcul des droites médianes

La droite D_1 (respectivement D_2) est obtenue par la régression linéaire des points milieux M_i du réseau P_1 (respectivement P_2).

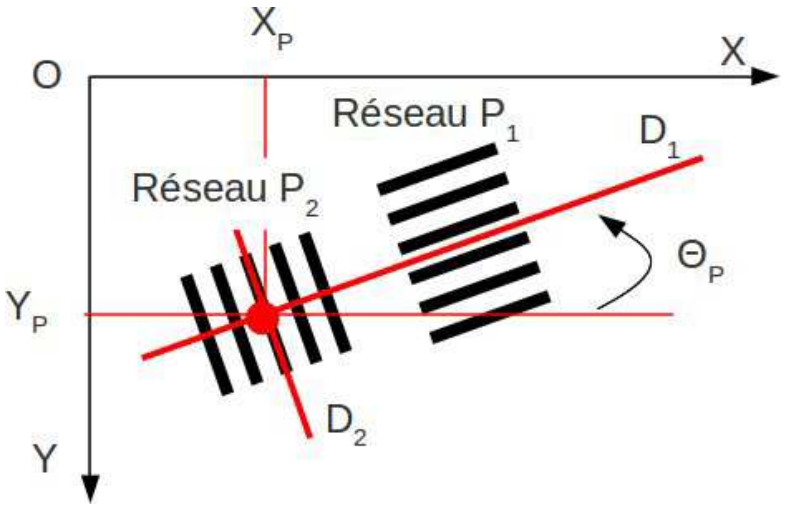


FIGURE 5.4 – Principe du suivi des coordonnées de P.

Soit $(x_i \quad y_i)^\top$ les coordonnées de M_i.

L'originalité du suivi et ses performances résident dans le calcul de ces coordonnées : la coordonnée y_i (respectivement x_i) de chaque point M_i de P_1 (respectivement P_2) est calculée à partir de la moitié de la phase déroulée $\varphi_{x_i}(y)$ (respectivement $\varphi_{y_i}(x)$) du signal $s(y)$ (respectivement $s(x)$) entre les limites $[L_{min} \quad L_{max}]$ du réseau P_1 (respectivement P_2) le long de la colonne x_i (respectivement la ligne y_i).

En effet, la phase déroulée $\varphi_{x_i}(y)$ est normalement une droite telle que :

1. $\varphi_{x_i}(L_{min}) = 0$;
2. $\varphi_{x_i}(L_{max}) = -(2N_1 + 1)\pi$;
3. $\varphi_{x_i}(y_i) = \frac{\varphi_{x_i}(L_{max}) - \varphi_{x_i}(L_{min})}{2} = -(N_1 + 0.5)\pi$;
4. $\varphi_{x_i}(y) = \alpha_{x_i} y + \beta_{x_i} \quad \forall L_{min} < y < L_{max}$.

avec α_{x_i} et β_{x_i} deux réels.

De même, la phase déroulée $\varphi_{y_i}(x)$ est une droite vérifiant les conditions précédentes en intervertissant x et y, N_1 et N_2 ainsi que x_i et y_i.

L'ondelette de mère de Morlet connue pour ces facultés à calculer avec une grande résolution les limites et la phase est utilisée pour ce faire ([199], [79], [198], [195]) :

$$\psi(u) = e^{-(\frac{u}{L_w})^2}(\cos 2\pi\nu u + j \sin 2\pi\nu u) \tag{5.2}$$

avec :

1. ν la fréquence en pixels des franges, c'est-à-dire $\nu = kf$ où k est le facteur d'échelle ;
2. L_w est un réel appelé la longueur de l'ondelette.

Les limites $[L_{min},\ L_{max}]$ et la phase φ sont extraites de la transformée en ondelette de Morlet W_s du signal $s(u)$:

$$W_s = \sum w_u(1,u) \tag{5.3}$$

avec $w_u(1,u)$ le coefficient d'ondelette de $s(u)$ au point u :

$$w_u(1,u) = \sum_{v=-\frac{H}{2}}^{v=+\frac{H}{2}} s(u+v)\psi(v) \tag{5.4}$$

où H est le domaine de définition de $s(u)$.

Au final :

1. la régression linéaire des points M_i de P_1 conduit à la droite D_1 d'équation :

$$y = a_1 x + b_1 \tag{5.5}$$

2. la régression linéaire des points M_i de P_2 conduit à la droite D_2 d'équation :

$$x = a_2 y + b_2 \tag{5.6}$$

On en déduit les coordonnées suivantes de P :

$$X_P = \frac{a_1 b_2 + b_1}{1 - a_1 a_2} \tag{5.7}$$

$$Y_P = \frac{a_2 b_1 + b_2}{1 - a_1 a_2} \tag{5.8}$$

$$\Theta_P = \arctan a_1 \tag{5.9}$$

Description de la méthode

La méthode de suivi comprend les phases ci-dessous.

1. On acquiert l'image.
2. On détecte et isole chaque réseau.
3. On calcule la transformée de Fourier rapide pour déterminer la fréquence ν des franges, l'ondelette mère de Morlet courte permettant le calcul exact des limites des réseaux, l'ondelette mère de Morlet longue permettant le calcul exact des phases et le facteur d'échelle k.

4. Pour le réseau P_1 (respectivement P_2) on applique les ondelettes courte et longue sur un nombre suffisant de colonnes (respectivement lignes) pour calculer les points milieux et l'équation de la droite médiane D_1 (respectivement D_2).
5. Enfin on calcule les coordonnées du point d'intersection des droites D_1 et D_2 selon les équations ci-dessus.

Evaluation de la méthode

La méthode a été évaluée dans les conditions expérimentales décrites ci-dessous.

La cible est une plaque en verre dépoli où les réseaux sont gravés par photolithographie. Le réseau P_1 (respectivement P_2) comprend $N_1 = 18$ (respectivement $N_2 = 16$) de motifs rectangulaires de 250 μm de largeur, soit des franges de période 500 μm ou de fréquence $f = 0.002\mu\text{m}^{-1}$. Elle est illuminée par le dessous à l'aide d'une source à base de LED et observée à 20 cm par un microscope délivrant des images de 512 $\times$ 512 pixels à 25 Hz (figure 5.5).

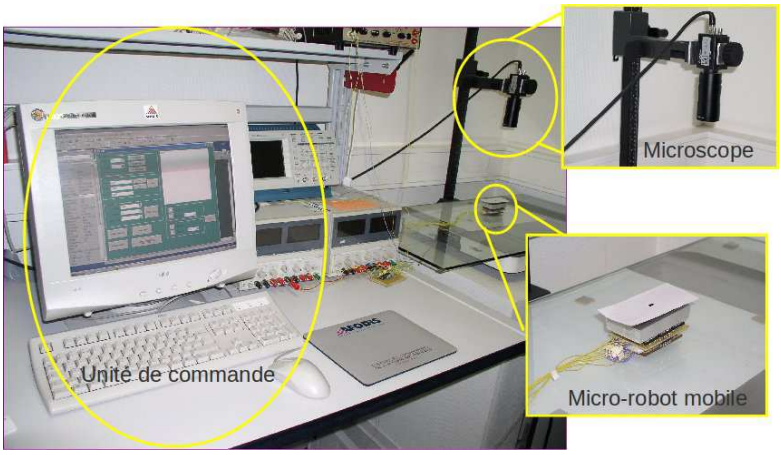


FIGURE 5.5 – Plateforme expérimentale d'étude du micro-moteur linéaire ultra-sonore.

Les figures 5.6, 5.7, 5.8 et 5.9 montrent respectivement un signal (fréquence ν = 62 pixel^{-1}), le module de sa transformée en ondelette courtes (L_w = 0.7), la phase de sa transformée en ondelette longue (L_w = 1.3) et les droites imprimées sur l'image de la cible.

La résolution de mesure déterminée par l'écart-type de mesure des droites médianes est de 0.01 pixel.

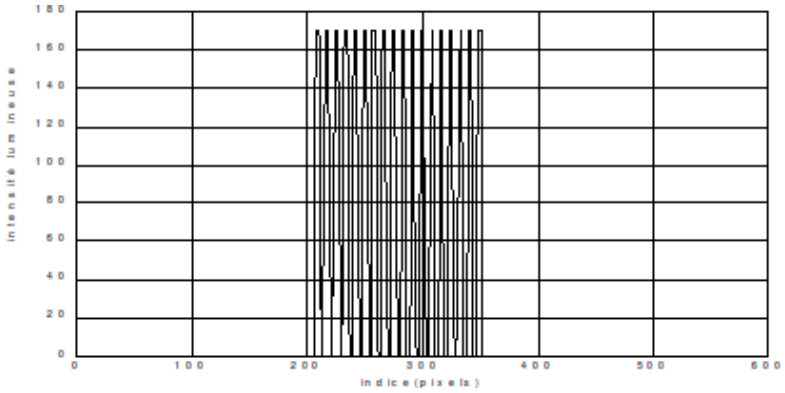


FIGURE 5.6 – Le signal $s(x)$ d'une colonne.

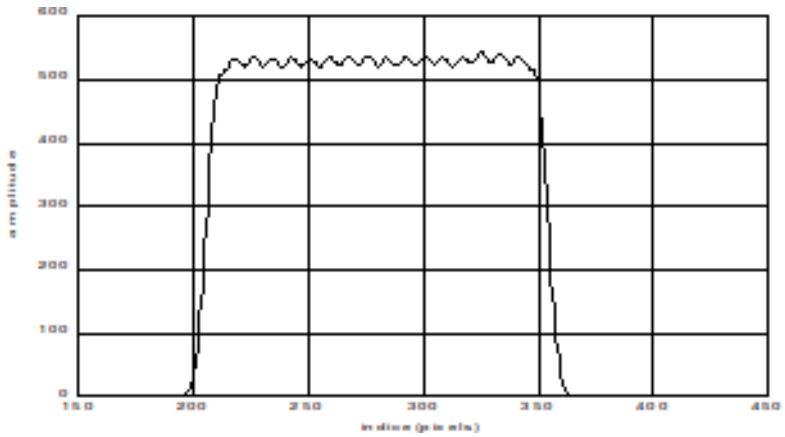


FIGURE 5.7 – L'amplitude de la transformée en ondelette longue du signal $s(x)$.

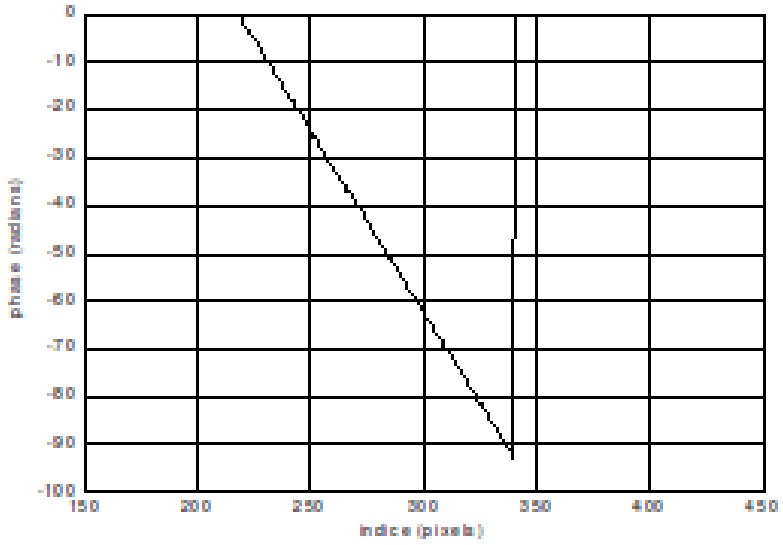


FIGURE 5.8 – La phase de la transformée en ondelette longue du signal $s(x)$.

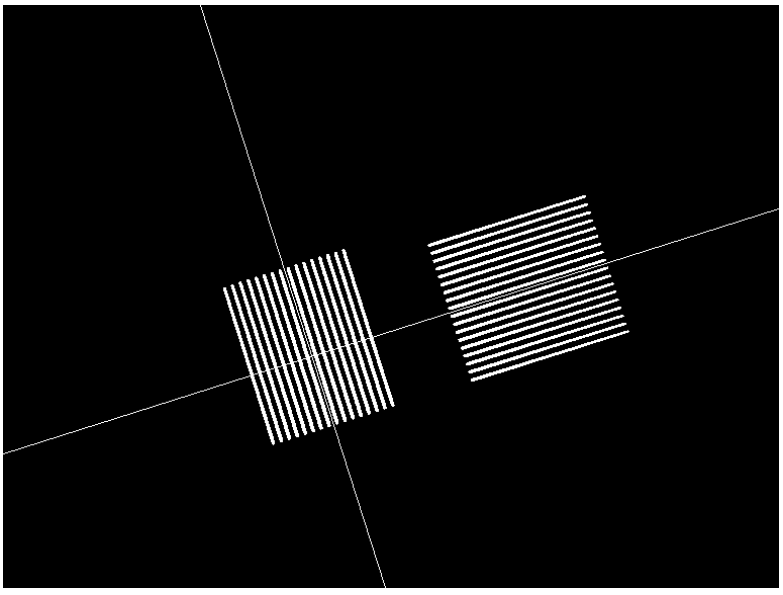


FIGURE 5.9 – Les droites médianes des deux réseaux imprimées sur l'image de la cible.

5.4.2 Application

Considérons le cas particulier du micro-robot mobile construit autour d'un micro-moteur linéaire ultra-sonore à ondes stationnaires [98]. Ce dernier est un résonateur-glisseur capable de réaliser des mouvements en translation et rotation sur des surfaces dures et lisses. Un ensemble de 4×5 céramiques piézo-électriques de type PZT (Plomb-Zirconium Titanate) est collé sur une plaque en bronze- beryllium de 64 mm × 38 mm × 2.5 mm et permet d'y créer des ondes stationnaires de volume. Quatre pieds de 3 mm de longueur sont judicieusement disposés sur le dessous dudit résonateur ; leur friction avec le plan de travail convertit les ondes stationnaires en mouvements de glissement (figure 5.10, 5.11). Le poids du système est d'environ 70 g et nous l'avons utilisé sur une surface en verre.

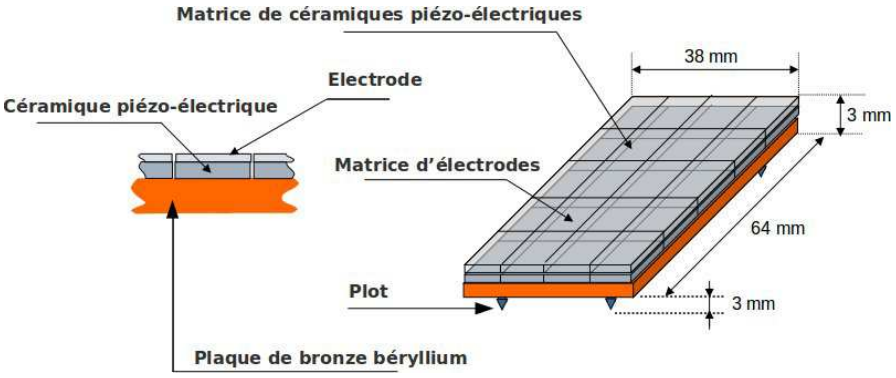


FIGURE 5.10 – Les composants du micro-moteur ultra-sonore.

L'organisation des céramiques permet l'excitation des modes de vibration 4 et 6 longitudinaux (axe X) et des modes de vibration 3 et 5 transverses (axe Y), selon l'application des tensions $U \sin 2\pi ft$ et $U \sin(2\pi ft + \pi)$. La correspondance mode de vibration, fréquence et déplacement est indiquée dans le tableau 5.1 où un mode dégénéré est utilisé pour générer les déplacements en rotation.

Le micro-robot est conçu pour fonctionner comme un système monovariable : à tout moment un seul déplacement est commandé. L'entrée est la tension d'alimentation $U \sin 2\pi ft$ tandis que la sortie est la vitesse du déplacement souhaité (figure 5.12).

L'analyse expérimentale du comportement du micro-robot nécessite le suivi le plus exact possible de sa position. La méthode de la cible en franges avec sa résolution de 0.01 pixel convient parfaitement. Cependant du fait du très faible niveau de la force tangentielle du micro-robot, son comportement s'est trouvé perturbé par les câbles d'alimentation de la cible en franges, nous conduisant à choisir une méthode par auto-corrélation normalisée à moyenne nulle avec un sur-échantillonnage

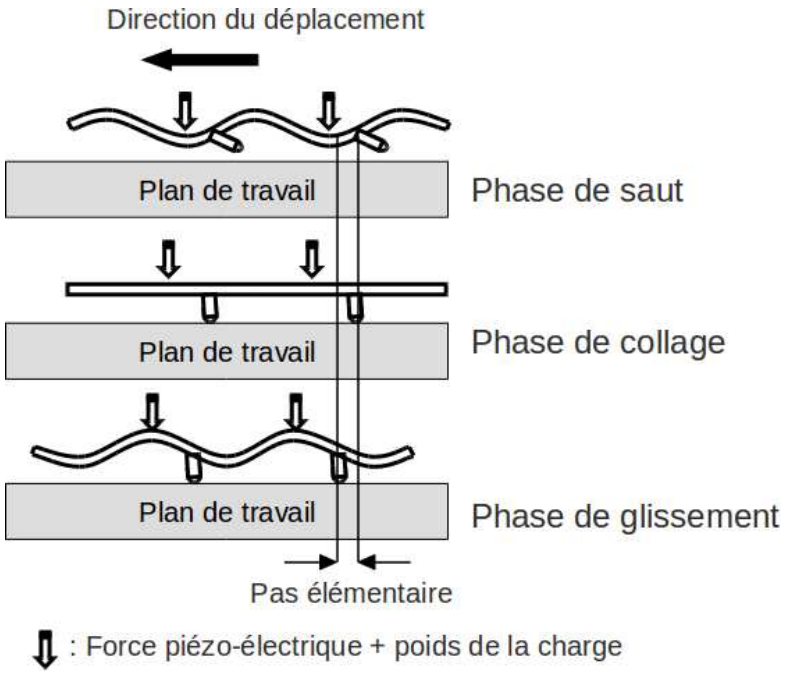


FIGURE 5.11 – Le mode de déplacement du micro-moteur : stick-slip.

Déplacement	Mode	Fréquence (kHz)
$X+$	(6,0)	35.7
$X-$	(4,0)	15.4
$Y+$	(0,5)	63
$Y-$	(0,3)	20
$\Theta+$	(0,5)	26.5
$\Theta-$	(0,5)	19.5

TABLE 5.1 – Correspondance entre déplacement, mode de vibration et fréquence

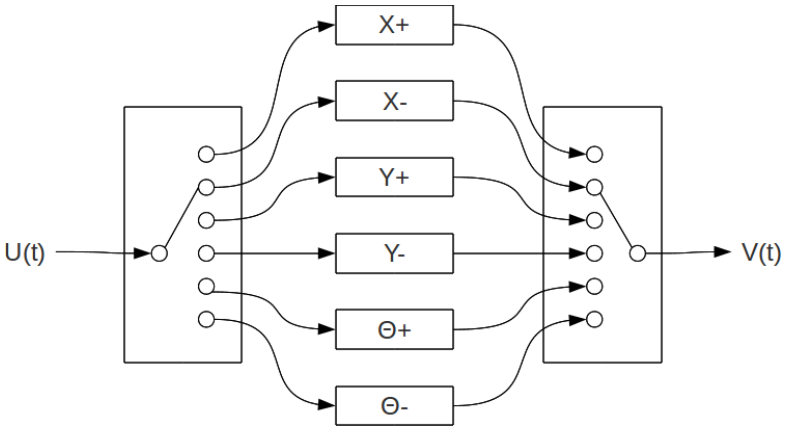


FIGURE 5.12 – Schéma-bloc du micro-robot.

à 0.025 pixel.

Le montage expérimental de la figure 5.5 et la méthode de suivi par auto-corrélation ont permis de réaliser l'analyse complète du fonctionnement du micro-robot : évolution de la vitesse de déplacement en fonction de la fréquence et l'amplitude du signal d'alimentation, de la valeur de la masse transportée, du temps. Elle a permis de montrer le couplage des déplacements qui a pour conséquence l'impossibilité d'obtention de trajectoire rectiligne sans boucle fermée de correction de la position du micro-moteur. Pour ce faire un asservissement visuel de type *look-then-move* a été mis en œuvre et a permis d'obtenir des trajectoires rectilignes (figure 5.13).

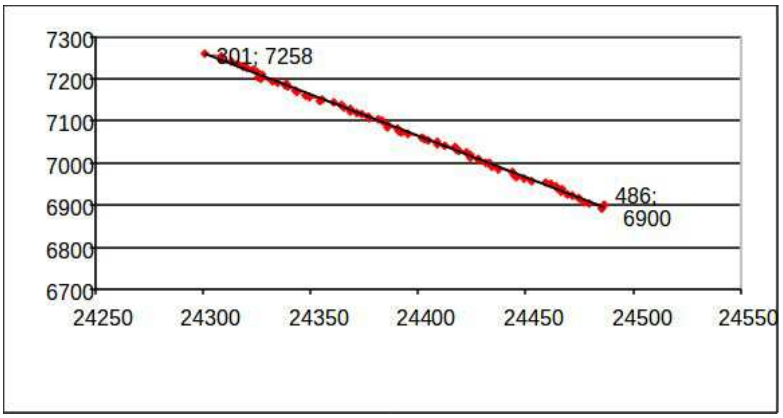


FIGURE 5.13 – Un exemple de trajectoire corrigée : les valeurs maximales de l'erreur sont 1 μm selon, l'axe X, 3 μm selon l'axe Y et 0.4° selon l'orientation.

5.5 Asservissement visuel et micro-manipulation

Les parties suivi et asservissement visuel 3D de ces travaux ont fait l'objet d'une coopération avec Eric Marchand de IRISA/LAGADIC.

Nous nous plaçons dans un cadre complémentaire au précédent : le micro-robot (positionneur et manipulateur) est à domaine atteignable très faible en comparaison de sa version mobile. Il n'est plus question de lui faire porter une cible, et *a fortiori* l'imagerie, ce qui conduit fatalement à la configuration d'asservissement visuel *eye-to-hand* expliquée plus haut. En considérant un microscope à zoom variable (cf. chapitre 3), nous avons développé un asservissement visuel intégrant cette particularité : l'asservissement visuel multi-échelle.

5.5.1 Asservissement 2D multi-échelle

Comme le suggère son nom, cet type d'asservissement visuel utilise des informations 2D, c'est-à-dire extraites directement des images. Dans la multitude des informations possibles, nous nous sommes limités à la position de points caractéristiques. Les images de microscopes étant généralement peu contrastées (voir chapitre 3 sur les propriétés du microscope), le calcul robuste de ces points devient un challenge que nous avons relevé en validant deux méthodes de suivi.

suivi 2D avec ESM et contrainte géométrique

La méthode ESM (Efficient Second order Minimization) a été initialement développée par Malis [133], [169]. Elle traite le suivi comme un recalage d'homographie entre une image courante et une image de référence. Il s'agit de faire en sorte que l'image recalée se superpose le plus parfaitement possible à l'image de référence au niveau des intensités. Soient $p*$ et p deux pixels appariés d'intensité $I(p*)$ et $I(p)$ des images de référence et courante, respectivement. Soit $\mathbf{H}$ l'homographie (géométrique) entre les deux images.

Il s'agit de trouver la fonction de recalage des intensités $w(\mathbf{H})$ minimisant :

$$\frac{1}{2}\sum_{p*}\left(I(p*, w(\mathbf{H})) - I(p)\right)^2 \tag{5.10}$$

Un développement de Taylor à l'ordre deux de cette fonction permet d'en calculer une solution itérative efficace de l'optimisation fondée sur la matrice jacobienne.

ESM suppose des images relativement bien texturées, hors cela n'est pas souvent le cas de nos conditions expérimentales, aussi avons nous associé la contrainte suivante pour forcer la convergence : l'image de référence et sa version recalée doivent garder la même définition $X \times Y$.
La figure 5.14 montre l'application de cette méthode à une image de structure

mesurant 400 μm $\times$ 400 μm $\times$ 100 μm, obtenue par le microscope Leica MZ16A.

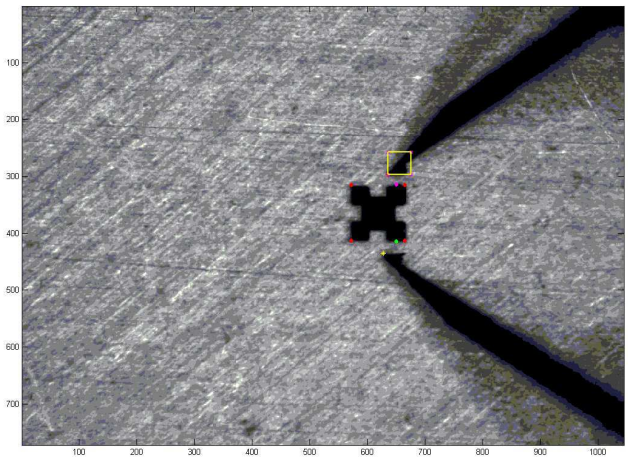


FIGURE 5.14 – Suivi 2D avec ESM et contrainte géométrique illustré sur une image de structure 400 μm $\times$ 400 μm $\times$ 100 μm et les doigts d'une pince, obtenue par le microscope Leica MZ16A.

suivi 2D avec détecteur SIFT et mise en correspondance

La méthode SIFT (Scale Invariant Feature Transform) est initialement de Lowe [131]. Les points détectés par SIFT sont invariants à l'échelle et à la rotation, et partiellement invariants au changement d'illumination et à l'angle de prise de vue. Ils sont bien localisés dans les deux domaines spatial et fréquentiel, réduisant la probabilité de perturbation par l'occlusion, l'encombrement, ou le bruit. La méthode comprend quatre phases principales :

1. calcul des extremum dans l'image traitée par un filtre DOG,
2. sélection des extremum stables,
3. calcul des points invariants à l'orientation, l'échelle et la position,
4. calcul des descripteurs de points peu sensibles à la distorsion et au changement d'illumination.

Les points détectés sont ensuite appariés en utilisant leurs descripteurs SIFT : le voisinage est défini dans *l'espace SIFT*.

La figure 5.15 montre l'application de cette méthode aux images courante et recherchée d'une fibre optique de 250 μm de diamètre, obtenues par le microscope

Leica MZ16A. Elle montre la pertinence de la méthode pour la manipulation de ces fibres par asservissement visuel sur notre plateforme expérimentale.

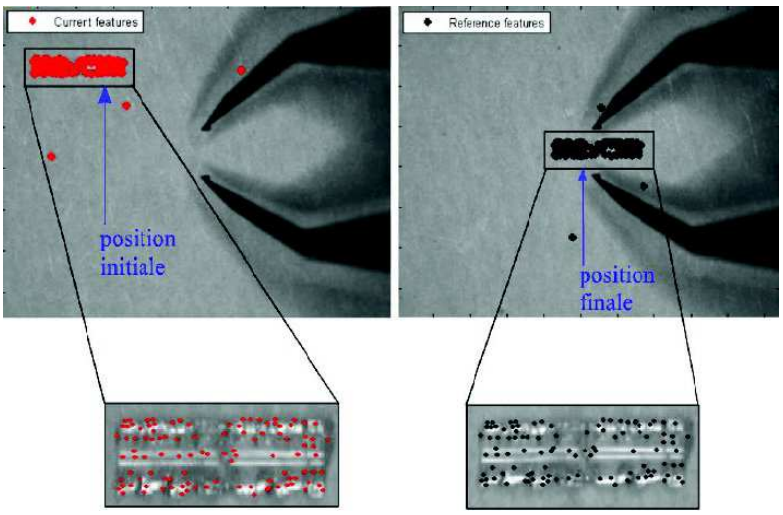


FIGURE 5.15 – Suivi 2D avec SIFT et appariement illustré sur deux images d'une fibre optique de 250 μm de diamètre, obtenues par le microscope Leica MZ16A.

Commande 2D multi-échelle

Les informations à manipuler sont les coordonnées normalisées des points d'intérêt : $p_i, i = 1...N$. Soient $p_i = (u_i, v_i)^\top$ les coordonnées du point p_i. Ses coordonnées normalisées $s_i = (x_i, y_i)^\top$ sont définies par :

$$x_i = x_i(\Gamma) = \frac{u_i - x_0}{mf(\Gamma)} \tag{5.11}$$

$$y_i = y_i(\Gamma) = \frac{v_i - y_0}{mf(\Gamma)} \tag{5.12}$$

avec x_0, y_0, m et $f(\Gamma)$ les paramètres intrinsèques du microscope au grandissement Γ.

La matrice d'interaction $\mathbf{L_i(Z*, \Gamma)}$ établissant la relation cinématique entre le microscope et la scène s'écrit :

$$L_i(Z*, \Gamma) = \begin{pmatrix} \frac{-1}{Z*} & 0 & \frac{x_i(\Gamma)}{Z*} & x_i(\Gamma)y_i(\Gamma) & -(1+x_i^2(\Gamma)) & y_i(\Gamma) \\ 0 & \frac{-1}{Z*} & \frac{y_i(\Gamma)}{Z*} & (1+y_i^2(\Gamma)) & -x_i(\Gamma)y_i(\Gamma) & -x_i(\Gamma) \end{pmatrix} \tag{5.13}$$

La donnée $Z*$ est la coordonnée Z du point de la scène correspondant à p_i dans l'image de référence. Il correspond à la distance microscope-scène et l'on peut le

calculer en mettant en œuvre la méthode de mesure de la netteté exposée au chapitre 3 (un avantage du microscope !).

Pour l'ensemble des points d'intérêt, on fait une concaténation des informations en s :

$$s = \begin{pmatrix} s_1 \\ \dots \\ s_N \end{pmatrix} \tag{5.14}$$

Pour la loi de commande, nous avons choisi d'utiliser l'approche de l'équipe IRISA/LAGADIC [151], qui consiste à imposer une descente exponentielle de l'erreur entre les informations de référence $s*$ et les informations extraites des images courantes s. Elle conduit à la loi suivante :

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = -\lambda L^+(Z*, \Gamma)(s - s*) \tag{5.15}$$

où :

1. $(v \quad \omega)^\top$ est la vitesse de la caméra dans le repère robot ;
2. $\mathbf{L}^+(\mathbf{Z*}, \mathbf{\Gamma})$ est la pseudo inverse de la matrice d'interaction $\mathbf{L}(\mathbf{Z*}, \mathbf{\Gamma})$ et est obtenue par concaténation des matrices $\mathbf{L_i}$:

$$L(Z*, \Gamma) = \begin{pmatrix} L_1(Z*, \Gamma) \\ \dots \\ L_N(Z*, \Gamma) \end{pmatrix} \tag{5.16}$$

Pour améliorer le taux de convergence et en même temps éviter les dépassements de consigne, le gain λ a également une évolution exponentielle décroissante selon la loi :

$$\lambda = \lambda_{min} + (\lambda_{max} - \lambda_{min}) e^{-\rho \|s - s*\|} \tag{5.17}$$

avec λ_{min}, λ_{max} et ρ valant 0.1, 1 et 40 respectivement.

Il peut arriver que l'on impose la trajectoire du robot : obtenue par exemple par la méthode des potentiels. Cela revient à avoir une consigne $s*$ variant avec le temps : $s*(t)$. Il faut dans ces conditions modifier la commande comme suit :

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = -\lambda L^+(Z*, \Gamma)(s - s*) + \lambda L^+(Z*, \Gamma) \frac{\partial s*(t)}{\partial t} \tag{5.18}$$

Le modèle cinématique du robot permet d'écrire les vitesses articulaires $\dot{q}$ par :

$$\dot{q} = \mathbf{J}^+ \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} \tag{5.19}$$

avec $\mathbf{J}^+$ la pseudo-inverse de la matrice jacobienne $\mathbf{J}$ du robot.

5.5.2 Asservissement 3D

Cet type d'asservissement visuel utilise des informations 3D c'est-à-dire spatiales. Ces informations s'obtiennent en deux phases : une extraction d'informations 2D des images puis leur utilisation pour calculer les informations finales. Ce processus à double phase augmente les risques d'erreur sur les résultats et constitue la grande limite de cette approche. Nos collègues de l'IRISA avaient développé une méthode de suivi utilisant le modèle CAO qui nous intéressait, il restait à savoir si cette méthode développée pour les objectifs faible grandissement était valide pour le microscope dont le grandissement est élevé.

suivi 3D avec modèle CAO

La méthode de suivi 3D est expliquée en détail dans la publication suivante de IRISA/LAGADIC : [152]. Elle repose sur un asservissement visuel 2D s'appliquant à un robot virtuel.

Soit $\mathbf{A}$ une cible de repère R_A.

Soient $s_i*, i = 1...N$, les informations obtenues dans une image courante de $\mathbf{A}$: elles constituent les informations de référence.

Soient $s_i(r), i = 1...N$, les mêmes informations obtenues en projetant le modèle CAO de $\mathbf{A}$ dans l'image courante en utilisant la position spatiale r de la caméra exprimée dans le repère de $\mathbf{A}$. Cette position spatiale peut s'exprimer par la matrice de passage de la caméra à $\mathbf{A}$ exprimée dans le repère de la caméra R_C : ${}^C\mathbf{M}_A$.

Le problème est de trouver la position r minimisant la somme des erreurs entre les différentes informations. Plutôt que d'utiliser un critère d'optimisation quadratique conduisant à un algorithme tel que Newton-Raphson ou Levenberg-Marquart, un critère intégrant un filtrage robuste pour pouvoir rejeter les données aberrantes est choisi par les auteurs :

$$\Delta = \sum_{i=1}^{N} \psi(s_i(r) - s_i*) = \psi(s(r) - s*) \tag{5.20}$$

avec ψ la fonction de Tuckey.

Cette formulation permet de transformer le problème en un asservissement visuel où la commande est la vitesse instantanée de la caméra virtuelle. La matrice d'interaction utilisée doit intégrer les paramètres intrinsèques du microscope.

L'algorithme implémenté dans la plateforme logicielle *VisP*, renvoie la position spatiale de $\mathbf{A}$ dans le repère caméra R_C : ${}^C\mathbf{M}_A$. Mais pour la commande on a besoin de la position de $\mathbf{A}$ dans le repère fixe de travail R_F : ${}^F\mathbf{M}_A$. Or la composition des matrices permet d'écrire :

$$^{F}\mathbf{M}_{A} =^{F} \mathbf{M}_{C} \quad ^{C}\mathbf{M}_{A} \tag{5.21}$$

Le problème est de calculer la matrice $^{F}\mathbf{M}_{C}$ qui correspond au passage de R_F à R_C exprimé dans R_F.

Les conditions expérimentales sont telles que : **A** étant posé sur le positionneur, les repères R_A et R_F sont coplanaires. Une translation calibrée selon l'axe X de R_F de **A** entre les positions 1 et 2 permet de calculer la matrice suivante :

$$^{A_{1x}}\mathbf{M}_{A_{2x}} = (^{C}\mathbf{M}_{A_{1x}})^{-1}(^{C}\mathbf{M}_{A_{2x}}) = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{3\times 3} & ^{A_{1x}}\mathbf{T}_{A_{2x}} \\ 0_{1\times 3} & 1 \end{pmatrix} \tag{5.22}$$

et d'en déduire le vecteur translation suivant :

$$^{A_{1x}}\mathbf{T}_{A_{2x}} = (t_{xx}, t_{xy}, t_{xz})^{\top} \tag{5.23}$$

De même une translation calibrée de **A** selon l'axe Y de R_F permet de calculer le vecteur translation suivant :

$$^{A_{1y}}\mathbf{T}_{A_{2y}} = (t_{yx}, t_{yy}, t_{yz})^{\top} \tag{5.24}$$

Le produit vectoriel de ces deux vecteurs permet de calculer un vecteur translation suivant l'axe Z de R_F :

$$^{A_{1z}}\mathbf{T}_{A_{2z}} =^{A_{1x}} \mathbf{T}_{A_{2x}} \times^{A_{1y}} \mathbf{T}_{A_{2y}} = (t_{zx}, t_{zy}, t_{zz})^{\top} \tag{5.25}$$

et de calculer la matrice de rotation $^{F}\mathbf{R}_{A}$ par :

$$^{F}\mathbf{R}_{A} = \begin{pmatrix} ^{A_{1x}}\mathbf{T}_{A_{2x}} \\ ^{A_{1y}}\mathbf{T}_{A_{2y}} \\ ^{A_{1z}}\mathbf{T}_{A_{2z}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{xx} & t_{xy} & t_{xz} \\ t_{yx} & t_{yy} & t_{yz} \\ t_{zx} & t_{zy} & t_{zz} \end{pmatrix} \tag{5.26}$$

en s'assurant que les propriétés d'une matrice de rotation sont vérifiées :

$$^{F}\mathbf{R}_{A} \quad (^{F}\mathbf{R}_{A})^{\top} = \mathbf{I}_{3\times 3} \tag{5.27}$$

$$det(^{F}\mathbf{R}_{A}) = 1 \tag{5.28}$$

On en déduit :

$$^{F}\mathbf{M}_{A} = \begin{pmatrix} ^{F}\mathbf{R}_{A} & 0_{3\times 1} \\ 0_{1\times 3} & 1 \end{pmatrix} \tag{5.29}$$

qui permet de calculer la matrice recherchée par :

$$^{F}\mathbf{M}_{C} =^{F} \mathbf{M}_{A} \quad (^{C}\mathbf{M}_{A})^{-1} \tag{5.30}$$

Dans nos expérimentations, nous avons choisi quatre points correspondant à quatre coins non coplanaires ($N = 5$, les 4 coins de la face visible et un dernier coin choisi sur une autre face). Les expérimentations ont été concluantes : on a pu suivre les coordonnées des pièces en silicium dans les images de la scène délivrées par un microscope positionné latéralement à la scène avec un angle de 45° avec la normale.

Commande 3D

Le suivi 3D décrit ci-dessus délivre à chaque instant la position spatiale s_A de **A** dans R_F par :

$$s_A = \begin{pmatrix} {}^F t_A \\ \theta u \end{pmatrix} \tag{5.31}$$

Les données ${}^F t_i$, θ et u correspondent à la position, l'angle de rotation et l'axe de rotation de **A** dans le repère R_F :

$${}^F\mathbf{M}_A = \begin{pmatrix} {}^F\mathbf{R}_A & {}^F t_A \\ 0_{1\times 3} & 1 \end{pmatrix} \tag{5.32}$$

Pour rappel si :

$$\mathbf{R}_A = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \tag{5.33}$$

alors θu vaut :

$$\theta u = \frac{1}{2 sinc(\theta)} \begin{pmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{pmatrix} \tag{5.34}$$

avec :

$$\theta = \arccos \frac{r_{11} + r_{22} + r_{33} - 1}{2} \tag{5.35}$$

$$sinc(\theta) = \frac{\sin \theta}{\theta} \tag{5.36}$$

Soit s_{A*} la position spatiale désirée de **A**. Elle peut être définie par :

$$s_A* = \begin{pmatrix} {}^F t_{A*} \\ 0 \end{pmatrix} \tag{5.37}$$

et obtenue par apprentissage, ou mieux à partir du modèle CAO de la cible.

En adoptant la descente exponentielle de l'erreur entre les positons s_A* et s_A, le positionnement de **A** est obtenu par la commande suivante :

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix}_F = -\lambda \begin{pmatrix} {}^F t_x - {}^F t_{x*} \\ {}^F t_y - {}^F t_{y*} \\ {}^F\mathbf{R}_A \theta u_\alpha \end{pmatrix} \tag{5.38}$$

Le gain λ de l'asservissement est défini comme pour l'asservissement 2D.

L'équation 5.19 permet de calculer les vitesses articulaires du robot.

5.5.3 Application élémentaire

Les cibles **A** et **B** considérées sont deux pièces en silicium oxydé obtenues par DRIE (Deep Reaction Ion Etching) c'est-à-dire par gravure ionique profonde. Elles mesurent 400 μm $\times$ 400 μm $\times$ 100 μm $\pm$ 1.5 μm avec des tranchées de 100 μm $\times$ 100 μm $\times$ 100 μm $\pm$ 1.5 μm sur chaque coté. L'application étudiée est l'insertion verticale des deux structures par leurs tranchées, ce qui conduit à un jeu mécanique entre -3 et +3 μm (figure 5.16).

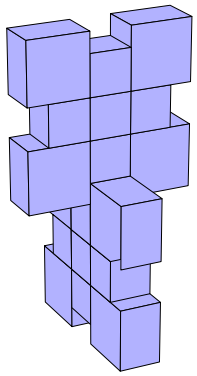


FIGURE 5.16 – Structure 3D à réaliser par insertion verticale de deux structures de 400 μm $\times$ 400 μm $\times$ 100 μm $\pm$ 1.5 μm par leurs tranchées de 100 μm $\times$ 100 μm $\times$ 100 μm $\pm$ 1.5 μm

La plateforme expérimentale est disposée dans un environnement faiblement contrôlé sur une table anti-vibration (figure 3.14 du chapitre 3). Elle comprend un positionneur à trois degrés de liberté xyα équipé d'un support compliant et un manipulateur à deux degrés de liberté zφ équipé d'une pince à deux doigts. Les robots permettent le positionnement horizontal et vertical des pièces. La pince comprend quatre degrés de liberté (deux par doigt) [140]. Un microscope positionné verticalement (Leica MZ16A) et un deuxième (Navitar 1-60113) positionné latéralement à 45° de la verticale assurent le retour visuel. Les spécifications sont détaillées dans le chapitre 3.

Le modèle cinématique du positionneur $xy\alpha$ s'écrit :

$$\begin{pmatrix} \dot{q_1} \\ \dot{q_2} \\ \dot{q_3} \end{pmatrix} = \mathbf{J_1} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_\alpha \end{pmatrix} \tag{5.39}$$

avec :

1. q_1 la translation d'axe X,
2. q_2 la translation d'axe Y,
3. q_3 la rotation d'axe Z,
4. $\mathbf{J_1}$ la matrice jacobienne valant :

$$\mathbf{J_1} = \begin{pmatrix} \cos q_3 & \sin q_3 & 0 & q_1 \\ -\sin q_3 & \cos q_3 & 0 & q_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{5.40}$$

Le modèle cinématique du manipulateur $z\varphi$ s'écrit :

$$\begin{pmatrix} \dot{q_3} \\ \dot{q_4} \end{pmatrix} = \mathbf{J_2} \begin{pmatrix} v_\varphi \\ \omega_\varphi \end{pmatrix} \tag{5.41}$$

avec :

1. q_4 la translation d'axe Z,
2. q_5 la rotation d'axe Y,
3. $\mathbf{J_2}$ la matrice jacobienne valant :

$$\mathbf{J_1} = \begin{pmatrix} a\cos q_5 & -a\sin q_5 & a & 0 \\ -\sin q_5 & \cos q_5 & 0 & 0 \\ -a\cos q_5 & a\sin q_5 & a & q_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{5.42}$$

avec $a = \cos 45°$ correspondant à l'angle de 45° entre l'axe de rotation et l'axe vertical.

Modélisation de l'application

Nous adoptons le principe classique en robotique qui consiste à réaliser une décomposition récursive de chaque tâche en une séquence de tâches de niveau inférieur jusqu'à obtention de tâches atomiques c'est-à-dire non décomposables. Il est utile de réaliser une description visuelle de ces séquences pour les appréhender facilement et pouvoir vérifier leur validité. Pour ce faire nous avons choisi d'utiliser les réseaux de Petri, mais nous aurions pu tout aussi bien utiliser le Grafcet.

La description par réseaux de Petri a respecté les conventions suivantes :

- une tâche est associée à une transition (éventuellement temporisée selon la durée de la tâche) et représentée par un rectangle ;
- un résultat de tâche (état) est associé à une place (éventuellement avec des jetons) et représentée par un cercle.

Au premier niveau, l'insertion de **B** dans **A** se décompose en un positionnement de **A** suivi d'un positionnement de **B** dans la tranchée de **A** (figure 5.17).

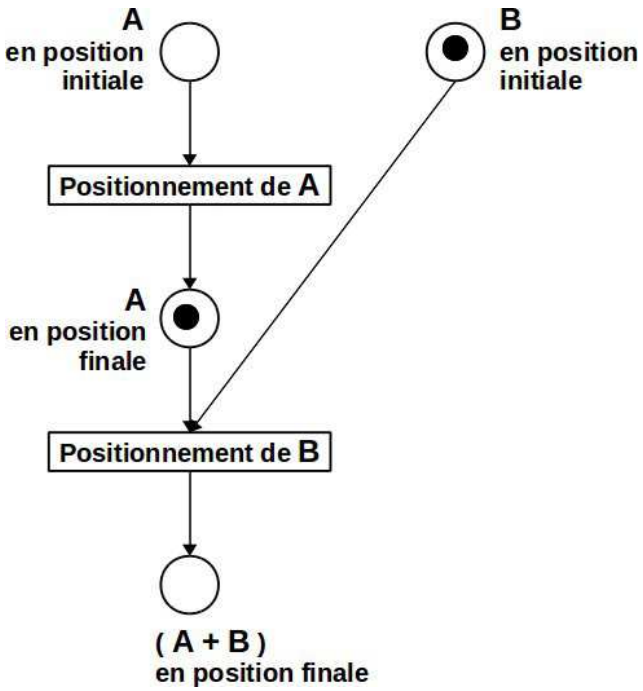


FIGURE 5.17 – Réseaux de Petri décrivant la séquence d'assemblage de **B** avec **A**.

Au deuxième niveau de décomposition, le positionnement de **A** correspond à une seule tâche de déplacement du fait que les pièces sont disposées sur la table du positionneur (figure 5.18).

Nous réalisons le positionnement de **B** selon la séquence (figure 5.18) :

1. prise de **B**,
2. déplacement de **B** jusqu'à la position de pré-insertion (déplacement de pré-insertion de **B**),
3. déplacement vertical de **B** jusqu'à la position finale (déplacement d'insertion de **B**),
4. lâcher de **B**.

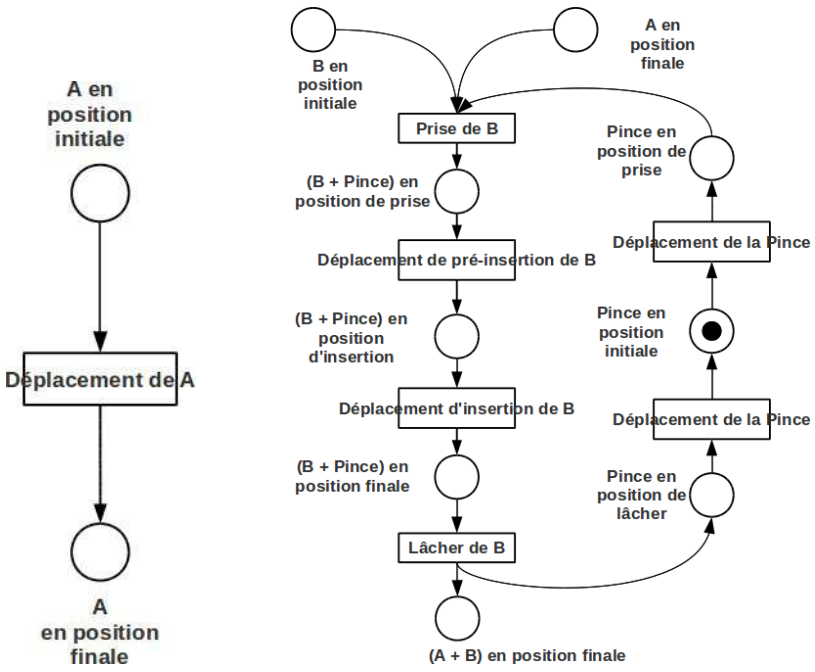


FIGURE 5.18 – Réseaux de Petri décrivant les séquences de positionnement de **A** (gauche) et **B** (droite).

La tâche d'insertion est la phase critique de la séquence, et ce d'autant plus que nous ne disposons pas de capteur de force de retour et ne pouvons procéder par forçage du fait de la fragilité de la pince et des pièces : nous ne pouvons compter que sur la précision de la commande. La phase de pré-insertion est introduite pour préparer cette phase : elle consiste à positionner **B** à la verticale de la tranchée d'insertion.

La qualité des tâches dépend fortement du couple (imagerie, asservissement visuel) utilisé. Pour notre cas, nous avons fait les choix suivants : (microscope vertical, asservissement visuel 2D) pour la réalisation des tâches de prise et lâcher, et (microscope latéral, asservissement visuel 3D) pour les tâches de déplacement. On notera que le microscope vertical (Leica MZ16A) est à zoom (donc grandissement) contrôlable par ordinateur ce qui permet d'utiliser l'asservissement multi-échelle décrit plus haut.

Asservissement visuel 2D et prise

Les prises de pièces sont décomposables en tâches atomiques suivantes : zoom avant, mise au point automatique, détection de la pièce, ouverture de la pince, alignement et centrage de la pièce par rapport à la pince, descente de la pince jusqu'au plan de prise, fermeture de la pince sur la pièce, zoom arrière, montée de

la pince avec la pièce (figure 5.19). Quatre systèmes sont commandés dans cette séquence : la pince (ouverture, fermeture), le manipulateur $z\varphi$ (montée, descente), le microscope vertical (zoom avant et arrière), le positionneur $xy\alpha$ (alignement, centrage).

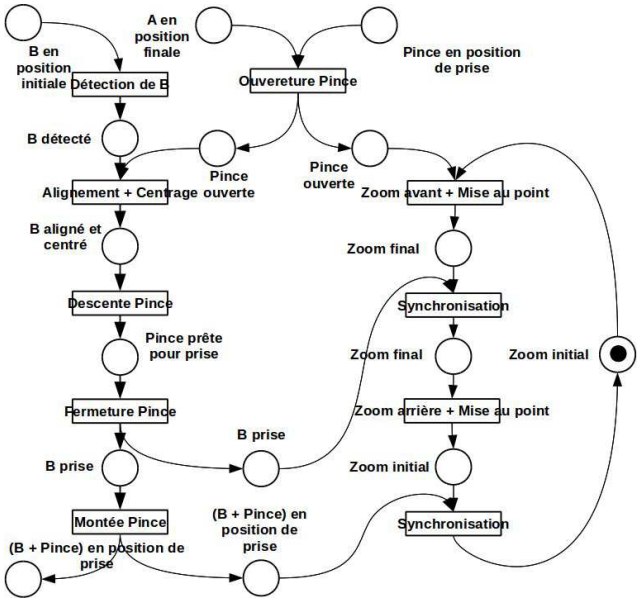


FIGURE 5.19 – La séquence de tâches pour la prise de la pièce **B**

La commande du positionneur est réalisée par asservissement visuel 2D avec décroissance exponentielle de l'erreur, en prenant comme informations visuelles s, les coordonnées-image s_i $(i = 1, 2, 3, 4)$ des quatre coins de la boîte englobante de la pièce. ESM est utilisée pour le suivi.

Le torseur cinématique correspondant est :

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_\alpha \end{pmatrix} = -\lambda L^+(Z*, \Gamma)(s - s*) \tag{5.43}$$

La distance pince- pièce **B** $Z*$ est obtenue à partir de la mesure de la netteté par la variance en déplaçant verticalement le microscope vertical depuis une position basse vers la position la plus haute possible. On obtient deux pics : le premier correspond à la scène avec la pièce et le deuxième à la pince. La différence de leur localisation correspond à $Z*$ (figure 5.20.

En dehors de la commande du positionneur, la valeur de $Z*$ est utilisée pour commander la descente et la montée de la pince. La mise au point automatique est obtenue par une synchronisation du déplacement du microscope sur celui du manipulateur. La fermeture de la pince est réalisée par une descente polynomiale des erreurs entre les positions de prise sur la pièce et celles mesurées sur les doigts

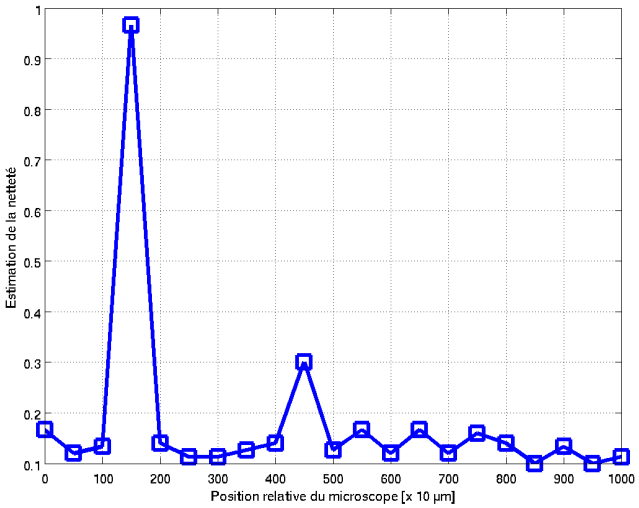


FIGURE 5.20 – Estimation de la profondeur $Z*$ par analyse de la netteté : elle correspond à la distance entre les deux pics les plus élevés.

gauche et droite de la pince.

Les lâcher des pièces **A** et **B** sont réalisés par des commandes similaires à la prise.

Asservissement visuel 3D et déplacement

Le point central de la face visible de chaque pièce est choisi comme origine de son repère. Ses coordonnées spatiales constituent les informations à suivre dans le flux d'image du microscope latéral. Pour les pièces **A** et **B** cela donne respectivement :

$$s_A = \begin{pmatrix} {}^F t_A \\ {}^F\mathbf{R}_A \theta u \end{pmatrix} \tag{5.44}$$

$$s_B = \begin{pmatrix} {}^F t_B \\ {}^F\mathbf{R}_B \theta u \end{pmatrix} \tag{5.45}$$

Les consignes calculées à partir de la connaissance parfaite de la géométrie des pièces s'écrivent respectivement :

$$s_A* = \begin{pmatrix} {}^F t_{A*} \\ 0 \end{pmatrix} \tag{5.46}$$

$$s_B* = \begin{pmatrix} {}^F t_{B*} \\ 0 \end{pmatrix} \tag{5.47}$$

Le déplacement de **A** est obtenu par la commande du positionneur $xy\alpha$ selon :

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_\alpha \end{pmatrix}_F = -\lambda \begin{pmatrix} {}^F t_x - {}^F t_{x*} \\ {}^F t_y - {}^F t_{y*} \\ {}^F\mathbf{R}_A \theta u_\alpha \end{pmatrix} \tag{5.48}$$

Le déplacement de pré-insertion de **B** est obtenu par la commande du positionneur $xy\alpha$ selon :

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_\alpha \end{pmatrix}_F = -\lambda \begin{pmatrix} {}^F t_x - {}^F t_{x*} \\ {}^F t_y - {}^F t_{y*} \\ {}^F\mathbf{R}_B \theta u_\alpha \end{pmatrix} \tag{5.49}$$

Le déplacement d'insertion de **B** est obtenu par la commande du manipulateur $z\varphi$ selon :

$$\begin{pmatrix} v_z \\ \omega_\varphi \end{pmatrix}_F = -\lambda \begin{pmatrix} {}^F t_z - {}^F t_{z**} \\ {}^F\mathbf{R}_B \theta u_\varphi \end{pmatrix} \tag{5.50}$$

Résultats

La figure 5.21 montre quelques images de la scène pendant la tâche de prise illustrant la commande multi-échelle : zoom faible loin de la cible (commande grossière) et élevé proche de la cible (commande fine).

L'évolution de l'erreur de prise est représentée à la figure 5.22 : sa valeur finale est de 2 μm pour la position et $7{\times}10^{-3}$ radian pour l'orientation.

La figure 5.23 montrent quelques images de la scène pendant les déplacements de **A** et **B**.

Les évolutions de l'erreur pour les deux robots sont présentées à la figure 5.24 : les valeurs finales sont 4 μm et $0.4{\times}10^{-3}$ radian en position et orientation respectivement.

En accord avec la théorie de l'asservissement, on trouve bien l'asservissement 2D plus précis que l'asservissement 3D : une erreur de 2 μm contre 4 μm.

La figure 5.25 montre des images prises avec le microscope électronique à balayage de l'assemblage final. Le jeu mécanique final est d'environ 3μm. La qualité

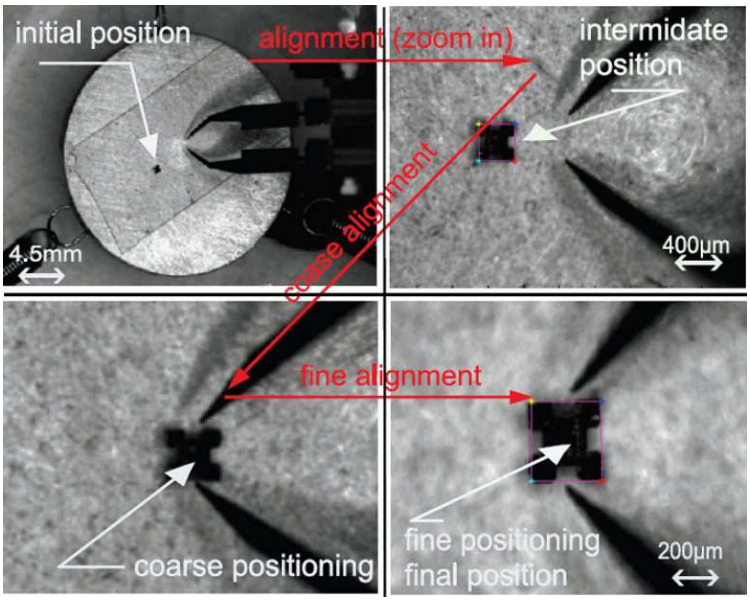


FIGURE 5.21 – Des images de la scène pendant la tâche de prise illustrant la commande multi-échelle

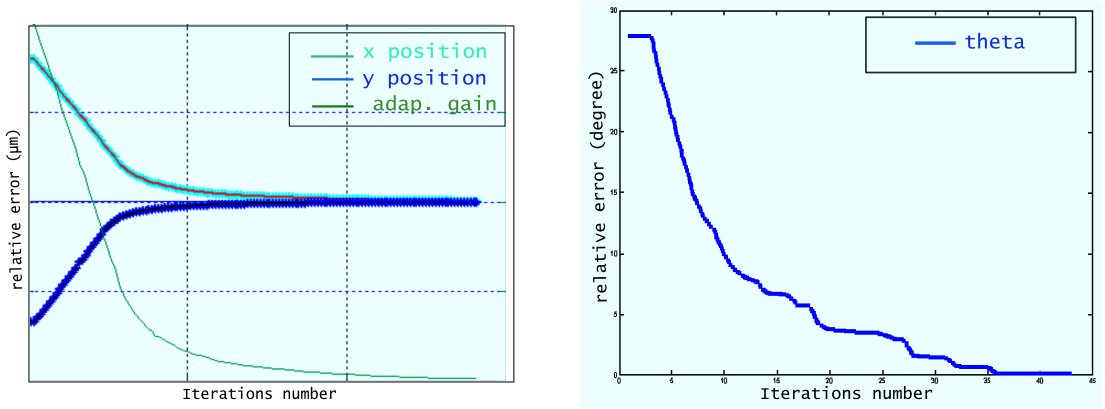


FIGURE 5.22 – Evolution de l'erreur de prise : position (à gauche), orientation (à droite)

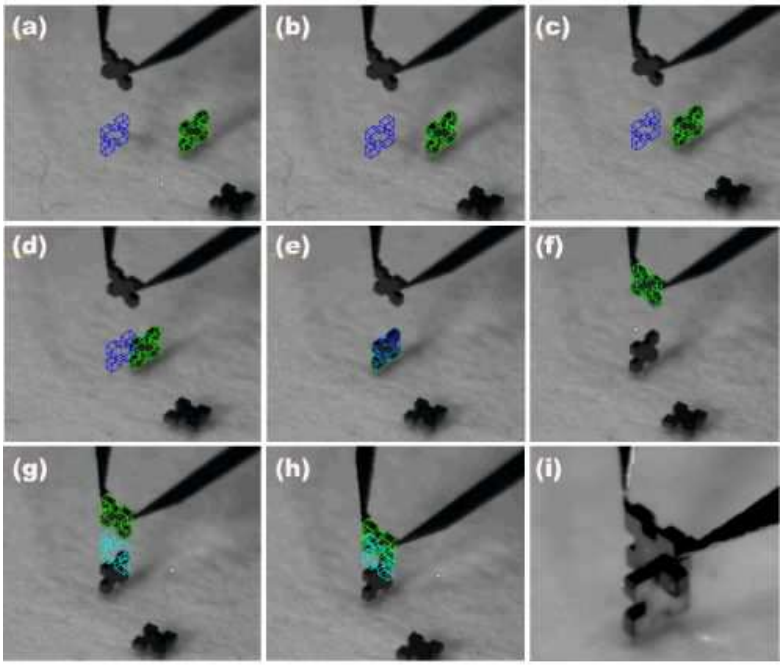


FIGURE 5.23 – Quelques images de la scène pendant les déplacements des pièces

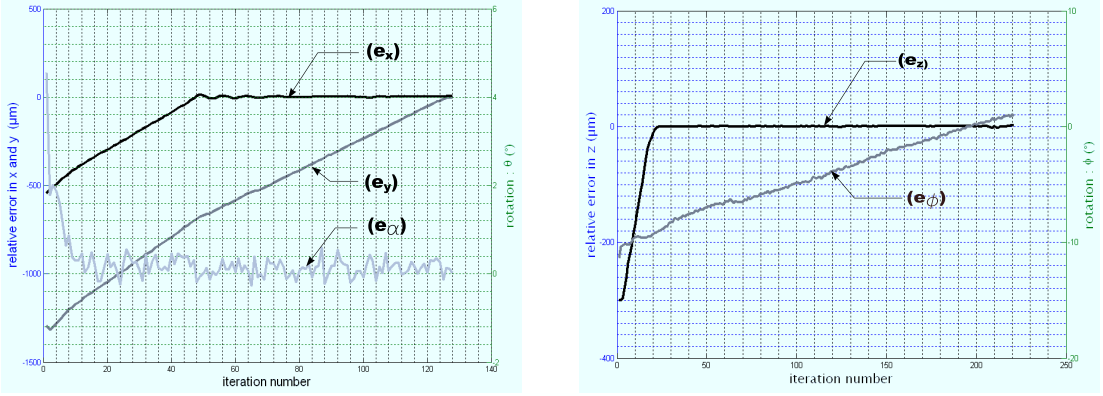


FIGURE 5.24 – Évolutions des erreurs de déplacement pour le positionneur (gauche) et le manipulateur (droite).

du résultat montre la pertinence des développements : de la définition des séquences, à la mesure des informations jusqu'à la commande.

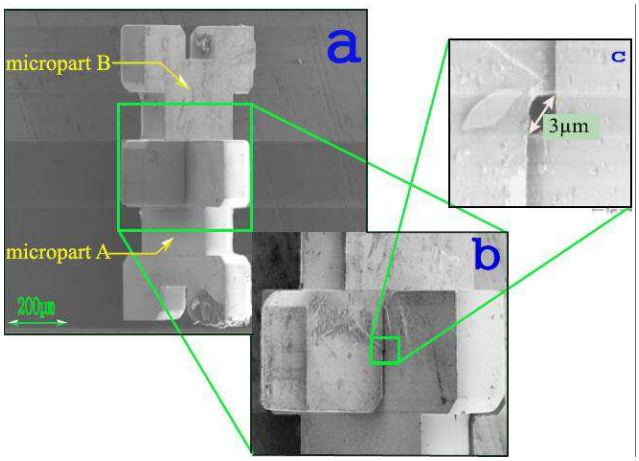


FIGURE 5.25 – Des images obtenues avec le microscope électronique à balayage de la structure finale illustrant la pertinence des développements.

Les essais en répétabilité ont donné les résultats suivants :

1. un taux de réussite de 72 %,
2. un temps de cycle d'environ 40s pour des pièces situées à environ 700 mm de la position de d'assemblage.

Les causes d'échec sont nombreuses :
- 17% pour l'occlusion de la pièce par les doigts de la pince conduisant à l'échec du suivi,
- 22% pour l'erreur de commande : la commande n'est pas tout le temps suffisamment précise pour éviter l'échec de l'insertion,
- 24% pour la force capillaire : l'hydrométrie de la scène génère des forces qui empêche le lâcher des pièces (figure 5.26),
- 37% pour la force électrostatique : la présence de charges électriques entre les pièces et les doigts conduisent à des mouvements parasites.

L'amélioration du taux de réussite passe par la réduction des forces électrostatique et capillaire, ce qui peut s'obtenir en contrôlant efficacement l'environnement et en fonctionnalisant les doigts de la pince.

5.5.4 Application évoluée

Les succès de l'application précédente ont permis d'envisager une application ou le produit final est plus évolué : insertion sur trois niveaux de cinq pièces par

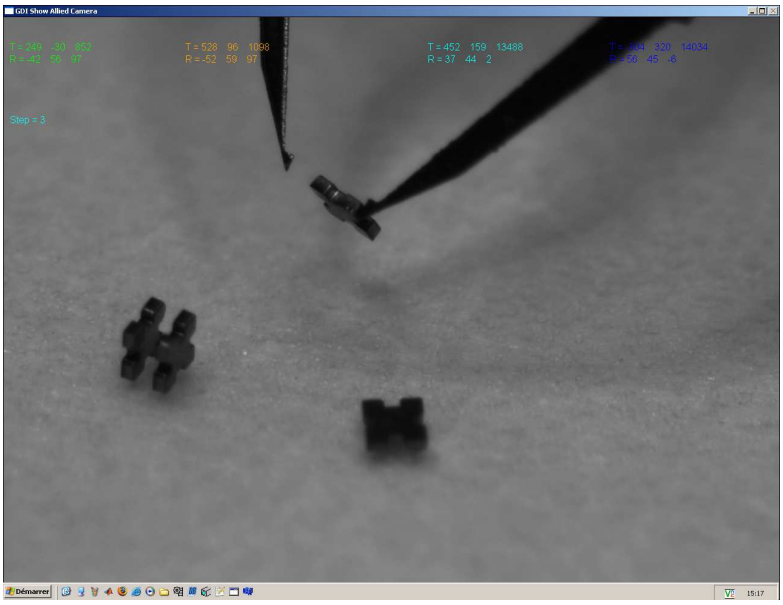


FIGURE 5.26 – Illustration de l'échec du lâcher : les forces d'adhésion maintienent la micro-structure (400 μm $\times$ 400 μm $\times$ 100 μm) sur le doigt de la pince.

leurs tranchées, sans utilisation de moyen de solidarisation comme le collage ou le soudage. On compte sur la précision des insertions pour obtenir un résultat stable.

Les positions spatiales désirées ont été définies en utilisant la connaissance parfaite des géométrie des pièces et de la structure.

La figure 5.27 montre quelques images pendant l'assemblage et le résultat final : l'obtention d'une structure stable sans collage.

5.6 Conclusion

La prescription concernait la problématique de l'asservissement visuel pour réaliser l'application générique d'assemblage par insertion avec un jeu mécanique inférieur à 5 μm :

– développement de méthodes de suivi précises, robustes et rapides,
– développement de méthodes de commande précises et robustes.

Nous avons commencé par nous intéresser aux déplacements d'un positionneur à espace atteignable important. Il est construit autour d'un micromoteur ultrasonore à ondes stationnaires se déplaçant selon le principe du stick-slip. Nous avons choisi de doter ce micro-robot mobile d'une cible et de suivre la position spatiale de celle-ci dans les images d'un microscope observant la scène d'évolution.

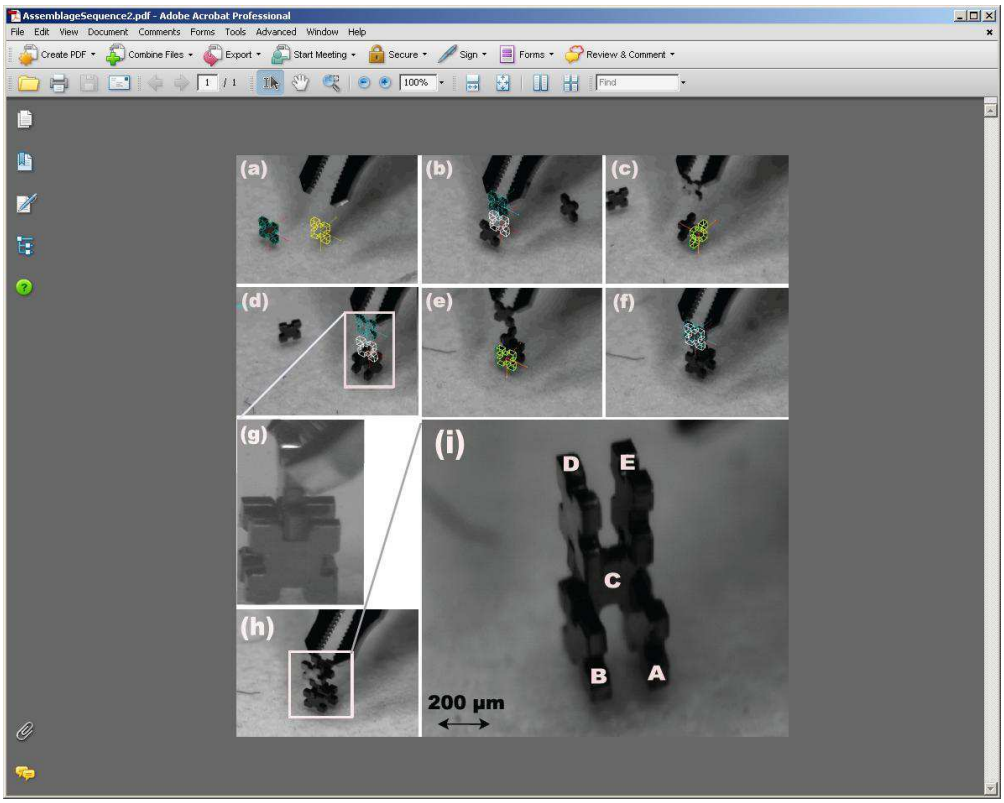


FIGURE 5.27 – Assemblage de cinq pièces sur trois niveaux.

Nous avons développé une cible en franges que la position spatiale peut être calculée avec une résolution de 0.01 pixel en utilisant la transformée par ondelette de Morlet. Cependant la mesure de la position d'une cible allongée a été préférée pour des raisons techniques. Elle a permis d'analyser finement le comportement du micro-robot puis de corriger sa trajectoire en utilisant un asservissement visuel de type look-then-move.

Nous avons ensuite apporté les adaptations nécessaires aux méthodes de suivi robustes ESM et SIFT pour pouvoir les appliquer efficacement sur les images provenant de microscopes optiques. Puis nous avons proposé une commande par asservissement visuel 2D multi-échelle : le grandissement du microscope est introduite dans la loi de descente exponentielle de l'erreur.

Nous avons ensuite réalisé les développements permettant d'exprimer les positions spatiales délivrées par Visp dans le repère fixe de travail. Après nous avons rappelé les principes régissant l'asservissement visuel 3D.

Les développements relatifs aux asservissements visuels 2D et 3D ont ensuite été appliqués avec succès à l'insertion de pièces en silicium par leurs rainures de 100 μm $\times$ 100 μm $\times$ 100 μm $\pm$ 1.5 μm, soit un jeu mécanique maximum de 3 μm.

Les développements réalisés sont importants, mais ils ne sont cependant pas exempts d'imperfection :

- une étude approfondie de la méthode de suivi de la cible en franges serait bienvenue pour évaluer son niveau de robustesse à la non planéité de la scène ;
- les asservissements visuels ont encore un niveau d'erreur relativement important, il serait intéressant de développer des méthodes plus précises telles que les méthodes utilisant des informations globales.

Les travaux sur le suivi en franges ont été développés dans la thèse de Jean-Christophe Ravassard entre 1996 et 2000, l'étude du micro-moteur ultra-sonore a été réalisé dans la thèse de Karima Rochdi entre 1999 et 2003. Enfin, les travaux sur l'asservissement visuel et la micromanipulation ont été réalisés dans la thèse de Brahim Tamadazte entre 2006 et 2009, et lui ont valu le prix 2010 de la meilleure thèse de l'université de Franche Comté et le prix 2010 de la seconde meilleure thèse en robotique du GDR Robotique.

Chapitre 6

Conclusion

6.1 Rappel de l'objectif

La robotique moderne date de la fin des années 50 ; elle a connu son apogée dans les années 70-80 pour ensuite connaître un passage à vide dans les années 90-2000. Mais depuis quelques années elle reprend du poil de la bête pour se retrouver nominée par le ministère de l'industrie parmi les technologies clés à l'horizon 2015 du secteur TIC (Technologies de l'Information et de la Communication) [200] aux cotés de l'optoélectronique, de la nanoélectronique, de l'informatique en nuages, des réseaux haut débit optiques, ... On pense bien évidemment à un renouvellement des applications industrielles mais surtout au développement de nouvelles applications notamment celles relevant du service [191]. C'est ainsi qu'est apparu depuis peu un fond d'investissement pour la robotique de service [184].

On perçoit que dans ces applications beaucoup relèveront de la micro-robotique. Évidemment, comme aujourd'hui beaucoup de ces applications ne ferons pas obligatoirement appel à la vision, mais la vision maîtrisée apporte et apportera une plus-value d'une grande importance et un avantage concurrentiel à ceux qui en disposent.

Notre ambition est d'asseoir la micro vision robotique dans le paysage scientifique et industriel, à la manière de la vision robotique. Pour ce faire un nombre important de défis est à relever :

- en premier lieu nous avons ce qui se rapporte à l'imagerie : développement de méthodes d'étalonnage robustes et précis ;
- nous avons tout ce qui a trait à la synthèse d'images virtuelles pour assister la réalisation micro-robotisée de tâches ;
- enfin nous avons tout ce qui est en rapport avec l'asservissement visuel : le développement de méthodes précises et robustes de suivi d'informations dans les flux d'images, de même que celui de méthodes de commande robustes,

répétables et précises.

Le relèvement de ces défis scientifiques et techniques doit permettre de réaliser des applications de caractérisation et d'assemblage de structures micrométriques selon un mode automatique ou semi-automatique avec une précision submicronique. Il doit également permettre de réaliser des applications de phonomicrochirurgie laser.

6.2 Bilan critique

Arrivé au terme de ce mémoire, nous mesurons mieux l'ambition de notre propos initial, et nous avons conscience de n'avoir atteint que très partiellement notre objectif, qui s'éloignait au fur et à mesure que nous avancions dans la perception de sa complexité et la prise de connaissance de ces multiples dimensions. Comme dit P. J. Proudhon : *rien n'est souvent moins vraisemblable quand on y regarde de trop près.*

En ce qui concerne l'imagerie, nous avons :
- fait un tour d'horizon des types d'imagerie utilisés à l'échelle micro-métrique et montré la prépondérance des microscopes optique et électronique,
- réalisé un bilan documenté des propriétés de ces microscope,
- développé une méthode robuste et précise de calcul de points d'intérêt et leur mise en correspondance,
- développé des méthodes d'étalonnage monofocal et multifocal en utilisant des méthodes paramétriques.

Ces méthodes ont été validées certes, mais il serait plus judicieux comme le suggère les théories un peu récentes d'utiliser des méthodes de calcul et de mise en correspondance de points d'intérêt invariants aux conditions de travail, ainsi que des modèles non paramétriques.

Pour ce qui est de la synthèse d'images virtuelles, nous avons développé et validé des concepts permettant de construire des microscopes virtuels avec d'intéressantes propriétés : vision 3D, champ large, grande résolution, vision latérale. Mais nous regrettons de n'avoir pas atteint le niveau pré-industriel de ces systèmes pour pouvoir les mettre à disposition du plus grand nombre.

Enfin pour ce qui est de l'asservissement visuel, nous avons :
- développé une méthode originale de suivi utilisant une cible en franges et l'avons appliqué avec succès à un micro-positionneur plan,
- montré que l'asservissement visuel 2D était une solution idéale pour réaliser les tâches critiques de prise et de lâcher des objets,

- montré que la méthode de suivi de cible à partir du modèle CAO initialement développée pour les optiques standards était également applicable au microscope optique,
- trouvé le moyen de calculer les matrices de changement de repère entre le microscope et la scène, puis de pouvoir appliquer les concepts de l'asservissement 3D à l'échelle micrométrique.

Cependant, il reste à développer des méthodes nouvelles de suivi et d'asservissement plus précises encore pour satisfaire totalement les contraintes de précision des tâches à l'échelle micro-métrique.

6.3 Perspectives

Il est enrichissant de raisonner sur des échelles définies par des objets de la physique ([187]), comme l'a fait le roadmap américain de 2007 sur la production des nano-systèmes [206] (figure 6.1). Au delà de l'échelle de la résolution limite de l'œuil humain à 30 cm, 100 μm, soit la taille moyenne d'un grain de sable, on trouve la robotique classique qui, comme expliqué plus haut, a fait d'énormes progrès depuis les années 60 et continue à en faire. Il en va de même de ce que l'on pourrait appeler la robotique à l'échelle atomique (le diamètre moyen d'un atome est 0.1 nm) avec les manipulations et arrangements d'atomes à l'aide de microscopes à sonde locale, de même que la manipulation de photons ou d'atomes ([65]). Curieusement, aux échelles intermédiaires, celles de la cellule (le diamètre moyen d'une cellule est estimée à 10 μm) et de la molécule (le diamètre moyen d'une molécule est estimée à 10 nm) comme le déclarait Richard P. Feynman dans son fameux discours de 1959 [66] :[1] *Il y a beaucoup de place en bas*, et donc beaucoup de travail de recherche à faire pour la robotique à ces échelles. Désormais, notre ambition est de travailler sur la vision robotique à ces échelles intermédiaires.

Cependant, les expériences des composants MEMS et électroniques, et des divers projets nationaux et européens (FP6 notamment) semblent indiquer que l'avenir de ces robotiques n'est pas dans l'industrie au sens de la production : les contraintes de rentabilité conduisent aux développements de solutions *ad hoc* contournant de préférence la manipulation de composants individuels micro-nano-métriques, en travaillant sur les wafers complets de dimensions centimétriques [183]. De notre point de vue, l'avenir est dans le service. Il s'agit notamment de la recherche scientifique :

- pour valider des concepts qui permettent ensuite de développer les solutions *ad hoc*,

1. There is Plenty of Room at the Bottom

Repère naturel	Dimension	Robotique
Taille d'un humain débout	2m	Robotique classique
Diamètre d'un grain de sable	10^{-4} m = 100 μm	Micro-Robotique
Diamètre d'une grosse cellule	10^{-5} m = 10 μm	Micro-Nano-Robotique
Diamètre d'une grosse molécule	10^{-8} m = 10 nm	Nano-Robotique
Diamètre d'une petite molécule	10^{-9} m = 1 nm	Nano-Pico-Robotique
Diamètre d'un gros atome	10^{-10} m = 100 pm	Pico-Robotique
Diamètre de l'électron	10^{-15} m = 1 fm	Pico-Femto-Robotique

TABLE 6.1 – Echelles et points de référence.

– pour analyser, comprendre et modéliser le comportement et le fonctionnement de matériaux et structures, c'est le cas des applications de caractérisation avec notamment la phase de préparation à la caractérisation.

Il s'agit également de la chirurgie minimalement invasive à base de laser : à la conception d'appareils à base de structures micro-métriques, s'ajoute la vision robotique permettant de réaliser des interventions très précises et donc affectant peu les tissus sains.

6.3.1 Micro-nano vision robotique

Depuis quelques temps, on assiste à un regroupement d'instruments scientifiques, à l'intérieur de l'enceinte propre du microscope électronique à balayage, en de véritables centres d'ingénierie pour structures aux échelles micro-nano-métriques (échelles de la cellule et de la molécule). On trouve typiquement :
– la colonne électronique permettant de faire de l'imagerie,
– la colonne ionique permettant de faire de l'usinage,
– l'injecteur de gaz permettant de faire des dépôts de matière et de la gravure,
– les détecteurs d'électrons et d'ions,
– les caméras infra-rouges pour avoir une vue globale de la chambre,
– les robots avec éventuellement des outils pour permettre la manipulation des structures.

Ces centres offriront le maximum de possibilités pour fabriquer, manipuler, caractériser, assembler sur la base de la micro-nano vision robotique.
Ils permettront de fabriquer : usinage, découpage et gravure grâce à la conjonction du faisceau d'ions et de l'injecteur de gaz (figures 6.1 et 6.2).

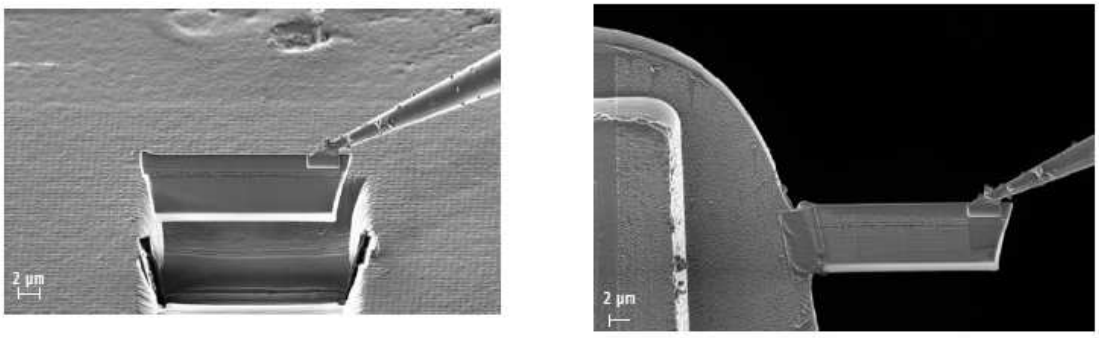


FIGURE 6.1 – Structures usinées au faisceau d'ions et manipulées par micro-robot, à l'intérieur du microscope [document Carl Zeiss].

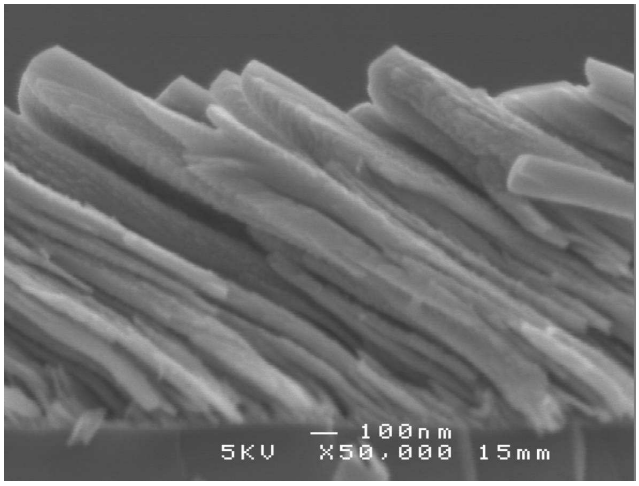


FIGURE 6.2 – Structures en chrome obtenues par pulvérisation, nécessitant un polissage [document Nicolas Martin de FEMTO-ST/MN2S].

Ils permettront de caractériser : essais de traction, essais de friction, essais de sondage, essais thermiques, tests fonctionnels (figure 6.3).

Ils permettront d'assembler : assemblage par insertion, assemblage suivi de soudage (figures 6.4 et 6.5).

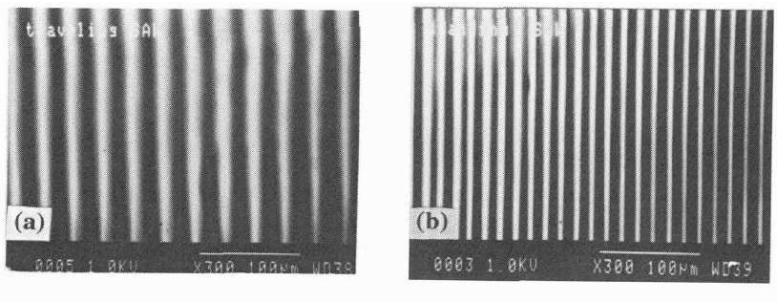


FIGURE 6.3 – Visualisation de franges d'interférence au microscope : (a) ondes acoustiques progressives, (b) ondes acoustiques stationnaires [72].

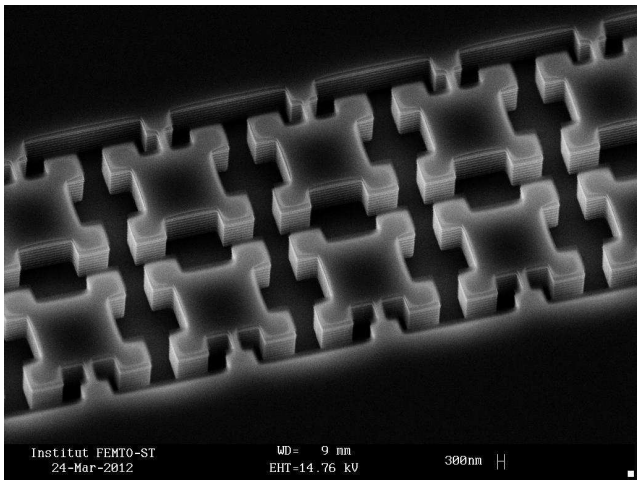


FIGURE 6.4 – Structures en silicium de 6 μm (longueur) $\times$ 6 μm (largeur) $\times$ 2 μm (épaisseur) devant être extraites et assemblées par insertion

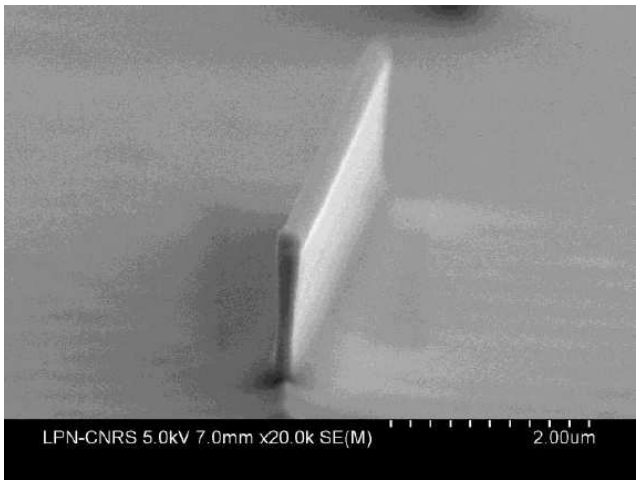


FIGURE 6.5 – Structure en phosphure d'indium (InP) de 20 μm (longueur) $\times$ 1.5 μm (hauteur) $\times$ 200 nm (épaisseur) devant être extraite et assemblée par soudage [document Remy Braive du LPN-Marcoussis].

Nous allons disposer à partir de février 2013 d'un tel centre d'ingénierie, financé par l'**équipement d'excellence ROBOTEX** et la région de Franche Comté (figure 6.6). Il va nous offrir l'opportunité de participer activement au développement de la micro-nano vision robotique. Nous en sommes heureux.

La première problématique à étudier sera l'étalonnage, notamment celui de la projection et de la distorsion, en considérant des modèles non paramétriques tels que ceux proposés par Hartley ([165]) et Sutton ([170]). Le premier auteur ayant abordé la modélisation de la projection des microscopes électroniques à balayage est Maune ([67]). Il traite le problème d'un point de vue purement photogrammétrique et propose un modèle de projection paramétrique de type projectif. L'équipe MEB de l'ONERA propose, dans un objectif de reconstruction 3D à très fort grandissement, un modèle affine (donc parallèle) puis une approche d'auto-étalonnage pour estimer les paramètres ([112], [157]). L'école des mines d'Albi et l'université de Caroline du sud ont proposé conjointement un modèle complet non paramétrique, avec pour objectif la réalisation de mesures ultra-précises : à faible grandissement (inférieur à 1000$\times$), ils proposent un modèle perspective et à fort grandissement (supérieur à 1000$\times$) un modèle parallèle ([141], [159]).
Les travaux cités affirment le basculement du modèle central au modèle parallèle sans jamais le démontrer ni théoriquement ni expérimentalement. Nous avons l'ambition d'étudier profondément le problème pour infirmer ou confirmer ces affirmations.

FIGURE 6.6 – Le microscope de la future plateforme expérimentale de micro-nano vision robotique.

La seconde problématique à étudier sera l'asservissement visuel. Les premiers résultats d'asservissement visuel ont été publiés par l'équipe du professeur Sato ([76], [91]). Ils font apparaître le niveau élevé du bruit dès que la fréquence d'acquisition des images augmente, mais présentent néanmoins des manipulations d'objets par un asservissement visuel de type look-then-move. Aucune modélisation du microscope n'est présentée. Rappelons que ces techniques d'asservissement look-then-move sont notoirement connues pour être très sensibles aux erreurs de modélisation, de calibration et de mesure. Les travaux de l'équipe du professeur Fatikow sont dans le même esprit. Dans cette équipe, les travaux de vision sont nettement plus approfondis comme par exemple le suivi de cible par cross-corrélation ou par contours actifs ([158]), la reconnaissance statistique de motifs ([176]) ou le suivi à 100 Hz d'un motif ([180]). Les travaux du professeur Nelson considèrent le modèle parallèle pour réaliser le suivi 3D de cibles rigides dans les images ([177]).
Pour notre part, nous souhaitons étudier l'utilisation de descripteurs spectraux dans les lois d'asservissement visuel. Il s'agit de passer d'une erreur e exprimée dans le domaine spatial :

$$e = I - I* \tag{6.1}$$

à une erreur exprimée dans le domaine fréquentiel :

$$e = TF(I) - TF(I*) = M(e) \exp -j\varphi(e) \tag{6.2}$$

où :
- I et $I*$ sont les images courante et désirée ;
- TF est la transformation de Fourier ;
- $M(e)$ et $\varphi(e)$ sont le module et l'argument de la transformation de Fourier.

Il est notoirement connu que $M(e)$ code la rotation et $\varphi(e)$ la translation. L' approche permet un découplage naturel entre la commande de la rotation et de la translation ([81], [167]). Outre les applications scientifiques, ce genre d'approche pourrait être d'un grand intérêt pour la microchirurgie laser aussi. Il pourrait s'agir de viser une taille de spot laser, au contact des tissus, d'environ de 10 μm au lieu de 100 μm minimum aujourd'hui.
La mise en œuvre de ces approches pourrait se faire en calculant la tranformation de Fourier sur l'ensemble de l'image ou, mieux encore, en la calculant uniquement sur une fenêtre d'intérêt (suivi par transformation de Fourier). La dernière idée est similaire à un travail de Nicolas Andreff sur la commande de robots parallèles par asservissement visuel : le suivi est réalisé dans le domaine spatial sur des images fournies par une caméra rapide CMOS ([182]).

6.3.2 Nano vision robotique

La micro-électronique utilise depuis quelques années le microscope électronique à transmission pour analyser et caractériser les matériaux. La résolution de ce der-

nier peut atteindre 80 pm, permettant de percevoir la structure atomique des matériaux. Des échantillons sont usinés, généralement par faisceaux d'ions, de sorte à être transparents aux électrons (épaisseurs comprises entre 5 nm et 500 nm) puis manipulés dans le microscope pour déterminer leurs caractéristiques thermophysiques.
Il est tout à fait possible d'envisager l'automatisation complète ou partielle de telles manipulations en utilisant le retour visuel fourni par le microscope. Le grand avantage d'une telle approche serait le grand niveau de précision atteint.
Les problématiques sont les mêmes que précédemment, étalonnage et asservissement visuel, mais dans un contexte d'imagerie différent.

Bibliographie

[65] *IBM researchers make 12-atom magnetic memory bit*, January 2012.

[66] Richard P. Feynman. There's plenty of room at the bottom. *Caltech Engineering and Science*, 23(5) :22–36, 1960.

[67] David F. Maune. Photogrammetric self-calibration of scanning electron microscopes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 42(9) :335–357, 1976.

[68] R.A. Jarvis. A perspective on range finding techniques for computer vision. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 5(2) :122–139, 1983.

[69] Shree K. Nayar. Shape from focus. Technical Report CMU-RI-TR-89-27, Department of Electrical and Computer Engineering The Robotics Institute Carnegie Mellon University Pittsburgh, Pennsylvania 15213, 1989.

[70] S. E. Chen and L. Williams. View interpolation for image synthesis. In *Computer Graphics (SIGGRAPH'93 Proceedings)*, pages 279–288, 1993.

[71] O. Faugeras and L. Robert. What can two images tell us about a third one ? Technical Report 2018, INRIA, France, 1993.

[72] D.V. Roshchupkin, M. Brunel, and R. Tucoulou. Visualization of surface acoustic waves by scanning electron microscopy. *Journal de Physique IV*, 4 :1229–1232, 1994.

[73] E.B. Barrett, P.M. Payton, and G. Gheen. Robust algebraic invariant methods with applications in geometry and imaging. In Toni F. Schenk, editor, *Proceedings of SPIE Remote Sensing and Reconstruction for Three-Dimensional Objects and Scenes*, volume 2572, pages 30–42, July 1995.

[74] S. Chen. Quicktime vr : an image-based approach to virtual environment navigation. In *Computer Graphics (SIGGRAPH'95 Proceedings)*, pages 29–38, 1995.

[75] Ronald S. Fearing. Survey of sticking effects for micro parts handling. In *IEEE IROS 1995, Pittsburgh, PA ; August 7-9, 1995*, 1995.

[76] Tomomasa Sato, Takayuki Kameya, Hideki Miyazaki, and Yotaro Hatamura. Hand-eye system in nano manipulation world. In *Proceedings of the 1995*

IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 1995, May 21-27, Nagoya, Japan, pages 59–66, 1995.

[77] Frédéric Devernay and Olivier Faugeras. From projective to euclidean reconstruction. In IEEE, editor, *Proceedings of the 1996 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '96)*, pages 1063–6919, 1996.

[78] Shai Avidan and Amnon Shashua. Novel synthesis in tensor space. In *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Juan, Puerto Rico, June*, pages 1034–1040, 1997.

[79] X. Colonna de lega. *Processing of non-stationary interface patterns : adapted phase-shifting algorithm and wavelet measurements by holographic and speckle interferometry.* PhD thesis, EPFL, 1997.

[80] Janne Heikkila and Olli Silvén. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. In *Proceedings ot the 1997 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR'97*, 1997.

[81] Baptiste Marcel, Maurice Briot, and Rafael Murrieta. Calcul de translation et rotation par la transformation de fourie r. *Traitement du Signal*, 14(2) :135–149, 1997.

[82] William Puech. *Localisation,reconstruction et mosaïque appliquées aux peintures sur cylindres généralisés à axe droit en vision monoculaire.* PhD thesis, Institut national polytechnique de Grenoble,, 1997.

[83] A. Sulzmann, J. M. Breguet, and J. Jacot. Micromotor assembly using high accurate optical vision feedback for microrobot relative 3d displacement in submicron range. In *Transducers' 97*, 1997.

[84] Richard Szeliski and Heung-Yeung Shum. Creating full view panoramic image mosaics and environment maps. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques,SIGGRAPH'97*, volume 31, pages 251–258, 1997.

[85] Silvia Allegro. *Automatic microassembly by means of visually guided micromanipulation.* PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1998.

[86] Shai Avidan and Amnon Shashua. Novel view synthesis by cascading trilinear tensors. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 4(4) :293–306, 1998.

[87] John T. Feddema and Ronald W. Simon. Visual servoing and cad-driven microassembly. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 5(4) :18–24, 1998.

[88] Toshio Fukuda and Fumihito Arai. Micromanipulation and robotic technology. In *1998 International conference on modeling and simulations of microsystems*, 1998.

[89] A. Sulzmann, P. Boillat, and J. Jacot. New developments in 3d computer vision for microassembly. In *SPIE Vol. 3519*, 1998.

[90] Sergej Fatikow, Axel Buerkle, and Joerg Seyfried. Automatic control system of a microrobot-based microassembly station using computer vision. In *SPIE Vol. 3834. Part of the SPIE conference on Microrobotics and Microassembly. Boston, Massachusetts. September 1999*, 1999.

[91] Takeshi Kasaya, Hideki Miyazaki, Shigeki Saito, and Tomomasa Sato. Micro object handling under sem by vision-based automatic control. In *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2189–2196, 1999.

[92] B. Mukundakrishnan, B. Vikramaditya, and B. Nelson. Design for visually guided microassembly. In *SPIE Vol. 3834*, 1999.

[93] K. Tsuchiya, A.Murakami, G. Fortmann, M. Nakao, and Y. Hatamura. Micro assembly and micro bonding in nano manufacturing world. In *SPIE Proceedings*, volume 3834, pages 132–140, 1999.

[94] Barmeshwar Vikramaditya and Bradley J. Nelson. Visually servoed micropositioning for robotic micromanipulation. *Microcomputer Applications*, 18 :23–31, 1999.

[95] Yu Zhou and Bradley J. Nelson. Calibration of a parametric model of an optical microscope. *Optical Engeenering*, 38(12) :1989–1995, 1999.

[96] S. Fatikow, J. Seyfried, ST. Fahlbuschand A. Buerkle, and F. Schmoeckel. A flexible microrobot-based microassembly station. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 27 :135–169, 2000.

[97] Ezio Malis and François Chaumette. 2 1/2 visual servoing with respect to unknown objects through a new estimation scheme of camera displacement. *International Journal of Computer Vision*, 37(1) :79–97, 2000.

[98] P. Le Moal, E. Joseph, and J.C. Ferniot. Mechanical energy transductions in standing wave ultrasonic motors : analytical modelling and experimental investigations. *Eur. J. Mech. A : Solids*, 19 :849–871, 2000.

[99] Bharath Mukundakrishnan and Bradley J. Nelson. Micropart feature design for visually servoed microassembly. In *Proceedings of ICRA 2000, San Francisco, CA, April 2000*, 2000.

[100] Christian B.U. Perwass. *Applications of geometric algrebra in computer vision : the geometry of multiple view tensors and 3D-reconstruction.* PhD thesis, University of Cambridge, 2000.

[101] S. Pollard, M. Pilu, S. Hayes, and A. Lorusso. View synthesis by trinocular edge matching and transfer. *Image and Vision Computing*, 18(9) :pp. 749–757, 2000.

[102] Stephen Ralis, Barmeshwar Vikramaditya, and Bradley J. Nelson. Micropositioning of a weakly calibrated microassembly system using coarse-to-fine visual servoing strategies. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 23(2) :123–131, 2000.

[103] H.Y. Shum and S. B. Kang. A review of image-based rendering techniques. In *Proceedings of the Visual Communications and Image Processing*, pages 2–13, 2000.

[104] Osamu Tohyama and Shigeo Maeda. Environmental recognition devices. *Sensors and Actuators B*, 64 :198–204, 2000.

[105] Ozamu Tohyama, Shigeo Maeda, Kazuhiro Abe, and Manabu Murayama. Fiber-optic sensors and actuators for environmental recognition devices. *IEICE Transactions on Electronics*, E83-C(3) :475–480, 2000.

[106] Yu Zhou, Bradley J. Nelson, and Barmeshwar Vikramaditya. Integrating optical force sensing with visual servoing for microassembly. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 28 :259–276, 2000.

[107] C. Fehn, P. Kauff, O. Schreer, and R. Schafer. Interactive virtual view video for immersive tv applications. In *Proceedings of International Broadcast Conference*, pages 14–18, 2001.

[108] O. J. Fleig, F. Devernay, J.-M. Scarabin, and P. Jannin. Surface reconstruction of the surgical field from stereoscopic microscope views in neurosurgery. *Computer Assisted Radiology and Surgery*, pages pp. 259–264, 2001.

[109] Seok Joo Lee, Kyunghwan Kim, Deok-Ho Kim, Jong-Oh Park, and Gwi Tae Park. Recognizing and tracking of 3d-shaped micro parts using multiple visions for micromanipulation. In *Proceedings of 2001 International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, 2001.

[110] Tilo Pfeifer, Reinhard Freudenberg, Gerd Dussler, and Benno Brocher. Quality control and process observation for the micro assembly process. *Measurement*, 30 :1–8, 2001.

[111] Makoto Tanaka. Development of desktop machining microfactory. *RIKEN Review*, Vol. 34 :46–49, 2001.

[112] F. Vignon, G. Le Besnerais, D. Boivin, J.-L. Pouchou, and L. Quan. 3d reconstruction from scanning electron microscopy using stereovision and self-calibration. In *Physics in Signal and Image Processing*, volume 1(1), pages 129–134, 2001.

[113] Udhav Bhosle, Subhasis Chaudhuri, and Sumantra Dutta Roy. A fast method for image mosaicing using geometric hashing. *IETE-Journal of Research*, 48(3-4) :317–324, 2002.

[114] S. Koelemeijer Cholet, F. Bourgeois, L. Benmayor, B. Moll, C. Wulliens, and J. Jacot. A flexible microassembly cell for small and medium sized batches. In *Proceedings of the 33 rd International Symposium on Robotics (ISR 2007), October 7-11, 2002*, 2002.

[115] Keith Connor and Ian Reid. Novel view specification and synthesis. In *Proceedings of British Machine Vision Conference, BMVC*, pages 243–252, 2002.

[116] M. Irani, T. Hassner, and P. Anandan. What does the scene look like from a scene point ? In *Proceedings of European Conference on Computer Vision (ECCV), Copenhagen (2002)*, pages 883–897, 2002.

[117] Kyunghwan Kim, Deok-Ho Kim, Seok Joo Lee, and Jaehoon Lee. Hybrid microassembly system for three-dimensional mems components. In *IWMF 2002. Microfactory. 3rd International Workshop on Microfactories. Minneapolis, Minnesota. September 2002.*, 2002.

[118] Seok Joo Lee, Kyunghwan Kim, Deok-Ho Kim, Jong-Oh Park, and Gwi-Tae Park. Vision based micromanipulation. In *Proceedings of the IWMF 2002 (International Workshop on Microfactories, Minneapolis, Minesota)*, 2002.

[119] Yuichi Okazaki, Nozomu Mishima, and KiwamuAshida. Microfactory and micro machine tools. In *The 1st Korea-Japan Conference on Positioning Technology, Daejeon, Korea, 2002*, 2002.

[120] Eniko T. Enikov, Scott Clark, and Lyubomir Minkov. Micro-assembly cell with dual optical/computer vision control for electrostatic gripping of mems. In *SPIE Vol. 5267*, 2003.

[121] Markus Niederoest, Jana Niederoest, and Jiri Scucka. Shape from focus : fully automated 3d reconstruction and visualization of microscopic objects. In *http ://e-collection.ethbib.ethz.ch/show ?type=bericht&nr=325&part=text*, 2003.

[122] Markus Niederost, Jana Niederost, and Jiri Scucka. Automatic 3d reconstruction and visualization of microscopic objects from a monoscopic multifocus image sequence. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV-5/W10*, 2003.

[123] Hideo Saito, Shigeyuki Baba, and Takeo Kanade. Appearance-based virtual view generation from multicamera videos captured in the 3-d room. *IEEE Transactions on Multimedia*, 5(3) :303–316, 2003.

[124] M. Trakaa and G. Tziritasa. Panoramic view construction. *Signal Processing : Image Communication*, 18 :465–481, 2003.

[125] Ge Yang, James A. Gaines, and Bradley J. Nelson. A surpervisory wafer-level 3d microassembly system for hybrid mems fabrication. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 37(1) :43–68, 2003.

[126] Liguo Chen, Lining Sun, Weibin Rong, and Xinqian Bian. Hybrid control of vision and force for mems assembly system. In *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biometrics. Shenyang, China. August 2004*, 2004.

[127] N. Dechev, W. L. Cleghorn, and J. K. Mills. Microassembly of 3-d microstructures using a compliant, passive microgripper. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 13(2) :176– 189, 2004.

[128] Eniko T. Enikov and Lyubomir Minkov. Micro-assembly and packaging of mems using optically transparent electrostatic gripper. In *Proceedings of 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2004), November 13-20, 2004, Anaheim, California, USA*, 2004.

[129] Michael A. Greminger and Bradley J. Nelson. Vision-based force measurement. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 26/N°3 :290–298, 2004.

[130] Takeshi Kasaya, Hideki Miyazaki, Shigeki Saito, Koichi Koyano, Tomio Yamaura, and Tomomasa Sato. Image-based autonomous micromanipulation system for arrangement of spheres in a scanning electron microscope. *Review of scientific instruments*, 75(6) :2033–2042, 2004.

[131] David G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60 (2) :91–110, 2004.

[132] Xiadong Lv and Xinhan Huang. Three-layered control architecture for microassembly with human-robot task plan interaction. In *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biometrics, August 22-26, 2004, Shenyang, China*, 2004.

[133] Ezio Malis. Improving vision-based control using efficient second-order minimization techniques. In *2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*, pages 1843–1848, 2004.

[134] L. Di Stefano, M. Marchionni, and S. Mattoccia. A pc-based real-time stereo vision system. *Machine Graphics and Vision*, 13(3) :197–220, 2004.

[135] W.T. Sun and T.C. Chin. Image-based visual servo for micromanipulation : a multiple-view and multiple-scale approach. In *2004 International Symposium on Micro-Nanomechatronics and Human Science*, 2004.

[136] M. Weck and C. Peschke. Equipment technology for flexible and automated micro-assembly. *Microsystem Technologies*, 10 :241–246, 2004.

[137] J. Wedekind. Focus set based reconstruction of micro-objects. In *International IEEE Conference on Mechatronics & Robotics (MechRob'04), Aachen, Germany, 13-15 September 2004*, 2004.

[138] R. S. Weinstein, M. R. Descour, Chen Liang, Gail Barker, Katherine M. Scott, Lynne Richter, Elizabeth A. Krupinski, Achyut K. Bhattacharyya, John R. Davis, Anna R. Graham, Margaret Rennels, and William C. Russum. An array microscope for ultrarapid virtual slide processing and telepathology. design, fabrication and validation study. *Human Pathology*, 35(11) :1303–1314, 2004.

[139] Thierry Zamofing and Heinz Hugli. Multiresolution reliability scheme for range image filtering. In *SPIE5606*, 2004.

[140] J. Agnus, P. Nectoux, and N. Chaillet. Overview of microgrippers and design of a micromanipulation station based on mmoc microgripper. In *IEEE*

International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, CIRA, Finland, 2005.

[141] Nicolas Cornille. *Accurate 3D Shape and Displacement Measurement using a Scanning Electron Microscope*. PhD thesis, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux. Albi, France, 2005.

[142] Michael Figl, Christopher Ede, Johann Hummel, Felix Wanschitz, Rolf Ewers, Helmar Bergmann, and Wolfgang Birkfellner. A fully automated calibration method for an optical see-through head-mounted operating microscope with variable zoom and focus. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, Vol. 24, N° 11 :1492–1499, 2005.

[143] Romuald Ginhoux, Jacques Gangloff, Michel de Mathelin, Luc Soler, Mara M. Arenas Sanchez, and Jacques Marescaux. Active filtering of physiological motion in robotized surgery using predictive control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 21(1) :235–246, 2005.

[144] Michael A. Greminger and James F. Jones. Real-time three-dimensional visualization of standard light microscope image sequences for microassembly. In *The 6th IEEE Symposium on Assembly and Task Planning, ISATP*, 2005.

[145] Benjamin Potsaid, Yves Bellouard, and John T. Wen. Adaptive scanning optical microscope (asom) : a multidisciplinary optical microscope design for large field of view and high resolution imaging. *Optics Express*, 13(17) :6504–6518, 2005.

[146] Torsten Sievers and Sergej Fatikow. Visual servoing of a mobile microrobot inside a scanning electron microscope. In *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2005.

[147] Lining Sun, Hui Xie, Weibin Rong, and Liguo Chen. Task-reconfigurable system for mems assembly. In *Proceedings of ICRA 2005, Barcelona, Spain, April*, 2005.

[148] Yu Sun, Stephan Duthaler, and Bradley J. Nelson. Autofocusing algorith selection in computer microscopy. In *Proceedings of 2005 IEEE/RSJ IROS*, 2005.

[149] Xiaodong Tao, Hyungsuck Cho, and Youngjun Cho. Microassembly of peg and hole using active zooming. In *Proc. of SPIE Vol. 6052*, 2005.

[150] Ge Yang, James A. Gaines, and Bradley J. Nelson. Optomechatronic design of microassembly systems for manufacturing hybrid microsystems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(4) :1013–1023, 2005.

[151] François Chaumette and Seth Hutchinson. Visual servo control, part 1 : Basic approaches. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 13(1) :82–90, 2006.

[152] Andrew I. Comport, Member, Eric Marchand, Muriel Pressigout, and François Chaumettemalis. Real-time markerless tracking for augmented reality :

The virtual visual servoing framework. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 12(4) :615–628, 2006.

[153] Eddie Cooke, Peter Kauff, and Thomas Sikora. Multi-view synthesis : A novel view creation approach for free viewpoint video. *Signal Processing : Image Communication*, 21 :476–492, 2006.

[154] Byungkyu Kim, Hyunjae Kang, Deok-Ho Kim, and Jong-Oh Park. A flexible microassembly system based on hybrid manipulations scheme for manufacturing photonics components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(3-4) :379–386, 2006.

[155] Hongdong Li and Richard Hartley. Inverse tensor transfer with applications to novel view synthesis and multi-baseline stereo. *Signal Processing : Image Communication*, 21 :724–738, 2006.

[156] Jun Liu and Roger Hubbold. Automatic camera calibration and scene reconstruction with scale-invariant features. In *ISVC*. University of Manchester, 2006.

[157] Jean-Louis Pouchou, Denis Boivin, Gilles Lapasset, Pierre Beauchêne, Guy Le Besnerais, Fabien Vignon, and Hélène Oriot. Reconstruction 3d de surface de matériaux par stéréoscopie en microscopie electronique à balayage (meb). In Christian Germain and Patrice Simard, editors, *Journée de travail Image et Métrologie, GDR ISIS, Bordeaux, 27 janvier 2006.* ONERA, 2006.

[158] Torsten Sievers and Sergej Fatikow. Real-time object tracking for the robot-based nanohandling in a scanning electron microscope. *Journal of Micromechatronics*, 3(3-4) :267–284, 2006.

[159] Michael A. Sutton, Ning Li, Dorian Garcia, Nicolas Cornille, Jean Jose Orteu, Stephen R. McNeill, Hubert W. Schreier, and Xiaodong Li. Metrology in a scanning electron microscope : theoretical developments and experimental validation. *Measurement science and technology*, 17(10) :2613–2622, 2006.

[160] W. Zhao. Flexible image blending for image mosaicing with reduced artifacts. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 20(4) :609 ?628, 2006.

[161] Jake J. Abbott, Zoltan Nagy, Felix Beyeler, and Bradley J. Nelson. Robotics in the small. part i : Microrobotics. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 14(2) :92–103, 2007.

[162] François Chaumette and Seth Hutchinson. Visual servo control, part. 2 : Advanced approaches. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 14(1) :109–118, 2007.

[163] Sergei Fatikow, Thomas Wich, Helge Hulsen, Torsten Sievers, and Marco jahnish. Microrobot system for automatic nanohandling inside a scanning

electron microscope. *IEEE/ASME, IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 12(3) :244–252, 2007.

[164] Indra Geys and Luc Van Gool. View synthesis by the parallel use of gpu and cpu. *Image and Vision Computing*, 25 :pp. 1154–1164, 2007.

[165] R. Hartley and S. Kang. Parameter-free radial distorsion correction with center of distorsion estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 29 :1309–1321, 2007.

[166] Marco Jaehnisch and Sergej Fatikow. 3-d vision feedback for nanohandling monitoring in a scanning electron microscope. *International Journal of Optomechatronics*, 1(1) :4–26, 2007.

[167] Vinutha Kallem, Maneesh Dewan, John P. Swensen, Gregory D. Hager, and Noah J. Cowan. Kernel-based visual servoing. In *IEEE/RSJ ICRA*, 2007.

[168] T. Molinier, D. Fofi, F. Meriaudeau, and R. Seulin. Trifocal tensor as a tool for modeling an imperceptible structured light sensor. *J. Opt. Technol*, 74(4) :282–287, 2007.

[169] Geraldo Silveira and Ezio Malis. Real-time visual tracking under arbitrary illumination changes. In *2007 Internation Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2007)*, 2007.

[170] M.A. Sutton, N. Li, D.C. Joy, A.P. Reynolds, and X. Li. Scanning electron microscopy for quantitative small and large deformation measurements part i : Sem imaging at magnifications from 200 to 10,000. *Experimental Mechanics*, 47(6) :775–787, 2007.

[171] Hui Xie, Weibin Rong, and Lining Sun. A flexible experimental system for complex microassembly under microscale force and vision-based control. *International Journal of Optomechatronics*, 1(1) :81–102, 2007.

[172] Tarkan Aydin and Yusuf Sinan Akgul. A new adaptive focus measure for shape from focus. In *BMVC 2008*, 2008.

[173] S. Fatikow and V. Eichhorn. Nanohandling automation : trends and current developments. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 222 :1353–1369, 2008.

[174] Arne Sieber, Pietro Valdastri, Keith Houston, Arianna Menciassi, and Paolo Dario. Flip chip microassembly of a silicon triaxial force sensor on flexible substrates. *Sensors and Actuators A*, 142(1) :421–428, 2008.

[175] Mehdi Ammi, Vincent Frémont, and Antoine Ferreira. Automatic camera-based microscope calibration for a tele-micromanipulation system using a virtual pattern. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(1) :184–191, 2009.

[176] Sergej Fatikow, Christian Dahmen, Tim Wortmann, and Robert Tunnel. Visual feedback methods for nanohandling automation. *International Journal of Information Acquisition*, 6(3) :159–169, 2009.

[177] Bradley E. Kratochvil, Lixin Dong, and Bradley J. Nelson. Real-time rigid-body visual tracking in a scanning electron microscope. *International Journal of Robotics Research*, 28(4) :498–511, 2009.

[178] Martin Probst, Christoph Hürzeler, Ruedi Borer, and Bradley J. Nelson. A microassembly system for the flexible assembly of hybrid robotic mems devices. *International Journal of Optomechatronics*, 3(2) :69–90, 2009.

[179] Yajing Shen, Masahiro Nakajima, Mohd Ridzuan Ahmad, Toshio Fukuda, Seiji Kojima, and Michio Homma. Single cell injection using nano pipette via nanorobotic manipulation system inside e-sem. In *9th IEEE Conference on Nanotechnology, IEEE NANO 2009, p 518-521*. Department of Micro-Nano Systems Engineering, Nagoya University, Nagoya, Japan, 2009.

[180] Daniel Jasper and Sergej Fatikow. Line scan-based high-speed position tracking inside the sem. *International Journal of Optomechatronics*, 4(2) :115–135, 2010.

[181] Yajing Shen, Masahiro Nakajima, Seiji KOjima, Michio Homma, and Toshio Fukuda. Nano knife fabrication and calibration for single cell cutting inside environmental sem. In *2010 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, p. 316-320*. Nagoya University, 2010.

[182] Redwan Dahmouche, Nicolas Andreff, Youcef Mezouar, and Philippe Martinet. Dynamic visual servoing from sequential regions of interest acquisition. *The International Journal of Robotics Research*, 31(4) :520–537, 2012.

[183] Eric Mounier and Jérôme Baron. Volume consumer markets are changing mems manufacturing. *Solid State Technology*, 55(6), 2012.

[184] Cécile Sornay. Robovolution capital : Création du 1er fonds d'investissement européen dédié à la robotique de service. Communiqué de presse, 2012.

[185] Gianluca Antonelli, Thor I. Fossen, and Dana R. Yoerger. *Handbook of robotics*, chapter Underwater robotics, pages 987–1008. Springer, 2008.

[186] Karl F. Bohringer, Ronald S. Fearing, and Ken Y. Goldberg. *The handbook of industrial robotics, second edition*, chapter Microassembly, pages 1045–1068. Wiley and sons, university of washington, college of engineering, 1999.

[187] Jean-Philippe Borel. *Biochimie dynamique*. De Boeck, 1997.

[188] F. Charlot, P. Jonnard, F. Roussel, J. Ruste, F. Grillon, A. Jadin, C. Mattieu, M. Ripoux, R. Passas, G. Thollet, F. Brisset, A Malchere, F. Maniguet, D. Boivin et C. Gendarme, A. Crisci, J.L. Pouchou, F. Robaut, T. Baudin, A.L. Etter, J. Cazaux, M. Betbeder, P. Hallegot, J.P. Lechaire, D. Dupeyre, J.M. Chaix, J.M. Missiaen, R. Chiron, G. Auvert, P. Donnadieu, and F. Donatini. *Microscopie électronique à balayage et microanalyses*. Paris : EDP Sciences, 2008.

[189] François Chaumette and Seth Hutchinson. *Handbook of robotics*, chapter Visual servoing and visual tracking, pages 563–584. Springer, 2008.

[190] Christian Cibert. *Fondamentaux d'optique et d'imagerie numérique à l'usage des microscopistes*. Cépaduès-éditions, 2005.

[191] Erdyn Consultants. *Le développement industriel futur de la robotique personnelle et de service en France*, Avril 2012.

[192] Sergej Fatikow. *Automated Nanohandling by Microrobots*. Springer-Verlag, 2008.

[193] Sergej Fatikow and Ulrich Rembold. *Microsystem Technology and Microrobotics*. Springer, 2010.

[194] Jacques Gangloff, Florent Nageotte, and Philipe Poignet. *Medical robotics*, chapter Vision-based control, pages 177–232. ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc, 2012.

[195] C. Gasquet and P. Witomski. *Analyse de Fourier et applications : filtrage, calcul numérique, ondelettes*. Masson, 1995.

[196] Martin Hägele, Klas Nilsson, and J. Norberto Pires. *Handbook of robotics*, chapter Industrial robotics, pages 963–986. Springer, 2008.

[197] Richard Hartley and Andrew Zisserman. *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2nd edition edition, 2006.

[198] M. Kunt. *Traitement numérique des signaux*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 1996.

[199] J. Max and J. L. Lacoume. *Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques*. Masson, 2000.

[200] Ministère de l'Industrie. *Technologies clés 2015 du secteur Technologies de l'information et de la communication*.

[201] Bradley J. Nelson, Lixin Dong, and Fumihito Arai. *Handbook of robotics*, chapter Micro/Nanorobotics, pages 411–450. Springer, 2008.

[202] Bradley J. Nelson, Steve Ralis, Yu Zhou, and Barmeshwar Vikramaditya. *Force and vision feedback for robotic manipulation of the microworld*, volume 250/2000 of *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, chapter Haptics In Experimental Robotics VI, pages 433–442. Springer Berlin, Heidelberg, 1999.

[203] Elizabeth M. Slayter and Henry S. Slayter. *Light and electron microscopy*. Cambridge University Press, 1992.

[204] Russell H. Taylor, Arianna Menciassi, Gabor Fichtinger, and Paolo Dario. *Handbook of robotics*, chapter Medical robotics and computer-integrated surgery, pages 1199–1222. Springer, 2008.

[205] Jocelyne Troccaz. *Medical Robotics*. John Wiley & Sons, 2012.

[206] USA. *Productive nanosystems : a technology roadmap*.

[207] Kazuya Yoshida and Brian Wilcox. *Handbook of robotics*, chapter Space robotics, pages 1031–1063. Springer, 2008.

***

La propriété est impossible.

Pierre-Joseph PROUDHON. Qu'est-ce que la propriété ?.

Résumé

La micro-robotique est une extension de la robotique à l'échelle micrométrique, c'est-à-dire autour de la résolution de l'œuil humain soit environ 100 μm. Sa naissance remonte aux années 90 à la suite de l'émergence des MEMS et MOEMS, une dizaine d'années plus tôt. Elle développe des solutions pour les applications de caractérisation de structures et de leur assemblage en produits composés, ou pour les applications de chirurgie minimalement invasive.

Nos travaux sont dans le prolongement de la micro-robotique. Ils portent sur la micro vision robotique, une thématique mariant judicieusement la micro-robotique et la micro-vision, c'est-à-dire la vision artificielle à l'échelle micro-métrique. Nous avons identifié et élucidé trois problématiques : l'imagerie avec les problèmes de modélisation et d'étalonnage, la synthèse d'images virtuelles avec les problèmes de calcul de microscopes virtuels exploitables, et l'asservissement visuel avec les problèmes de suivi robuste et précis d'informations dans les flux d'images, et les problèmes de calcul de lois de commande robustes et précises. Les développements ont été validés sur des applications d'instrumentation scientifique et industrielle : manipulation de micro-structures en vue de leur caractérisation ou de leur assemblage en structures 3D évoluées.

Ces travaux vont se poursuivre sur une application de chirurgie minimalement invasive : pilotage de la position d'un spot laser en vue d'intervention sur les tissus du larynx. Puis ils vont s'étendre aux échelles inférieures, c'est-à-dire entre 10 μm et 10 nm : la micro-nano et la nano visions robotiques. Les problématiques démeurent inchangées mais de nouveaux développements sont nécessaires pour prende en compte les propriétés spécifiques des imageries (microscopes électroniques) et des robots. Les applications ciblées par ces nouvelles thématiques sont la fabrication, la caractérisation et l'assemblage des micro-nano structures pour les systèmes opto-électroniques ou acousto-optiques.