

La robotique parallèle au service de la chirurgie maxillo-faciale

Ing. J-Ph. SOLEIL
Ir V. SERONT
ISICHT - Mons
Ir Khanh Tran DUY
Dr R. OLSZEWSKI
UCL

Cet article est d'un intérêt certain pour quiconque souhaite découvrir une application complète et pratique de la robotique parallèle. De même, il constitue une excellente illustration de la polyvalence dont doit faire preuve l'ingénieur mettant la technique au service de secteurs tels que celui du monde médical. Partant de la procédure globale, l'article présente toute l'évolution de ce projet pluridisciplinaire.

Mots-clés : robotique parallèle, modèle géométrique, codeur incrémental, chirurgie maxillo-faciale.

This paper will be of great interest for whoever wishes to discover a complete and practical application in parallel robotics. Likewise, it will constitute an excellent illustration of the versatility of the engineer who wants to put the technique at the service of sectors such the medical world. Starting with the global procedure, the article will present all the evolution of this multi-field project.

Key words: parallel robotics, geometrical model, incremental encoder, orthognathic surgery.

1. Introduction

Voilà presque deux ans que le Centre d'Etudes et de Recherches de l'ISIC Mons (CERISIC) s'est investi dans le projet HEROL, financé dans le cadre des projets WALEO par la Région Wallonne. Il s'agit d'un projet d'initiative visant la mise à profit des compétences de différents partenaires issus du monde médical, technique et informatique et ayant pour sujet la « Conception d'un dispositif global d'assistance en chirurgie maxillo-faciale ».

Les cinq partenaires regroupés autour de ce projet pluridisciplinaire sont : les unités de stomatologie, de télécommunication et de production mécanique de l'UCL (Woluwe et Louvain-la-Neuve), le pôle de Rapid Prototyping du CRIF (Seraing) et le Centre d'Etudes et de Recherches de l'ISIC (Mons).

2. But du projet

HEROL a pour but d'améliorer les performances de la chirurgie maxillo-faciale en fournissant au chirurgien de nouveaux outils performants et précis, intégrant de manière complète la troisième dimension dans le diagnostic, la planification, la simulation et l'exportation des résultats en salle d'opération.

La contribution du CERISIC consiste en l'instrumentation d'un robot manipulateur passif à 6 degrés de liberté et au développement de l'interface de mesure de son déplacement dans l'espace. Ce robot sert dans toute la phase de préparation et de simulation de l'opération à la mesure du déplacement relatif des fragments d'os dans l'espace. Le cahier des charges spécifie une précision pour la mesure de l'ordre de 0.1 [mm] en position et de 0.1 [°] en orientation.

3. Contexte

La chirurgie maxillo-faciale assure le diagnostic et le traitement des pathologies de la bouche et des mâchoires (par exemple : dysharmonie faciale, retrognathie/prognathie mandibulaires, bec de lièvre, etc.). Selon

une approche purement esthétique et/ou fonctionnelle, elle traite la déformation des mâchoires, les traumatismes faciaux et leurs séquelles. De nos jours, le diagnostic est mené sur téléradiographie 2D selon l'analyse céphalométrique du Prof. J. Delaire. Par construction géométrique, cette méthode précise les déplacements des mâchoires du patient. HEROL vise l'introduction de la troisième dimension dans cette procédure, selon une nouvelle analyse proposée par le Dr. R. Olszewski.

Du patient jusqu'en salle d'opération, le schéma global (fig.1) reprend les quatre modules constituant les différentes pièces du projet HEROL.

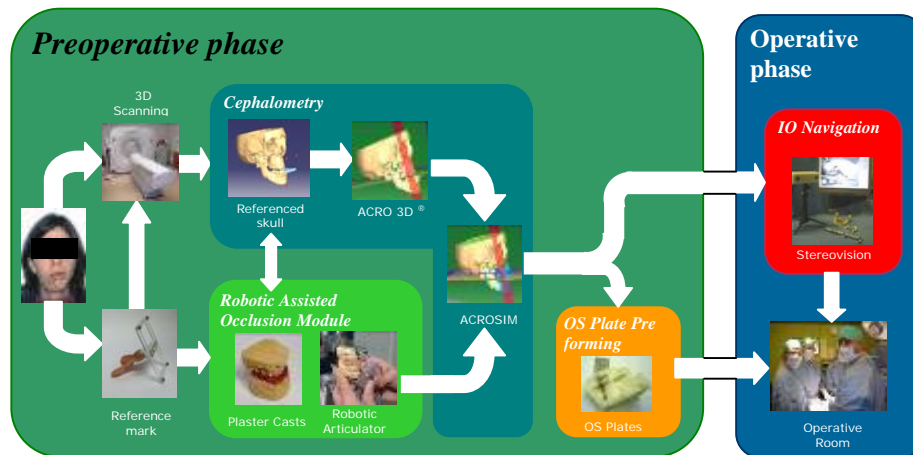


Figure 1 : Procédure globale du projet HEROL

Décomposons le problème en deux phases distinctes :

- la phase préopératoire : analyse, planification, simulation
- la phase opératoire : intervention proprement dite sur le patient

3.1 La phase préopératoire

L'intervention du chirurgien consiste à réaliser des découpes dans l'os (ostéotomies), à avancer ou reculer les fragments (mandibule et/ou maxillaire) et à les fixer dans la position finale désirée à l'aide de plaques d'ostéosynthèse (fig. 2).



Figure 2 : Fixation des os à l'aide de plaques d'ostéosynthèse

La phase préopératoire doit prévoir les traits d'ostéotomies et les déplacements à réaliser par le chirurgien. A l'aide du logiciel d'imagerie médicale ACRO 3D[®] - développé par le partenaire TELE et basé sur une image 3D du patient (issue d'un scanner CT-Scan) - l'analyse céphalométrique 3D, développée par le Dr. Olszewski dans le cadre de sa thèse de doctorat, est réalisée. Par différents plans tracés dans l'espace, le chirurgien détermine les paramètres amenant une bonne harmonie faciale.

D'autre part, pour des raisons plutôt fonctionnelles cette fois, le chirurgien doit garantir une bonne occlusion dentaire (engrènement correct des dents les unes sur les autres). Le chirurgien va travailler avec des modèles en plâtre des dents du patient. C'est ici qu'intervient le manipulateur robotisé, chargé de la mesure du déplacement relatif de la mandibule par rapport au maxillaire. Les moulages en plâtre sont alors placés sur le manipulateur exactement comme sur le patient. Le chirurgien impose ensuite un déplacement relatif de la mandibule par rapport au maxillaire et le robot enregistre le vecteur déplacement correspondant en vue finalement de l'intégrer dans le logiciel d'imagerie médicale.

Il s'agit ensuite de faire converger l'analyse céphalométrique 3D avec le déplacement relatif mesuré. Les données sont fusionnées par le chirurgien dans la partie simulation du logiciel (encore en développement). Les traits d'ostéotomie sont virtuellement déterminés ainsi que la position des plaques d'ostéosynthèse, achevant la planification et la simulation de l'opération. Les zones du squelette où seront fixées ces dernières en phase opératoire sont sélectionnées et imprimées en modèles stéréo-lithographiques sur lesquels le chirurgien préformera les plaquettes (procédé de *rapid prototyping* réalisé au CRIF et consistant en l'impression couche par couche d'un objet pour restituer son volume).

3.2 La phase opératoire

Avant d'entrer en salle blanche, le chirurgien a donc à sa disposition :

- le modèle virtuel correspondant au résultat final désiré y compris les traits d'ostéotomie et position des plaquettes
- les plaquettes d'ostéosynthèse préformées conformément au modèle virtuel

Un système de navigation intra opératoire est la clé pour exporter tous les renseignements issus de l'analyse précédente et guider le chirurgien dans la réalisation des traits d'ostéotomie et la fixation des plaquettes d'ostéosynthèse. Il est en effet possible, à l'aide d'un système de stéréovision, de procéder au suivi d'objets dans l'espace. Le visage du patient ainsi que les outils du chirurgien sont équipés de marqueurs et peuvent être suivis dans l'espace tridimensionnel restitué par les deux caméras du système de stéréovision. Une fois co-registrés avec le modèle virtuel de la partie simulation, les informations relatives aux traits d'ostéotomie et au positionnement des plaquettes peuvent être retournées au chirurgien pour l'aider dans son travail.

4. La robotique parallèle

Précisons, à présent, la collaboration du CERISIC dans le projet et abordons quelques principes de robotique parallèle.

Les premiers mécanismes parallèles remontent à un peu moins de cinquante ans mais ce n'est que depuis une vingtaine d'années qu'il est vraiment question d'essor. Celui-ci est, par exemple, fort présente dans le domaine des simulateurs de vol ainsi que dans l'industrie pour la réalisation de mouvements précis et rapides (ex : fabrication des semi-conducteurs). Une structure parallèle se définit comme :

« Un mécanisme en chaîne cinématique fermée dont l'organe terminal est relié à la base par plusieurs chaînes cinématiques indépendantes »

4.1 Robot parallèle vs robot série

Pour les robots « série », à l'inverse des structures parallèles, on parle de chaînes cinématiques ouvertes, c'est-à-dire que les éléments constitutifs du robot sont agencés les uns à la suite des autres un peu à l'image d'un bras humain.

La figure 3 permet la comparaison entre structure parallèle et structure série (respectivement à gauche et à droite).



Figure 3 : Structure parallèle de Stewart - Robot « série » KR 100 P

Les principaux avantages des robots parallèles sont :

- une meilleure précision (dans un bras « série » les erreurs de position s'additionnent le long de la chaîne ; ils sont soumis à flexion, source d'écarts non mesurables par les capteurs proprioceptifs)
- une plus grande rapidité d'exécution
- une réduction de l'encombrement
- un meilleur rapport charge utile/masse
- une répartition sensiblement équitable des efforts sur chaque bras

Cependant, les structures parallèles n'ont pas que des avantages. La commande des robots « série » s'avère peu compliquée du fait d'un modèle géométrique directement accessible par les fonctions trigonométriques de base, il n'en est pas de même pour les robots parallèles pour lesquels le modèle géométrique est complexe. Nous noterons aussi que l'espace de travail des robots parallèles se trouve généralement plus réduit.

4.2 Robot actif, semi actif ou passif

Dans le cadre du projet HEROL, il était initialement prévu de réaliser un robot manipulateur actif, c'est-à-dire une structure motorisée capable de

reproduire exactement sur des modèles en plâtre les déplacements mandibule-maxillaire définis dans une simulation logicielle.

Bien que séduisante dans son principe, cette approche logicielle fut finalement rejetée en partie à cause du problème de la mise en occlusion des dents. Celle-ci suppose en effet de disposer d'un puissant algorithme capable de déterminer la meilleure occlusion dentaire. Mais surtout, cela implique d'accéder à un modèle informatique précis des dents du patient. Or, la résolution du scanner est de l'ordre du millimètre et bien souvent la présence d'un matériel d'orthodontie et autres plombages détériore la qualité des images (problème d'artefacts).

Imaginer de réguler en position la structure, au dixième de millimètre, pour finalement relâcher la commande et permettre au chirurgien de chercher manuellement la meilleure occlusion des modèles en plâtre était un non-sens. Par ailleurs, il est important que les chirurgiens, utilisateurs finaux, puissent conserver quelques unes de leurs habitudes et ainsi adopter plus aisément le nouveau dispositif.

La question fut alors de choisir entre la solution d'un manipulateur purement passif (déplacé manuellement, le robot passif constitue une aide informationnelle, il ne comporte pas d'actionneurs) et un manipulateur semi-actif (déplacement manuel, tout en privilégiant cette fois certaines directions imposées par des actionneurs). Après étude, le choix final s'est porté vers une solution passive, solution qui aujourd'hui d'ailleurs se révèle effectivement la plus adaptée.

4.3 La structure développée dans le cadre du projet HEROL

L'unité PRM (Unité de Production Mécanique et Machine de l'UCL), partenaire principal du CERISIC dans ce projet, était chargée de l'étude et de la réalisation mécanique de la structure. Il s'agit d'un hexapode, structure parallèle à six degrés de liberté. Les caractéristiques principales de cette réalisation sont :

- une finition « zero backlash » nécessitant un grand soin dans le choix des matériaux et dans la réalisation des pièces de sorte à disposer d'une structure mécanique de précision

- un système original de rotules magnétiques, développées spécialement par l'unité PRM pour l'application et offrant de grands débattements angulaires à un prix hors compétition (fig. 4)

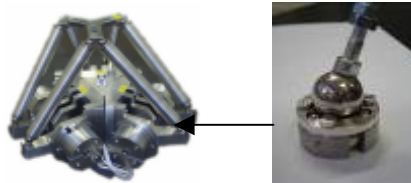


Figure 4 : L'hexapode développé pour le projet – détail d'une rotule

5. Instrumentation du robot manipulateur

Comportant six degrés de liberté, de type passif et de structure parallèle, ce robot n'est pas actionné ; il constitue un outil de mesure. Par l'intermédiaire de la position angulaire de chacune des six jambes du manipulateur, la posture du manipulateur pourra être déterminée (entendons par 'posture', la position et l'orientation de la plateforme).

5.1 Choisir un matériel de mesure angulaire

Tout d'abord, un état de l'art en matière de mesure de positions angulaires a été dressé. A cette étape du projet, le cahier des charges impliquait une mesure angulaire d'une résolution de l'ordre de $6 \cdot 10^{-04}$ [rad], soit $0.034[^\circ]$.

Le tableau de la figure 4 résume les conclusions tirées de cette étude :

Nom	Type	Signal	Résolution	Mesure	Prix	Qualité principale	Défaut principal
Potentiomètre	résistif	A	+	Absolue	€	Bon marché	Mesure avec contact (usure)
Resolver	inductif	A	++	Absolue	€€€€	Finesse de la mesure	Mauvais comportement dynamique
Inductosyn	inductif	A	++++	Absolue ou Incrémentale	€€€€€	Finesse de la mesure	Electronique coûteuse (aérospatial, militaire)
Codeur incr.	optique (existe en magnétique)	D	+++	Incrémentale	€€	Meilleur rapport qualité/prix	Mesure relative, fréquence élevée
Codeur abs.	optique (existe en magnétique)	D	++	Absolue	€€€	Pas d'initialisation de la mesure	Devient vite encombrant avec la résolution
SinCos	optique + interp. numérique	D	++++	Incrémentale	€€€€	Finesse de la mesure	Electronique coûteuse

Figure 4 : Tableau récapitulatif - mesures de position angulaire

La solution du codeur incrémental a été retenue (fig. 5). Un codeur d'une résolution de 7500 [PPR] (Pulse Per Revolution) du fabricant scandinave SCANCON[®] a pu faire l'objet de premiers tests de validation.



Figure 5 : Le codeur 2RM-HF de SCANCON[®]

5.2 Choisir un matériel d'acquisition

Les codeurs incrémentaux en quadrature délivrent deux trains d'impulsions déphasés de 90[°] (canaux A et B) (fig.6). Ces codeurs se connectent sur un matériel d'acquisition constitué principalement de compteurs rapides. Ce type de carte est de même équipé de puces de type LS7084 (ou LS7083) capables de discriminer le sens de rotation de l'axe par détection des fronts montants et descendants de chaque sortie. Grâce à ce déphasage des signaux, il est possible de multiplier par deux ou par quatre la résolution de

base du codeur. Par ce biais, le codeur à 7500 [PPR] permet d'atteindre une résolution de 30 000 [PPR], soit 0.012 [°] largement suffisant. Pour chaque impulsion lue, le compteur rapide associé sera incrémenté ou décrétement. La précision du codeur est de l'ordre de +/- 10% de sa résolution.

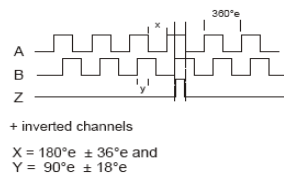


Figure 6 : Diagramme de sortie d'un codeur en quadrature

Pour la mesure de la position des six jambes du manipulateur, nous avons retenu un modèle de cartes externes sur USB (les cartes USB1 du fournisseur américain USDigital). Communiquant via le bus universel USB, fournies avec une bibliothèque de fonctions (DLL et driver système) facilement intégrables en Delphi, VB, C/C++ ou autre, elles se connectent à chaud sur n'importe quelle station de travail (contrairement aux autres solutions PCI, SCSIII, PXI, etc.) et constituent une excellente solution bon marché. Chaque carte accepte jusque 4 codeurs en quadrature et dispose de 8 I/O digitales, mises à profit pour l'interfaçage du manipulateur (interface utilisateur, dispositif de blocage, etc.).



Figure 7 : Schéma de la chaîne de d'acquisition

6. Mesurer un déplacement dans l'espace à l'aide du robot

La mesure d'un déplacement relatif dans l'espace par la structure parallèle équipée de ses codeurs incrémentaux requiert inévitablement une

initialisation. En effet, un codeur incrémental réalise une mesure relative. Cependant, par l'entremise de l'impulsion d'index générée pour une position unique du codeur sur sa troisième sortie (canal Z), on peut effectuer une initialisation par rapport à un repère fixé une fois pour toute. Cette initialisation a été programmée et intégrée dans l'interface de mesure de manière transparente pour l'utilisateur.

6.1 Modélisation de la structure

A présent que nous mesurons avec précision et, dans un repère connu, la position angulaire de chacune des six jambes de la structure parallèle, nous allons pouvoir nous intéresser davantage à son modèle géométrique.

De tels mécanismes se modélisent comme un ensemble de corps liés les uns aux autres par une série de joints et d'articulations élémentaires (translation ou rotation à degré de liberté unique). La position et l'orientation de chacun sont à chaque fois précisées par une variable dite « coordonnée articulaire ». De même, la position de la plateforme se définit par un ensemble de variables appelées coordonnées généralisées. Le passage de l'espace articulaire vers l'espace généralisé consiste à résoudre le problème du modèle géométrique direct de la structure (fig. 8). La structure a été modélisée par le logiciel ROBOTRAN[®] - développé ultérieurement par l'unité PRM - un calcul itératif selon la méthode de Newton-Raphson permet la fermeture de chacune des boucles cinématiques de la structure (fig. 9).

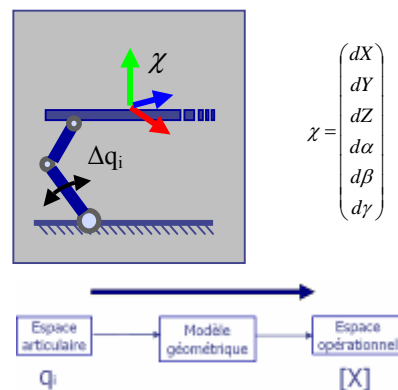


Figure 8 : Principe de la résolution du modèle géométrique

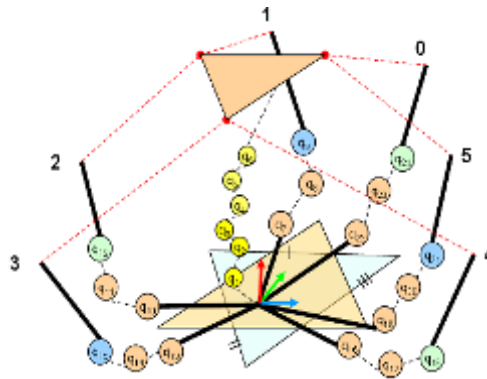


Figure 9 : Modèle de la structure

6.2 Le passage de repère

L'étape suivante consiste à lier le déplacement des modèles en plâtre des dents du patient sur le manipulateur avec le modèle virtuel du logiciel d'imagerie médicale : le passage de repère (fig.10).

Un petit cadre comportant quatre billes de titane et fixé sur un mordu de cire placé sur le patient lors de son passage dans le scanner résout ce problème.

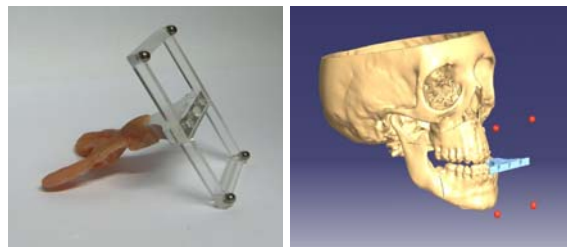


Figure 10 : Le passage de repère

Le crâne virtuel peut dès lors facilement être référencé dans le logiciel d'imagerie médicale. Le mordu étant de même un enregistrement de la position absolue des mâchoires par rapport aux billes de titane, la fixation de ce repère sur la plateforme étant unique et quantifiable par un vecteur, l'initialisation de la mesure dans le repère du patient virtuel ne pose pas de problème.

Les déplacements ensuite mesurés pouvant être exprimés à l'aide de matrices de transformation en coordonnées homogènes, l'expression des positions et des déplacements dans l'un ou l'autre repère se résume à du calcul matriciel de base. Mémorisant ainsi la position initiale de la mandibule dans le repère du manipulateur, la déplaçant ensuite pour l'amener en occlusion avec le maxillaire - soit la configuration finale désirée - le déplacement relatif de l'un par rapport à l'autre peut enfin être exporté pour être fusionné avec l'analyse céphalométrique 3D.

6.3 L'interface de mesure via le robot passif

L'interface développée pour la mesure via le robot manipulateur consiste en un programme informatique (code source en C) incluant :

- l'initialisation de la communication avec les cartes d'acquisition
- l'initialisation de la mesure (index des 6 codeurs incrémentaux)
- la séquence de la procédure à suivre pas à pas
- le dialogue avec l'utilisateur (via deux pédales)
- la lecture cyclique des positions angulaires de chaque jambe
- la résolution du modèle géométrique direct
- l'initialisation de la position de la mandibule par rapport au maxillaire
- la mesure du déplacement relatif
- le passage de repère

Le tout sera implémenté par la suite dans la partie simulation du logiciel d'imagerie médicale : ACROSIM (encore en développement).

Une interface de démonstration a cependant été développée afin de procéder aux premières validations du dispositif. Cette interface consiste en :

- une approche didactique du principe du manipulateur
- une explication pas à pas de la procédure
- une visualisation 3D en temps réel des déplacements de la structure dans l'espace

7. Validation

Une première présentation de la procédure globale a eu lieu le 28 mai 2005, à l'occasion des 100 ans de stomatologie et des 25 ans de la chirurgie maxillo-faciale organisés par les Cliniques Universitaires de Saint-Luc (Woluwé). Quelques cent quatre-vingt stomatologues, chirurgiens et autres dentistes s'étaient déplacés pour l'occasion, dont l'illustre Professeur J. Delaire qui n'a pas hésité à se prêter au jeu pour la démonstration du nouveau manipulateur (fig.11).



Figure 11 : Le Prof. J Delaire et le robot manipulateur

Concernant la validation quantitative, la résolution de la mesure est inférieure à 0.05 [mm]. La structure a fait l'objet d'une calibration précise consistant en un paramétrage minutieux de chacun des corps constitutifs. Chaque pièce a été mesurée à l'aide d'une machine de mesure 3D, gold standard en la matière, financée dans le cadre de ce projet par le FNRS. Cette dernière étape permettra de valider la précision de la mesure effectuée à l'aide de la structure parallèle. On peut s'attendre, vu la précision d'usinage de la structure, à des résultats de l'ordre de grandeur de la résolution.

8. Conclusions

Fruit d'une étroite collaboration entre l'unité PRM et le CERISIC, le manipulateur et son interface sont aujourd'hui tout à fait fonctionnels.

Le dispositif présenté à l'occasion de la conférence sur la chirurgie maxillo-faciale fin mai 2005, a attiré toute l'attention et l'intérêt des chirurgiens. Par

la suite de même, il pourra se montrer d'une grande utilité tant sur un plan scientifique que pédagogique. Le champ d'application pourra aussi s'étendre à d'autres domaines que celui de la chirurgie maxillo-faciale (pensons déjà à l'orthopédie).

Un projet pluridisciplinaire comme celui-ci a ceci d'intéressant qu'il amène l'ingénieur à faire preuve de toute la polyvalence dont il est capable : géométrie dans l'espace, calcul matriciel, acquisition de donnée, informatique (dessin 3D, DLL, GUI), mécanique, etc. Aussi l'ouverture d'esprit est de mise pour, d'une part bien cerner les attentes des chirurgiens et d'autre part expliquer de manière simple et accessible les solutions techniques apportées aux problèmes posés.

9. Bibliographie

- [1] OLSZEWSKI R., NICOLAS V., MACQ B., REYCHLER H. ACRO 4D: *universal analysis for four-dimensional diagnosis, 3D planning and simulation in orthognathic surgery*. In LEMKE HU., VANNIER MW., INAMURA K., FARMAN AG., DOI K., REIBER JHC. (Eds) *Computer Assisted Radiology and Surgery, CARS 2003* ; 1235-1240.
- [2] DOMBRE E., KHALIL W., *Modélisation et commande des robots*, Paris, Hermes Edition, 1988
- [3] MERLET J-P., *Les Robots Parallèles 2^{ème} édition revue et corrigée*, Paris, Hermes Edition, 1997
- [4] ASCH Georges, *Les capteurs en instrumentation industrielle*, 5ème édition. Paris, Dunod, 2002
- [5] ROBOTRAN User's Guide – 6.3 FSA :
<http://www.prm.ucl.ac.be/cours/meca2802/03-04/manuel63fsa.pdf>
- [6] USDigital USB1 User Manual :
<http://www.usdigital.com/products/usb1/index.shtml>