SECTION MICROTECHNIQUE



Conception et construction d'un Micro-Robot mobile pour

l'Astrophysique

Sujet proposé par : Le Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique

> Travail réalisé sous la supervision du : **Prof. Lorenzo Zago** ainsi que du : **Dr. François Barrot** et de : **Serge Droz, Ing. ETS**

${\rm Candidat \ Bachelor:} \\ Mathias \ Gumy$

30 novembre 2010



Table des matières

Ré	sumé	i
Ca	hier des charges	ii
Li	ste des abréviations et des dénominations	iii
Pr	ogramme de travail	\mathbf{iv}
1	Présentation du contexte et des solutions existantes 1.1 Présentation du contexte	1 1 2 2 3
	1.3.3 Le masque configurable du spectromètre multi-objets MOSFIRE 1.4 Quelques exemples de systèmes réflectifs 1.4.1 Les bras robotisés du spectromètre Kmos 1.4.2 Le projet Starbugs	$\begin{array}{c} 4\\ 4\\ 4\\ 5\end{array}$
2	Exigences du système	6
3	Catalogue de solutions pour le choix du système de locomotion des micro-robots 3.1 Les robots mobiles à roues	s 7 7 9 11 12 13
4	Etude des concepts développés par UK-ATC4.1Présentation du "Wheepie design"4.2Présentation du DMD design	16 16 19
5	Etude et compréhension des éléments fournis par UK-ATC 5.1 Présentation des éléments reçus 5.2 Analyse de l'alimentation par le substrat 5.2.1 Plan de charge 5.3 Description des moteurs choisis par UK-ATC 5.4 Tests effectués par UK-ATC sur le DMD design 5.4.1 Déplacements linéaires 5.4.2 Circularité des roues 5.4.3 Rotation sur l'axe de symétrie 5.4.4 Déviation de l'axe de rotation	21 21 21 24 25 25 25 26 26 26 27

6	Pré	-dimensionnement des divers composants du nouveau design du micro-robot	2 8
	6.1	Tests et caractérisation des moteurs choisis par UK-ATC	28
		6.1.1 Matériel utilisé	28
		6.1.2 Description des mesures effectuées	29
		6.1.3 Tests de répétabilité de mouvements	29
		6.1.4 Tests de caractérisation du jeu	31
		6.1.5 Tests de synchronisation des moteurs	33
		6.1.6 Conclusions	33
	6.2	Recherche et choix d'un nouveau moteur	34
	0	6.2.1 Description des valeurs d'intérêt	34
		6.2.2 Comparaison des alternatives moteurs	34
		6.2.3 Description du moteur choisi	35
		6.2.4 Création d'un PCB flevible d'interfacage	36
	63	Conception préliminaire	36
	0.0	6.3.1 Analyse des performances théoriques de la modélisation préliminaire	37
	64	Calcula et megures se reprovintant aux contects d'alimentation preminiaire	01 20
	0.4	6.4.1. Calcula théorieuna de florier	00 20
		0.4.1 Calculs theoriques de nexion	38
		0.4.2 Mesures de flexion	40
7	Cor	ception de la partie mécanique du MGD design	42
•	7 1	Etude des diverses pièces composant l'assemblage	42
	1.1	7.1.1 Lo châssis	43
		7.1.1 Le chassis	40
		7.1.2 Les hasques moteur	40
		7.1.3 Les roues	44
		7.1.4 Le support du l'OB comprenant les contacts	40
	7 0	7.1.5 Equimorage du micro-robot Etude de l'accomble de complet	40
	1.2	Etude de l'assemblage complet 7.9.1 Fination de matematique et accomplement aux marges	40
		7.2.1 Fixation du moteur et accouplement aux roues	40
	7.9	(.2.2 Fixation de la carte electronique principale	41
	1.3	vues 3D du concept	48
8	Cal	culs se rapportant au MGD design et comparaison avec ceux d'UK-ATC	49
0	81	Calcul de la résolution et de la vitesse du MGD design	49
	0.1	811 Calcul de la résolution théorique du micro-robot	49
		812 Calcul de la vitesse théorique du micro-robot	50
	82	Comparaison des valeurs théoriques obtenues pour les différents designs	50
	83	Calcul de la position statique du micro-robot	51
	0.0	8 3 1 Calcul du moment régultant de l'écrasament des lamos ressort	51
		8.3.2 Calcul du nouveau contra de massa du robot	51
	8 /	Calcul de l'accélération admissible par le miere robet	52
	0.4		00
9	Test	ts et caractérisation du micro-robot	56
	9.1	Matériel Utilisé	58
	9.2	Test de caractérisation des moteurs Penny	58
	0	9.2.1 Test en micro-pas	58
		9.2.2 Test de caractérisation du jeu sur le moteur	59
	93	Procédure de test de caractérisation du prototype	60
	0.0		00
10	Pho	tographies du MGD design	61
	10.1	Photographies des pièces	61
	10.2	Photographies de l'assemblage	63
	-		-
11	Am	éliorations possibles, Conclusion	65
	11.1	Améliorations possibles	65
		11.1.1 Réduction du volume des cates électroniques	65
		11.1.2 Implémentation d'un capteur incrémental	66
	11.2	Conclusion	67

\mathbf{A}	Datasheet moteurs	73
	A.1 Datasheet du moteur Smoovy	73
	A.2 Datasheet du moteur Penny	76
в	Analyse des mesures sur les moteurs Smoovy	81
	B.1 Analyse des tests de répétabillité	81
	B.2 Analyse des tests de caractérisation du jeu	91
	B.3 Analyse des tests avec Matlab	98
	B.4 Analyse des tests de synchronisaiton des moteurs	102
\mathbf{C}	Analyse des mesures sur les moteurs Penny	109
	C.1 Ånalyse des tests de micro-pas	109
	C.2 Analyse des tests de caractérisation du jeu	118
D	Comparaison des divers moteurs	123
\mathbf{E}	Calculs, mesure de flexion des lames ressort	143
F	PCB flexible d'interfaçage	148
\mathbf{G}	Mises en plan	154
	G.1 Mises en plan A3	154
	G.2 Mises en plan A4	158
н	Annexe des améliorations possibles	167
	H.1 Capteur POSIC	167

Résumé

Le présent rapport de travail de Bachelor présente la conception et la construction de micro-robots mobiles. Ces robots sont destinés à être placés sur le plan focal du future télescope européen géant (European Extremely Large Telescope, E-ELT). Leurs but sera de capter des faisceaux d'intérêt afin de les rediriger vers les composants qui en effectuent le traitement. Cette application implique que le robot ait une empreinte au sol qui soit la plus petite possible. Des études concernant la conception de ce système ainsi qu'un démonstrateur ont d'ores et déjà été réalisées par le Centre de Technologie en Astrophysique d'Edimbourg (UK-ATC). La précision d'un robot dépend de plusieurs éléments. Les moteurs, l'électronique et la communication sont bien évidemment des points clés pour atteindre une précision souhaitée, mais il est impossible de réaliser des déplacements précis sans une base mécanique rigide et précise.

La problématique de ce travail de Bachelor se trouve dans la conception d'un châssis mécanique permettant au robot de se positionner de manière extêmement précise sur un point définit par l'utilisateur. Le tout en garantissant non seulement cette précision dans le positionnement sur le plan x - y, mais aussi dans l'orientation angulaire du robot, le tout dans un volume minimal. Pour des raisons programmatiques, il a été décidé de reprendre l'électronique développée par UK-ATC et de l'intégrer dans un nouveau châssis afin de se concentrer sur l'aspect mécanique du microrobot.

En repartant du concept développé par UK-ATC, un châssis mécanique intégrant les diverses cartes électroniques de leur démonstrateur à été développé. Une attention toute particulière à été portée sur la simplicité lors de la conception de cette partie mécanique, sans toutefois négliger l'aspect premier de ce robot, à savoir sa capacité à se positionner de manière précise. Suite à un travail de conception et de modélisation, un prototype de robot à pu être produit et assemblé.

Cahier des charges

Le cahier des charges présenté ci-dessous est tel qu'il à été transmis à la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud (HEIG-VD).

- Etude et compréhension des spécifications du système
- Etablissement d'un catalogue de solutions pour les choix du système de locomotion des microrobots
- Etude et compréhension du démonstrateur fourni par UK-ATC
- Conception et pré-dimensionnement
- Dessins de fabrication, spécifications d'achat des composants
- Achat, suivi de fabrication, assemblage
- Tests de caractérisation du prototype
- Rédaction d'un rapport technique

Liste des abréviations et des dénominations

Tout au long de ce rapport de travail de Bachelor, plusieurs abréviations et dénominations particulières sont employées. La liste suivante en décrit les principales.

AAO	Anglo-Australian Observatory
DMD	Concept pour le micro-robot mobile, UK-ATC
EAP	ElectroActive Polymer
Echidna	Positionneur de fibres, projet de l'AAO
E-ELT	European Extremely Large Telescope
EPAM	Electrostrictive Polymer Artificial Muscle
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
ESA	Agence Spatiale Européenne
ESO	European Southern Observatory
HEIG-VD	Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud
Kmos	Spectrographe multi-objets
MGD	Concept pour le micro-robot mobile, Mathias Gumy
Nasmyth	Type de foyer pour télescopes à monture azimutale
OPTICON	OPTical Infrared Co-Ordination Network for Astronomy
OzPoz	Positionneur de fibres, projet de l' AAO
Starbugs	Positionneur de fibres, projet de l'AAO
UK-ATC	Centre de Technologie en Astrophysique d'Edimbourg
VLT	Very Large Telescope
Wheepie	Concept pour le micro-robot mobile, UK-ATC

Programme de travail

Plusieurs points sont nécessaires à la réalisation de ce travail de Bachelor. Lors des premières réflexions, il est important de se pencher sur les solutions déjà existantes afin de comprendre de quelle manière elles fonctionnent ainsi que les moyens utilisés. Cette étude permettra de mieux cerner les divers aspects et défis d'un tel projet.

La conception d'un micro-robot mobile nécessite une réflexion toute particulière sur le système de locomotion de ce dernier. Dans le cadre de ce travail, l'utilisation des éléments fournis par UK-ATC implique un système de locomotion utilisant des moteurs rotatifs. Leur choix s'étant porté sur un robot à roues, il en sera de même pour le futur prototype. Néanmoins, il est intéressant de se pencher sur les divers systèmes de locomotion permettant de rendre un robot mobile. Cette réflexion permettra de comprendre les implications du choix du système de locomotion dans la conception d'un micro-robot ainsi que ses répercussions sur sa précision et sa manoeuvrabilité.

UK-ATC a directement fourni un grand nombre de documents relatifs à leur démonstrateur. Il est donc nécessaire de se familiariser avec cette documentation afin de visualiser de quelle manière ils ont conçu leur prototype, quels ont été les problèmes rencontrés et les solutions trouvées pour pallier à ces derniers.

Comme convenu dès le début du travail, UK-ATC a fourni plusieurs éléments composant leur démonstrateur. Dès lors, il est nécessaire d'étudier ces éléments puisqu'ils feront partie intégrante du future prototype. Des tests de caractérisation des moteurs choisis par UK-ATC seront mis en oeuvre afin de déterminer s'il s'agit de la meilleure solution pour le système d'entrainement et le cas échéant de les exploiter au mieux.

Une fois ces divers aspects étudiés, il sera possible de débuter la conception de la partie mécanique du micro-robot. Cette dernière est le sujet principal de ce travail de Bachelor puisque le but final à savoir un prototype, résulte de cette conception. Le travail de conception nécessite une grande réflexion. En effet, il implique plusieurs aspects tels que l'intégration des moteurs et des cartes électroniques développées par UK-ATC, le tout dans un volume minimal, tout en gardant à l'esprit que l'objectif premier de ce concept est la précison dans le positionnement.

Suite à la conception du micro-robot, il sera possible d'entrer dans la phase de construction, à savoir l'usinage des diverses pièces nécessaires à l'assemblage de ce dernier. Il est important de tenir compte des délais d'usinage dans la planification du projet. En effet, un fois l'assemblage du micro-robot effectué, il restera encore une phase de tests.

Dès que le micro-robot sera assemblé, divers tests de caractérisation seront effectués. Les test seront semblables à ceux effectués par UK-ATC sur leur démonstrateur, afin de pouvoir faire des comparaisons entre le prototype sujet à ce travail de Bachelor et le leur. Ces tests permettrons de quantifier les améliorations induites par la conception d'un nouveau châssis.

Enfin, des proposition d'améliorations pour la suite du projet seront proposées, afin de permettre à d'éventuelles personnes de poursuivre dans les meilleurs conditions possibles.

Chapitre 1

Présentation du contexte et des solutions existantes

1.1 Présentation du contexte

Le futur télescope européen géant (European Extremely Large Telescope, E-ELT) sera équipé de nombreux instruments. Un de ceux-ci consiste à capter la lumière de plusieurs objets célestes distincts en plaçant et en orientant précisément des petits miroirs dans le plan focal du télescope. Cette fonction sera assumée par un grand nombre de petits robots mobiles autonomes portant des éléments optiques. La taille souhaitée pour les robots est de 20x20x20 mm. Le centre de technologie en astrophysique d'Edimbourg (UK-ATC) a développé un premier démonstrateur. Le but de ce travail de Bachelor de concevoir et de tester une version améliorée du système de locomotion du robot en partant du concept et du matériel fournit par UK-ATC. Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet européen OPTICON (Optical Infrared Co-ordination Network for Astronomy).

1.2 Présentation des solutions existantes

Plusieurs solutions ont été mises en oeuvre afin d'isoler la lumière de corps célestes distincts. Elles sont classées en deux catégories, à savoir les systèmes transmissifs et les systèmes réflectifs. Bien souvent, les systèmes réflectifs utilisent des miroirs afin de rediriger les faisceaux d'intérêt sur différents instruments se trouvant parfois sur le pourtour du plan focal. Dans le cas des systèmes transmissifs, des fibres optiques ou des masques (configurables en temps réel ou non) sont utilisés afin de ne laisser passer que les faisceaux d'intérêt. Dans ce cette section, plusieurs systèmes utilisant ces modes de captation de la lumière sont présentés.

1.3 Quelques exemples de systèmes transmissifs

1.3.1 Le positionneur de fibres OzPoz

L'ESO (European Southern Observatory) a commandé à l'AAO (Anglo-Australian Observatory) un positionneur de fibres qui pourrait alimenter un spectrographe sur la seconde unité du VLT (Very Large Telescope) se trouvant à Cerro Paranal au Chilli. Le positionneur de fibre OpOz [19] est le résultat de cette commande. Ce système permet de préparer un plan pendant qu'un autre est positionné sur le plan focal pour l'observation (voire figure 1.1a). En effet, le châssis mécanique comporte deux plans, ce qui permet de gagner du temps du fait qu'une fois le deuxième plan configuré (exemple figure 1.1b), il ne reste plus qu'à interchanger les deux par un système de basculement. Les fibres optiques sont fixées à de petits disques magnétiques, ce qui permet de mettre le plan focal à la verticale sans qu'elles ne chutent. Le positionnement de ces petits disques se fait au moyen d'un robot (voir figure 1.1c) spécialement conçu pour l'application. La mécanique de base du robot a été adaptée au rayon de courbure du plan focal. Ainsi, le bras sur lequel se déplace le chariot supportant le préhenseur présente une surface courbée de rayon égal à celui du plan. Pour un futur développement, il est envisagé de placer deux plans supplémentaires de part et d'autre de la structure, afin de diminuer encore le temps de latence entre deux observations, ce qui serait un gain de temps non négligeable, car avec ce type de positionneurs, le temps de configuration d'un plan est essentiellement proportionnel au nombre de fibres à positionner.



(a) OzPoz

(b) Plan focal configuré



(c) Robot pour le positionnement des disques

FIGURE 1.1: Photogrphies du positionneur de fibres OzPoz

1.3.2 Le positionneur de fibres Echidna

Le positionneur de fibres Echidna [17], [18] est, tout comme OzPoz, un projet de l'AAO. Ce projet a été mis en oeuvre pour le système de multi-spectroscopie du télescope Subaru situé sur le site du mont Mauna Kea à Hawaii. Echidna est capable de positionner jusqu'à 400 fibres au moyen d'actuateurs piezo-électriques capables d'orienter des épines supportant chacune une fibre optique (voir figure 1.2a). Chaque épine est constituée de plusieurs parties, à savoir : un tube actuateur en matérau piezo-électrique polarisé radialement, un aimant en terres rares, trois sphères en nitride de titanium et une sphère faisant office de pivot. La figure 1.2b montre ces différentes parties et illustre le moyen utilisé pour les déplacement, à savoir l'effet "stick-slip". Si aucun courant n'est appliqué, la tige est en position de repos. Pour effectuer un déplacement il faut tout d'abord appliquer une montée en courant lente n'induisant pas d'effet de glissement. La tige s'oriente donc en suivant la position donnée par la flexion du tube. Puis, une montée en courant rapide induisant un glissement est effectuée afin de remettre le tube dans sa position originelle. A cause de ce glissement, la tige reste en position et ne suit pas la flexion du tube, ce qui permet d'orienter les diverses épines dans la direction souhaitée et ce de manière simultanée.



FIGURE 1.2: Le positionneur de fibres Echidna

1.3.3 Le masque configurable du spectromètre multi-objets MOSFIRE

MOSFIRE (Multi-Object Spectrometer for Infra-Red Exploration [28] [29] [30]) est, comme son nom l'indique, un spectromètre multi-objets. Il comporte un masque configurable permettant de ne laisser passer que les faisceaux d'intérêt. Ce masque développé par le Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM) est constitué de deux jeux de barettes opposées pouvant être déplacées afin de créer de petites ouvertures permettant aux faisceaux sélectionnés de traverser le masque. Les ouvertures sont créées à la position choisie en approchant deux barres opposées et en maintenant la distance désirée entre elles afin de créer une fente rectangulaire. Les barres se situant sur un côté peuvent être déplacées indépendemment de celles se trouvant sur l'autre côté, ce qui permet de créer n'importe quelle taille de fente. Une photographie du masque monté ainsi que qu'une vue des barrettes est disponible à la figure 1.3.



(a) Le masque monté

(b) Vue des barettes

FIGURE 1.3: Le masque du spectromètre MOSFIRE

1.4 Quelques exemples de systèmes réflectifs

1.4.1 Les bras robotisés du spectromètre Kmos

Kmos [20] est un spectrographe multi-objets qui sera lui aussi implanté dans le télescope de l'ESO (VLT). Il sera monté sur le foyer Nasmyth du télescope. La version finale comporte 24 bras robotiques (voir figure 1.4a) répartis en trois sections de huit bras sur le pourtour de l'ouverture, permettant de positionner des miroirs à l'endroit souhaité par l'opérateur (voire figure 1.4b). Ces bras ne sont autre que des bras robotiques entrainés radialement et angulairement par deux moteurs pas-à-pas.



(a) Bras robotique Kmos

(b) Répartition des bras robotiques

FIGURE 1.4: Bras robotiques utilisés dans le projet Kmos

1.4.2 Le projet Starbugs

Le concept Starbugs [14], [15] utilise des micro-robots mobiles afin de positionner des fibres ou des miroirs à l'endroit souhaité par l'utilisateur. Il peut donc être classé dans les deux catégories (transmissif, réflectif), le choix de le faire apparaître dans cette section est donc tout à fait arbitraire. L'utilisation de petits robots pour accomplir ce positionnement a de nombreux avantages. Tout d'abord, plusieurs robots peuvent être déplacés simultanément contrairement aux positionneurs "Pick & Place" traditionnels qui ne peuvent déplacer plus d'un objet à la fois, ce qui réduirait le temps de configuration qui est, dans le cas d'un positionneur "Pick & Place", proportionnel au nombre d'objets à placer. Les robots étant mobiles, le système ne requiert pas de bras robotisé ou d'autre système de placement, ce qui réduit l'encombrement ainsi que le poids du système, permettant ainsi une meilleur intégration, surtout dans des espaces confinés. Les micro-robots utilisent l'effet piezo-électrique comme moyen de locomotion. Le design mécanique est simple : Deux tubes en matériau piezo-électrique concentriques avec des électrodes sur les quatre quadrants font office de "jambes" (voir figure 1.5b). Un aimant est collé au dessus des tubes et un autre aimant est disposé de l'autre côté du plan focal, ce qui permet de maintenir le contact avec ce dernier tout en positionnant le robot en dessous de ce plan (voire figure 1.5a). La méthode de déplacement est illustrée par à la figure 1.6. Tout d'abord, un courant est appliqué sur les électrodes du tube extérieur afin qu'il s'allonge de manière à ce que le tube intérieur ne soit plus en contact avec le plan. Ensuite, le tube intérieur fléchi, le tube extérieur se contracte pour que le robot se tienne sur le tube intérieur puis le tube intérieur fléchi dans le sens opposé ce qui propulse le robot vers l'avant.



(a) Principales parties du robot

(b) Vue des deux tubes piezo-électriques





FIGURE 1.6: Principe de déplacement du positionneur Starbugs

Chapitre 2

Exigences du système

Les spécifications de performance, illustrées dans le tableau 2.1 ont été fixées par UK-ATC et dépendent directement de l'application. La figure 2.1 montre le système de coordonnées du robot, permettant ainsi de mieux comprendre les dénominations des specifications.

Spécification		Valeur désirée
Positionnement grossier en $x - y$	\leq	$5.0 \ mm$
Positionnement grossier en θz	\leq	20 mrad
Positionnement fin en $x - y$	\leq	$10 \ \mu m$
Positionnement fin en θz	\leq	1 mrad
Vitesse minimale	\geq	10 mm/s
Empreinte au sol	\leq	20x20 mm
Proximité de deux robots	\leq	2 mm

TABLEAU	2.1:	Réca	pitulatif	des	exigences	du	système
TITTT		100000	or our our	~~~~	origonooo	~~~	N, NOULLIO



FIGURE 2.1: Système de coordonnées du robot

Chapitre 3

Catalogue de solutions pour le choix du système de locomotion des micro-robots

Le mode de locomotion d'un robot dépend essentiellement de l'application souhaitée et du type de surface sur laquelle il va se déplacer. Dans ce chapitre, une présentation non-exhaustive de quelques modes de locomotion et de quelques robots les utilisant est proposée.

3.1 Les robots mobiles à roues

Les roues sont depuis longtemps le mode de locomotion le plus populaire en ce qui concerne la robotique mobile. En effet, il existe une multitude de robots utilisant des roues comme moyen de déplacement. Lors de la conception d'un robot à roues, il faut tout d'abord cerner ce que l'on veut réaliser et quelles sont nos attentes vis à vis des performances de ce dernier. Combien de roues l'application nécessite-t-elle, de quel type, combien de degrés de liberté sont nécessaires?

Deux principales alternatives concernant la conception d'un robot à roues sont à choix. Soit concevoir un robot qui sera holonome ou un qui sera non-holonome. Un robot est considéré comme holonome s'il est capable de se déplacer à n'importe quel moment dans n'importe quelle direction le long du plan de base (x, y) sans tenir compte de l'orientation du robot le long de son axe vertical (z). Par opposition, un robot non-holonome ne pourra pas changer de direction sans tenir compte de son orientation autour de son axe vertical (z).

3.1.1 Les solutions non-holonomes

Les robots non-holonomes sont ceux dont en général les déplacements sont les plus faciles à gérer. Il existe plusieurs types de plateformes pour les robots non-holonomes à roues tels que :

- Plateforme à quatre roues de type voiture
- Plateforme à deux roues différentielles
- Plateforme à deux roues différentielles + roue(s) folles ¹
- Plateforme de type "piaggo" à une roue motrice orientable et deux roues fixes

Sur la figure 3.1, des schémas des diverses plateformes sont présentés. Les roues de couleur noire sont définies comme motrices alors que celles en gris sont non-motrices. Les flèches montrent les déplacements possibles par les roues. Comme pour les roues, une flèche est noire pour des déplacements dus à un moteur et grise lorsqu'elle est libre. A noter que pour le "type voiture",

^{1.} Par roues folles, il est entendu roues libres dans tout les sens de rotation.

les roues sont noires et grises car plusieurs cas sont possibles : Deux roues motrices orientables et deux roues libres mais fixes dans leur orientation ou deux roues motrices fixes dans leur orientation et deux roues libres mais directrices. A noter que pour la plateforme "Différentielle 2 points de contact", cette configuration est réalisable uniquement dans le cas où le centre de gravité du robot se trouve en dessous de l'axe des roues. La plateforme "3 roues synchrones orientables" est quantà-elle une plateforme omnidirectionnelle, néanmoins, elle apparaît dans ce tableau du fait qu'elle utilise des roues non-omnidirectionnelles.



FIGURE 3.1: Schémas de diverses plateformes utilisant des roues non-omnidirectionnelles

Exemples de micro-robots non-holonomes

La plupart du temps, lorsqu'il s'agit de micro-robotique, les solutions holonomes sont abandonnées au profit de solutions non-holonomes. Une multitude de micro-robots non-holonomes ont été réalisés. Sur la figure 3.2, trois micro-robots à roues sont présentés. La figure 3.2a montre le robot Alice [3] réalisé par Gilles Caprari au laboratoire des systèmes autonomes de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). La figure 3.2b montre le robot Pico [11] conçu et réalisé par Zac Wheeler. La figure 3.2c montre quant-à-elle Jasmine [12], un robot développé par l'université de Stuttgart et de Karlsruhe.



(a) Le robot Alice

(b) Le robot Pico

(c) Le robot Jasmine III

FIGURE 3.2: Quelques exemples de micro-robots à roues

3.1.2 Les solutions holonomes

Différentes catégories de roues permettant des déplacements holonomes existent. Il est aussi possible, dans le cas d'utilisation de roues non-omnidirectionnelles, de changer l'orientation des roues avant d'effectuer un mouvement, ce qui permet des déplacements dans toutes les directions (comme présenté sur la figure 3.1 sous "3 roues synchrones orientables").

Les roues omnidirectionnelles

Il existe plusieurs sortes de roues omnidirectionnelles. La première roue de ce type à été brevetée en 1919 par J. Grabowiecki. Depuis quelques années, ces roues sont utilisées aussi bien dans des applications robotiques qu'industrielles, ou encore logistiques. La figure 3.3 montre quelques types de roues omnidirectionnelles.

Roue « Suédoise »	Roue segmentée	Roue Mecanum

FIGURE 3.3: Quelques types de roues holonomes

Plusieurs types de plateformes sont envisageables afin de rendre un robot holonome grâce à ces roues spéciales. La figure 3.4 en montre quelques exemples.



FIGURE 3.4: Schémas de diverses plateformes holonomes utilisant des roues onmidirectionnelles

Le troisième schéma de droite de la figure 3.4 montre une plateforme utilisant des roues Mecanum. Un Schéma plus précis concernant les possibilités de déplacement de ces dernières est disponible à la figure 3.5



FIGURE 3.5: Schémas des déplacements possibles pour une plateforme équipée de roues Mecanum

Exemples de robots utilisant des roues omnidirectionnelles

Voici quelques exemple d'utilisation des roues omnidirectionnelles dans la robotique. Sur la figure 3.6, le robot ROVIO [10] de la société WOWWEE est capable de se déplacer dans toutes les directions grâce à ses trois roues omnidirectionnelles réparties à 120° l'une de l'autre. Sur la figure 3.7, deux application utilisant des roues Mecanum. Tout d'abord sur la figure 3.7a, YOUBOT [10], un robot développé par KUKA robotics, et sur la figure 3.7b, SIDEWINDER [10], un élévateur développé par AIRTRAX.



FIGURE 3.6: Le robot Rovio conçu par la société WOWWEE



(a) Le robot YouBot

(b) L'élévateur Sidewinder

FIGURE 3.7: Exemples d'applications utilisant des roues Mecanum

3.2 Les robots mobiles à chenilles

La locomotion par chenilles est en général utilisée pour des robots évoluant dans des milieux plus rudes ou difficiles au niveau du terrain. En effet, le fait d'avoir des chenilles fournit une bien plus grande surface de contact avec le sol, ce qui apporte une plus grande stabilité que lors de l'utilisation de roues. Dans le cas de franchissement d'obstacles, les robots à roues ne peuvent en général pas franchir des obstacles de hauteur supérieure au rayon des roues (dans une configuration standard). Dans le cas de chenilles cela est tout à fait envisageable. En contrepartie, la grande surface de contact fournie par les chenilles rend le changement de direction moins précis, car elles doivent patiner lors d'une rotation. Ceci implique que l'axe de rotation du robot est difficile à prédire. Cela se répercute sur la précision dans les changements de position ou de direction car ils sont eux aussi dépendant de la friction avec le sol. La figure 3.8 montre des exemples de robots utilisant des chenilles comme mode de locomotion. Sur la figure 3.8a, le robot Nanokhod développé par Hoener et Sulger GmbH [7] et l'institut Max Planck pour l'agence spatiale européenne (ESA). Sur la figure 3.8b, un robot à chenille développé par Doug Adkins et Ed Heller travaillant pour l'institut de recherche SANDIA [6] mesurant environ 1.3x1.3 centimètres.



(a) Le robot Nanokhod

(b) Le robot de Sandia

FIGURE 3.8: Exemples d'applications utilisant des chenilles

3.3 Les robots mobiles à actuateurs piezo-électriques

Lorsque l'on parle d'actuateurs piezo-électriques, on se réfère généralement aux actuateurs piezocéramiques qui sont des matériaux qui ont pour propriété de développer une charge électrique lorsqu'une contrainte mécanique leur est appliquée (i.e. compression) et inversément de se déformer lorsqu'une charge électrique leur est appliquée. Les actuateurs piezo-céramiques sont très utilisés comme systèmes de locomotion dans la micro-robobique. Avec ce type d'actuateurs, il est possible de générer des mouvements de différentes manières, mais le plus souvent, c'est l'effet "stick-slip" qui est utilisé. Sur la figure 3.9, un schéma montrant le mode de déplacement selon l'effet "stick-slip" est visible. Dans un premier temps, une montée lente en tension est appliquée, ce qui provoque une flexion des lames (en rouge) dans un sens. Puis, une rapide inversion du courant provoque un fléchissement des lames mais dans le sens inverse. Lors de ce rapide changement, il se produit un effet de glissement, les pattes reviennent en place mais sans créer de déplacement.



FIGURE 3.9: Schéma montrant l'effet "stick-slip"

Le robot MiCRoN

Le robot MICRON [31] est le résultat d'un consortium européen regroupant huit partenaires dont l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) qui s'est chargée du développement du système de locomotion. Ce dernier consiste en un cadre en titane dans lequel un structure flexible est découpée par laser. Quatre barres en matériau piezo-céramique sont assemblées au cadre sur les côtés et trois demi-sphères en saphir servent de pieds. En appliquant différentes charges électriques au barres piezo-céramiques, il est possible de créer un mouvement en utilisant l'effet "stick-slip". Sur la figure 3.11, un schéma montre la manière dont peuvent s'effectuer les déplacements. Des tests ont montrés que cette plateforme de locomotion est capable de répéter des pas de 7 nanomètres.



FIGURE 3.10: Photographie du robot MICRON



FIGURE 3.11: Schéma de la plateforme de locomotion du robot MICRON

Le robot miBot

Le robot MIBOT de la société IMINA TECHNOLOGIES [8], une start-up de l'EPFL est un micromanipulateur commercial. Ce robot peut être utilisé dans plusieurs applications comme la nanomanipulaiton, les tests sur les MEMS, etc, le tout avec une précision de positionnement du manipulateur à 10 nanomètres.



FIGURE 3.12: Photographie de la plateforme développée par IMINA TECHNOLOGIES

3.4 Les robots basés sur d'autres systèmes de locomotion

Bien ententu, il existe encore bien d'autres modes de locomotion pour les robots. Des recherches dans des instituts, entreprises ou écoles permettent de faire constamment évoluer ce domaine. Une des voies qui connait un essort particulier à l'heure actuelle est la bio-inspiration. Depuis quelques années, des chercheurs se tournent vers des solution inspirées de ce que l'on peut observer dans la nature. Les insectes sont une source particulièrement grande d'inspiration. Pourquoi tenter de développer des systèmes extrêmement compliqués et onéreux alors que la nature, forte de millions d'années d'évolution, à déjà résolu une grande partie des problèmes de locomotion qui peuvent se poser lors de la conception d'un robot? D'autres chercheurs ne se sont pas basés sur la bio-inspiration pour développer des modes de locomotion novateurs. Dans cette section, une brève présentation de quelques robots utilisant des modes de locomotion pouvant être qualifiés de non-conventionnels sont présentés.

"BallIP"', le robot équillibriste

Masaaki Kumagai et Takaya Ochiai de l'université de Tohoku Gakuin au Japon ont développé un robot capable de tenir en équilibre sur une balle de dimensions égales à celles d'une boule de bowling [4], fonctionnant selon le principe du pendule inversé. Trois moteurs pas à pas sont directement reliés à des roues omnidirectionnelles, elles-mêmes directement en contact avec la balle. A noter que ce robot ne fonctionne qu'avec une balle légèrement déformable pour créer une surface de contact balle/sol suffisante pour l'adhérence du robot. Les roues sont placées à 120° l'une de l'autre et de

manière à ce que la roue soit perpendiculaire à la tangente au point de contact avec la balle. Un gyroscope ainsi que des accéléromètres sont utilisés pour la commande d'asservissement.



FIGURE 3.13: Le robot BallIP

Le robot vibreur

Panagiotis Vartholomeos, Kostas Mougiakos et Evangelos Papadopoulos du département d'ingéniérie mécanique de l'université nationale d'Athènes ont développé un robot de forme cylindrique ayant un diamètre de 3.54 milimètres qui se déplace en utilisant deux moteurs sur lesquels sont placées de petites masses excentriques [21]. La rotation de ces petites masses produit un effet bien connu dans les téléphones portables, à savoir la vibration. En combinant ces effets de vibration, il est possible d'effectuer des déplacements de l'ordre du sub-micromètre, le tout avec une vitesse de 1.5 milimètres par seconde.



FIGURE 3.14: Le robot vibreur de l'université d'Athènes

Robot marcheur

Le centre national allemand de recherche pour l'aéronautique et le spatial à développé un robot marcheur [9]. Ce dernier utilise deux bras robotiques de la maison KUKA. Chacun des ces bras comporte six degrés de liberté ainsi que des capteurs de force.



FIGURE 3.15: Le robot marcheur du centre de recherches Allemand

Muscles artificiels

Les polymères électro-actifs (EAP) sont actuellement entre-autres utilisés dans des applications de muscles atrificiels (EPAM). Ce matériau à la propriété de pouvoir fléchir, se contracter ou se rétracter lorsqu'un courant électrique lui est imposé. La plupart des applications utilisent des matériaux piezo-céramiques. Diverses applications sont possibles, comme l'hexapode développé par l'institut de recherche de Stanford (SRI) présenté à la figure 3.16a ou encore ce projet d'ailes actives aussi en cours de développement au SRI (voire figure 3.16b) (sources [10]).



(a) Un hexapode

(b) Un projet d'ailes actives

FIGURE 3.16: Exemples d'applications utilisant des EPAM

Chapitre 4

Etude des concepts développés par UK-ATC

Le centre de technologie en astrophysique d'Edimbourg (UK-ATC) a développé deux concepts de robots différents, à savoir le Wheepie design et le DMD design. Sur ces deux robots, seul un à été retenu pour la suite du projet, il est donc intéressant de se pencher sur les raisons qui ont mené à l'abandon d'un concept et celles qui au contraire ont permis d'en choisir un autre. C'est pourquoi ce chapitre est dédié à l'étude des différents concepts développés par UK-ATC.

4.1 Présentation du "Wheepie design"

Le Wheepie design ¹ à été imaginé par M. William Cochrane, chercheur aurès du centre de technologie en astrophysique d'Edimbourg, pour sa simplicité. Dans ce concept, les roues du robot sont directement fixées sur l'axe des moteurs. Dès lors, un tour de moteur correspond à un tour de roue. Le châssis est fabriqué en ABS ² et les roues sont en aluminium.



FIGURE 4.1: Modélisation du Wheepie design

^{1.} Ce concept ayant été abandonné, seul un petit résumé succint en est fait afin d'aller à l'essentiel.

^{2.} Acrylonitrile-Butadiène-Styrène (famille des styréniques) matière plastique couramment utilisé dans les fabrications industrielles

Grâce à un rapide calcul, en tenant compte du moteur choisi (Smoovy motor 0308B voir annexe A.1), ainsi que du fait que la carte de commande des moteurs peut fournir 48 pas par tours pour un moteur ayant 1 paire de pôles (ce qui est le cas du moteur Smoovy), il est possible de déterminer la précision théorique du robot.

Nombre de pas par tours du moteur $("N_{mot}")$	48
Nombre de paires de pôles du moteur $("p")$	1
Rapport de réduction du réducteur (" i_{red} ")	125:1
Diamètre des roues $("d")$	26.7 mm
Distance entre les roues $("s")$	$31 \mathrm{~mm}$

Grâce aux informations ci-dessus, il est possible de connaître le nombre de pas par tour moteur comme suit :

$$N_{pas\ mot} = p \cdot N_{mot} = 1 \cdot 48 = 48\ pas/tours \tag{4.1}$$

En multipliant ce nombre de pas par tours avec le rapport de réduction du réducteur, il est possible de calculer la résolution globale du moteur :

$$resol_{mot} = 48 \cdot 125 = 6000 \ pas/tours \tag{4.2}$$

Avec le diamètre des roues et la résolution globale du moteur, il est possible de calculer la résolution théorique du robot :

$$resol_{robot} = \frac{P_{roue}}{resol_{mot}} = \frac{26.7 \cdot 10^{-3} \cdot \pi}{6000} \cong 13.61 \ \mu m/pas$$
 (4.3)

Lors d'une rotation sur lui-même, en utilisant l'approximation pour les petits angles, la résolution angulaire du robot se calcule comme suit :

$$resol_{angl} = \frac{resol_{robot}}{s/2} = \frac{13.6 \cdot 10^{-6}}{15.5 \cdot 10^{-3}} = 0.877 \ mrad$$
(4.4)

La vitesse de l'axe du réducteur se calcule comme suit (V_{moteur} tiré des datasheet diponibles dans l'annexe A.1) :

$$V_{sortie\ moteur} = \frac{V_{moteur}}{i} = \frac{10000\ tours/min}{125} = 80\ tours/min \equiv 1.33\ tours/s \tag{4.5}$$

La vitesse linéaire théorique du robot sera donc :

$$V_{robot} = d_{roue} \cdot \pi \cdot V_{sortie\ moteur} = 26.7 \cdot \pi \cdot 1.33 \cong 111.84\ mm/s \tag{4.6}$$

L'empreinte au sol du robot est de 30x30 mm, ce qui sort des exigences du système (voir chapitre 2). L'entrainement direct des roues permet une conduite différentielle, c'est à dire que le robot est potentiellement capable d'effectuer une rotation sur lui-même. Une fois le démonstrateur construit, des essais on pu être réalisés. Lors d'un premier essai, le robot était incapable d'effectuer un déplacement. Une observation du système va révéler que les alésages des roues étaient de trop grande dimension pour permettre l'entrainement de ces dernières par les moteurs. Un deuxième test va montrer que le châssis est trop lourd pour reposer uniquement sur les axes des moteurs. Lors de ce test, peu après le début d'un déplacement, les roues supportant le châssis vont se "cambrer" sous l'effet du poids du robot. En effet, la charge radiale admissible sur les axes des moteurs (voir annexe A.1) est trop faible (0.1 N à 15 mm de la face de montage) elle ne permet qu'un robot d'un poids maximal d'environ 20 g (0.1 Newtons repris par chaque axe moteur). Afin de soulager les axes des moteurs, différentes solutions on été envisagées. Une était de soutenir le robot en plaçant de petites billes sous le châssis. Une autre était de désolidariser l'axe des roues de l'axe des moteurs. Ces deux solutions sont considérée par UK-ATC comme trop difficiles à mettre en oeuvre et ont donc été abandonnées.

Comme cité précédemment, le Wheepie design à été abandonné car les moteurs ne sont pas dimensionnés pour être capables de soutenir le poids du châssis et que les solutions envisagées pour soulager les axes des moteurs sont jugées trop difficiles à mettre en oeuvre.

4.2 Présentation du DMD design

Le DMD design a été réalisé par David Montgomery, CAD system manager auprès d'UK-ATC. Il utilise un système de conduite différentielle tout comme le Wheepie design. Les roues faites en Vespel³, un polymère auto-lubrifiant, sont placées sur le même axe et entrainées par friction d'un pignon non cranté directement sur ces dernières. Un joint O-ring placé sur le pourtour des roues fait office de pneu. Afin de maintenir une force de friction suffisante et constante, des petits ressorts de traction agissant sur l'axe des moteurs et les tirant dans la direction des roues on été placés. Une attention particulière à été portée sur le dimensionnement de ces ressorts de traction. En effet, les moteurs étant les mêmes que pour le Wheepie design, il est important de ne pas dépasser la charge radiale admissible par les axes des moteurs. Une solution permettant d'augmenter la charge radiale admissible par le moteur sur son axe est en cours de discussion entre UK-ATC et le fabricant. Cette dernière consisterait à placer un roulement à billes sur l'axe du moteur permettant de reprendre les efforts sur une portée et donc d'augmenter cette charge radiale admissible. Le châssis du robot est usiné dans une pièce de Delrin⁴. A ce jour, le DMD design intègre les deux moteurs Smoovy de chez FAULHABER, une batterie lithium-polymère (Li-Po) de 3.7 V et 110 mAh ainsi qu'une carte de commande développée par DREAMPACT LIMITED. Cette dernière permet, grâce à un module électronique, de commander le robot via un Putty, sorte d'hyperterminal, le tout en utilisant la communication sans fil.



FIGURE 4.2: Photographie du DMD design

En tenant compte du moteur choisis pour ce robot (Smoovy motor 0308B voire annexe A.1) et du diamètre des roues, il est possible de déterminer la précision théorique du robot ainsi que sa vitesse maximum.

Nombre de pas par tours du moteur $("N_{mot}")$	48
Nombre de paires de pôles du moteur $("p")$	1
Rapport de réduction du réducteur (" i_{red} ")	125:1
Diamètre des roues $("d")$	13.2 mm
Distance entre les roues $("s")$	23.8 mm

^{3.} Dupond de Nemours commercialise une forme de polymère auto-lubrifiant sous le nom de Vespel

^{4.} Dupont de Nemours commercialisa le premier POM (polyoxyméthylène), sous la dénomination de Delrin en 1959

Grâce aux informations ci-dessus, il est possible de connaître le nombre de pas par tour moteur comme suit :

$$N_{pas\ mot} = p \cdot N_{mot} = 1 \cdot 48 = 48\ pas/tours \tag{4.7}$$

En multipliant ce nombre de pas par tours avec le rapport de réduction, il est possible de calculer la résolution globale du moteur :

$$resol_{mot} = 48 \cdot 125 = 6000 \ pas/tours$$
 (4.8)

L'entraînement est fait au moyen d'un pignon non cranté frottant directement sur la roue. L'ensemble pignon-roue induit un nouveau rapport de réduction qui se calcule comme suit :

$$i_{pignon\ roue} = \frac{d_{roue}}{d_{pignon}} = \frac{13.2}{2.5} \cong 5.28 \tag{4.9}$$

Ce rapport de réduction supplémentaire est à multiplier par la résolution du moteur afin de connaître la résolution des roues :

$$resol_{roue} = resol_{mot} \cdot i_{pignon\ roue} = 6000 \cdot 5.28 \cong 31680\ pas/tours \tag{4.10}$$

Avec le diamètre des roues et la résolution sur cette dernière, il est possible de calculer la résolution théorique du robot :

$$resol_{robot} = \frac{P_{roue}}{resol_{roue}} = \frac{13.2 \cdot 10^{-3} \cdot \pi}{31680} \cong 1.3 \ \mu m/pas$$
 (4.11)

Lors d'une rotation sur lui-même, en utilisant l'approximation pour les petits angles, la résolution angulaire du robot se calcule comme suit :

$$resol_{angl} = \arctan\left(\frac{resol_{robot}}{s/2}\right) = \arctan\left(\frac{1.3 \cdot 10^{-6}}{11.9 \cdot 10^{-3}}\right) = 0.109 \ mrad \tag{4.12}$$

La vitesse de l'axe du réducteur se calcule comme suit :

$$V_{sortie\ moteur} = \frac{V_{moteur}}{i} = \frac{10000\ tours/min}{125} = 80\ tours/min \equiv 1.33\ tours/s \tag{4.13}$$

On calcule alors la vitesse de la roue en introduisant le rapport de réduction supplémentaire $i_{pignon\ roue}$

$$V_{roue} = \frac{V_{sortie\ moteur}}{i_{pignon\ roue}} = \frac{1.33}{5.28} \cong 0.252\ tours/s \tag{4.14}$$

La vitesse linéaire théorique du robot sera donc :

$$V_{robot} = d_{roue} \cdot \pi \cdot V_{roue} = 13.2 \cdot \pi \cdot 0.252 \cong 10.45 \ mm/s$$
 (4.15)

Chapitre 5

Etude et compréhension des éléments fournis par UK-ATC

Le Centre de Technologie en Astrophysique d'Edimbourg à fait parvenir certains éléments composant leur démonstrateur. La majeur partie de ces éléments seront intégrés dans le future prototype, c'est pourquoi une étude de ces divers éléments est faite dans ce chapitre.

5.1 Présentation des éléments reçus

- 3 moteurs smoovy 0308003B de chez faulhaber
- 3 électroniques de commande des moteurs BLD05002S de chez FAULHABER
- 1 module de contrôle conçu par DREAMPACT LIMITED
- 3 batteries Li-Po EFLB11015 fournissant 3.7 V et 110 mAh de la marque E-FLITE
- 1 chargeur de batteries
- 1 connecteur supplémentaire pour les batteries
- 1 plan de charge et son alimentation
- 1 PCB comprenant les contacts pour l'alimentation via le plan de charge
- 1 PCB comprenant le traitement de l'alimentation via le plan de charge
- Plusieurs câbles pour la connection avec le PC
- 1 manuel d'utilisation édité par DREAMPACT LIMITED

Dès la première prise en main du matériel, l'alimentation par batteries à été mise de côté au profit d'une alimentation via une alimentation de laboratoire, afin de ne pas être dépendant du niveau de charge des batteries lors des tests.

5.2 Analyse de l'alimentation par le substrat

5.2.1 Plan de charge

Le plan de charge développé par UK-ATC consiste en un PCB fait d'un substrat FR4 standard. Des électrodes sont disposées à intervals réguliers sur ce dernier selon un motif alterné anode-cathode (voire figure 5.1).

Géométrie des contacts électriques

Afin d'alimenter en permanence le robot en électricité, les contacts nécessaires sont placés de manière à ce qu'en dépit de la position où de l'orientation du robot, il y ait toujours un contact qui



FIGURE 5.1: Dessin de fabrication du plan de charge

touche une anode et un qui touche une cathode. Si le robot effectue un déplacement perpendiculairement aux électrodes, il apparaît directement qu'au minimum trois contacts sont nécessaires. En effet, lorsque l'un des contacts se trouve dans un espace sans électrode, deux autres sont nécessaires pour alimenter le robot.

Avant d'établir la géométrie de ces contacts, il est nécessaire de tenir compte des déplacements possibles par le robot, à savoir :

- Déplacement dans la direction de l'axe x du robot (l'axe y est défini comme coïncident avec l'axe des roues, voir figure 2.1)
- Rotation du robot autour de son axe vertical (z)

La rotation du robot autour de son axe vertical suggère que les contacts devraient se trouver sur le périmètre d'un cercle dont le centre coïncide avec l'axe z du robot. Elle indique aussi que les contacts ne peuvent se trouver à plus de deux sur la même droite, en effet, si tout les contacts étaient alignés dans un espace entre deux électrodes ou sur la même, le robot ne serait alors plus alimenté correctement. Afin de trouver une géométrie satisfaisant aux spécifications d'alimentation, il est supposé que trois contacts sont disposés de manière uniforme sur le périmètre du cercle. Il est possible que lors de déplacements, deux contacts soient alignés dans un espace entre les électrodes. Pour pallier à cela, un quatrième contact doit être ajouté. Afin de garder une disposition symétrique, ce dernier est placé au centre du cercle. En partant de cette idée, il faut maintenant identifier les cas limites afin de déterminer le rayon du cercle ainsi que la position des contacts sur son pourtour.

Sur le bas de la figure 5.2, il est possible d'observer les trois contacts disposés de manière uniforme, à savoir à 120° l'un de l'autre ainsi que le contact central. Une réprésentation de la position estimée comme étant la plus critique est donnée sur le haut de cette même figure. En effet, deux contacts sont alignés à la verticale sur la droite. Lorsque le contact le plus à gauche quitte l'anode, il faut impérativement qu'un autre vienne toucher une autre anode. Il est donc nécessaire que ces deux contacts alignés sur la droite et le contact le plus à gauche touchent chacun une anode au même instant.

A partir de la figure 5.2, il est possible de retrouver le rayon nécessaire au bon placement des contacts. L'angle α est connu et vaut 120°, la largeur d'une électrode "l" est de 8 mm, l'espace



FIGURE 5.2: Schéma des contacts sur le plan de charge

entre deux électrodes "e" est quant à lui de 2 mm. Le rapport e/l est donc de 1 : 4.

La distance horizontale entre le contact de gauche et les deux contacts de droite est connue et vaut :

$$d_{min} = l + 2 \cdot e \tag{5.1}$$

Mais il est aussi possible de la définir comme étant le rayon du cercle additionné avec la projection d'une des branches sur l'axe horizontal (en bleu sur le schéma).

$$d = r_{cercle} + r_{cercle} \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = r_{cercle} \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)$$
(5.2)

En combinant les deux équations précédentes, on peut isoler r_{cercle} et le calculer comme suit :

$$(l+2\cdot e) = r_{cercle} \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right) \longrightarrow r_{cercle} = \frac{l+2e}{1 + \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$
(5.3)

Si on tiens compte du fait que le rapport entre la largeur des espaces et des électrodes est de 1 : 4, et que l'angle α vaut 120°, il est possible d'écrire :

$$r_{cercle} = \frac{3/2 \cdot l}{1 + \cos(60^{\circ})} \longrightarrow r_{cercle} = \frac{3l}{2 \cdot (1 + 1/2)} \longrightarrow r_{cercle} = \frac{3l}{3} \longrightarrow r_{cercle} = l$$
(5.4)

Il est donc démontré que le rayon minimum pour cette disposition, compte tenu de la géométrie du plan de charge est de :

$$r_{cercle} = l = 8 \ mm \tag{5.5}$$

5.3 Description des moteurs choisis par UK-ATC

Les moteurs choisis par UK-ATC sont des moteurs Smoovy de chez FAULHABER (désignation 0308B). Ces moteurs (voire figure 5.3) ont été choisis par eux pour les raisons suivantes :

- Encombrement faible
- Fourni un couple résonnable en fonction de sa taille
- Précis
- Facilement contrôlable
- Prix d'achat raisonnable



FIGURE 5.3: Photographie du moteur Smoovy 0308B

Ces moteurs sont commandés en mode pas à pas par à l'électronique de commande BLD05002S. Le programme de contrôle développé par DREAMPACT LIMITED permet de fixer la vitesse du moteur ("MRATE") ainsi que son accélération ("MRAMP"). L'argument de la commande "MRATE" correspond au nombre de pas générés par seconde. Celui de la commande "MRAMP" correspond au nombre de pas utilisés pour accélérer le moteur jusqu'à la consigne de vitesse "MRATE". Un résumé des valeurs d'intérêt concernant ce moteur est disponible dans le tableau 5.1 (pour les données complètes, se référer a l'annexe A.1).

Description	Donnée	Unité
Tension nominale	3	V
Puissance utile	0.04	W
Réducteur	125 :1	-
Charge radiale admissible sur l'arbre de sortie du réducteur	0.1	Ν
Nombre de paires de pôles	1	-
Pas générés par l'électronique de commande par révolution	48	-
Désignation réducteur	03A	-
Désignation électronique de commande	BLD05002S	-

TABLEAU 5.1: Récapitulatif des données du moteur Smoovy 0308B

5.4 Tests effectués par UK-ATC sur le DMD design

Lors de ces tests, différents robots de même configuration on été utilisés afin de vérifier si leur comportement est similaire. Les tests effectués sont les suivants :

- Répétitivité lors de déplacements linéaires
- Circularité des roues
- Rotation du robot sur lui-même pour vérifier l'angle de rotation
- Rotation du robot sur lui-même pour vérifier s'il s'écarte de son axe de rotation

5.4.1 Déplacements linéaires

Les mesures sont réalisées avec à un microscope Nikon doté d'une table croisée à lecture numérique. Les résultats de ces tests révèlent que, selon les spécifications du système, les robots ne sont pas assez précis pour se positionner en boucle ouverte, c'est à dire sans système de supervision. En effet, de grandes différences sont à noter dans les résultats robot par robot et en les comparant (voire tableau 5.2).Les mesures sont effectuées manuellement, c'est à dire que la personne prenant les mesures doit "pointer" une cible de référence pour effectuer les mesures. Afin de caractériser la précision de ces mesures, un test à été effectué. Dans un premier temps la personne prenant les mesures doit "pointer" un endroit de référence et le mettre à zéro. La table croisée est ensuite déplacée aléatoirement et la personne prenant les mesures doit venir retrouver son "zéro". La conclusion de ces tests est que les mesures sont fiables à +/- 60 microns, ce qui parait élevé en vue de la tolérance souhaitée pour la précision lors de déplacements linéaires du robot (pour rappel +/- 5 microns).

Robot	BOT001	BOT002	BOT003	BOT004	BOT005
Distance moyenne parcourue $[\mu m]$	846	951	-	831	-
Plus longue distance parcourue $[\mu m]$	1047	1057	-	917	-
Plus courte distance parcourue $[\mu m]$	733	879	-	753	-
Ecart-type $[\mu m]$	51	42	-	34	-
Erreur de mesure $[\mu m]$	60	60	-	60	-
Nombre de mesures	43	29	-	23	-

TABLEAU 5.2: Récapitulatif des mesures de déplacements linéaires

5.4.2 Circularité des roues

Pour effectuer ces tests le robot est "couché" sur le côté et déposé sur un socle une roue face au champ d'observation du microscope, l'autre se trouvant dans l'empreinte du socle est désactivée (pour éviter que le robot ne bouge durant les mesures). Un marquage est fait sur la roue (pas sur le O-ring). Une commande de x pas est donnée, puis la position du marquage est relevée. L'opération est reconduite jusqu'à ce que la batterie du robot soit déchargée.

Les positions relevées indiquent que les roues ne sont pas parfaitement coaxiales avec l'axe du moteur. Ce dernier point est intéressant. En effet, la course effectuée par le robot dépend directement du trajet effectué par les roues. Si ce trajet n'est pas parfaitement le même pour les deux roues, la position du robot ne peut alors être garantie.

5.4.3 Rotation sur l'axe de symétrie

Pour ces tests, l'appareil de mesure utilisé est un projecteur d'ombre (SHADOWGRAPH Serial : PJ-A3000). Afin de mesurer la rotation du robot sur lui-même, une commande correspondant à une rotation du robot d'un certain angle est donnée. La position angulaire de ce dernier est ensuite relevée dans le but d'en déduire une relation entre le nombre de pas donnés et l'angle de rotation du robot correspondant.



FIGURE 5.4: Chemin parcouru par les roues lors de rotations de petits angles

En se basant sur le schéma de la figure 5.4, il est possible de faire ressortir la relation suivante :

$$\theta = \arctan\left(\frac{d}{r}\right) \tag{5.6}$$

5.4.4 Déviation de l'axe de rotation

Ce test consiste à faire tourner le robot sur lui-même de 360° . Le but de la mesure est de déterminer si il y à une tendance dans la manière dont le robot dévie de son axe de rotation lorsqu'il tourne sur lui-même (phénomène déjà observé auparavant, ce qui explique cette mesure). Cette mesure est prise au moyen du microscope Nikon, ce qui implique que la précision lors des mesures est à nouveau de +/- 60 microns (explications voir section 5.4.1).

Ces tests montrent que le robot dévie de son axe dans un gamme allant de 2.840 à 3.510 millimètres. Des résultats plus détaillés sont disponibles dans le tableau 5.5

Description	Résultat
Déviation moyenne $[mm]$	2.840
Plus longue déviation $[mm]$	3.510
Plus petite déviation $[mm]$	2.219
Ecart-type [mm]	0.340
Erreur de mesure $[mm]$	0.060
Nombre de mesures	20

TABLEAU 5.3: Récapitulatif des mesures de déviation de l'axe de rotation

Il est possible d'expliquer cette déviation et de l'estimer par le fait que le déplacement induit par la rotation d'une roue n'est pas forcément égal à celui de l'autre roue. Ceci peut être du au fait que les roues ne sont pas tout à fait circulaires ou encore au moteurs eux-mêmes. Lors d'une rotation du robot sur lui-même, il est possible qu'une roue s'arrête avant l'autre et fasse office de pivot. L'axe de rotation du robot sera alors placé sur le périmètre d'un disque de rayon équivalent à la moitié de la distance entre les deux roues (voir figure 5.5).



FIGURE 5.5: Une roue servant de pivot

Le manque de précision du robot implique l'implémentation d'un étage supplémentaire sur le dessus du robot permettant d'effectuer un positionnement angulaire précis du miroir.

5.4.5 Conclusion

Suite à ces divers tests, la conclusion d'UK-ATC est que le robot peut être capable d'effectuer un positionnement grossier puis de corriger son erreur de positionnement grâce à un système de supervision.UK-ATC pense que le manque de précision du robot provient certainement de la partie mécanique de ce dernier, à savoir le châssis ainsi que le système d'entrainement des roues. C'est pourquoi le but premier de ce travail de bachelor est d'améliorer la partie mécanique du robot afin d'obtenir une meilleur précision dans ses déplacement et donc dans son positionnement.

Chapitre 6

Pré-dimensionnement des divers composants du nouveau design du micro-robot

6.1 Tests et caractérisation des moteurs choisis par uk-atc

A la lumière des résultats de mesure d'UK-ATC sur leur prototype, une caractérisation rigoureuse des moteurs était indispensable. Les tests se sont déroulés dans un laboratoire du CSEM avec le matériel suivant :

Description	FABRICANT	Modèle	No. Série	Quantité
Smoovy motor	Faulhaber	BRUSHLESS DC	0308003в	3
		MOTOR		
Electronique	Dreampact	-	-	1
moteur	Limited			
Electronique de	Chipcon	SMART RF	04eb	1
commande				
Module wireless	Chipcon		CC2510EM	1
Capteur laser	MICRO-OPTRONIC	opto NCDT 2200	ILD2200-20	2
			1006112	
Oscilloscope	AGILENT	DSO7024A	MY48260294	1
	TECHNOLOGIES			
Alimentation	Dr. k Witmer	IC-TRIPLE Z	550 297 (CSEM	1
	Elektronik AG		201194)	
Alimentation	A+D PRODUCTS	LC 30-1	-	1

6.1.1 Matériel utilisé

TABLEAU 6.1: Matériel utilisé pour la caractérisation des moteurs Smoovy
6.1.2 Description des mesures effectuées

Pour effectuer les tests de caractérisation des moteurs, la solution retenue à été de fixer une barre sur l'axe du moteur sur laquelle un faisceau laser est envoyé. La figure 6.1 illustre le banc de tests. La résolution du capteur MICRO-OPTRONIC est de +/- 0.3 μm , néanmoins, compte tenu du bruit sur la mesure, elle est effectivement de 1 μm . Ce procédé permet de mesurer des variation de positions lors des divers tests effectués, à savoir :

- Rotation de 360° (6000 pas) afin de vérifier la répétabillité des mouvements
- Rotation de 1000 pas dans le sens horaire, puis anti-horaire afin de vérifier le jeu global du moteur
- Test de synchronisation des moteurs

A noter que toutes les mesures relevées lors des tests de caractérisation des moteurs ont été fait avec comme vitesse 2000 pas par seconde ("MRATE = 2000") et 1 pas comme rampe d'accélération ("MRAMP = 1").



FIGURE 6.1: Photographie de la mesure par capteur laser

6.1.3 Tests de répétabilité de mouvements

Le premier test effectué consiste à donner l'ordre au moteur de faire un tour complet afin de vérifier la répétabilité du mouvement. Le schéma de la figure 6.2 illustre la manière dont les tests on été effectués. Deux pièces ont été usinées afin d'effectuer ces tests. Une fixe avec un alésage pour maintenir le moteur, une autre libre entrainée par le moteur et servant de surface de référence. A noter que la mesure à été prise à 7 mm de l'axe du moteur, ce qui correspond à un diamètre de 14 mm pour la roue (valeur estimée d'après une modélisation préliminaire du système).

Procédure de test :

- 1) Prise de la référence (mise à zéro de la valeur donnée par le capteur laser)
- 2) Envoi de la commande de 6000 pas (360°)
- 3) Relevé de la position après rotation
- 4) Puis on recomence au point 1

Une fois les mesures récoltées, une analyse de ces dernières à été faite au moyen d'Excel. A noter que toutes les mesures ou graphiques sont disponibles dans l'annexe B.1. Pour le moteur 1, le test de 6000 pas (360°) permet de tracer le graphique de la dispersion des mesures (figure 6.3) ainsi que le pourcentage de valeurs par plage de mesures (figure 6.4).

L'analyse de ces données montre que la répartition des valeurs est à peu-près gaussienne (voir figure 6.4). Un résumé des résultats concernant le les résultats des tests de répétabilité est disponible dans le tableau 6.2.



FIGURE 6.2: Schéma de mesure pour la caractérisation des moteurs



FIGURE 6.3: Graphique de dispersion des mesures pour 6000 pas pour le moteur 1



FIGURE 6.4: Graphique de la répartition des mesures pour 6000 pas pour le moteur 1

Moteur	moteur 1	moteur 2	moteur 3
Déviation moyenne $[\mu m]$	-0.250	-1.733	0.780
Déviation minimum $[\mu m]$	0.1	2.1	0.2
Déviation maximum $[\mu m]$	39.1	62.0	48.9
Ecart-type $[\mu m]$	15.36	21.10	20.78
Nombre de mesures	40	40	40

TABLEAU 6.2: Récapitulatif des mesures de répétabilité

6.1.4 Tests de caractérisation du jeu

Le second test effectué concerne la caractérisation du jeu dans le réducteur du moteur. Dans les datasheet fournis par FAULHABER (voire annexe A.1), le jeu angulaire à la sortie du réducteur est donné à 4° sans charge. Ce jeu angulaire invervient lors d'un changement de direction. En effet, lorsque le sens de rotation du moteur est inversé, les engrenages composant le réducteur doivent tour à tour rattraper le jeu se trouvant entre les pignons. Afin de mesurer ce jeu, le même matériel qu'au point précédent est utilisé.

Procédure de test :

- 1) La position de la barrette est mise à zéro.
- 2) Envoi de 1000 pas dans le sens horaire $(+\ 1000 \ {\rm pas})$
- 3) Envoi de 1000 pas dans le sens anti-horaire (- 1000 pas (changement de sens de rotation induisant du jeu))
- 4) Relevé de mesure puis mise à zéro
- 5) Envoi de 1000 pas dans le sens anti-horaire (- 1000 pas)
- 6) Envoi de 1000 pas dans le sens horaire (+ 1000 pas (changement de sens de rotation induisant du jeu))
- 7) Relevé de mesure puis mise à zéro
- 8) Puis on recomence au point 1

Une fois les mesures récoltées, une analyse de ces dernières à été faite au moyen d'Excel. A noter que toutes les mesures ou graphiques sont disponibles dans l'annexe B.2. Pour le moteur 1, le test de 1000 pas permet de tracer le graphique de la dispersion des mesures (figure 6.5) ainsi que le pourcentage de valeurs par plage de mesures (figure 6.6).

Pour le moteur 2 et le moteur 3 les résultats sont disponibles dans l'annexe B.2. Un résumé des valeurs d'intérêt est disponible dans le tableau 6.3. Les valeurs de ce tableau sont directement transformées en degrés.



FIGURE 6.5: Graphique de dispersion des mesures pour la caractérisation du jeu dans le moteur 1



FIGURE 6.6: Graphique de répartition des mesures pour la caractérisation du jeu dans le moteur 1

Moteur	moteur 1	moteur 2	moteur 3
Jeu moyen dans le sens horaire $[deg]$	2.169	1.568	1.627
Jeu moyen dans le sens anti-horaire $[deg]$	2.175	1.586	1.639
Jeu minimum dans le sens horaire $[deg]$	2.085	1.152	1.385
Jeu maximum dans le sens horaire $[deg]$	2.225	1.639	1.691
Différence des jeux dans le sens horaire $[deg]$	0.140	0.488	0.306
Jeu minimum dans le sens anti-horaire $[deg]$	2.129	1.279	1.542
Jeu maximum dans le sens anti-horaire $[deg]$	2.235	1.626	1.693
Différence des jeux dans le sens anti-horaire $[deg]$	0.106	0.347	0.151
Ecart-type du jeu dans le sens horaire $[deg]$	0.029	0.108	0.070
Ecart-type du jeu dans le sens anti-horaire $[deg]$	0.024	0.076	0.043
Nombre de mesures	40	40	40

TABLEAU 6.3: Récapitulatif des mesures du jeu du réducteur

6.1.5 Tests de synchronisation des moteurs

Afin de vérifier si les moteurs tournent à la même vitesse, un test de mesure de la vitesse de rotation à été effectué. Les mesures se sont déroulées selon le schéma de la figure 6.7.



FIGURE 6.7: Schéma du banc de test pour la mesure de la vitesse de rotation des moteurs

Les mesures ont été relevées au moyen d'un oscilloscope Agilent Technologies (référence voir tableau 6.1). En se servant de ces mesures, une analyse graphique à été effectuée. Les différents graphiques de mesures se trouvent dans l'annexe B.4. Les calculs ont été effectués en pointant les valeurs sur les graphiques et en n'en déduisant la fréquence de rotation des moteurs. Le tableau 6.4 résume les valeurs calculées.

Mesure	t 1 tr mot 1 $[s]$	t 1 tr mot 2 $[s]$	f rot mot 1 $[mHz]$	f rot mot 2 $[mHz]$	$\Delta f [mHz]$
Mesure 1	2.983	2.983	335.233	335.233	0
Mesure 2	2.985	2.98	335.008	335.570	0.562
Mesure 3	2.81	2.985	355.872	335.008	20.864
Mesure 4	2.99	2.78	334.448	359.712	25.264
Mesure 5	2.99	2.99	334.448	334.448	0
Mesure 6	2.99	2.98	334.448	335.570	1.122

TABLEAU 6.4: Récapitulatif des mesures de synchronisation des moteurs

6.1.6 Conclusions

Suite à ces test, la conclusion est que les moteurs ne conviennent pas à l'application souhaitée. Lors des tests de répétabillité, bien que les déviations moyennes soient comprises entre -1.773 et 0.780 microns, l'écart-type est lui compris entre 15.36 et 21.10 microns, ce qui ne correspond pas à la tolérance de positionnement de +/-5 microns. La différence entre le jeu moyen dans le sens horaire et celui dans le sens anti-horaire varie peu, mais tout-de-même trop pour l'application. Chaque moteur à son propre jeu qui, rapporté au périmètre d'une roue de 7 milimètres de diamètre donne un jeu de l'ordre de 200 microns, ce qui pose aussi problème. La mesure de la vitesse de rotation de chaque moteur montre toutefois que les deux moteurs fonctionnent de manière synchrone, il n'y à donc aucun problème à attendre venant de cela. Au vu des résultats obtenus et compte tenu de la faible charge radiale admissible sur l'axe du moteur, la décision a donc été prise d'effectuer des recherches en vue de trouver un moteur convenant mieux à l'application.

6.2 Recherche et choix d'un nouveau moteur

6.2.1 Description des valeurs d'intérêt

Suite aux tests effectués (voire section 6.1), une recherche à été faite afin de trouver un autre moteur convenant mieux à l'application. Ces recherches ont été effectuées auprès de l'entreprise FAULHABER. Grâce à ces recherches, quatre moteurs ont été mis en avant car ils satisfont aux critères suivants :

- Charge radiale admissible sur l'axe du moteur suffisante pour supporter un robot de 80-100 grammes
- Couple fourni par le moteur suffisant pour l'application
- Dimensions du moteur permettant une intégration dans un carré de 20x20 milimètres
- Amélioration potentielle de la résolution du robot

6.2.2 Comparaison des alternatives moteurs

Quatre moteurs ont été identifiés comme convenant à l'application. Une modélisation de ces derniers est visible sur la figure 6.8. Sur cette figure, les moteurs sont comparés au moteur Smoovy choisi par UK-ATC.



FIGURE 6.8: Penny-motor 1202...BH / Penny-motor 1307D004BH / Servomoteur C.C. 0620...B / Smoovy-motor 0308B

Un document Excel concernant la comparaison de ces moteurs à été rédigé. Dans ce fichier, le couple disponible sur les roues, la vitesse linéaire ainsi que la résolution linéaire potentielles du robot sont calculées pour différents diamètres de roues. Une étude volumique de l'implémentation des moteurs dans un châssis de 20x20 milimètres d'empreinte au sol est aussi disponible dans ce fichier. Ce document (voir annexe D) a conduit au choix des moteurs présentés dans la section suivante.

6.2.3 Description du moteur choisi

Comme cité dans la section précédente, c'est suite à la comparaison de quatre moteurs qu'un moteur à été choisi. Il s'agit du Penny-motor 1307D004BH et ce en raison des caractéristiques suivantes :

- Le moteur admet une bonne charge radiale sur son axe (0.5 [N])
- Un réducteur est intégré (270 :1)
- Jeu angulaire identique à celui du Smoovy (donné à 4°)
- Le couple fourni par le moteur est suffisant pour notre application (5 [mNm])
- Les dimension du moteur permettent une intégration dans une empreinte au sol de 20x20 [mm]
- Des sondes de Hall permettant de connaître la vitesse de rotation du moteur sont intégrées
- Le moteur fonctionne avec la même électronique de commande que le Smoovy motor (BLD05002S) pour lequel la carte de commande à été développée
- L'utilisation de ces moteurs simplifie le design mécanique du châssis

Ce moteur existe en deux configuration, à savoir l'axe du moteur déscentré (1307004BH, voir figure 6.9a) ou centré (1309004BH, voir figure 6.9b). La configuration choisie pour entraîner les roues du micro-robot est la configuration décentrée car elle permet de rapprocher l'axe de ces dernières du sol. Ceci permet d'avoir des roues de petit diamètre, ce qui est intéressant pour l'application car la résolution du micro-robot est dépendante du diamètre des roues. Plus les roues seront petites, plus la résolution du robot sera bonne.



FIGURE 6.9: Modélisation des moteurs choisis

6.2.4 Création d'un PCB flexible d'interfaçage

Comme cité dans la section précédente, le moteur Penny fonctionne avec la même électronique de commande que le moteur Smoovy. Ceci à permis de changer de moteur, tout en ne modifiant pas la carte électronique de commande. La fiche de connection du moteur Penny n'est pas la même que celle du Smoovy, ce qui implique un changement de connecteur. Afin de permettre à UK-ATC de repartir du prototype qui sera réalisé tout en gardant leurs moteurs (Smoovy), il à été décié de créer un PCB d'interfaçage. Une des terminaisons est conçue de manière à être insérée dans l'ancien connecteur (connecteur du moteur Smoovy) et l'autre comporte le nouveau connecteur nécessaire au fonctionnement du moteur Penny. Les pistes du PCB ne font en fait que de relier les pins entre-elles (voir figures 6.10). Les schéma de mise en oeuvre de ce PCB d'interfaçage sont disponibles dans l'annexe F.



(a) PCB d'interfaçage sans connecteur (b) PCB d'interfaçage avec connecteur

FIGURE 6.10: Photographie du PCB d'interfaçage

6.3 Conception préliminaire

Une conception préliminaire du prototype à été effectuée. Cette dernière ne tient compte que du volume des moteurs choisis et nécessiterait un remaniement complet de la carte de commande des moteurs fournie par UK-ATC. Les modifications nécessaires à cette intégration ne font pas partie du cahier des charges de ce travail de bachelor, en raison des délais de conception et de réalisation qui sortiraient du temps imparti à la réalisation de ce dernier. Sur la figure 6.11, il est possible d'observer que l'exigence sur le footprint est tenue concernant le châssis et presque tenue si l'on tiens compte de la largeur roues. Sur cette figure, il est aussi possible d'observer la hauteur approximative que pourrait avoir le robot s'il devait comporter un étage supplémentaire afin d'effectuer un positionnement angulaire précis du miroir.



FIGURE 6.11: Modélisation du robot en utilisant les moteurs Penny

6.3.1 Analyse des performances théoriques de la modélisation préliminaire

Suite à cette conception préliminaire, il est possible de calculer les performances théoriques d'un tel robot compte tenu de l'utilisation des moteurs Penny. L'électronique de commande peut générer 48 pas par tours pour un moteur ayant une paire de pôles (comme le Smoovy). Le moteur Penny possède quand-à-lui quatre paries de pôles, ce qui améliore sa résolution. Compte tenu des informations suivantes, il est possible d'effectuer les calculs ci-dessous :

Nombre de pas par tours du moteur $("N_{mot}")$	48
Nombre de paires de pôles du moteur $("p")$	4
Rapport de réduction du réducteur (" i_{red} ")	270:1
Diamètre des roues $("d")$	$11.65~\mathrm{mm}$
Distance entre les roues $("s")$	21.2 mm

Le nombre de pas par tour moteur " $N_{pas mot}$ " se calcule comme suit :

$$N_{pas\ mot} = p \cdot N_{mot} = 4 \cdot 48 = 192\ pas/tours \tag{6.1}$$

En multipliant ce nombre de pas par tours par le rapport de réduction du réducteur, il est possible de calculer la résolution globale du moteur :

$$resol_{mot} = 192 \cdot 270 = 51840 \ pas/tours$$
 (6.2)

Le diamètre des roues découlant de la conception préliminaire présentée à la section 6.3 est de 11.65 milimètres. Grâce à ce diamètre et à la résolution globale du moteur, il est possible de calculer la résolution théorique du robot :

$$resol_{robot} = \frac{P_{roue}}{resol_{mot}} = \frac{11.65 \cdot 10^{-3} \cdot \pi}{51840} \cong 0.7 \ \mu m/pas$$
 (6.3)

Lors d'une rotation sur lui-même, en utilisant l'approximation pour les petits angles, la résolution angulaire du robot se calcule comme suit :

$$resol_{angl} = \frac{resol_{robot}}{s/2} = \frac{0.7 \cdot 10^{-6}}{10.6 \cdot 10^{-3}} = 0.066 \ mrad$$
(6.4)

La vitesse de l'axe du réducteur se calcule comme suit (V_{moteur} tiré des datasheet diponibles dans l'annexe A.2) :

$$V_{sortie\ moteur} = \frac{V_{moteur}}{i} = \frac{10000\ tours/min}{270} \cong 37.037\ tours/min \equiv 0.61728\ tours/s \tag{6.5}$$

La vitesse linéaire théorique du robot sera donc :

$$V_{robot} = d_{roue} \cdot \pi \cdot V_{sortie\ moteur} = 11.65 \cdot \pi \cdot 0.61728 \cong 22.59\ mm/s \tag{6.6}$$

6.4 Calculs et mesures se rapportant aux contacts d'alimentation avec le substrat

L'alimentation du robot en courant se fait au moyen de contacts frottants sur un plan de charge (voir chapitre 5.2.1). Afin de vérifier que le poids du robot suffit à garantir ces contacts et aussi que l'action des lames ressort ne contre pas la traction des roues, il faut calculer l'écrasement théorique de la plateforme puis mesurer ce dernier. Une modélisation des contacts à lames est disponible à la figure 6.12



FIGURE 6.12: Modélisation du PCB supportant les lames ressort

6.4.1 Calculs théoriques de flexion

Pour les calculs théoriques suivants, il est admis que la le poids du robot est uniformément réparti sur le PCB supportant les contacts. Les lames ressorts sont considérées comme identiques et comme des poutres encastrées, ce qui permet de calculer la flexion théorique des ces dernières. Les lames ressort sont faites d'un alliage cuivre bérilium (BeCu). Pour un tel alliage, il existe plusieurs traitements différents qui lui confère des propriétées mécaniques variables. Ici, les calculs sont effectués avec les valeurs d'intérêt suivantes :

Module de Young $("E")$	127.7 [GPa]
Longueur lame $("L")$	$7 \; [mm]$
Largeur lame $("l")$	$2.5 \; [\mathrm{mm}]$
Epaisseur lame $("e")$	$0.1 \; [mm]$

En considérant que le poids du robot est uniformément réparti, et en estimant le poids de ce dernier à 60 grammes, il est possible de calculer la force appliquée sur chaque lame comme suit :

$$F = \frac{m \cdot g}{4} = \frac{60 \cdot 10^{-3} \cdot 9.81}{4} \cong 147.15 \ mN \tag{6.7}$$

Le calcul du moment d'inertie d'une poutre se fait de la manière suivante :

$$I_y = \frac{l \cdot e^3}{12} = \frac{2.5 \cdot 0.1^3}{12} \cong 208.333 \cdot 10^{-6} \ mm^4$$
(6.8)

La flèche au point d'applicaiton de la force ${\cal F}$ (représentée à la figure 6.13) se calcul comme suit :

$$\Delta_x = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I_y} = \frac{147.15 \cdot 10^{-3} \cdot 7^3}{3 \cdot 127.7 \cdot 10^3 \cdot 208.333 \cdot 10^{-6}} \cong 0.632 \ mm \tag{6.9}$$



FIGURE 6.13: Flexion sur une lame

6.4.2 Mesures de flexion

Les calculs de flexion pour de petites pièces telles que les lames ressort dont dispose le robot sont indicatifs. Afin de vérifier ces calculs, des mesures de flexion ont été faites. Le matériel utilisé pour ces mesures est décrit dans le tableau 6.5.

Description	FABRICANT	Modèle	No. Série	Quantité
Capteur laser	MICRO-OPTRONIC	opto NCDT 2200	ILD2200-20	1
			1006112	
Alimentation	Dr. k Witmer	IC-TRIPLE Z	550 297 (CSEM	1
	Elektronik AG		201194)	

TABLEAU 6.5: Matériel utilisé pour la mesure de flexion des lames ressort

Le procédé de mesure est simple : la cible, petit prisme rectangulaire sur lequel est fixé le PCB supportant les lames ressort est placé en dessous d'un capteur laser. En chargeant ce prisme avec des rondelles préalablement pesées au moyen d'une balance de précision, il est possible de mesure le déplacement correspondant (Δ_x) . Un schéma de mesure est montré à la figure 6.14. Chaque série mesure est effectuée trois fois. Un récapitulatif de ces mesures est disponible dans le tableau 6.6, pour le détail des mesures, se référer à l'annexe E.



FIGURE 6.14: Schéma de mesure de flexion des lames ressort

Résultats des mesures

Charge $[g]$	Moy. mes $[mm]$	Ecart-type $[mm]$	Val th $[mm]$	Val. th - Mes $[mm]$
12.9	0.1407	0.0167	0.1359	0.0047
25.6	0.2777	0.0046	0.2698	0.0079
36.9	0.3876	0.0193	0.3889	0.0012
47.6	0.4654	0.0259	0.5016	0.0362
65.2	0.5295	0.0255	0.6871	0.1576

TABLEAU 6.6: Récapitulatif des mesures d'écrasement des contacts à lames

Sur le graphique de la figure 6.15, il est possible d'observer la flexion des lames par rapport à la charge posée sur le prisme. Afin de garantir que le contact entre les lames ressort et le plan de charge soit assuré, il est nécessaire d'imposer une valeur pour la flèche des lames ressorts. Mais il faut aussi tenir compte du fait que ces dernières vont exercer une force de sens opposé au poids propre du robot. Pour que ce dernier puisse avancer, il a besoin de la force de frottement exercée par ses roues sur le sol et cette force de frottement dépend directement du poids du robot. Ainsi, il faut dimensionner l'écrasement des contacts avec le plan de charge de manière à ce que le contact soit garanti tout en ne délestant pas trop le robot. Afin de garantir ceci, il est décidé que la poussée exercée par les lames ressort ne devrait pas excéder le tiers du poids total du robot, ce qui nous amène à une force exercée par les contacts équivalente à 20 grammes. En observant le graphique de la figure 6.15, il est possible d'estimer que pour une force équivalente à 20 grammes, il faut un écrasement des lames de 0.2 milimètres. Afin de vérifier cela, il suffit de reprendre le calcul de la flèche (équation 6.9).

$$\Delta_x = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I_y} \longrightarrow F = \Delta_x \cdot \frac{3 \cdot E \cdot I_y}{L^3} = 0.2 \cdot \frac{3 \cdot 127.7 \cdot 10^3 \cdot 208.33 \cdot 10^{-6}}{7^3} \cong 46.54 \ mN \quad (6.10)$$

La vérification se fait comme ceci :

$$\frac{m_{robot} \cdot g}{3} \ge 4 \cdot F \longrightarrow \frac{60 \cdot 10^{-3} \cdot 9.81}{3} \ge 4 \cdot 46.54 \cdot 10^{-3} \longrightarrow 196.2 \cdot 10^{-3} \ge 186.16 \cdot 10^{-3} \longrightarrow ok \ (6.11)$$



FIGURE 6.15: Graphique de la flexion des lames ressorts

Chapitre 7

Conception de la partie mécanique du MGD design

Une fois les moteurs permettant l'entraînement des roues choisis et l'écrasement des lames ressort dimensionné, il a été possible de se pencher sur le corps du problème, à savoir la conception et la modélisation des pièces mécaniques composant le châssis du robot. Cette conception est le coeur de nombreux problèmes et défis. En effet, la précision finale du robot dépend bien évidemment des moteurs et de leur résolution, mais aussi de la conception mécanique qui est construite autour d'eux. Une attention toute particulière à donc été portée tout au long de la conception de ces pièces sur la précision des divers ajustements ainsi que sur les tolérances accompagnant leur usinage. Dans ce chapitre, les diverses pièces conçues sont présentées les unes après les autres, puis dans l'assemblage afin d'expliquer au mieux les divers points d'intérêts se rapprotant à chacune d'elles. A noter que toutes les mises en plan ayant servi à l'usinage des diverses pièces sont disponibles dans l'annexe G.



FIGURE 7.1: Vue éclatée du MGD design

7.1 Etude des diverses pièces composant l'assemblage

7.1.1 Le châssis

Le châssis est le coeur du système, il comporte plusieurs taraudages permettant la fixation des divers éléments. Tous les taraudages ont un filet M1 car ils sont suffisants et surtout assez petits pour l'application. La standardisation de tout les taraudages permet de simplifier l'usinage de cette pièce. Plusieurs évidements sont effectués afin de laisser une place suffisante à certains éléments. Un évidement est prévu pour la carte électronique principale (commande des moteurs), un autre pour permettre le passage des flexibles d'alimentation des moteurs et un autre pour faire remonter les câbles d'alimentation jusqu'à la carte. L'alésage de centrage des flasques moteur est prévu pour être usiné traversant et en une seule fois, ceci afin de garantir la coaxalité des deux alésages. Cet alésage fait office de centrage pour les flasques moteur, aussi est-il tolérancé. Sur le pourtour de ce dernier se trouvent deux taraudages M1 traversants servant à fixer les flasques moteur ainsi qu'un alésage précis pour mettre une goupille afin de garantir la position angulaire de ces flasques. Une modélisation du châssis est visible à la figure 7.2



FIGURE 7.2: Modélisation du châssis du MGD design

7.1.2 Les flasques moteur

Les flasques des moteur permettent de fixer ces derniers au châssis. En effet, il à été décidé de concevoir un système qui puisse être facilement montable et démontable. C'est dans ce but que la fixation par flasques à été choisie. Le penny-motor 1307004BH possède des taraudages de fixation sur sa face avant (plan détaillé disponible dans l'annexe A.2) ainsi qu'un axe de centrage (voir figure 7.7), ce qui permet de le fixer tout en garantissant la position de son axe. Un alésage prévu pour une goupille est aussi disponible sur la face avant du moteur, ce qui permet de positionner angulairement le moteur. Sur l'arrière de la flasque, un axe tolérancé est prévu pour effectuer le centrage de cette dernière avec le châssis. Là encore, une goupille est prévue afin de positionner la flasque angulairement. Des vis de fixation assurent la coïncidence de la flasque avec le châssis. Une modélisation d'une flasque moteur est visible à la figure 7.3



FIGURE 7.3: Modélisation d'une flasque moteur du MGD design

7.1.3 Les roues

Les roues sont une partie critique. En effet, un légère différence dans le diamètre ou la cylindricité de ces dernières peut causer de grands problèmes dans le positionnement ultérieur du robot. Le diamètre de la roue est donc tolérancé et leur usinage est appairé, c'est-à-dire que les roues sont usinées deux par deux. Le diamètre de ces roues est fixé à 18 milimètres, cette dimension à été fixée pour deux raisons. Premièrement, elle permet l'implantation des PCB supportant les contacts avec le sol ainsi que le traitement de l'alimentation directement en dessous des moteurs, ce qui est idéal. Deuxièmement, en cours de développement, il à été envisagé de mettre une petit capteur incrémental sur la roue afin de savoir de combien de degrés elle à effectivement trourné. Pour ce faire, un capteur à été trouvé auprès de l'entreprise POSIC à Neuchâtel. Le diamètre extérieur du disque comprenant les cibles pourait-être selon eux ramené à environ 16 milimètre. C'est donc aussi afin de permettre une future implantation de ces capteurs incrémentaux que la roue à été ainsi dimensionnée. La fixation de la roue sur l'axe du moteur pose un léger problème. Comme cité au point précédent, il est souhaité de concevoir un système démontable. Dans ce cas, le collage n'est pas recommandé. Bien qu'il soit possible de décoller les pièces, cette action requiert l'emploit de solvants qui pourraient à la longue endomager la pièce, sans parler du temps requis pour effectuer ce décollage. Pour pallier à ce problème, une solution utilisant un joint o-ring dont le détail est donné à la section 7.2.1 à été incorporée. Une modélisation d'une roue et de sa flasque de fixation est visible à la figure 7.4



FIGURE 7.4: Modélisation d'une roue du MGD design

7.1.4 Le support du PCB comprenant les contacts

Le robot doit pouvoir s'auto-alimenter via des contacts frottant sur un plan de charge. Cette solution à donc été implémentée dans le design mécanique. La taille de cet élément ainsi que du PCB de traitement de l'alimentation à posé quelques problèmes. En effet, les dimensions de ces deux PCBs sont de 20x20 milimètres. Puisque le but est toujours de concevoir un système facilement démontable, ces dimensions imposent la mise en oeuvre d'un moyen de fixation extérieur, ce qui implique que l'empreinte au sol du robot soit légèrement supérieure à 20x20 milimètres. La solution choisie consiste en un cadre supportant les deux PCBs. Sur ce cadre, deux surfaces d'appuis triangulaires sont présentes afin de supporter les PCBs qui comportent les empreintes correspondantes (voire figure 7.5b).



FIGURE 7.5: Modélisation du support pour le PCB de contacts du MGD design

7.1.5 Equillibrage du micro-robot

Dans ce système, la position finale du robot doit impérativement être garantie. Les lames ressorts sont en contact avec le sol, mais ne permettent pas de garantir la position du robot du fait qu'il s'agit de contacts flexibles. Pour garantir la position du robot, il faut trois contacts rigides. Deux sont effectués par les roues, mais il en faut un troisième. La solution choisie pour ce troisième contact est une vis sur laquelle une surface de contact non conductrice est montée. Le contact est en fait une sorte de rivet en téflon, ce qui permet de réduire les frottements induis par le système d'anti-basculement. L'emploi d'une vis est choisi afin de pouvoir régler la hauteur de ce point de contact en intercalant des feuilles d'épaisseur. La modélisation de la figure 7.6 montre une vue de ce système d'anti-basculement.



FIGURE 7.6: Vue du système de stabilisation du micro-robot

7.2 Etude de l'assemblage complet

7.2.1 Fixation du moteur et accouplement aux roues

Sur la figure 7.7, une vue éclatée du sous-ensemble châssis, moteur, roue et de leurs moyens de fixation est disponible. Comme expliqué dans les points 7.1.2 et 7.1.1, la fixation du moteur est faite au moyen de flasques. Les centrages par les axes et les alésages, ainsi que le positionnement angulaire au moyen de goupilles est expliqué dans ces mêmes points. La fixation de la roue est faite au moyen d'un joint O-ring et d'une flasque. Comme expliqué au point 7.1.3, c'est pour garder un système démontable que ce moyen de fixation à été choisi. L'alésage de la roue est chanfreiné à 90° sur une profondeur donnée. Un joint O-ring (joint horlogé fabriqué par ISO-SWISS) est monté derrière la roue et s'appuie sur la face de ce chanfrein. En venant serrer ce joint entre la roue et la flasque, ce dernier est comprimé et du fait que le chanfrein est de 90° (45° par rapport à l'axe du moteur), vient effectuer un serrage sur l'axe du moteur. Ainsi la roue est maintenue axialement et radialement par le joint (voire figure 7.8).



FIGURE 7.7: Vue élcatée de la fixation du moteur et de l'accouplement aux roues du MGD design



FIGURE 7.8: Fixation des roue du MGD design

7.2.2 Fixation de la carte électronique principale

La carte électronique principale (commande des moteurs) à été fournie par UK-ATC. Des trous de fixation ont été inclu dans la conception de la carte elle-même. Malheureusement, ces derniers ne sont pas accessibles et ne permettent donc pas d'effectuer une fixation. Un trou de passage servant à la base à maintenir la batterie en place à été récupéré afin de servir de trou de fixation. L'emplacement de ce trou sur la carte nécessite une pièce supplémentaire, visible sur la figure 7.9. Cette pièce est fixé au châssis au moyen de deux vis M1. Sa forme lui vient du fait qu'il faut nécessairement laisser un accès au pins de connection pour les fils d'alimentation. La carte électronique est fixée sur cette pièce de fixation au moyen d'un petit écrou manufacturé afin de correspondre aux dimensions de cette dernière et à nouveau d'une vis M1.



FIGURE 7.9: Vue éclatée de la fixation de la carte principale du MGD design

7.3 Vues 3D du concept

Vues d'ensemble du robot

La figure 7.10 montre deux vues d'ensemble de l'assemblage.



(a) Vue sans la carte électronique

(b) vue complète

FIGURE 7.10: Modélisation du robot MGD design

Chapitre 8

Calculs se rapportant au MGD design et comparaison avec ceux d'UK-ATC

Une fois les divers éléments mécaniques dimensionnés, il est possible d'estimer par calcul les performances du robot. Cela permet de comparer les performances théoriques des anciens designs avec le nouveau. Dans la première partie de ce chapitre, la résolution et la vitesse du MGD design seront calculées et comparées avec les valeurs théoriques obtenues pour le Wheepie et le DMD design. Dans la seconde partie, des calculs spécifiques au MGD design seront développés afin de vérifier le système d'équillibrage du prototype ainsi que de fixer la vitesse et l'accélération maximale admissible par le micro-robot.

8.1 Calcul de la résolution et de la vitesse du MGD design

8.1.1 Calcul de la résolution théorique du micro-robot

Connaissant les caractéristiques des moteurs permettant l'entraînement des roues ainsi que le diamètre de ces dernières, il est possible de calculer la résolution théorique du micro-robot. Les données ci-dessous sont tirées en partie des datasheets du moteurs (voire annexe A.2).

Nombre de pas par tours du moteur $("N_{mot}")$	48
Nombre de paires de pôles du moteur $("p")$	4
Rapport de réduction du réducteur (" i_{red} ")	270 :1
Diamètre des roues $("d")$	$18 \mathrm{~mm}$
Distance entre les roues $("s")$	$22.6~\mathrm{mm}$

Le nombre de pas par tours générés par la carte de commande des moteurs se calcule comme suit :

$$N_{pas\ mot} = p \cdot N_{mot} = 4 \cdot 48 = 192\ pas/tours \tag{8.1}$$

En multipliant ce nombre de pas par tours avec le rapport de réduction du réducteur, il est possible de calculer la résolution globale du moteur :

$$resol_{mot} = 192 \cdot 270 = 51840 \ pas/tours$$
 (8.2)

Le diamètre des roues suite à la modélisation du design final du chapitre 7 est de 18 milimètres, grâce à ce diamètre et à la résolution globale du moteur, il est possible de calculer la résolution théorique du robot :

$$resol_{robot} = \frac{P_{roue}}{resol_{mot}} = \frac{18 \cdot 10^{-3} \cdot \pi}{51840} \cong 1.1 \ \mu m/pas$$
 (8.3)

Lors d'une rotation sur lui-même, en utilisant l'approximation pour les petits angles, la résolution angulaire du robot se calcule comme suit :

$$resol_{angl} = \frac{resol_{robot}}{s/2} = \frac{1.1 \cdot 10^{-6}}{11.3 \cdot 10^{-3}} = 0.097 \ mrad$$
(8.4)

8.1.2 Calcul de la vitesse théorique du micro-robot

La vitesse de l'axe du réducteur se calcule comme suit (V_{moteur} tiré des datasheet diponibles dans l'annexe A.2) :

$$V_{sortie\ moteur} = \frac{V_{moteur}}{i} = \frac{10000\ tours/min}{270} \cong 37.037\ tours/min \equiv 0.61728\ tours/s \tag{8.5}$$

La vitesse linéaire théorique du robot sera donc :

$$V_{robot} = d_{roue} \cdot \pi \cdot V_{sortie\ moteur} = 18 \cdot \pi \cdot 0.61728 \cong 34.9\ mm/s \tag{8.6}$$

8.2 Comparaison des valeurs théoriques obtenues pour les différents designs

Sur le tableau 8.1, il est possible d'observer un comparatif entre la résolution théorique et la vitesse linéaire théorique des différents robots, à savoir le Wheepie design, le DMD design et le MGD design (les calculs se rapportant au Wheepie et au DMD design sont développés dans le chapitre 4). En comparant le Wheepie design au DMD design, on s'aperçoit que la résolution du Wheepie est de l'ordre de dix fois moins bonne que celle du DMD. La vitesse linéaire est quand-à-elle de l'ordre de dix fois plus élevée pour le Wheepie que pour le DMD. L'objectif principal est de concevoir un robot ayant une bonne résolution, c'est pourquoi, entre les deux design, il est possible de dire que le meilleur pour l'application souhaitée est le DMD design. Le MGD design offre une précision de l'ordre du micron et une vitesse linaire environ trois fois supérieure au DMD design. C'est pourquoi le nouveau design devient, sur le plan théorique, le meilleur robot pour cette application.

Robot	Weepie	DMD	MGD
Résolution linéaire théorique du robot $[\mu m/pas]$	13.6	1.3	1.1
Résolution angulaire théorique $[mrad]$	0.877	0.109	0.097
Vitesse linéaire théorique du robot $[mm/s]$	111.84	10.45	34.9

TABLEAU 8.1: Comparaison des performances théoriques des différents robots

8.3 Calcul de la position statique du micro-robot

8.3.1 Calcul du moment résultant de l'écrasement des lames ressort

Pour ces calcul, les mêmes hypothèses qu'à la section 6.4.1 sont faites, à savoir que les lames sont considérées comme identiques et la charge appliquée comme uniforme. Pour rappel, il est aussi décidé de ne pas délesté le robot de plus du tiers de son poids, ce qui explique le therme $1/3 \cdot m_{robot}$.



FIGURE 8.1: Schéma d'équillibre des lames ressort

Sur la figure 8.1, il est possible d'observer la disposition des lames sous le châssis du micro-robot. Les forces rentrant en jeu pour le calcul du moment résultant de l'écrasement des lames ressorts sont : F_{cont} qui correspond à la force résultante de l'écrasement d'une lame ressort, $1/3 M_{robot}$ qui représente le poids générant cet écrasement. En utilisant les données de la figure 8.1, il est possible de calculer le moment résultant de ce sous-système comme suit :

$$M_{cont} = \sum M_C = +F_{cont} \cdot 7.866 - F_{cont} \cdot 2.9 - F_{cont} \cdot 4.923$$

$$= F_{cont} \cdot (7.866 - 2.9 - 4.923) = 43 \cdot 10^{-3} \cdot F_{cont}$$

$$= (43 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^{-1} \cdot 46.54 \cdot 10^{-3} \approx 2 \cdot 10^{-6} Nm$$
(8.7)

Ces calculs ne tiennent pas compte de l'incertitude sur le positionnement du PCB supportant les lames ressorts. Comme cité au paragraphe 6.4.1, il est choisi de positionner ce dernier de manière à ce que les lames ressorts soient comprimées de 0.2 milimètres. L'incertitude sur le positionnement du PCB se repporte sur les calculs de l'équation ??. La force résultant de l'écrasement des lames ressorts dépend linéairement de la valeur de la flèche Δx (voir equation 6.10). La tolérance sur le positionnement du PCB est de +/- 5 centièmes de milimètre. Ce qui donne une incertitude de 5% sur son positionnement.

Le résultat du calcul de l'équation **??** nous indique que le robot aura une légère tendance à basculer vers l'arrière (vers la droite de la figure).

8.3.2 Calcul du nouveau centre de masse du robot

Comme expliqué à la section 7.1.5, il est nécessaire d'avoir trois points de contacts rigides avec le sol. Afin de garantir que le robot va s'appuyer sur ce troisième point de contact, il est choisi de le charger avec une petite masse de 10 grammes. De ce fait, le centre de masse du robot se trouve ramené en direction du troisième point de contact.



FIGURE 8.2: Schéma pour déterminer le nouveau centre de masse

La modélisation sous SOLIDWORKS du micro-robot donne un centre de masse dont les coordonnées par rapport à l'axe des roues et au plan de symétrie du robot sont :

$$O_{m \ robot \ x,y,z} = \begin{bmatrix} -0.57\\ 14.2\\ 0 \end{bmatrix}$$
(8.8)

La position du stabilisateur et donc du poids supplémentaire est :

$$O_{m \ eqli \ x,y,z} = \begin{bmatrix} -11.25 \\ -2.527 \\ 0 \end{bmatrix}$$
(8.9)

Le calcul du nouveau centre de masse du robot s'effectue comme suit :

$$y_c = \frac{m_{robot} \cdot O_{m \ robot} \ y + m_{eqli} \cdot O_{m \ suppl \ y}}{m_{robot} + m_{eqli}} = \frac{60 \cdot 14.2 + 10 \cdot (-2.527)}{60 + 10} \cong 11.8$$
(8.10)

$$x_c = \frac{m_{robot} \cdot O_{m \ robot} \ x + m_{eqli} \cdot O_{m \ suppl \ x}}{m_{robot} + m_{eqli}} = \frac{60 \cdot (-0.507) + 10 \cdot (-11.250)}{60 + 10} \cong -2.1 \quad (8.11)$$

Le nouveau centre de masse sera donc :

$$O_{m \ nv \ x,y,z} = \begin{bmatrix} -2.1\\ 11.8\\ 0 \end{bmatrix}$$
(8.12)

8.4 Calcul de l'accélération admissible par le micro-robot

Les moteurs du micro-robot entraînent les roues qui elles-mêmes exercent une force de traction qui va permettre au robot de se déplacer. Cette force de dépend du poids du robot ainsi que du coefficient de frottement entre les roues et la surface sur laquelle évolue le robot. La figure 8.3 montre les forces en jeux pour la détermination de l'accélération admissible par le système, à savoir :

F_{adh} :	Force d'adhérence des roues
$F_{frott-cont}$:	Force induite par le frottement des contacts à lames
$F_{frott-NB}$:	Force induite par le frottement du stabilisateur
m_{tot} :	Masse totale du robot
N_A :	Réaction d'appuis sur les roues
N_B :	Réaction d'appuis sur le stabilisateur
M_{cont}	Moment résultant de l'écrasement des lames ressort



FIGURE 8.3: Schéma pour déterminer l'accélération admissible par le robot

Le schéma de la figure 8.3 permet de poser les équations suivantes :

$$\sum F_x = m \cdot \ddot{x} : 2 \cdot F_{adh} - F_{frott-cont} - F_{frott-NB} = m \cdot \ddot{x}$$
(8.13)

$$\sum F_y = 0 : -m_{tot} \cdot g + 2 \cdot N_A + 4 \cdot F_{cont} + N_B = 0$$
(8.14)

$$\sum M_c = 0 : M_{cont} + m_{tot} \cdot g \cdot 2.1 \cdot 10^{-3} - N_B \cdot 11.250 \cdot 10^{-3}$$
(8.15)

Le système est décrit par 3 équations à 5 inconnues : F_{adh} , $F_{frott-cont}$, $F_{frott-B}$, N_A , N_B

Mais :

Connaissant la force F_{cont} (voire équation 6.10) il est possible de déterminer la force de frottement induite par les contacts des lames ressorts comme suit :

$$F_{frott-cont} = 4 \cdot F_{cont} \cdot \mu_{BeCu} = 4 \cdot 46.54 \cdot 10^{-3} \cdot 0.2 \cong 37.232 \ mN \tag{8.16}$$

De l'équation 8.15, connaissant le couple généré par l'écrasement des contacts à lames (voir équation ??) il est possible de ressortir la réaction d'appuis du stabilisateur N_B :

$$N_B = \frac{M_{cont} + m_{tot} \cdot g \cdot 2.1 \cdot 10^{-3}}{11.250 \cdot 10^{-3}} = \frac{2 \cdot 10^{-6} + 70 \cdot 10^{-3} \cdot 9.81 \cdot 2.1 \cdot 10^{-3}}{11.250 \cdot 10^{-3}} \cong 128.362 \ mN \quad (8.17)$$

Le calcul de N_B montre que lorsque le robot sera en position de repos, il reposera naturellement sur le troisième contact rigide.

Grâce à cette valeur de N_B , il est maintenant possible de calculer la réaction d'appuis des roues sur le sol :

$$N_A = \frac{m_{tot} \cdot g - 4 \cdot F_{cont} - N_B}{2} = \frac{70 \cdot 10^{-3} \cdot 9.81 - 4 \cdot 46.54 \cdot 10^{-3} - 128.362 \cdot 10^{-3}}{2} \cong 186.089 \, mN_{(8.18)}$$

Avec cette valeur de N_A , il est possible de calculer la force d'adhérence des roues F_{adh} , tout en sachant que la condition pour que les roues tournent sans glissement est que la force d'adhérence soit plus petite que la force de frottement, ce qui explique la multiplication par un facteur pour la sécurité de 0.9.

$$F_{adh} \le N_A \cdot \mu_{AL} \longrightarrow F_{adh} = 0.9 \cdot N_A \cdot \mu_{AL} = 0.9 \cdot 186.089 \cdot 10^{-3} \cdot 0.4 \cong 66.99 \ mN \tag{8.19}$$

La force due au frottement du stabilisateur sur le sol $F_{frott-NB}$ peut elle aussi être calculée :

$$F_{frott-NB} = N_B \cdot \mu_{PTFE} = 128.362 \cdot 10^{-3} \cdot 0.05 \cong 6.418 \ mN \tag{8.20}$$

Et maintenant, connaissant F_{adh} , $F_{frott-cont}$ ainsi que $F_{frott-B}$ il est possible de calculer l'accélération admissible par le système au moyen de l'équation 8.13 :

$$\ddot{x} = \frac{2 \cdot F_{adh} - F_{frott-cont} - F_{frott-NB}}{m} = \frac{2 \cdot 66.99 \cdot 10^{-3} - 37.232 \cdot 10^{-3} - 6.418 \cdot 10^{-3}}{70 \cdot 10^{-3}} \cong 1.29 \, m/s^2$$
(8.21)

Cette accélération permet de calculer le temps nécessaire au robot pour atteindre sa vitesse maximale au moyen de la relation de base :

$$v = \ddot{x} \cdot t \longrightarrow t = \frac{V_{robot}}{\ddot{x}} = \frac{34.9 \cdot 10^{-3}}{1.29} \cong 0.0271 \ s$$
 (8.22)

Ce qui implique que le temps nécessaire au moteur pour atteindre la vitesse souhaitée devra être inférieure à la valeur calculée à l'équation 8.22 afin d'éviter que les roues ne patinent lors de la phase d'accélération. Le choix est fait d'introduire un facteur deux dans le temps d'accélération du moteur afin d'éviter ce phénomène de glissement.

$$t_{acc\ mot} = 2 \cdot t = 2 \cdot 0.0271 = 0.054 \longrightarrow 0.055\ s \tag{8.23}$$

Comme cité à la section 5.3, il est possible de fixer le nombre de pas effectués par seconde ("MRATE") ce qui correspond à la vitesse du moteur ainsi que le nombre de pas utilisés pour atteindre cette consigne ("MRAMP") ce qui correspond à son accélération.

En reprenant les résultats des équations 8.2 et 8.5, il est possible de calculer la vitesse du moteur en nombre de pas par secondes :

$$V_{pas\ mot} = resol_{mot} \cdot V_{sortie\ moteur} = 51840 \cdot 0.61728 \cong 32000\ pas/s \tag{8.24}$$

Ce qui permet de fixer la vitesse maximale du moteur à "MRATE" = 32000.

Il est maintenant possible de calculer le temps que met le moteur pour effectuer un pas :

$$t_{pas} = \frac{1}{V_{pas \ mot}} = \frac{1}{32000} \cong 31.25 \cdot 10^{-6} \ s \tag{8.25}$$

Grâce à ce résultat, il est possible de déterminer le nombre de pas nécessaires à l'accélération du moteur :

$$t_{acc\ mot} = N_{pas\ acc} \cdot t_{pas} \longrightarrow N_{pas\ acc} = \frac{t_{acc\ mot}}{t_{pas}} = \frac{0.055}{31.25 \cdot 10^{-6}} \cong 1760\ pas \tag{8.26}$$

Ce qui permet de fixer le nombre minium de pas nécessaires à l'accélération à "MRAMP" = 1760.

Chapitre 9

Tests et caractérisation du micro-robot

Une fois les divers éléments composant le prototype à disposition, il est possible de l'assembler et de le caractériser. Dès la réception des moteurs Penny, ces derniers ont été montés sur la carte de commande conçue par DREAMPACT LIMITED et on été testés. Malheureusement, il à été observé que les moteurs Penny ne fonctionnent pas comme espéré. En effet, sur les datasheet des moteurs Penny (voir annexe A.2), la vitesse de rotation de l'axe de sortie du réducteur est annoncée à 37 tours par minute. Lors des essais sur la carte électronique de commande des moteurs, il n'a pas été possible de faire tourner les moteurs plus rapidement que 2000 pas par seconde, ce qui correspond à 2.31 tours par minute.

Un autre moyen de test à été mis en place afin de vérifier si l'électronique de commande des moteurs (BLD05002S) fonctionne correctement. Le schéma de la figure 9.1 illustre le setup de test mis en place pour faire fonctionner les moteurs et les caractériser.



FIGURE 9.1: Setup de test pour le moteur Penny

9.1 Matériel Utilisé

Description	FABRICANT	Modèle	No. Série	Quantité
Moteur	Faulhaber	Penny	1307004BH	3
Electronique	Faulhaber	DRIVE SYSTEM	BLD05002S	1
moteur				
Capteur laser	MICRO-OPTRONIC	opto NCDT 2200	ILD2200-20	2
			1006112	
Sondes de cou-	Tektronix	AM	503B	3
rant				
Générateur de	Agilent	-	33210A	1
fonctions	Technologies			
Oscilloscope	Agilent	DSO	1004A	1
	Technologies			
Alimentation	Dr. k Witmer	IC-TRIPLE Z	550 297 (CSEM	1
	Elektronik AG		201194)	
Alimentation	A+D PRODUCTS	lc 30-1	-	1

TABLEAU 9.1: Matériel utilisé pour la caractérisation des moteurs smoovy

9.2 Test de caractérisation des moteurs Penny

9.2.1 Test en micro-pas

Le premier test effectué sur les moteurs Penny à été d'effectuer des déplacements en générant des micro-pas via le générateur de fonctions. Les mesures se sont déroulées comme suit :

- 1) prise de la référence (mise à zéro de la valeur donnée par le capteur laser)
- 2) envoi de la séquence de micro-pas
- 3) relevé de mesure
- 4) les points 2) et 3) sont répétés le nombre de fois voulues
- 5) après 20 itérations, le sens de rotation du moteur est inversé
- 6) envoi de la séquence de micro-pas
- 7) relevé de mesure
- 8) les points 6) et 7) sont répétés le nombre de fois voulues

Une fois ces tests effectués, une analyse au moyen de Matlab à été faite. Cette dernière est disponible dans l'annexe C. Le tableau 9.3 contitent quelques valeurs d'intérêt.

Moteur	moteur 1	moteur 2	moteur 3	moteur 4
Déplacement moyen pour 10 pas $[\mu m]$	6.21	8.53	7.77	9.3
Déplacement moyne pour 5 $pas[\mu m]$	4.56	4.48	4.76	6.86
Déplacement moyen pour 2 pas $[\mu m]$	1.24	2.45	1.63	1.39
Ecart-type sur les déplacement de 10 pas $[\mu m]$	2.14	2.45	11.56	3.28
Ecart-type sur les déplacement de 5 pas $[\mu m]$	1.91	1.41	1.54	2.04
Ecart-type sur les déplacement de 2 pas $[\mu m]$	0.48	0.97	0.63	0.53
Nombre de mesures	47	47	47	47

TABLEAU 9.2: Récapitulatif des mesures de	e micro-pas
---	-------------



FIGURE 9.2: Graphique du déplacement en micro-pas

9.2.2 Test de caractérisation du jeu sur le moteur

Le deuxième test effectué consiste à mesurer le jeu à la sortie du réducteur. Les mesures sont effectuées comme suit :

- 1) prise de la référence (mise à zéro de la valeur donnée par le capteur laser)
- 2) envoi de 3000 pas dans le sens horaire
- 3) envoi de 3000 pas dans le sens anti-horaire (changement de sens de rotation induisant du jeu)
- 4) relevé de mesure puis mise à zéro de la valeur donnée par le capteur laser
- 5) les points 2) 3) et 4) sont répétés le nombre de fois voulues

Une fois ces mesures relevés, une analyse de ces dernières à été faite au moyen de Matlab. Cette dernière est disponible dans l'annexe C. Le tableau **??** contient quelques valeurs d'intérêt.

Moteur	moteur 1	moteur 2	moteur 3	moteur 4
Jeu moyen dans le sens horaire $[deg]$	1.093	1.111	1.280	1.187
Jeu moyen dans le sens anti-horaire $[mrad]$	-1.092	-1.128	-1.279	-1.160
Ecart-type du jeu dans le sens horaire $[mrad]$	0.019	0.216	0.248	0.183
Ecart-type du jeu dans le sens anti-horaire $[mrad]$	0.0192	0.208	0.249	0.219
Nombre de mesures	20	32	20	20

TABLEAU 9.3: Récapitulatif des mesures du jeu angulaire

Il est à noter que la dispersion des mesures est grande car il à été observé lors des tests que le jeu diminue au fur et à mesure du déroulement du test. Ceci est expliquable par le fait que tout au long du test la pignonerie composant le réducteur chauffe et donc se dilate, ce qui explique le fait que le jeu diminue tout au long de la prise de mesure. Le graphique de la figure 9.3 illustre ce phénomène.



FIGURE 9.3: Graphique représentant le jeu du moteur Penny

9.3 Procédure de test de caractérisation du prototype

Pour les tests de caractérisation du MGD design, la procédure de mesure se veut semblable aux tests effectués par UK-ATC sur le DMD design (voir section 5.4), ceci afin de pouvoir clairement comparer les résultats des deux prototypes. Les tests à effectuer sont donc :

- Répétitivité lors de déplacements linéaires
- Circularité des roues
- Rotation du robot sur lui-même pour vérifier l'angle de rotation
- Rotation du robot sur lui-même pour vérifier s'il s'écarte de son axe de rotation

Pour effectuer les diverses mesures, le CSEM dispose d'un système de mesure optique de la marque MARCEL AUBERT. Grâce à cet appareil, il sera possible d'effectuer des mesures avec une précision de l'ordre du micron. A l'heure de rédaction de ce rapport, comme cité au début de ce chapitre, ces tests n'ont pas encore eu lieu, mais il est tout à fait envisageable qu'ils puissent être effectués avant la présentation du diplôme et donc être inclus dans la cette dernière.

Chapitre 10

Photographies du MGD design

10.1 Photographies des pièces



(a) Vue isométrique

(b) Vue de dessous

FIGURE 10.1: Chassis du MGD design



(a) Vue isométrique



(b) Vue de dessus avec le PCB de traitement de l'alimentation



(c) Vue de dessous avec le PCB des contacts à lame

FIGURE 10.2: Cadre de fixation de l'alimentation par le sol



(a) Vue d'une flasque moteur



(b) Vue d'une roue et de sa flasque

FIGURE 10.3: Flasque et roue



(a) Vue d'un moteur Penny



(b) Vue des moteurs avec leurs flasques

FIGURE 10.4: Moteur et flasques

10.2 Photographies de l'assemblage



(a) Vue du châssis sans les roues

(b) Vue du châssis avec les roues







FIGURE 10.6: Vues du robot complet



FIGURE 10.7: Vue du robot complet
Chapitre 11

Améliorations possibles, Conclusion

11.1 Améliorations possibles

Le temps alloué à ce travail de Bachelor est de dix semaines. Dans un temps aussi court, il n'a malheureusement pas été possible de mettre en oeuvre certaines modifications telles que la reconception des diverses cartes électroniques fournies par UK-ATC. Si ces modifications pouvaient avoir lieu, il serait possible d'envisager plusieurs voies pour l'amélioration du micro-robot. Les solutions envisagées comprenant un remaniement des diverses cartes électroniques sont présentées dans cette section.

11.1.1 Réduction du volume des cates électroniques

Le volume du prototype actuel est en majeur partie du à l'intégration des cartes électroniques fournies par UK-ATC ainsi qu'à leurs dimensions. La carte principale permettant de commander les moteurs ainsi que la communication sans fil comporte des éléments qui sont redondants. Une première estimation concernant les dimensions d'une carte remaniée à été faite de par les concepteurs de cette carte (DREAMPACT LIMITED). La conclusion est qu'il serait selon eux possible de réduire ces dimensions à un cube de 16 milimètres d'arrête.

La solution du PCB flexible

L'utilisation d'un PCB flexible comme support des composants électroniques pourrait apporter plusieurs avantages. D'une part, l'intégration serait moins volumineuse et pourrait ne plus nécessiter de fixation rigide (vis ou autres). D'autre part, ce PCB flexible pourrait aussi comporter le traitement de l'alimentation par le sol. Les connections entre ce que sont pour l'instant les différents PCBs pourraient donc être faites via ce PCB flexible.

Si ce concept pouvait être réalisé, il serait possible alors de concevoir un micro-robot ayant des dimensions de l'ordre de 20x20x30 milimètres, les 30 milimètres étant dus à l'intégration d'un étage de rotation fine du miroir. Une modélisation préliminaire d'un tel concept est disponible à la figure 11.1



FIGURE 11.1: Modélisation d'un robot envisageable

La solution du PCB comme châssis

Une autre solution enviagée nécessitant toujours un remaniement des cartes électroniques à été envisagée. L'intégration des diverses cartes électroniques ayant été un des points difficiles, une solution serait de ne pas avoir à les intégrer. En effet, il est possible d'utiliser les PCBs comme châssis. Les tolérances d'usinage des PCB standards sont de l'ordre du centième de milimètre, ce qui pourrait tout à fait convenir à l'application. Le volume du micro-robot serait alors quasi uniquement dépendant du volume occupé par les moteurs.

11.1.2 Implémentation d'un capteur incrémental

Des investigations ont été menées concernant l'implémentation d'un capteur incrémental directement sur les roues du micro-robot. En effet, peu importe le choix du moteur, si il comporte un réducteur (ce qui est le cas pour notre application), ce dernier induira du jeu lors des changements de sens de rotation¹. Connaissant ce problème, il est possible de le corriger dans la commande même des moteurs, mais il serait plus judicieux de pouvoir connaître la position des roues en tout temps. Un capteur semblant convenir à l'application à été trouvé auprès de l'entreprise POSIC à Neuchâtel, une spin-off du CSEM. Un contact avec ce fabricant à permis de trouver un capteur convenant à l'application. Il s'agit d'un capteur incrémental se composant d'un encodeur et d'une cible. Comme cité au paragraphe 7.1.3, les roues sont déjà dimensionnées afin de permettre l'implémentation de cette cible sur ces dernières. L'utilisation de ce codeur impliquerait bien entendu un remaniement de la carte électronique de commande des moteurs ainsi que du programme informatique correspondant. Les datasheets de ce capteurs sont disponibles dans l'annexe H.1. Suite aux tests préliminaires effectués sur les moteurs Penny (voir section 9.2), il est à noter qu'il paraît réellement plus que judicieux de se tourner vers cette solution.

^{1.} Sauf si il s'agit de réducteur "Harmonic Drive", mais ces derniers sont de trop grandes dimensions pour être intégrés au moteurs convenant au micro-robot

11.2 Conclusion

Au terme de ce travail de Bachelor, un prototype de micro-robot mobile à été construit. La caractérisation de ce dernier est actuellement en cours. Les résultats des tests préliminaires sur les moteurs Penny sont encourageant et il semble tout à fait envisageable que le robot soit capable d'une résolution de l'ordre de 2-3 micromètres.

Le châssis résultant de la conception à une empreinte au sol de 21x25 millimètres, ce qui est légèrement plus grand que la valeur donnée dans les exigeances du système, mais cette empreinte au sol est due à l'implémentation de l'électronique fournie par UK-ATC. L'assemblage du microrobot à montré que l'objectif sur la simplicité de conception est atteint, en effet, les diverses pièces s'assemblent et se désassemblent facilement et les ajustements permettent une grande précision dans le positionnement des divers éléments.

Pour mener à bien la conception de ce micro-robot, un état de l'art concernant les divers systèmes de locomotion adaptables à la robotique à été rédigé, permettant ainsi au lecteur de se familiariser avec plusieurs robots utilisant divers modes de déplacement.

Afin de mieux comprendre l'objectif de conception des micro-robots, un chapitre traitant de plusieurs systèmes conçus pour sélectionner des faisceaux d'intérêt provenant d'un télescope à été écrit. Ce chapitre permet au lecteur d'avoir une vue d'ensemble sur l'objectif de ces micro-robots et de découvrir les solutions déjà envisagées ou mises en oeuvre pour l'atteindre.

De manière générale, l'objectif de conception et de construction d'un micro-robot est atteint. Le châssis mécanique résultant de ce travail de bachelor est précis, simple et fonctionnel. Malheureusement, l'arrivée tardive des moteurs ainsi que quelques problèmes dus à l'électronique n'ont pas permi à l'heure actuelle de caractériser le prototype de manière complète. Ce travail de caractérisation sera fait ultérieurement et les résultats seront inclus dans la présentation du travail de diplôme.

Remerciements

En premiers lieux, je souhaite remercier mes parents, Pierrette et Jean-Marc ainsi que ma soeur et mon frère sans qui je n'aurais pu mener à bien ces études. Merci à vous tous pour vos encouragements et pour le soutient dont vous avez fait preuve à mon égard. Je tiens aussi à remercier tout spécialement Christel ma compagne, qui m'a soutenu, aidé et supporté tout au long de la réalisation de ce travail de fin d'études. Merci à toi.

Je veux également remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de ce projet :

Au centre suisse d'électronique et de microtechnique :

Le Dr. François Barrot ainsi que Serge Droz pour avoir suivi et contribué par leurs précieux conseils à l'avancement de mon projet, le tout avec en faisant preuve d'assiduïté et de passion.

Le Dr. Jean-Marc Breguet, Section Head de la divison systèmes mécatroniques de m'avoir accordé sa confiance et son soutient tout au long de mon projet.

Monsieur Pascal Pilloud pour la réalisation du PCB flexible d'interfaçage ainsi que pour son entraint et sa bonne humeur.

Madame Marianne Toimil pour les divers travaux de soudure effectués avec la plus grande méticulosité.

Monsieur René Maurer ainsi que tout les membres des ateliers mécaniques du CSEM pour la réalisation de nombreuses pièces.

Monsieur Hervé Saudan pour la re-lecture de mon rapport, son regard pointilleux ainsi que sa passion du travail bien fait.

A la haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud :

Le Dr. Lorenzo Zago, pour son excellente supervison de mon travail, sa disponibilité et ses encouragements.

Monsieur Cyril Ottonin ainsi que tout les membres des ateliers mécaniques de la HEIG-VD pour la parfaite réslisation des pièces mécaniques composant le prototype final.

Et de manière plus générale :

Je tiens à remercier chaleureusement tout les collaborateurs du CSEM pour leur gentillesse lors de mon arrivée et tout au long de mon travail.

Monsieur Nicolas Surdez de chez MINIMOTOR pour sa disponibilité et sa flexibilité.

Le Dr. Leszek Lisowiski pour sa motivation à toute épreuve.

Le Dr. Ivar Kjelberg pour ses conseils avisés.

Copyright

Je soussigné Mathias Gumy, cède et suis d'accord de céder au CSEM, à ses successeurs, ayants droits ou personnes désignées par elle, tous mes droits sur les inventions faites ou conçues par moi, seul ou en collaboration avec d'autres, à l'occasion de mon emploi au CSEM, en faisant ou non usage du temps, du matériel ou des facilités du CSEM.

Je conviens en outre de signer, reconnaître et délivrer sans rétribution mais au frais du CSEM, tous actes et documents se rapportant aux dites inventions, y compris les demandes de brevet nécessaires pour l'obtention en tous pays des brevets pour les dites inventions, en reconnaissant au CSEM, ses successeurs, ayants droits ou personnes désignées par elle, la propriété de ces brevets, étant entendu que le CSEM mentionnera mon nom dans ces demandes de brevet.

Je certifie avoir effectué ce travail de Bachelor de manière autonome, sans l'aide de moyens non autorisés. Les sources utilisées sont répertoriées dans la bibliographie.

Titre : Conception et construction d'un Micro-Robot Mobile pour l'Astrophysique

Auteur : Mathias Gumy

(Date)

Ce document à été rédigé par son auteur en utilisant ${\rm \sc lambda}T_{\rm \sc E}X$ et Adobe PDF.

Liste des figures

$1.1 \\ 1.2$	Photogrphies du positionneur de fibres OzPoz	$\frac{2}{3}$
1.3	Le masque du spectromètre MOSFIRE	4
1.4	Bras robotiques utilisés dans le projet Kmos	4
1.5	Photographies du positionneur Starbugs	5
1.6	Principe de déplacement du positionneur Starbugs	5
2.1	Système de coordonnées du robot	6
3.1	Schémas de diverses plateformes utilisant des roues non-omnidirectionnelles	8
3.2	Quelques exemples de micro-robots à roues	8
3.3	Quelques types de roues holonomes	9
3.4	Schémas de diverses plateformes holonomes utilisant des roues onmidirectionnelles	9
3.5	Schémas des déplacements possibles pour une plateforme équipée de roues Mecanum	10
3.6	Le robot Rovio conçu par la société WOWWEE	10
3.7	Exemples d'applications utilisant des roues Mecanum	11
3.8	Exemples d'applications utilisant des chenilles	11
3.9	Schéma montrant l'effet "stick-slip"	12
3.10	Photographie du robot MICRON	12
3.11	Schéma de la plateforme de locomotion du robot MICRON	13
3.12	Photographie de la plateforme développée par IMINA TECHNOLOGIES	13
3.13	Le robot BallIP	14
3.14	Le robot vibreur de l'université d'Athènes	14
3.15	Le robot marcheur du centre de recherches Allemand	15
3.16	Exemples d'applications utilisant des EPAM	15
4.1	Modélisation du Wheepie design	16
4.2	Photographie du DMD design	19
5.1	Dessin de fabrication du plan de charge	22
5.2	Schéma des contacts sur le plan de charge	23
5.3	Photographie du moteur Smoovy 0308B	24
5.4	Chemin parcouru par les roues lors de rotations de petits angles	26
5.5	Une roue servant de pivot	27
6.1	Photographie de la mesure par capteur laser	29
6.2	Schéma de mesure pour la caractérisation des moteurs	30
6.3	Graphique de dispersion des mesures pour 6000 pas pour le moteur 1	30
6.4	Graphique de la répartition des mesures pour 6000 pas pour le moteur 1	30
6.5	Graphique de dispersion des mesures pour la caractérisation du jeu dans le moteur 1	32
6.6	Graphique de répartition des mesures pour la caractérisation du jeu dans le moteur 1	32
6.7	Schéma du banc de test pour la mesure de la vitesse de rotation des moteurs	33
6.8	Penny-motor 1202BH / Penny-motor 1307D004BH / Servomoteur C.C. 0620B	
	/ Smoovy-motor 0308B	34
6.9	Modélisation des moteurs choisis	35

$\begin{array}{c} 6.10 \\ 6.11 \\ 6.12 \\ 6.13 \\ 6.14 \\ 6.15 \end{array}$	Photographie du PCB d'interfaçage	36 36 38 39 40 41
$7.1 \\ 7.2 \\ 7.3 \\ 7.4 \\ 7.5 \\ 7.6 \\ 7.7 \\ 7.8 \\ 7.9 \\ 7.10$	Vue éclatée du MGD designMGD designModélisation du châssis du MGD designMGD designModélisation d'une flasque moteur du MGD designMGD designModélisation d'une roue du MGD designMGD designModélisation du support pour le PCB de contacts du MGD designMGD designVue du système de stabilisation du micro-robotMGD designVue élcatée de la fixation du moteur et de l'accouplement aux roues du MGD designFixation des roue du MGD designMGD designVue éclatée de la fixation de la carte principale du MGD designMGD designModélisation du robot MGD designMGD design	$\begin{array}{c} 42 \\ 43 \\ 44 \\ 45 \\ 45 \\ 46 \\ 47 \\ 47 \\ 48 \\ 48 \end{array}$
8.1 8.2 8.3	Schéma d'équillibre des lames ressort	51 52 53
$9.1 \\ 9.2 \\ 9.3$	Setup de test pour le moteur Penny	57 59 60
$10.1 \\ 10.2 \\ 10.3 \\ 10.4 \\ 10.5 \\ 10.6 \\ 10.7 \\$	Chassis du MGD design	61 62 62 63 63 64
11.1	Modélisation d'un robot envisageable	66

Liste des tableaux

2.1	Récapitulatif des exigences du système
5.1	Récapitulatif des données du moteur Smoovy 0308B
5.2	Récapitulatif des mesures de déplacements linéaires
5.3	Récapitulatif des mesures de déviation de l'axe de rotation
6.1	Matériel utilisé pour la caractérisation des moteurs Smoovy
6.2	Récapitulatif des mesures de répétabilité
6.3	Récapitulatif des mesures du jeu du réducteur
6.4	Récapitulatif des mesures de synchronisation des moteurs
6.5	Matériel utilisé pour la mesure de flexion des lames ressort
6.6	Récapitulatif des mesures d'écrasement des contacts à lames
8.1	Comparaison des performances théoriques des différents robots 50
9.1	Matériel utilisé pour la caractérisation des moteurs smoovy
9.2	Récapitulatif des mesures de micro-pas
9.3	Récapitulatif des mesures du jeu angulaire

Annexe A

Datasheet moteurs

A.1 Datasheet du moteur Smoovy



Brushless DC-Micromotors

sensorless smoovy[®] Technology

0,023 mNm

For combination with Gearheads: 03A Drive Electronics: BLD 05002 S, SC 1801 F

Series 0308 ... B

		0308 H		003 B	
1	Nominal voltage	UN		3	Volt
2	Terminal resistance, phase-phase	R		33.5	Ω
3	Output power ¹⁾	P2 max.		0,04	W
4	Efficiency	η max.		16.94	%
	,				
5	No-load speed	no		60 500	rpm
6	No-load current (with shaft ø 0,6 mm)	lo		0.029	À
7	Stall torque	Мн		0.024	mNm
8	Friction torque, static	Co		1,77 · 10 ⁻³	mNm
9	Friction torque, dynamic	Cv		1.09 · 10 ⁻⁷	mNm/rpm
10	Speed constant	k n		33 043	rpm/V
11	Back-EMF constant	kε		0,03	mV/rpm
12	Torque constant	kм		0,289	mNm/A
13	Current constant	kı		3,46	A/mNm
14	Slope of n-M curve	Δn/ΔM		3.8·10 ⁶	rpm/mNm
15	Terminal inductance, phase-phase	L		60	μH
16	Mechanical time constant	τm		8	ms
17	Rotor inertia	J		2.10-4	qcm ²
18	Angular acceleration	α max.		1 200	·10 ³ rad/s ²
19	Thermal resistance	Rth 1 / Rth 2	29 / 188		K/W
20	Thermal time constant	au w1 / $ au$ w2	0,4/8		s
21	Operating temperature range		- 30 + 60		°C
22	Shaft bearings		jewel bearings		
23	Shaft load max.:		, ,		
	 radial at 3 000 (1 mm from mounting flange) 		0,2		N
	- axial at 3 000 rpm (push-on only)		0,2		N
	- axial at standstill (push-on only)		2		N
24	Shaft play:				
	– radial	≤	0,03		mm
	– axial	≤	0,15		mm
25	Housing material		Nickel alloy		
26	Weight		0,31		g
27	Direction of rotation		electronically reversible		
Rec	commended values - mathematically indeper	ndent of eac	h other		
28	Speed up to ²⁾	Ne max.		84 000	rpm
29	Torque up to ^{1) 2)}	Me max.		0,023	mNm
30	Current up to (thermal limits) 1) 2)	le max.		0.1	А

¹⁾ at 15 000 rpm

²⁾ thermal resistance Rth 2 not reduced



For notes on technical data and lifetime performance refer to "Technical Information". Edition 2010 – 2011 © DR. FRITZ FAULHABER GMBH & CO. KG Specifications subject to change without notice.



Micro Planetary Gearheads

smoovy[®] Technology

0,88 mNm

For combination with Brushless DC-Micromotors: 0308

Series 03A

	03A
Housing material	plastic
Geartrain material	steel
Recommended max. input speed for:	
- continuous operation	15 000 rpm
Backlash, at no-load	4°
Bearings on output shaft	bronze
Shaft load max.:	
 radial (1,5 mm from mounting face) 	0,1 N
– axial	0,2 N
Shaft press fit force, max.	1 N
Shaft play (on bearing output):	
– radial	≤ 0,03 mm
– axial	≤ 0,15 mm
Operating temperature range	– 20 … + 60°C

Specifications				
		output	output torque	
reduction ratio	weight	continuous	intermittent	direction-
(absolute)	without	operation	operation	of rotation
	motor			(reversible)
		M max.	M max.	
	g	mNm	mNm	
25 : 1	0,20	0,28	0,42	=
125 : 1	0,18	0,88	1,32	=

Note: The Planetary Gearheads are only available in combination with the brushless DC-Micromotors series 0308 ... B.

Scale enlarged M2:1





03A

For notes on technical data and lifetime performance refer to "Technical Information". Edition 2010 – 2011

A.2 Datasheet du moteur Penny



Brushless DC-Gearmotors

penny-motor[®] Technology

5 mNm

For combination with Drive Electronics: BLD 1501 H, BLD 05002 S, SC 1801 each with adapter board

Series 1307 BH					
Integrated Motor	1307 C		004 BH	006 BH	
Nominal voltage	Un		4	6	V
Terminal resistance, phase-phase	R		16	70	Ω
Output power ¹⁾	P2 max.		0,206	0,157	W
Efficiency	η max.		52	43	%
No-load speed	no		37 630	34 770	rpm
No-load current	lo		0,026	0,015	А
Stall torque	Мн		0,249	0,136	mNm
Speed constant	k n		9 502	5 902	rpm/V
Back-EMF constant	ke		0,105	0,169	mV/rpm
Torque constant	км		1,005	1,618	mNm/A
Current constant	kı		0,995	0,618	A/mNm
Slope of n-M curve	Δn/ΔM		151 272	255 336	rpm/mNm
Rotor inertia	J		0,16	0,16	gcm ²
Drive system					
Housing material (Coartrain material		plastic / matal			
Shaft boaring		combination ball bearings + sloave bearings			
Shaft load max :		combination ban bearings + sieeve bearings			
- radial at 10,000 rpm (1.5 mm from boaring)	-	0.5			N
- axial at 10 000 rpm (1,5 mm rom bearing)	5	0,5			N
- avial at standstill	2	5			N
Shaft play:	2	5			
- radial (3 mm from bearing face)	<	0.12			mm
- axial	<	0.7			mm
Operating temperature range	-	0 + 85			°C
operating temperature range		0			
Recommended values - mathematically indepe	ndent of eac	h other			
Speed up to	N e max		10 000	10 000	min ⁻¹

¹⁾ at 10 000 min-¹ ²⁾ thermal resistance Rth2 not reduced ³⁾ at standstill

Integrated Gearhead			004	I BH	006	5 BH		
			output	torque	output	torque		
reduction ratio	output	weight	continuous	intermittent	continuous	intermittent	direction	efficiency
(rounded)	speed	with	operation	operation	operation	operation	of rotation	
	up to	motor			-		(reversible)	
	n _{max}		Mmax.	Mmax.	Mmax.	Mmax.		
	rpm	g	mNm	mNm	mNm	mNm		%
6:1	1 639	2,1	1,0	1,9	0,8	1,5	=	88
11:1	893	2,2	1,6	3,3	1,3	2,6	≠	82
32 : 1	310	2,3	4,4	8,9	3,5	7,1	=	77
93 : 1	107	2,4	5,0	15,0	5,0	15,0	¥	72
270 : 1	37	2,5	5,0	15,0	5,0	15,0	=	68
659 : 1	15	3.5	5.0	15.0	5.0	15.0	±	64



For notes on technical data and lifetime performance

refer to "Technical Information". Edition 2009 Aug. 11



Motoréducteurs C.C. sans balais

Technologie penny-motor®

5 mNm

Combinaisons avec Electroniques de commande: BLD 1501 H, BLD 05002 S, SC 1801 chacun avec carte adaptateur

Série 1309 BH					
Moteur intégré	1309 C		004 BH	006 BH	
Tension nominale	UΝ		4	6	V
Résistance entre phases	R		16	70	Ω
Puissance utile 1)	P2 max.		0,206	0,157	W
Rendement	η max.		52	43	%
Vitesse à vide	no		37 630	34 770	rpm
Courant à vide	lo		0,026	0,015	A
Couple de démarrage	Мн		0,249	0,136	mNm
Constante de vitesse	k n		9 502	5 902	rpm/V
Constante FEM	ke		0,105	0,169	mV/rpm
Constante de couple	kм		1,005	1,618	mNm/A
Constante de courant	kı		0,995	0,618	A/mNm
Pente de la courbe n/M	Δn/ΔM		151 272	255 336	rpm/mNm
Inertie du rotor	J		0,16	0,16	gcm ²
Système d'entraînement					
Matériau du boîtier / matériau de l'engrenage		plastique / métal			
Palier de l'arbre de sortie		roulements à billes + paliers frittés			
Charge de l'arbre max.:					
– radiale à 10 000 rpm (1,5 mm du palier)	≤	0,5			N
– axiale à 10 000 rpm	≤	0,1			N
– axiale à l'arrêt	≤	5			N
Jeu de l'arbre					
– radial (3 mm de la face)	≤	0,12			mm
– axial	≤	0,2			mm
Température d'utilisation		0 + 85			°C

Valeurs recommandées - indépendante	es les unes des autres			
Vitesse jusqu'à	Ne max	10 000	10 000	min ⁻¹
Courant jusqu'à ^{2) 3)}	le max	0,205	0,098	А

¹⁾ à 10 000 rpm ²⁾ limite thermique Rth 2 non réduit ³⁾ à l'arrêt

Moteur intégré			004	4 BH	006	5 BH		
Rapport de réduction (nominal)	Vitesse de sortie jusqu'à n _{max}	Poids sans moteur	Couple d'er Service permanent Mmax.	Service intermittent Mmax.	Couple d'er Service permanent Mmax.	ntraînement Service intermittent M _{max.}	Sens de rotation (réversible)	Rendement
	rpm	g	mNm	mNm	mNm	mNm		%
17 : 1	592	2,6	2,5	5,0	2,0	3,9	¥	82
31:1	323	2,7	4,3	8,5	3,4	6,8	=	77
90 : 1	111	2,8	5,0	15,0	5,0	15,0	¥	72
259 : 1	39	2,9	5,0	15,0	5,0	15,0	=	68
749 : 1	13	2,9	5,0	15,0	5,0	15,0	¥	64
1 830 : 1	5	3,0	5,0	15,0	5,0	15,0	=	60

Echelle aggrandie



Pour les indications concernant durée de vie ainsi que les données techniques complémentaires voir "Informations techniques". Edition 2010 – 2011







Servo Amplifier

Synchronous Drive penny-motor[®] Technology

For combination with Brushless DC-Micromotors:

0206, 0308, 0515, 1202 Brushless DC-Gearmotors: 1307, 1309

At $V_m < 0.8$ V the PWM outputs are deactivated (the motor is

switched off). A current regulation is not provided.

Series BLD 05002 S

	BLD 05002 S	
Power supply	2,7 5,5	V DC
PWM switching frequency	500	kHz
Continuous output current @ TA = 22°C	250	mA
Total standby current	15	mA
Steps per revolution with pole-pair 1 (0206, 0308, 0515)	48	
Steps per revolution with pole-pair 4 (1202, 1307, 1309)	192	
Temperature range:		
– Operating temperature	0 +70	°C
– Storage temperature	-20 +80	°C
Dimension and Weight:		
– Dimension (L x W x H)	10,2 x 10,2 x 2,8	mm
– Weight	0,6	g

Note: The Servo Amplifier is supplied with an operating instruction manual for installation and start-up. A Test board with adjustable oscillator and integrated motor mounts is available separately.

General Information

The Series BLD 05002 S is an electronics with sine form output voltage for synchronous micromotors.

The motor voltage is set with an analogous control voltage at input " V_m ". It is calculated from the supply voltage V_{cc} and the voltage at V_m to:

V_{Motor} = (V_m - V_{cc}/2) · 0,707

A suitable range for V_m is $V_{cc}/2$ to V_{cc} .

The setting of speed is done with an external clock signal at the digital input "Clk". It is calculated from the number of pole pairs p and the clock frequency $f_{\rm clk}$ to:

 $n = f_{clk} / (48 \cdot p)$

The direction of rotation of the motor can be reversed with the digital input "Dir".

Dimensional drawing



For notes on technical data and lifetime performance refer to "Technical Information". Edition 2010 – 2011

Annexe B

Analyse des mesures sur les moteurs Smoovy

B.1 Analyse des tests de répétabillité

Analyse de mesures pour le moteur 1 : test de répétabilité

-0.0071

.0003

			Intes	runnees croissa	ednences cr	7			ā	81 al III				0.000000
						7					Lictori			0.000684
														0.000308
														0.000009
														0.001092
			0.00%	0.431063124		100.00%	40	0	0.04-0.05	0.05	0.04			0.000089
			12.50%	1.701767559		100.00%	40	5	0.03-0.04	0.04	0.03	0.018406376	cart-type estimé =	0.000116
	06.09.2010	DATE	0.00%	5 5.001168668	1.1	87.50%	35	0	0.02-0.03	0.03	0.02	-0.001522207	noyenne estimée =	0.001079
			10.00%	5 10.9409405	1.1	87.50%	35	4	0.01-0.02	0.02	0.01	0.0391	lev. maximum =	0.000000
nm	7	Rayon	27.50%	6 17.81762046	0.7	77.50%	31	11	0-0.01	0.01	0	0.0001	lev. minimum =	0.000258
A	0.12	A	20.00%	0 21.60014389	0.0	50.00%	20	8	-0.01-0	0	-0.01	0.015363289	cart-type corr.	0.001425
<	3.75	۷	17.50%	2 19.49285615	-0.5:	30.00%	12	7	-0.020.01	-0.01	-0.02	0.017822314	cart-type =	0.000017
	_	MRAMP	10.00%	5 13.09502116	-1.1	12.50%	ъ	4	-0.030.02	-0.02	-0.03	-0.0001	nédiane =	0.000574
	2000	MRATE	2.50%	6.548605438	-1.9	2.50%	1	1	-0.040.03	-0.03	-0.04	-0.000250	noyenne =	0.000181
		settings	répartition / plage	Gaussienne estimée	6 Droite de Henry	répartition en %	effectifs cumulés	histogramme	plage	lim.sup.	lim. inf.	40	br. Mes. =	0.000047
I														



0.0022

0.000006 0.000155

0.000011 0.001014

0.0156

0.000111 0.000251 0.000001

0.0103

000

.0328 2600

0.0005



Mesure de répétabillité pour le moteur 1 Valeurs en millimètres

0.0391 -0.0032 0.0048 0.0051 0.0184 -0.0125 -0.0122

-0.0057

0.000030 0.001014 0.000003 0.000588 0.000016 0.000077

0.0316

-0.0245

-0.009

0.0017 0.0016 0.0038 0.0316 0.0036

0.000004

-0.0274 -0.0069

0.000044





Tests et analyse effectués par : Mathias Gumy



valeur absolue



0.0071 0.0137 0.0242 0.0032 0.0037 0.00376 0.00376 0.00376 0.00376 0.0001 0.0126 0.0022 0.0126 0.0026 0.0022 0.0126 0.0022 0.0012 0.0026 0.0012 0.0012 0.0016 0.0012 0.0016 0.0016 0.0016 0.0016 0.0016 0.0016 0.0016 0.0017 0.0016 0.0017 0.0017 0.0017 0.0017 0.00274 0.00274 0.00274 0.00274 0.0051 0.00274 0.00277 0.0023

moyenne =	-0.000250					
sigma =	0.015363289					
	lim inf	lim sup	nbr mes	%	dist normale	
classe 1 sigma	-0.015613	0.015113	33	82.50%	68%	
classe 2 sigma	-0.030977	0.030476577	35	87.50%	95%	
classe 3 sigma	-0.046339866	0.045839866	40	100.00%	99.70%	
					distribution pr	esque gaussienn
		lim sup	nbr mes			
		-0.005	16			
		0.005	28			
Nombre de me	sures dans une classe	de +/- 5 microns	12			

			125+00	r cumulóne ernie					330					0.0345 0.001313	
														0.0021 0.000000	
														0.0201 0.000337	
														0.0128 0.000122	
		-	2.50%	0.557541905		100.00%	40	-	0.05-0.065	0.065	0.05			0.0071 0.000029	
		-	2.50%	2.326077201		97.50%	39	1	0.035-0.05	0.05	0.035	0.024079559	ecart-type estimé =	0.0592 0.003713	
	06.09.2010	DATE	12.50%	6.583299649	1.64	95.00%	38	ъ	0.02-0.035	0.035	0.02	0.00228515	moyenne estimée =	0.0414 0.001574	
			20.00%	12.639678	0.93	82.50%	33	8	0.050.2	0.02	0.005	0.062	dev. maximum =	0.0039 0.000032	
mm	7	R	27.50%	16.46270843	0.32	62.50%	25	11	"-0.10.05	0.005	-0.01	0.0021	dev. minimum =	-0.062 0.003632	
Þ	0.12	Þ	22.50%	14.5458616	-0.39	35.00%	14	9	-0.0250.01	-0.01	-0.025	0.021107453	ecart-type corr.	0.0077 0.000089	
<	3.75	<	7.50%	8.71867531	-1.15	12.50%	5	3	-0.040.025	-0.025	-0.04	0.023457713	ecart-type =	0.0163 0.000212	
	1	MRAMP	2.50%	3.545148622	-1.64	5.00%	2	1	-0.0550.04	-0.04	-0.055	-0.00355	médiane =	0.0263 0.000604	
	2000	MRATE	2.50%	0.977892865	-1.96	2.50%	1	1	-0.070.055	-0.055	-0.07	-0.001733	moyenne =	0.0206 0.000499	
		settings	répartition / plage	Gaussienne estimée	Droite de Henry	répartition en %	effectifs cumulés	histogramme	plage	lim.sup.	lim. inf.	40	nbr. Mes. =	0.0196 0.000455	

.008

0.000038 0.000043 0.000532

0.000122

0.000107



0.0273 -0.0023 -0.0058 -0.0368 0.0285

-0.004's

0.000007

0.019 0.009 0.0381 12

0.000364 0.000122 0.000319

0.000375 0.000232 0.000120 0.001587

Valeurs en millimètres!

-0.0273

0.005 0.006 0.0168







valeur absolue







0.0196 0.0263 0.0263 0.0263 0.0077 0.067 0.0079 0.0071 0.0079 0.0071 0.0079 0.0079 0.0079 0.0079 0.0079 0.0079 0.0079 0.0021 0.0021 0.0023 0.0023 0.0023 0.00121 0.0121 0.0123 0.00123 0.00127 0.0127 0.0127 0.0127 0.0023 0.0025 0.0023 0.0023 0.0023 0.0025 0.0025 0.0025 0.0025 0.0025 0.0025 0.0025 0.0025 0.0055 0.00552 0.00552

			6	e +/- 5 microns	s dans une classe d	mesure	Nombre de
			25	0.005			
			19	-0.005			
			nbr mes	sup	lim		
ssienne	distribution gau						
	99.70%	100.00%	40	.061589858	-0.065054858 C		classe 3 siç
	95%	97.50%	39	.040482405	-0.043947 C		classe 2 sic
	68%	80.00%	32	0.019375	-0.022840		classe 1 siç
	dist normale	%	nbr mes	qus	lim	lim inf	
					0.021107453		sigma =
					-0.001733		moyenne =

Anal
vse
de
mesu
Ires
pour
e
mo
teur
Ν
: test
de
rér
oét:
abil
ité

							- C+								20001	-
													18	0.000072	-0.0077	
			ies	mulees croissant	idneuces cu	Fre				8 9 11				0.000001	-0.0002	-
									20	aromn	Lictori			0.000007	0.0035	
														0.001808	0.0433	_
														0.000395	-0.0191	-
		-	7.50%	2.482546242		100.00%	40	з	0.04-0.05	0.05	0.04			0.001121	-0.0327	-
		-	5.00%	4.829401532		92.50%	37	2	0.03-0.04	0.04	0.03	0.025825779	ecart-type estimé =	0.000053	-0.0065	-
	06.09.2010	DATE	7.50%	8.086765034	1.1	87.50%	35	ω	0.02-0.03	0.03	0.02	0.000617236	moyenne estimée =	0.000307	0.0183	-
			12.50%	4 11.65579429	0.8	80.00%	32	5	0.01-0.02	0.02	0.01	0.0489	dev. maximum =	0.000521	0.0236	
mm	7	R	17.50%	5 14.46087139	0.4	67.50%	27	7	0-0.01	0.01	0	0.0002	dev. minimum =	0.000273	0.0173	_
A	0.12	A	17.50%	15.4430328	0.0	50.00%	20	7	-0.01-0	0	-0.01	0.020789546	ecart-type corr.	0.000911	-0.0294	-
<	3.75	V	7.50%	5 14.19568208	-0.4	32.50%	13	ω	-0.020.01	-0.01	-0.02	0.023660095	ecart-type =	0.001266	-0.0348	
	_	MRAMP	12.50%	7 11.23221674	-0.6	25.00%	10	ъ	-0.030.02	-0.02	-0.03	0.0003	médiane =	0.000002	0.0022	-
	2000	MRATE	12.50%	7.64997871	-1.1	12.50%	σ	ъ	-0.040.03	-0.03	-0.04	0.000780	moyenne =	0.000693	0.0271	_
		settings	répartition / plage	Gaussienne estimée	Droite de Henry	répartition en %	effectifs cumulés	histogramme	plage	lim.sup.	lim. inf.	40	nbr. Mes. =	0.000931	0.0313	-



-0.0015 -0.0144 -0.0201 -0.0092 0.0093

0.037

-0.018

-0.0012

020 N .003

004

.007

0.0089

0.0167

0.0489



valeur absolue

classe 3 sigma	classe 2 sigma	classe 1 sigma	lim ir	sigma =	moyenne =
-0.061588639 (-0.040799 (-0.020010	ıf İir	0.020789546	0.000780
0.063148639	0.042359092	0.021570	m sup		
40	37	33	nbr mes		
100.00%	92.50%	82.50%	%		
99.70%	95%	68%	dist normale		

			ø	5 microns	sures dans une classe de +/-	Nombre de mes
			25	0.005		
			17	-0.005		
			nbr mes	lim sup		
ue gaussienne	distribution presc					
	99.70%	100.00%	40	0.063148639	-0.061588639	classe 3 sigma
	95%	92.50%	37	0.042359092	-0.040799	classe 2 sigma
		Í	Í			

B.2 Analyse des tests de caractérisation du jeu

Ē.
/se
de
mes
üre
g
Ĭ
Ð
BO
teur
_
_
l : test
I : test cara
I : test caracte
I : test caractéris
I : test caractérisati
I : test caractérisation
I : test caractérisation du j

		0.00%	100.00%	40	0	0.34-0.42	0.42	0.34			0.070246	-0.2654
		47.50%	100.00%	40	19	0.26-0.34	0.34	0.26		ecart-type estimé =	0.070682	0.2655
06.09.2010	DATE	2.50%	52.50%	21	1	0.18-0.26	0.26	0.18		moyenne estimée =	0.071471	-0.2677
		0.00%	50.00%	20	0	0.1-0.18	0.18	0.1		maximum =	0.069411	0.2631
7	R	0.00%	50.00%	20	0	0.02-0.1	0.1	0.02		minimum =	0.069559	-0.2641
0.12	Þ	0.00%	50.00%	20	0	-0.06-0.02	0.02	-0.06	0.23337846	ecart-type corr.	0.070204	0.2646
3.75	<	0.00%	50.00%	20	0	-0.140.06	-0.06	-0.14	0.26881056	ecart-type =	0.069717	-0.2644
1	MRAMP	0.00%	50.00%	20	0	-0.220.14	-0.14	-0.22	-0.0027	médiane =	0.070045	0.2643
2000	MRATE	50.00%	50.00%	20	20	-0.30.22	-0.22	-0.3	-0.000360	moyenne =	0.070299	-0.2655
	settings	répartition / plage	répartition en %	effectifs cumulés	histogramme	plage	lim.sup.	lim. inf.	40	nbr. Mes. =	0.065056	0.2547

0.2657 -0.2668 0.2662

2674

2694



-0.2631

0.2718 0.2687

0.2682

2674 2673

0.2631 -0.2654 -0.2649 -0.2658

-0.265; 0.2628

-0.2605

0.2606

Tests et analyse effectués par : Mathias Gumy





0.2718

eurs negative microns négatives microns microns microns microns microns microns microns microns microns microns microns	265.05	Moyenne des valeurs p	-265.77	Moyenne des valeurs r		271.8	Maximum des valeurs	254.7	Minimum des valeurs p	-260.1	Maximum des valeurs	-273	Minimum des valeurs r	3.54541958	Ecart-type dans les val		2.973408464	Ecart-type dans les val
	microns	ositives	microns	négatives		microns	positives	microns	ositives	microns	négatives	microns	négatives	microns	eurs positive		microns	eurs négative

valeurs triées



Analyse de mesures pour le moteur 2 : test caractérisation du jeu

Valeurs en millimètres!		-0.1956 -0.1942	0.1981	-0.1987	-0.1974	-0.1967 0.194	0.1983	-0.1966 0.0	0.1893 0.0	-0.1915 0.0	0.1033 0.0	-0.1974 0.0	-0.1983 0.0	0.1981 0.0	-0.1955 0.0	0.1971 0.0	-0.1983 0.0	0.1983 0.0	-0.1971 0.0	0.1949 0.0	-0 1958 0.0	-0.1959 0.0	0.1984 0.0	-0.1986 0.0	0.1957 0.0	-0.1943 0.0	0.1908 0.0	-0.1921 0.0	0.1969 0.0	-0.1987 0.0	0.1835 0.0	-0.1859 0.0	0.1774 0.0	-0.1563 0.0	0.1407 0.0
								38221)36251	36253	27700)39401)38221	38889	39680	137792	139282	38889	39759)38417	38415	37909	137948 137946	139799	39007	38729	137327	36825	136482	139203	39047	134076	134152)31861	124088	20107
-0.2 -0.25	-0.15	-0.05	mm 0.05	0.1	0.15	0.25					-	-0.20.15-0.15		0		n	br. 10	me	s .	20		25	•				ecart-type estimé =	moyenne estimée =	maximum =	minimum =	ecart-type corr.	ecart-type =	médiane =	moyenne =	nbr. Mes. =
		10 15					_	Répartitio				0.1 -0.10.05 -0.05											Histo				0.018406376	-0.00152221			0.168078738	0.195468369	-0.0078	-0.001098	40
		20 25						n des mes			plage	5-0 0-0.05 0.0											rigramme			0.2	0.15	0.1	0.05	0	-0.05	-0.1	-0.15	-0.2	lim. inf.
		30						ures				5-0.1 0.1-0.1														0.25	0.2	0.15	0.1	0.05	0	-0.05	-0.1	-0.15	lim.sup.
	•	35 40										0.15-0.2 0.2-0														0.2-0.25	0.15-0.2	0.1-0.15	0.05-0.1	0-0.05	-0.05-0	-0.10.05	-0.150.1	-0.20.15	plage
		45										25		Г 												1	18	1	0	0	0	0	0	20	histogramme
-0.20.15 -	0.00%	20.00%	30.00%	40.00%	50.00%	60.00%						-0.15	2	0	10	n	br.	me 30	s	40	:	50				40	96	21	20	20	20	20	20	20	effectifs cumulés
0.150.1 -0.10.05	0.00% 0.00%							Réna				-0.1 -0.05											Fréquence			100.00%	97.50%	52.50%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	répartition en %
-0.05-0 0-0.05	0.00% 0.00%							rtition nar n			plage	0.05	0										s cumulées c			2.5	45.0	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0	répartition / play
0.05-0.1	0.00%						000	age				0.1	2										roissa			50%	%00	50% DATE	%00	00% R	00% A	A %00	00% MRA	00% MRA	ae settir
0.1-0.15		2.50%										0.15	2										intes					111					MP	TE	las
0.15-0.2 0.2-(2.5			45.00%							0.2 0	2															06.09.20			0.	3.		20	
).25		<u>×</u>										.25	1															10		7 mm	12 A	75 V	-1	00	

No. mesure

plage

valeurs triées

Ecart-type dans les valeurs négatives 9.345996891 microns







0.19

0.2

0.21

Analyse de mesures pour le moteur 3 : test caractérisation du jeu

0.2000	2006 0	-0.2011	0.2007	0.0007	-0.1985	0.1955	-0.1943	0.1953	-0.1945	0.1953	-0.1947	0.1898	-0.1887	0.1881	-0.1884	0.1692
0.040008	0 010200	0.040173	0.040349	0.000100	0.039138	0.038482	0.037494	0.038403	0.037571	0.038403	0.037649	0.036278	0.035356	0.035633	0.035243	0.028855
L								ecart-type estimé =	moyenne estimée =	maximum =	minimum =	ecart-type corr.	ecart-type =	médiane =	moyenne =	nbr. Mes. =
	Historigrar											0.173888965	0.202192781	-0.0096	-0.000668	40
C							0.18	0.13	0.08	0.03	-0.02	-0.07	-0.12	-0.17	-0.22	lim. inf.
	nme						0.23	0.18	0.13	0.08	0.03	-0.02	-0.07	-0.12	-0.17	lim.sup.
							0.18-0.23	0.13-0.18	0.08-0.13	0.03-0.08	-0.02-0.03	-0.070.02	-0.120.07	-0.170.12	-0.220.17	plage
							19	1	0	0	0	0	0	0	20	histogramme
							40	21	20	20	20	20	20	20	20	effectifs cumulés
cqueeteeteeteeteeteeteeteeteeteeteeteeteet	Frequence	•					100.00%	52.50%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	répartition en %
cumulées croissante							47.50%	2.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	50.00%	répartition / plage
		•							DATE		R	A	<	MRAMP	MRATE	settings
ſ	<i>n</i>								06.09.2010		7 mm	0.12	3.75	1	2000	





Valeurs en millimètres!

-0.2034 0.2017 0.2019 0.2039 0.2039 0.2043 -0.2043 -0.2043 -0.2016 0.2049 -0.2066

0.2034 -0.2039 -0.2049 -0.2042 0.2042 -0.2032

0.2009 0.2018 0.2005 0.2027 0.2027 0.2035

J.204z







valeurs triées





Moyenne des valeurs po 198.86	-200.195	Moyenne des valeurs ne	206.6	Maximum des valeurs p	169.2	Minimum des valeurs po	-188.4	Maximum des valeurs n	-206.8	Minimum des valeurs no	8.614699799	Ecart-type dans les vale		5.311008924	Ecart-type dans les vale
micrions	micrions	égatives	microns	ositives	microns	ositives	microns	égatives	microns	égatives	microns	urs positives		microns	urs négatives





B.3 Analyse des tests avec Matlab

Trait_mes.m

Contents

- Init
- Chargement des mesures
 Grands en nuege de points des mesures de répétable
- Graphs en nuage de points des mesures de répétabilité
 Graph en nuage de points des mesures de caratérisation du jeu
- Histogrammes
- Calcul des valeurs en pourcents
- Traçage des historigrammes

Init

clear all close all clc

Chargement des mesures

<pre>mot_1_600 = load('mes_6000_mot1.txt');</pre>
<pre>mot_2_600 = load('mes_6000_mot2.txt');</pre>
<pre>mot_3_600 = load('mes_6000_mot3.txt');</pre>
<pre>mot_1_100 = load('mes_1000_av_ar_mot1.txt');</pre>
<pre>mot_2_100 = load('mes_1000_av_ar_mot2.txt');</pre>
<pre>mot_3_100 = load('mes_1000_av_ar_mot3.txt');</pre>
mot_1_6000 = mot_1_600 * 10^3;
mot_2_6000 = mot_2_600 * 10^3;
mot_3_6000 = mot_3_600 * 10^3;
<pre>mot_1_1000 = mot_1_100 * 10^3;</pre>
<pre>mot_2_1000 = mot_2_100 * 10^3;</pre>
mot_3_1000 = mot_3_100 * 10^3;

Graphs en nuage de points des mesures de répétabillité

figure

plot(mot_1_6000,'x'), grid, title('Répartition des mesures pour le moteur 1'), xlabel('No. mesure'), ylabel('Ecart par rapp figure plot(mot_2_6000,'x'), grid, title('Répartition des mesures pour le moteur 2'), xlabel('No. mesure'), ylabel('Valeurs en [\m figure plot(mot_3_6000,'x'), grid, title('Répartition des mesures pour le moteur 3'), xlabel('No. mesure'), ylabel('Valeurs en [\m





Graph en nuage de points des mesures de caratérisation du jeu

figure

plot(mot_1_1000,'x'), grid, title('Répartition des mesures pour le moteur 1'), xlabel('No. mesure'), ylabel('Valeurs du jeu
figure
plot(mot_2_1000,'x'), grid, title('Répartition des mesures pour le moteur 2'), xlabel('No. mesure'), ylabel('Valeurs en [\m
figure plot(mot_3_1000,'x'), grid, title('Répartition des mesures pour le moteur 3'), xlabel('No. mesure'), ylabel('Valeurs en [\m





Histogrammes

[x11,	xout11]	=	hist(mot_1_1000,9)
[x16,	xout16]	=	hist(mot_1_6000,9)
[x21,	xout21]	=	hist(mot_2_1000,9)


[x26, xout26] = hist(mot_2_6000,9); [x31, xout31] = hist(mot_3_1000,9); [x36, xout36] = hist(mot_3_6000,9);

Calcul des valeurs en pourcents

ntot = 40; pctsl1 = (x11/ntot)*100; pctsl6 = (x16/ntot)*100; pcts21 = (x21/ntot)*100; pcts26 = (x26/ntot)*100; pcts31 = (x31/ntot)*100; pcts36 = (x36/ntot)*100;

Traçage des historigrammes

figure

bar(xout11,x11),axis([xout11(1)*1.3 xout11(end)*1.3 min(x11) max(x11)+1]),title('Répartition des mesures en %'), xlabel('Pl
for i = 1: length(x11)
 text(xout11(i)-0.01,x11(i)+0.5, [num2str(pcts11(i)),' [%]']);

<mark>end</mark> figure

end



Published with MATLAB® 7.6

B.4 Analyse des tests de synchronisaiton des moteurs



Tests de synchronisation des moteurs, Test 1



Tests de synchronisation des moteurs, Test 2



Tests de synchronisation des moteurs, Test 3



Tests de synchronisation des moteurs, Test 4



Tests de synchronisation des moteurs, Test 5



Tests de synchronisation des moteurs, Test 6

Annexe C

Analyse des mesures sur les moteurs Penny

C.1 Analyse des tests de micro-pas

mes_micro_pas.m

Contents

• Init

- Chargement des mesures
- Définition des nombres de mesures
- Définition des valeures attendues
- Détermination du pas moyen
- <u>Graphiques</u>
 <u>Graphique de comparaison</u>

Init

clear all close all clc

Chargement des mesures

```
mot_1(:,1) = load('mot_1_10.txt');
mot_1(:,2) = load('mot_1_5.txt');
mot_1(:,3) = load('mot_1_2.txt');
mot_3(:,1) = load('mot_3_10.txt');
mot_3(:,2) = load('mot_3_5.txt');
mot_3(:,3) = load('mot_3_2.txt');
mot_4(:,1) = load('mot_4_10.txt');
mot_4(:,2) = load('mot_4_5.txt');
mot_4(:,3) = load('mot_4_2.txt');
mot_5(:,1) = load('mot_5_10.txt');
mot_5(:,2) = load('mot_5_2.txt');
```

Définition des nombres de mesures

no_mes_mot_1 = 1 : length(mot_1(:,1)); no_mes_mot_3 = 1 : length(mot_3(:,1)); no_mes_mot_4 = 1 : length(mot_4(:,1)); no_mes_mot_5 = 1 : length(mot_5(:,1));

Définition des valeures attendues

pas10 = 14*10^3*pi*10/51840;%% en micronspas5 = 14*10^3*pi*5/51840;%% en micronspas2 = 14*10^3*pi*2/51840;%% en microns

val_att_pas_10_up = 0 : pas10 : 20*pas10; val_att_pas_10_down = 20*pas10 : -pas10 :-5*pas10; val_att_pas_10 = cat(2, val_att_pas_10_up, val_att_pas_10_down);

val_att_pas_5_up = 0 : pas5 : 20*pas5; val_att_pas_5_down = 20*pas5 : -pas5 :-5*pas5; val_att_pas_5 = cat(2, val_att_pas_5_up, val_att_pas_5_down);

val_att_pas_2_up = 0 : pas2 : 20*pas2; val_att_pas_2_down = 20*pas2 : -pas2 :-5*pas2; val_att_pas_2 = cat(2, val_att_pas_2_up, val_att_pas_2_down);

Détermination du pas moyen

```
for i = 2:19
    pas_mot_1(i,1) = mot_1(i,1)-mot_1(i-1,1);
    pas_mot_1(i,2) = mot_1(i,2)-mot_1(i-1,2);
    pas_mot_1(i,3) = mot_1(i,3)-mot_1(i-1,3);
    pas_mot_3(i,1) = mot_3(i,1)-mot_3(i-1,1);
    pas_mot_3(i,2) = mot_3(i,2)-mot_3(i-1,2);
    pas_mot_3(i,3) = mot_3(i,3)-mot_3(i-1,3);
    pas_mot_4(i,1) = mot_4(i,1)-mot_4(i-1,1);
    pas_mot_4(i,2) = mot_4(i,2)-mot_4(i-1,2);
    pas_mot_4(i,3) = mot_5(i,1)-mot_4(i-1,3);
    pas_mot_5(i,1) = mot_5(i,1)-mot_5(i-1,1);
    pas_mot_5(i,3) = mot_5(i,3)-mot_5(i-1,2);
    pas_mot_5(i,3) = mot_5(i,3)-mot_5(i-1,3);
end
pas_moy_mot_1 = mean(pas_mot_1);
pas_moy_mot_4 = mean(pas_mot_4);
```

pas mov mot 5 = mean(pas mot 5);ecart_type_pas_mot_1 = std(pas_mot_1); ecart_type_pas_mot_3 = std(pas_mot_3); ecart_type_pas_mot_4 = std(pas_mot_4); ecart_type_pas_mot_5 = std(pas_mot_5); disp(['Moteur 1: déplacement moyen pour 10 pas = ', num2str(pas_moy_mot_1(:,1)),' microns'])
disp(['Moteur 1: déplacement moyen pour 5 pas = ', num2str(pas_moy_mot_1(:,2)),' microns'])
disp(['Moteur 1: déplacement moyen pour 2 pas = ', num2str(pas_moy_mot_1(:,3)),' microns']) disp(' _____ ____ -- ') disp(['Moteur 3: déplacement moyen pour 10 pas = ', num2str(pas_moy_mot_3(:,1)),' microns'])
disp(['Moteur 3: déplacement moyen pour 5 pas = ', num2str(pas_moy_mot_3(:,2)),' microns'])
disp(['Moteur 3: déplacement moyen pour 2 pas = ', num2str(pas_moy_mot_3(:,3)),' microns']) ----disp(- ') disp(['Moteur 4: déplacement moyen pour 10 pas = ', num2str(pas_moy_mot_4(:,1)),' microns'])
disp(['Moteur 4: déplacement moyen pour 5 pas = ', num2str(pas_moy_mot_4(:,2)),' microns'])
disp(['Moteur 4: déplacement moyen pour 2 pas = ', num2str(pas_moy_mot_4(:,3)),' microns']) disp(1) disp(['Moteur 5: déplacement moyen pour 10 pas = ', num2str(pas_moy_mot_5(:,1)),' microns'])
disp(['Moteur 5: déplacement moyen pour 5 pas = ', num2str(pas_moy_mot_5(:,2)),' microns'])
disp(['Moteur 5: déplacement moyen pour 2 pas = ', num2str(pas_moy_mot_5(:,3)),' microns']) disp(disp('---------') disp(['Moteur 1: écart-type sur les déplacements pour 10 pas = ', num2str(ecart_type_pas_mot_1(:,1)),' microns'])
disp(['Moteur 1: écart-type sur les déplacements pour 5 pas = ', num2str(ecart_type_pas_mot_1(:,2)),' microns'])
disp(['Moteur 1: écart-type sur les déplacements pour 2 pas = ', num2str(ecart_type_pas_mot_1(:,3)),' microns']) -----') disp('----disp(['Moteur 3: écart-type sur les déplacements pour 10 pas = ', num2str(ecart_type_pas_mot_3(:,1)),' microns'])
disp(['Moteur 3: écart-type sur les déplacements pour 5 pas = ', num2str(ecart_type_pas_mot_3(:,2)),' microns'])
disp(['Moteur 3: écart-type sur les déplacements pour 2 pas = ', num2str(ecart_type_pas_mot_3(:,3)),' microns']) disp(disp(['Moteur 4: écart-type sur les déplacements pour 10 pas = ', num2str(ecart_type_pas_mot_4(:,1)),' microns'])
disp(['Moteur 4: écart-type sur les déplacements pour 5 pas = ', num2str(ecart_type_pas_mot_4(:,2)),' microns'])
disp(['Moteur 4: écart-type sur les déplacements pour 2 pas = ', num2str(ecart_type_pas_mot_4(:,3)),' microns']) disp(disp(['Moteur 5: écart-type sur les déplacements pour 10 pas = ', disp(['Moteur 5: écart-type sur les déplacements pour 5 pas = ', disp(['Moteur 5: écart-type sur les déplacements pour 2 pas = ', , num2str(ecart_type_pas_mot_5(:,1)),' microns'])
num2str(ecart_type_pas_mot_5(:,2)),' microns'])
num2str(ecart_type_pas_mot_5(:,3)),' microns']) disp('--Moteur 1: déplacement moyen pour 10 pas = 6.2105 microns Moteur 1: déplacement moyen pour 5 pas = 4.5579 microns Moteur 1: déplacement moyen pour 2 pas = 1.2421 microns _____ Moteur 3: déplacement moyen pour 10 pas = 8.5263 microns Moteur 3: déplacement moyen pour 5 pas = 4.4789 microns Moteur 3: déplacement moyen pour 2 pas = 2.4526 microns Moteur 4: déplacement moyen pour 10 pas = 7.7737 microns Moteur 4: déplacement moyen pour 5 pas = 4.7632 microns Moteur 4: déplacement moyen pour 2 pas = 1.6316 microns Moteur 5: déplacement moyen pour 10 pas = 9.3 microns Moteur 5: déplacement moyen pour 5 pas = 6.8632 microns Moteur 5: déplacement moyen pour 2 pas = 1.3947 microns _____ _____ _____ Moteur 1: écart-type sur les déplacements pour 10 pas = 2.1432 microns Moteur 1: écart-type sur les déplacements pour 5 pas = 1.9086 microns Moteur 1: écart-type sur les déplacements pour 2 pas = 0.47879 microns Moteur 3: écart-type sur les déplacements pour 10 pas = 2.4497 microns Moteur 3: écart-type sur les déplacements pour 5 pas = 1.414 microns Moteur 3: écart-type sur les déplacements pour 2 pas = 0.97489 microns Moteur 4: écart-type sur les déplacements pour 10 pas = 11.5582 microns Moteur 4: écart-type sur les déplacements pour 5 pas = 1.541 microns Moteur 4: écart-type sur les déplacements pour 2 pas = 0.62721 microns Moteur 5: écart-type sur les déplacements pour 10 pas = 3.2784 microns Moteur 5: écart-type sur les déplacements pour 5 pas = 2.0424 microns Moteur 5: écart-type sur les déplacements pour 2 pas = 0.52649 microns

Graphiques

figure
subplot(4,1,1)
plot(no_mes_mot_1, mot_1(:,1),'x', no_mes_mot_1, val_att_pas_10), title('Moteur 1, mesure 10 pas par 10 pas'), xlabel('10*N
subplot(4,1,2)
plot(no_mes_mot_3, mot_3(:,1),'x', no_mes_mot_3, val_att_pas_10), title('Moteur 3, mesure 10 pas par 10 pas'), xlabel('10*N
subplot(4,1,3)
plot(no_mes_mot_4, mot_4(:,1),'x', no_mes_mot_4, val_att_pas_10), title('Moteur 4, mesure 10 pas par 10 pas'), xlabel('10*N
subplot(4,1,4)
plot(no_mes_mot_5, mot_5(:,1),'x', no_mes_mot_5, val_att_pas_10), title('Moteur 5, mesure 10 pas par 10 pas'), xlabel('10*N

figure
subplot(4,1,1)

```
plot(no_mes_mot_1, mot_1(:,2),'x', no_mes_mot_1, val_att_pas_5), title('Moteur 1, mesure 5 pas par 5 pas'), xlabel('5*N = n
subplot(4,1,2)
plot(no_mes_mot_3, mot_3(:,2),'x', no_mes_mot_3, val_att_pas_5), title('Moteur 3, mesure 5 pas par 5 pas'), xlabel('5*N = n
subplot(4,1,3)
plot(no_mes_mot_4, mot_4(:,2),'x', no_mes_mot_4, val_att_pas_5), title('Moteur 4, mesure 5 pas par 5 pas'), xlabel('5*N = n
subplot(4,1,4)
plot(no_mes_mot_5, mot_5(:,2),'x', no_mes_mot_5, val_att_pas_5), title('Moteur 5, mesure 5 pas par 5 pas'), xlabel('5*N = n
figure
subplot(4,1,1)
plot(no_mes_mot_1, mot_1(:,3),'x', no_mes_mot_1, val_att_pas_2), title('Moteur 1, mesure 2 pas par 2 pas'), xlabel('10*N =
subplot(4,1,2)
plot(no_mes_mot_3, mot_3(:,3),'x', no_mes_mot_3, val_att_pas_2), title('Moteur 3, mesure 2 pas par 2 pas'), xlabel('10*N =
subplot(4,1,3)
plot(no_mes_mot_4, mot_4(:,3),'x', no_mes_mot_4, val_att_pas_2), title('Moteur 4, mesure 2 pas par 2 pas'), xlabel('10*N =
subplot(4,1,4)
plot(no_mes_mot_5, mot_5(:,3),'x', no_mes_mot_5, val_att_pas_2), title('Moteur 5, mesure 2 pas par 2 pas'), xlabel('10*N =
```







figure
subplot(3,1,1)
plot(no_mes_mot_1, mot_1(:,1),'-x', no_mes_mot_3, mot_3(:,1),'-x', no_mes_mot_4, mot_4(:,1),'-x', no_mes_mot_5, mot_5(:,1),
title('Comparaison des moteurs sur 10 pas par 10 pas'), xlabel('10*N = nbr pas'), ylabel('Déplacement [\mum]'), grid
,hold on
plot(no_mes_mot_1, val_att_pas_10,'-.m','LineWidth',3),legend('moteur 1','moteur 3','moteur 4','moteur 5','théorie')
,hold off

subplot(3,1,2)
plot(no_mes_mot_1, mot_1(:,2),'-x', no_mes_mot_3, mot_3(:,2),'-x', no_mes_mot_4, mot_4(:,2),'-x', no_mes_mot_5, mot_5(:,2),
title('Comparaison des moteurs sur 5 pas par 5 pas'), xlabel('5*N = nbr pas'), ylabel('Déplacement [\mum]'), grid
,hold on
plot(no_mes_mot_1, val_att_pas_5,'-.m','LineWidth',3),legend('moteur 1','moteur 3','moteur 4','moteur 5','théorie')
,hold off

subplot(3,1,3)
plot(no_mes_mot_1, mot_1(:,3),'-x', no_mes_mot_3, mot_3(:,3),'-x', no_mes_mot_4, mot_4(:,3),'-x', no_mes_mot_5, mot_5(:,3),
title('Comparaison des moteurs sur 2 pas par 2 pas'), xlabel('2*N = nbr pas'), ylabel('Déplacement [\mum]'), grid
,hold on
plot(no_mes_mot_1, val_att_pas_2,'-.m','LineWidth',3),legend('moteur 1','moteur 3','moteur 4','moteur 5','théorie')



,hold off



Published with MATLAB® 7.6









C.2 Analyse des tests de caractérisation du jeu

mes_jeu.m

Contents

- Init
- Chargement des mesures
- Tri des valeurs
- Calcul du jeu moyen dans le sens horaire
- <u>Calcul du jeu moyen dans le sens anti-horaire</u>
- <u>Calcul de l'écart-type sur le jeu horaire</u>
- Calcul de l'écart-type sur le jeu anti-horaire
- <u>Affichage des résultats</u>
- Graphique des mesures

Init

```
clear all
close all
clc
```

Chargement des mesures

jeu_mot_1	=	<pre>load('jeu_mot_1.txt');</pre>
jeu_mot_3	=	<pre>load('jeu_mot_3.txt');</pre>
jeu_mot_4	=	<pre>load('jeu_mot_4.txt');</pre>
jeu_mot_5	=	<pre>load('jeu_mot_5.txt');</pre>

Tri des valeurs

```
ind_jeu_pos_mot_1 = find(jeu_mot_1 > 0);
ind_jeu_pos_mot_3 = find(jeu_mot_3 > 0);
ind_jeu_pos_mot_4 = find(jeu_mot_4 > 0);
ind_jeu_pos_mot_5 = find(jeu_mot_5 > 0);
jeu_pos_mot_1 = jeu_mot_1(ind_jeu_pos_mot_1);
jeu_pos_mot_3 = jeu_mot_3(ind_jeu_pos_mot_3);
jeu_pos_mot_4 = jeu_mot_4(ind_jeu_pos_mot_4);
jeu_pos_mot_5 = jeu_mot_5(ind_jeu_pos_mot_5);
ind_jeu_neg_mot_1 = find(jeu_mot_1 < 0);
ind_jeu_neg_mot_3 = find(jeu_mot_3 < 0);
ind_jeu_neg_mot_5 = find(jeu_mot_4 < 0);
ind_jeu_neg_mot_5 = find(jeu_mot_5 < 0);
jeu_neg_mot_1 = jeu_mot_1(ind_jeu_neg_mot_1);
jeu_neg_mot_3 = jeu_mot_3(ind_jeu_neg_mot_3);
jeu_neg_mot_4 = jeu_mot_4(ind_jeu_neg_mot_4);
```

jeu_neg_mot_5 = jeu_mot_5(ind_jeu_neg_mot_5);

Calcul du jeu moyen dans le sens horaire

jeu_moy_pos_mot_1	=	<pre>mean(jeu_pos_mot_1);</pre>
jeu_moy_pos_mot_3	=	<pre>mean(jeu_pos_mot_3);</pre>
jeu_moy_pos_mot_4	=	<pre>mean(jeu_pos_mot_4);</pre>
ieu moy pos mot 5	=	<pre>mean(jeu pos mot 5);</pre>

Calcul du jeu moyen dans le sens anti-horaire

```
jeu_moy_neg_mot_1 = mean(jeu_neg_mot_1);
jeu_moy_neg_mot_3 = mean(jeu_neg_mot_3);
jeu_moy_neg_mot_4 = mean(jeu_neg_mot_4);
jeu_moy_neg_mot_5 = mean(jeu_neg_mot_5);
```

Calcul de l'écart-type sur le jeu horaire

```
ecart_type_jeu_pos_mot_1 = std(jeu_pos_mot_1);
ecart_type_jeu_pos_mot_3 = std(jeu_pos_mot_3);
ecart_type_jeu_pos_mot_4 = std(jeu_pos_mot_4);
ecart_type_jeu_pos_mot_5 = std(jeu_pos_mot_5);
```

Calcul de l'écart-type sur le jeu anti-horaire

ecart_type_jeu_neg_mot_1 = std(jeu_neg_mot_1); ecart_type_jeu_neg_mot_3 = std(jeu_neg_mot_3);

```
ecart_type_jeu_neg_mot_4 = std(jeu_neg_mot_4);
ecart_type_jeu_neg_mot_5 = std(jeu_neg_mot_5);
```

Affichage des résultats

disp(['Moteur 1: jeu moyen dans le sens horaire = ', num2str(jeu_moy_pos_mot_1),' microns']) disp(['Moteur 1: jeu moyen dans le sens anti-horaire = ', num2str(jeu_moy_neg_mot_1),' microns'])
disp(['Moteur 1: écart-type du jeu dans le sens horaire = ', num2str(ecart_type_jeu_pos_mot_1),' microns']) disp(['Moteur 1: écart-type du jeu dans le sens anti-horaire = ', num2str(ecart_type_jeu_neg_mot_1), ' microns': disp('-------') disp(' - ') disp(disp(['Moteur 3: jeu moyen dans le sens horaire = ', num2str(jeu_moy_pos_mot_3),' microns']) disp([Moteur 3: jeu moyen dans le sens anti-horaire = ', num2str(jeu_moy_neg_mot_3),' microns'])
disp(['Moteur 3: écart-type du jeu dans le sens horaire = ', num2str(ecart_type_jeu_pos_mot_3),' microns']) disp(['Moteur 3: écart-type du jeu dans le sens anti-horaire = ', num2str(ecart_type_jeu_neg_mot_3),' microns'] disp(•) disp(['Moteur 4: jeu moyen dans le sens horaire = ', num2str(jeu_moy_pos_mot_4),' microns']) disp(['Moteur 4: jeu moyen dans le sens anti-horaire = ', num2str(jeu_moy_pet_mot_4),' microns'])
disp(['Moteur 4: écart-type du jeu dans le sens horaire = ', num2str(ecart_type_jeu_pos_mot_4),' microns'])
disp(['Moteur 4: écart-type du jeu dans le sens anti-horaire = ', num2str(ecart_type_jeu_neg_mot_4),' microns']) disp(disp(['Moteur 5: jeu moyen dans le sens horaire = ', num2str(jeu_moy_pos_mot_5),' microns']) disp(['Moteur 5: jeu moyen dans le sens anti-horaire = ', num2str(jeu_moy_neg_mot_5),' microns']) disp(['Moteur 5: écart-type du jeu dans le sens horaire = ', num2str(ecart_type_jeu_pos_mot_5),' microns']) disp(['Moteur 5: écart-type du jeu dans le sens anti-horaire = ', num2str(ecart_type_jeu_neg_mot_5)]) disp(['Moteur 1: jeu moyen dans le sens anti-horaire = ', num2str(jeu_moy_neg_mot_1),' microns'])
disp(['Moteur 1: écart-type du jeu dans le sens horaire = ', num2str(ecart_type_jeu_pos_mot_1),' microns']) disp(['Moteur 1: écart-type du jeu dans le sens anti-horaire = ', num2str(ecart_type_jeu_neg_mot_1), ' microns' disp('------ ')

Moteur 1: jeu moyen dans le sens horaire = 133.57 microns Moteur 1: jeu moyen dans le sens anti-horaire = -133.43 microns Moteur 1: écart-type du jeu dans le sens horaire = 2.0199 microns Moteur 1: écart-type du jeu dans le sens anti-horaire = 2.341 microns Moteur 3: jeu moyen dans le sens horaire = 135.7313 microns Moteur 3: jeu moyen dans le sens anti-horaire = -137.8625 microns Moteur 3: écart-type du jeu dans le sens horaire = 26.3464 microns Moteur 3: écart-type du jeu dans le sens anti-horaire = 25.3642 microns Moteur 4: jeu moyen dans le sens horaire = 156.4222 microns Moteur 4: jeu moyen dans le sens anti-horaire = -156.2182 microns Moteur 4: écart-type du jeu dans le sens horaire = 30.3336 microns Moteur 4: écart-type du jeu dans le sens anti-horaire = 30.4491 microns Moteur 5: jeu moyen dans le sens horaire = 145.08 microns Moteur 5: jeu moyen dans le sens anti-horaire = -141.75 microns Moteur 5: écart-type du jeu dans le sens horaire = 22.3632 microns Moteur 5: écart-type du jeu dans le sens anti-horaire = 26.7511 Moteur 1: jeu moyen dans le sens anti-horaire = -133.43 microns Moteur 1: écart-type du jeu dans le sens horaire = 2.0199 microns Moteur 1: écart-type du jeu dans le sens anti-horaire = 2.341 microns

Graphique des mesures

figure
plot(jeu_mot_1,'x'), title('Mesure du jeu pour le moteur 1'), xlabel('no de mesure'), ylabel('Jeu [\mum]'),gric
figure
plot(jeu_mot_3,'x'), title('Mesure du jeu pour le moteur 3'), xlabel('no de mesure'), ylabel('Jeu [\mum]'),gric
figure
plot(jeu_mot_4,'x'), title('Mesure du jeu pour le moteur 4'), xlabel('no de mesure'), ylabel('Jeu [\mum]'),gric
figure
plot(jeu_mot_5,'x'), title('Mesure du jeu pour le moteur 5'), xlabel('no de mesure'), ylabel('Jeu [\mum]'),gric





Published with MATLAB® 7.6

Annexe D

Comparaison des divers moteurs

Comparatif Moteurs



- Smoovy motor 0307B :
- Penny motor 1307BH :
- servo moteur C.C. 0620B :

Couple à vaincre en fonction du diamètre de la roue

masse estiméee du système :	0.06 kg
coefficient de frottement :	0.6

Dia roue [mm]	Force frott [N]	Couple frott [mNm]
1	0.35316	0.17658
2	0.35316	0.35316
3	0.35316	0.52974
4	0.35316	0.70632
5	0.35316	0.8829
6	0.35316	1.05948
7	0.35316	1.23606
8	0.35316	1.41264
9	0.35316	1.58922
10	0.35316	1.7658
11	0.35316	1.94238
12	0.35316	2.11896
13	0.35316	2.29554
14	0.35316	2.47212
15	0.35316	2.6487
16	0.35316	2.82528
17	0.35316	3.00186
18	0.35316	3.17844
19	0.35316	3.35502
20	0.35316	3.5316

Smoovy motor 0307B :

couple disponible à la sortie du réducteur moteur

Dia roue [mm]	Couple dispo sur roue [mNm]	
1		1.1
2		2.2
3		3.3
4		4.4
5		5.5
6		6.6
7		7.7
8		8.8
9		9.9
10		11
11		12.1
12		13.2
13		14.3
14		15.4
15		16.5
16		17.6
17		18.7
18		19.8
19		20.9
20		22



Smoovy motor 0307B

0.88 mNm

Nombre de tours par minute du moteur pour atteindre 10mm/s

Smoovy motor 0307B :

réducteur planétaire	125 :1	-
réduction supplémentaire	3.5 :1	
vitesse du moteur	15000	tr/min
vitesse à la sortie du réducteur	120	tr/min
vitesse à la sortie de la réduction	34.28571429	tr/min

Dia roue [mm]	nbr tr/min sortie reduc pour 10 mm/s
1	190.9859317
2	95.49296586
3	63.66197724
4	47.74648293
5	38.19718634
6	31.83098862
7	27.28370453
8	23.87324146
9	21.22065908
10	19.09859317
11	17.36235743
12	15.91549431
13	14.69122552
14	13.64185227
15	12.73239545
16	11.93662073
17	11.23446657
18	10.61032954
19	10.05189114
20	9.549296586

Calcul de la résolution possible en fonction du diamètre de la roue:

Smoovy motor 0307B :

nbre pas/tr	48
réducteur planétaire	125 1
nbr pas/tr sortie reducteur planétaire	6000
Réduction supplémentaire	3.5
nbr pas/tr sortie réduc suppl	21000

Dia roue [mm]	Résolution sans Réd supp.[µm]	Résolution avec Réd supp.[µm]
1	0.523598776	0.14959965
2	1.047197551	0.2991993
3	1.570796327	0.448798951
4	2.094395102	0.598398601
5	2.617993878	0.747998251
6	3.141592654	0.897597901
7	3.665191429	1.047197551
8	4.188790205	1.196797201
9	4.71238898	1.346396852
10	5.235987756	1.495996502
11	5.759586532	1.645596152
12	6.283185307	1.795195802
13	6.806784083	1.944795452
14	7.330382858	2.094395102
15	7.853981634	2.243994753
16	8.37758041	2.393594403
17	8.901179185	2.543194053
18	9.424777961	2.692793703
19	9.948376736	2.842393353
20	10.47197551	2.991993003

Compatible avec:

Réducteur	03A
Electronique de commande	BLD 05002 S
Contrôleur de vitesse	SC 1801

Vitesse théorique en fonction du diamètre des roues:

Smoovy motor 0307B :

réducteur planétaire	125 :1
réduction supplémentaire	3.5 :1
vitesse du moteur	15000 tr/min
vitesse à la sortie du réducteur	120 tr/min
vitesse à la sortie de la réduction	34.28571429 tr/min

Dia roues [mm]	Vitesse sans red. Sup. [mm/s]	Vitesse avec red. Supp. [mm/s]
1	6.283185307	1.795195802
2	12.56637061	3.590391604
3	18.84955592	5.385587406
4	25.13274123	7.180783208
5	31.41592654	8.97597901
6	37.69911184	10.77117481
7	43.98229715	12.56637061
8	50.26548246	14.36156642
9	56.54866776	16.15676222
10	62.83185307	17.95195802
11	69.11503838	19.74715382
12	75.39822369	21.54234962
13	81.68140899	23.33754543
14	87.9645943	25.13274123
15	94.24777961	26.92793703
16	100.5309649	28.72313283
17	106.8141502	30.51832863
18	113.0973355	32.31352444
19	119.3805208	34.10872024
20	125.6637061	35.90391604

Penny motor 1307BH :

couple disponible à la sortie du réducteur moteur

Couple dispo sur roue [mNm] Dia roue [mm] 6.25 1 2 12.5 3 18.75 4 25 5 31.25 6 37.5 7 43.75 8 50 9 56.25 10 62.5 11 68.75 12 75 13 81.25 14 87.5 15 93.75 100 16 17 106.25 18 112.5 19 118.75 20 125



Penny motor 1307BH

5 mNm

Nombre de tours par minute du moteur pour atteindre 10mm/s

Penny motor 1307BH :

réducteur intégré	270 :1	
vitesse du moteur	10000	tr/min
vitesse à la sortie du réducteur	37.03703704	tr/min

Dia roue [mm]	nbr tr/min sortie reduc pour 10 mm/s
1	190.9859317
2	95.49296586
3	63.66197724
4	47.74648293
5	38.19718634
6	31.83098862
7	27.28370453
8	23.87324146
9	21.22065908
10	19.09859317
11	17.36235743
12	15.91549431
13	14.69122552
14	13.64185227
15	12.73239545
16	11.93662073
17	11.23446657
18	10.61032954
19	10.05189114
20	9.549296586

Calcul de la résolution possible en fonction du diamètre de la roue:

Penny motor 1307BH :

nbre pas/tr	192 :1
réducteur planétaire	270
nbr pas/tr sortie reducteur planétaire	51840

Dia roue [mm]	Résolution sans Réd supp.[µm]
1	0.06060171
2	0.12120342
3	0.18180513
4	0.242406841
5	0.303008551
6	0.363610261
7	0.424211971
8	0.484813681
9	0.545415391
10	0.606017101
11	0.666618812
12	0.727220522
13	0.787822232
14	0.848423942
15	0.909025652
16	0.969627362
17	1.030229072
18	1.090830782
19	1.151432493
20	1.212034203

Compatible avec:

Electronique de commande	BLD 05002 S
Contrôleur de vitesse	SC 1801

Vitesse théorique en fonction du diamètre des roues:

Penny motor 1307BH :

réducteur intégré	270 :1
vitesse du moteur	10000 tr/min
vitesse à la sortie du réducteur	37.03703704 tr/min

Dia roues [mm]	Vitesse [mm/s]
1	1.939254724
2	3.878509449
3	5.817764173
4	7.757018898
5	9.696273622
6	11.63552835
7	13.57478307
8	15.5140378
9	17.45329252
10	19.39254724
11	21.33180197
12	23.27105669
13	25.21031142
14	27.14956614
15	29.08882087
16	31.02807559
17	32.96733032
18	34.90658504
19	36.84583976
20	38.78509449

servo moteur C.C. 0620B :

couple disponible à la sortie du réducteur moteur

Dia roue [mm]	Couple dispo sur roue [mNm]
1	31.25
2	62.5
3	93.75
4	125
5	156.25
6	187.5
7	218.75
8	250
9	281.25
10	312.5
11	343.75
12	375
13	406.25
14	437.5
15	468.75
16	500
17	531.25
18	562.5
19	593.75
20	625



servo moteur C.C. 0620B

25 mNm

Nombre de tours par minute du moteur pour atteindre 10mm/s

servo moteur C.C. 0620B :

réducteur planétaire	256 :1	
vitesse du moteur	40000	tr/min
vitesse à la sortie du réducteur	156.25	tr/min

Dia roue [mm]	nbr tr/min sortie reduc pour 10 mm
1	190.9859317
2	95.49296586
3	63.66197724
4	47.74648293
5	38.19718634
6	31.83098862
7	27.28370453
8	23.87324146
9	21.22065908
10	19.09859317
11	17.36235743
12	15.91549431
13	14.69122552
14	13.64185227
15	12.73239545
16	11.93662073
17	11.23446657
18	10.61032954
19	10.05189114
20	9.549296586

Calcul de la résolution possible en fonction du diamètre de la roue:

servo moteur C.C. 0620B :

nbre pas/tr codeur magnétique	256
réducteur planétaire	256 :1
nbr pas/tr sortie reducteur planétaire	65536

Dia roue [mm]	Résolution sans Réd supp.[µm]
1	0.0479369
2	0.095873799
3	0.143810699
4	0.191747598
5	0.239684498
6	0.287621398
7	0.335558297
8	0.383495197
9	0.431432097
10	0.479368996
11	0.527305896
12	0.575242795
13	0.623179695
14	0.671116595
15	0.719053494
16	0.766990394
17	0.814927294
18	0.862864193
19	0.910801093
20	0.958737992

Compatible avec:

Réducteur	"08/1
Codeur magnétique	PA2-50
Codeur magnétique	HXM3-64
Contrôleur de vitesse	SC 1801
Electronique de commande	BLD 2401
Contrôleur de mouvement	MCBL 3003/06 S

Vitesse théorique en fonction du diamètre des roues:

servo moteur C.C. 0620B :

réducteur planétaire	256 :1
vitesse du moteur	40000 tr/min
vitesse à la sortie du réducteur	156.25 tr/min

Dia roues [mm]	Vitesse [mm/s]
1	8.181230869
2	16.36246174
3	24.54369261
4	32.72492347
5	40.90615434
6	49.08738521
7	57.26861608
8	65.44984695
9	73.63107782
10	81.81230869
11	89.99353956
12	98.17477042
13	106.3560013
14	114.5372322
15	122.718463
16	130.8996939
17	139.0809248
18	147.2621556
19	155.4433865
20	163.6246174
Résumé des valeurs obtenues

Couple disponible sur les roues

Diamètre en mm, couple en mNm

Dia Roue	Smoovy	Penny	Servo
1	1.1	6.25	31.25
2	2.2	12.5	62.5
3	3.3	18.75	93.75
4	4.4	25	125
5	5.5	31.25	156.25
6	6.6	37.5	187.5
7	7.7	43.75	218.75
8	8.8	50	250
9	9.9	56.25	281.25
10	11	62.5	312.5
11	12.1	68.75	343.75
12	13.2	75	375
13	14.3	81.25	406.25
14	15.4	87.5	437.5
15	16.5	93.75	468.75
16	17.6	100	500
17	18.7	106.25	531.25
18	19.8	112.5	562.5
19	20.9	118.75	593.75
20	22	125	625

Résolution théorique par pas en micromètes

smoovy* : avec réduction supplémentaire de 3.5 : 1

Dia Roue	Smoovy	Smoovy*	Penny	Servo
1	0.523599	0.1496	0.060602	0.047937
2	1.047198	0.299199	0.121203	0.095874
3	1.570796	0.448799	0.181805	0.143811
4	2.094395	0.598399	0.242407	0.191748
5	2.617994	0.747998	0.303009	0.239684
6	3.141593	0.897598	0.36361	0.287621
7	3.665191	1.047198	0.424212	0.335558
8	4.18879	1.196797	0.484814	0.383495
9	4.712389	1.346397	0.545415	0.431432
10	5.235988	1.495997	0.606017	0.479369
11	5.759587	1.645596	0.666619	0.527306
12	6.283185	1.795196	0.727221	0.575243
13	6.806784	1.944795	0.787822	0.62318
14	7.330383	2.094395	0.848424	0.671117
15	7.853982	2.243995	0.909026	0.719053
16	8.37758	2.393594	0.969627	0.76699
17	8.901179	2.543194	1.030229	0.814927
18	9.424778	2.692794	1.090831	0.862864
19	9.948377	2.842393	1.151432	0.910801
20	10.47198	2.991993	1.212034	0.958738

Vitesse en fonction du diamètre des roues:

smoovy* : avec réduction supplémentaire de 3.5 : 1

Dia Roue	Smoovy	Smoovy*	Penny	Servo
1	6.283185	1.795196	1.939255	8.181231
2	12.56637	3.590392	3.878509	16.36246
3	18.84956	5.385587	5.817764	24.54369
4	25.13274	7.180783	7.757019	32.72492
5	31.41593	8.975979	9.696274	40.90615
6	37.69911	10.77117	11.63553	49.08739
7	43.9823	12.56637	13.57478	57.26862
8	50.26548	14.36157	15.51404	65.44985
9	56.54867	16.15676	17.45329	73.63108
10	62.83185	17.95196	19.39255	81.81231
11	69.11504	19.74715	21.3318	89.99354
12	75.39822	21.54235	23.27106	98.17477
13	81.68141	23.33755	25.21031	106.356
14	87.96459	25.13274	27.14957	114.5372
15	94.24778	26.92794	29.08882	122.7185
16	100.531	28.72313	31.02808	130.8997
17	106.8142	30.51833	32.96733	139.0809
18	113.0973	32.31352	34.90659	147.2622
19	119.3805	34.10872	36.84584	155.4434
20	125.6637	35.90392	38.78509	163.6246

Récapitulatif des valeurs pour sélection

Diamètre en mm, Précision en micromètre, Vitesse en mm/s

Smoovy	/ 0308B	sans	réd	sup	b
2	00000	50115		Sabl	μ.

Dia Roue	Précision	Vitesse	Cont. Pos	Footprint	Encombr
1	0.523599	6.283185	non	20X20	faible
2	1.047198	12.56637	non	20x20	faible
3	1.570796	18.84956	non	20X20	faible
4	2.094395	25.13274	non	20X20	faible
5	2.617994	31.41593	non	20X20	faible
6	3.141593	37.69911	non	20X20	faible
7	3.665191	43.9823	non	20X20	faible
8	4.18879	50.26548	non	20X20	faible
9	4.712389	56.54867	non	20X20	faible
10	5.235988	62.83185	non	20X20	faible
11	5.759587	69.11504	non	20X20	faible
12	6.283185	75.39822	non	20X20	faible
13	6.806784	81.68141	non	20X20	faible
14	7.330383	87.96459	non	20X20	faible
15	7.853982	94.24778	non	20X20	faible
16	8.37758	100.531	non	20X20	faible
17	8.901179	106.8142	non	20X20	faible
18	9.424778	113.0973	non	20X20	faible
19	9.948377	119.3805	non	20X20	faible
20	10.47198	125.6637	non	20X20	faible

Smoovy 0308B avec réd supp:

Dia Roue	Précision	Vitesse	Cont. Pos	Footprint	Encombr
1	0.1496	1.795196	non	20X20	faible
2	0.299199	3.590392	non	20x20	faible
3	0.448799	5.385587	non	20X20	faible
4	0.598399	7.180783	non	20X20	faible
5	0.747998	8.975979	non	20X20	faible
6	0.897598	10.77117	non	20X20	faible
7	1.047198	12.56637	non	20X20	faible
8	1.196797	14.36157	non	20X20	faible
9	1.346397	16.15676	non	20X20	faible
10	1.495997	17.95196	non	20X20	faible
11	1.645596	19.74715	non	20X20	faible
12	1.795196	21.54235	non	20X20	faible
13	1.944795	23.33755	non	20X20	faible
14	2.094395	25.13274	non	20X20	faible
15	2.243995	26.92794	non	20X20	faible
16	2.393594	28.72313	non	20X20	faible
17	2.543194	30.51833	non	20X20	faible
18	2.692794	32.31352	non	20X20	faible
19	2.842393	34.10872	non	20X20	faible
20	2.991993	35.90392	non	20X20	faible

abillité
péta
la ré
pour
lants
conclu
non
Tests

Penny 1307BH:

Dia Roue	Précision	vitesse	Cont. Pos	Footprint	Encombr
1	0.060602	1.939255	oui	20X20	moyen
2	0.121203	3.878509	oui	20x20	moyen
3	0.181805	5.817764	oui	20X20	moyen
4	0.242407	7.757019	oui	20X20	moyen
5	0.303009	9.696274	oui	20X20	moyen
6	0.36361	11.63553	oui	20X20	moyen
7	0.424212	13.57478	oui	20X20	moyen
8	0.484814	15.51404	oui	20X20	moyen
9	0.545415	17.45329	oui	20X20	moyen
10	0.606017	19.39255	oui	20X20	moyen
11	0.666619	21.3318	oui	20X20	moyen
12	0.727221	23.27106	oui	20X20	moyen
13	0.787822	25.21031	oui	20X20	moyen
14	0.848424	27.14957	oui	20X20	moyen
15	0.909026	29.08882	oui	20X20	moyen
16	0.969627	31.02808	oui	20X20	moyen
17	1.030229	32.96733	oui	20X20	moyen
18	1.090831	34.90659	oui	20X20	moyen
19	1.151432	36.84584	oui	20X20	moyen
20	1.212034	38.78509	oui	20X20	moyen

Servo 0620B:

Dia Roue	Précision	Vitesse	Cont. Pos	Footprint	Encombr
1	0.047937	8.181231	oui	20X20	Haut
2	0.095874	16.36246	oui	20x20	Haut
3	0.143811	24.54369	oui	20X20	Haut
4	0.191748	32.72492	oui	20X20	Haut
5	0.239684	40.90615	oui	20X20	Haut
6	0.287621	49.08739	oui	20X20	Haut
7	0.335558	57.26862	oui	20X20	Haut
8	0.383495	65.44985	oui	20X20	Haut
9	0.431432	73.63108	oui	20X20	Haut
10	0.479369	81.81231	oui	20X20	Haut
11	0.527306	89.99354	oui	20X20	Haut
12	0.575243	98.17477	oui	20X20	Haut
13	0.62318	106.356	oui	20X20	Haut
14	0.671117	114.5372	oui	20X20	Haut
15	0.719053	122.7185	oui	20X20	Haut
16	0.76699	130.8997	oui	20X20	Haut
17	0.814927	139.0809	oui	20X20	Haut
18	0.862864	147.2622	oui	20X20	Haut
19	0.910801	155.4434	oui	20X20	Haut
20	0.958738	163.6246	oui	20X20	Haut

Vue des différents moteurs:

Smoovy:





Penny:





Servo:





Annexe E

Calculs, mesure de flexion des lames ressort

∕lesui
esu
INS:
Ē
-
_
цЩ,
d
<u> </u>
ľD,
\Box
2
S.
ы Ж
T T
1
1
T
d
Ð
ŝ
_
b
5
Ð
Ś
_
F
res
ress
ressc
ressor

Mesures de d'écrasement de la plateforme de contact

poids propre du montage 7 g

écrasement maximal 0.57 mm

Mesure 1 :

Calculs théoriques

0.687195825	0.5522	65.2
0.501695111	0.495	47.6
0.388919109	0.4096	36.9
0.269819219	0.2829	25.6
0.135963591	0.15	12.9
delta x théorique [mm]	delta x [mm]	charge [g]

Mesure 2 :

0.687195825	19	0.501	65.2
0.501695111	49	0.454	47.6
0.388919109	33	0.373	36.9
0.269819219	55	0.276	25.6
0.135963591	07	0.150	12.9
delta x théorique [mm]		delta x [mm]	charge [g]

Mesure 3 :

0.687195825	45	0.53	65.2
0.501695111	164	0.44	47.6
0.388919109	801	0.38	36.9
0.269819219	39	0.27	25.6
0.135963591	14	0.12	12.9
delta x théorique [mm]		delta x [mm]	charge [g]



charge [g]	mes 1 [mm]	mes 2 [mm]	mes 3 [mm]		moyenne [mm]	ecart-type	valeurs théoriques	Val thmes.
12.9	0.15	0.1507		0.1214	0.1407	0.016717954	0.135963591	0.004736409
25.6	0.2829	0.2765		0.2739	0.277766667	0.004631774	0.269819219	0.007947447
6.95	0.4096	0.3733		0.3801	0.387666667	0.019296718	0.388919109	0.001252443
47.6	0.495	0.4549		0.4464	0.465433333	0.025955796	0.501695111	0.036261778
65.2	0.5522	0.5019		0.5345	0.529533333	0.025515159	0.687195825	0.157662491

mes_lam.m

Contents

- <u>Init</u>
 <u>Données de base</u>
- Calcul de la force appliquée à chaque lame
 Calcul du moment d'inertie d'une lame
- <u>Calcul de la flexion théorique</u>
- Droite de régression
- Calcul de la moyenne des mesures calcul de l'écart-type sur les mesures
- <u>Calcul des fonctions errorbars</u>
- Affichage des valeurs d'intérêt
 Traçage des graphiques d'intérêt

Init

clear all close all clc

Données de base

charge = [12.9 25.6 36.9 47.6 65.2];	
dx1 = [0.15 0.2829 0.4096 0.495 0.5522]	; % [g]
dx2 = [0.1507 0.2765 0.3733 0.4549 0.50]	19]; %[g]
dx3 = [0.1214 0.2739 0.3801 0.4465 0.534	45]; %[g]
Fch = 9.81 .* charge .*10^-3 ./4;	% [N]
E = 127.7e3; L = 7; l = 2.5; e = 0.1; Pr = 60e-3;	% [N/mm] % [mm] % [mm] % [kg]

Calcul de la force appliquée à chaque lame

F = (Pr * 9.81)/4;% [N]

Calcul du moment d'inertie d'une lame

 $Iy = (1 * e^3)/12;$ % [mm^4]

Calcul de la flexion théorique

dx th = (Fch	* L^3)/(3	* E * Iy);	% [mm]
	ш э,, (э		0 [

Droite de régression

Poly_dx1	<pre>= polyfit(charge, dx1, 1);</pre>
dreg_dx1	= polyval(Poly_dx1, charge);
Poly_dx2	<pre>= polyfit(charge, dx2, 1);</pre>
dreg_dx2	= polyval(Poly_dx2, charge);
Poly_dx3	<pre>= polyfit(charge, dx3, 1);</pre>
dreg_dx3	= polyval(Poly_dx3, charge);

Calcul de la moyenne des mesures

for i = 1:5comp(:,i) = [dx1(i) dx2(i) dx3(i)];end for n = 1:5
 moy(n) = mean(comp(:,n)); end

calcul de l'écart-type sur les mesures

for k = 1:3ecart_type(k,:) = std(comp(k,:)); end

Calcul des fonctions errorbars

```
ErrNeg1 = ecart_type(1)*ones(size(dx1));
ErrPos1 = - ecart_type(1)*ones(size(dx1));
```

ErrNeg2 = ecart_type(2)*ones(size(dx2)); ErrPos2 = - ecart_type(2)*ones(size(dx2)); ErrNeg3 = ecart_type(3)*ones(size(dx3)); ErrPos3 = - ecart_type(3)*ones(size(dx3)); Affichage des valeurs d'intérêt disp(['Moyennes des mesures = ', num2str(moy)]) disp(['Ecarts-types sur les mesures = ', num2str(ecart_type')]) Moyennes des mesures = 0.1407 0.27777 0.38767 0.46547 0.52953 Ecarts-types sur les mesures = 0.16284 0.14118 0.15992 Traçage des graphiques d'intérêt figure errorbar(charge, dx1, ErrNeg1, ErrPos1, 'o'), hold on plot(charge, dreg_dx1,'g'), title('Flexion des lames ressorts, mesure 1'), xlabel('Charge [g]'), ylabel('Flexion [mm]'), le , hold off figure errorbar(charge, dx2, ErrNeg2, ErrPos2, 'o'), hold on plot(charge, dreg_dx2,'g'), title('Flexion des lames ressorts, mesure 2'), xlabel('Charge [g]'), ylabel('Flexion [mm]'), le ,hold off figure errorbar(charge, dx3, ErrNeg3, ErrPos3, 'o'), hold on plot(charge, dreg_dx3,'g'), title('Flexion des lames ressorts, mesure 3'), xlabel('Charge [g]'), ylabel('Flexion [mm]'), le , hold off figure errorbar(charge, dxl, ErrNeg1, ErrPos1, 'og'), hold on errorbar(charge, dx2, ErrNeg2, ErrPos2, 'ob') errorbar(charge, dx3, ErrNeg3, ErrPos3, 'or') plot(charge, dreg_dx1,'g', charge, dreg_dx2,'b', charge, dreg_dx3,'r', charge, dx_th,'m'), title('Flexion des lames ressort , legend('mesure 1','mesure 2','mesure 3','droite régression mesure 1','droite régression mesure 2','droite régression mesure





Published with MATLAB® 7.6

Annexe F

PCB flexible d'interfaçage

















PCB dimensions : 35mmX8mmX0.2mm



Annexe G

Mises en plan

G.1 Mises en plan A3







G.2 Mises en plan A4



 Ce document est la propriété du CSEM et ne doit pas être communiqué sans autorisation préalable
 Page
 1/1
 A4

 File: \\srv-e.csem.local\Data-E\Groups\div_e\Projets\211\OPTICON-2_211_EU_0728_PSp\4_EXECUTION_DU_PROJET\WORKING_DIR\Bachelor_Mhg\Proje

 support_pcb_contacts
 Saved by: mhg
 Date: lundi 22 novembre 2010 10:21:41



Ce document est la propriété du CSEM et ne doit pas être communiqué sans autorisation préalable
 Page
 1/1
 A4

 File: \\srv-e.csem.local\Data-E\Groups\div_e\Projets\211\OPTICON-2_211_EU_0728_PSp\4_EXECUTION_DU_PROJET\WORKING_DIR\Bachelor_Mhg\Projet

 support_carte
 Saved by: mhg
 Date: lundi 8 novembre 2010 11:59:34







Ce document est la propriété du CSEM et ne doit pas être communiqué sans autorisation préalable
 Page
 1/1
 A4

 File: \\srv-e.csem.local\Data-E\Groups\div_e\Projets\211\OPTICON-2_211_EU_0728_PSp\4_EXECUTION_DU_PROJET\WORKING_DIR\Bachelor_Mhg\Projetyue_ensembe
 Saved by: mhg
 Date: lundi 8 novembre 2010 11:55:43





File: \\srv-e.csem.local\Data-E\Groups\div_e\Projets\211\OPTICON-2_211_EU_0728_PSp\4_EXECUTION_DU_PROJET\WORKING_DIR\Bachelor_Mhg\Projets flasque_roue Saved by: mhg Date: lundi 1 novembre 2010 08:48:01



File: \\srv-e.csem.local\Data-E\Groups\div_e\Projets\211\OPTICON-2_211_EU_0728_PSp\4_EXECUTION_DU_PROJET\WORKING_DIR\Bachelor_Mhg\Projets pcb_contacts Saved by: mhg Date: mardi 30 novembre 2010 10:54:06

Annexe H

Annexe des améliorations possibles

H.1 Capteur POSIC



ID1101C Dual Channel Rotary Encoder Kit

Product data

Features

- Highly miniaturized encoder
- Differential inductive sensing principle
- · Insensitive to magnetic interference fields
- Robust against oil, water, dust, particles
- Ultra-thin encoder and codewheel (each 0.9 mm)
- Optional with cable, connector and holder

Applications

- Brushed and brushless motors
- Industrial / laboratory / office automation
- Rotary stages
- · Robotics, assembly equipment
- High-speed motion control
- Mechatronics applications

Key Specifications

Output format	A and B in quadrature
Resolution	9 – 14 bit, 128 – 4096 CPR
Maximum speed	up to 40'000 RPM
Airgap	up to 0.7 mm
Supply	5 V, 12 mA
Temperature	0 – 100℃

Description

The ID1101 incremental encoder kit consists of an encoder and a codewheel. The dual-channel encoder provides incremental A and B output signals in quadrature. The resolution is programmed ex-factory from 9 up to 14 bit (128 up to 4096 Cycles Per Revolution). The codewheel is a 28.2 mm diameter disc with readout-radius 12.2 mm and is the same for all resolution-options.

Resolution, maximum speed and airgap

The maximum interpolation factor that can be attained depends on the Signal to Noise Ratio (SNR). The noise depends on the bandwidth and thus on the maximum speed. The signal depends on the distance between sensor and target (the signal increases exponentially when the airgap is reduced). The resolution, maximum speed and the airgap are thus dependent on each other, as shown in the tables 2 and 3.

Mechanical assembly

The encoder has two half-holes that allow a precise alignment of the encoder by means of two pins with diameter 1 mm. The drawing of the encoder in Fig. 3 shows the precise location of the two half-holes. The drawing of the encoder-holder in Fig. 5 shows the location of the holes for the alignment pins.



The encoder is typically glued in an encoder-holder. If the holder is ferromagnetic and/or electrically conducting, the surface behind the sensor-center (see Fig. 3) must be flat and homogeneous and have a diameter of 5 mm. This is not required for an encoder-holder that is not ferromagnetic and not electrically conducting,

Accessories

Encoder-holder

The encoder-holder (optional) consists of 3.2 mm thick FR4material and has 4 screwholes for easy mounting. The holder includes a strain-relief for the cable. Fig. 5 shows the technical drawing of the encoder-holder.



Cable and connector

The encoder is supplied with cable and connector. The cable is a standard flat cable with 5 wires at a pitch of 1.27 mm. Different connectors according to DIN41651 as well as a 6-pin MicroMaTch connector are available as standard options.



Encoder and codewheel customization.

Customization of encoders and/or codewheels for a specific application is offered as an engineering service by POSIC. For more information, contact POSIC directly.

3D models of encoder and codewheel

3D models (STEP- and IGS) can be downloaded from POSIC's website.



Specifications

Recommended Operating Conditions

Parameter	Symbol	Remark	Min	Тур	Max	Unit
Supply voltage	VDD		4.5	5.0	5.5	V
Operating Temperature	T _A		0		100	Ĵ
Operating frequency	F	See Table 3			200	kHz
Airgap	Z			0.2		mm
Radial play + eccentricity	ΔΥ				0.1	mm
Axial play	ΔZ				0.1	mm

Electrical Characteristics

Electrical characteristics over recommended operating conditions, typical values at VDD = 5.0 V, T_A = 25°C.

Parameter	Symbol	Remark	Min	Тур	Мах	Unit
Supply current	IDD	No load	8	12	20	mA
High level output voltage	V _{OH}	$I_L = 2 \text{ mA}$	VDD-0.5			V
Low level output voltage	V _{OL}	$I_L = 2 \text{ mA}$			0.5	V
Rise time	t _r	C _L = 47 pF			20	ns
Fall time	t _f	C _L = 47 pF			20	ns

Encoding Characteristics

Encoding characteristics over recommended operating conditions, typical values at VDD = 5.0 V, $T_A = 25 \text{°C}$, airgap = 0.2 mm, speed = 500 RPM.

Parameter	Symbol	Remark	Min	Тур	Мах	Unit
Pulse width error	ΔΡ	Nominal value 180°e		10	50	°e
State width error	ΔS	Nominal value 90°e		10	60	°e
Phase shift error	ΔΦ	Nominal value 90°e		10	45	°e
Position error	Δθ			0.15	0.7	m



Fig. 1 Coordinate system of encoder.



Fig. 2 Encoder output signals A and B in quadrature.

Technical drawings





20-0.1

Fig. 3 Sensor dimensions and connections





.06





Fig. 5 Encoder Holder type A (see Table 5).

	Connector pin
✓ 225 mm ➤	1
	2
	3
	4
5 06	5
	6

Connector pin	Name	Description
1	VDD	5V Supply
2	VSS	Ground
3	А	Output A
4	В	Output B
5	I	Output Index
6	NC	Not Connected

Fig. 6 Encoder with flat cable (pitch 1.27 mm) and 6-pin MicroMaTch connector.



Ordering information

Ordering	code: ID1101C-ABBCC-DDDDE	EEEFF
A	Orientation	Table 1
BB	Maximum speed	Table 2
CC	Resolution	Table 3
DDDD	Codewheel	Table 4
EEEE	Encoder holder and cable	Table 5
FF	Connector	Table 6

Table 1: Orientation

Α	Orientation	Direction of rotation DIR
0	0°	Rising edge A prior to B

Table 2: Maximum speed

BB	Max speed (RPM)	Resolution
01	20	9 – 14 bit
02	39	9 – 14 bit
03	78	9 – 14 bit
04	156	9 – 14 bit
05	313	9 – 14 bit
06	625	9 – 14 bit
07	1'250	9 – 14 bit
08	2'500	9 – 14 bit
09	5'000	9 – 13 bit
10	10'000	9 – 12 bit
11	20'000	9 – 11 bit
12	40'000	9 – 10 bit

Lower Max speed leads to a lower jitter of the A/B outputs.

Table 3: Resolution

00	Resolution		Max speed	Max counting
	Bits	CPR	(RPM)	Airgap* (mm)
03	9	128	40'000	0.7
04	10	256	40'000	0.6
05	11	512	20'000	0.5
06	12	1024	10'000	0.4
07	13	2048	5'000	0.3
08	14	4096	2'500	0.3

* Encoder is calibrated at airgap = 0.2 mm, which is recommended as nominal value. Sequence of A and B transitions is correct up to Max counting Airgap, but encoding specifications may be out of range.

Table 4:	Codewheel		
DDDD		Cod	ewheel

 $\begin{array}{|c|c|c|c|c|}\hline 0106 & 64 \text{ periods, } 28.2 \text{ mm } \varnothing, \text{ see Fig. 4} \\\hline \text{Other codewheels available upon request.} \\\hline \end{array}$

|--|

Table 5	Encoder holder and cable
Table J.	

EEEE	Encoder holder and cable
00xx	No holder, xx cm flat cable
A0xx	Holder type A (Fig. 5) and xx cm flat cable
Other encoder holders and cables available upon request	

Table 6: Connector

FF	Connector
01	6-pin conn. AMP MicroMaTch 7-215083-6
02	6-pin connector DIN 41651
03	14-pin connector DIN 41651
Other compactors overlights when requirest	

Other connectors available upon request.

Standard combinations available from stock: ID1101C-0BBCC-0106A02201 ID1101C-0BBCC-0106A02202 ID1101C-0BBCC-0106A03003

Definitions

Airgap	Distance between encoder and codewheel in Z-direction. See Fig. 1.
Count	See Cycle.
Cycle	One A quad B period, see Fig. 2.
CPR	Cycles or Counts Per Revolution.
DIR	Direction of rotation of the codewheel when the side with the stripes is observed.
e	Electrical degree (one Cycle is 360 ଂe)
m	Mechanical degree (one codewheel revolution is 360 [°] m).
Phase shift Φ	Number of electrical degrees between the center of the high state of channel A and the center of the high state of channel B. Nominal values is 90°. See Fig. 2.
Position θ	Angular position of the codewheel measured in mechanical degrees.
Pulse width P	Number of electrical degrees that an output is high during one cycle. Nominal value is 180°E. See Fig. 2.
RPM	Revolutions Per Minute (of the codewheel).
State width S	Number of electrical degrees between two neighboring A and B transitions. Nominal value is 90%. See Fig 2.

© Copyright 2010 POSIC. All rights reserved. No part of this document may be reproduced without the prior written consent of POSIC. Products and companies mentioned in this document may be trademarks or registered trademarks of their respective owners.

Information in this document is believed to be accurate and reliable and may be changed without notice. No responsibility is assumed by POSIC for its use, nor for infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. Some commercial or geographical restrictions may apply to the sale of this product. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of POSIC. In no event shall POSIC, its employees, its contractors, or the authors of this document be liable for special, direct, indirect, or consequential damage, losses, costs, charges, claims, demands, claim for lost profits, fees, or expenses of any nature or kind.

POSIC products are not designed, intended, authorized or warranted to be suitable for use in life-support applications, devices or systems or other critical care applications. Inclusion of POSIC products in such applications is understood to be undertaken solely at the customer's own risk. Should a customer purchase or use POSIC products for any such unauthorized application, the customer shall indemnify and hold POSIC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, representatives and distributors harmless against all claims, costs, damages and attorney fees which could arise.

Bibliographie

- Prof. R. Clavel. Composants de la Microtechnique. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, mars 2003.
- [2] Roland Siegwart and Illah R. Nourbakhsh. Introduction to Autonomous Mobile Robots. The MIT Press, 2004.
- [3] Gilles Caprari. Autonomous Micro-Robots : Applications and Limitations. PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2003.
- [4] Masaaki Kumagai and Takaya Ochiai. Development of a robot balanced on a ball first report, implementation of the robot and basic control. Technical report, Tohoku Gakuin University, march.
- [5] Zhenbo Li and Jiapin Chen. Omni-directional mobile microrobots on a millimeter scale for a microassembly system. Technical report, Shanghai Jiao Tong University, 2006.
- [6] Sandia National Laboratories. What may be world's smallest mini-robot being developed at sandia. http://www.sandia.gov/media/NewsRel/NR2001/minirobot.htm, page consultée le 29 septembre 2010.
- [7] Von Hoerner and Sulger. Nanokhod rover. http://www.vh-s.de/en/projectexamples/ spacerovers/nanokhod, page consultée le 29 septembre 2010.
- [8] Imina Technologies. mibot bt-10. http://www.imina.ch/content/mibot, page consultée le 29 octobre 2010.
- Centre allemand de recherches en aérospatiale. Dlr-biped. http://www.dlr.de/rm/en/ desktopdefault.aspx/tabid-6838/11291_read-25964, page consultée le 27 octobre 2010.
- [10] The robotics news portal. Hizook. http://www.hizook.com/, page consultée le 18 octobre 2010.
- [11] Zac Wheeler. pico : Quite possibly the world's smallest robot. http://poor-robot.com/ pico/, page consultée le 25 octobre 2010.
- [12] IPVS University of Stuttgart and Research University of Karlsruhe. Open-source micro-robotic project. http://www.swarmrobot.org/tiki-index.php, page consultée le 25 octobre 2010.
- [13] W. D. Taylor, D. C. Atkinson, W. A. Cochrane, D. M. Montgomery, H. Shnetler, T. E. C. Baillie, and S. Clausen. A prototype micro-autonomous positioning system for mirror deployment with multi-object instruments. SPIE Vol. 7739 77391D-1, Institute for Astronomy, United Kingdom Astronomy Technology Centre, Heriot-Watt University.
- [14] M. Goodwin, J. Heijmans, I. Saunders, J. Brzeski, W. Saunders, R. Muller, R. Haynes, and J. Gilbert. Starbugs : focal plane fiber positioning technology. SPIE Vol. 7739 77391E-1, Anglo-Australian Observatory.
- [15] R. Haynes, A. McGrath, J. Brzeski, D. Correl, G. Frost, P. Gillingham, S. Miziariski, R. Muller, and S. Smedley. It's alive! - performance and control of prototype starbug actuators. SPIE Vol. 6273 62731V-1, Anglo Australian Observatory.
- [16] Samuel C. Barden. Instrumentation at the anglo-australian observatory. Technical report, Anglo Australian Observatory.
- [17] P. Gillingham, A. Moore, M. Akiyama, J Brzeski, D. Correl, J. Dawson, T. Farrel, G. Frost, J. Griesbach, R. Haynes, D. Jones, S. Miziarski, R. Muller, S. Smedley, G. Smith, L. Waller, K. Noakes, and C. Arridge. The fiber multi-object spectrograph (fmos) project : the angloaustralian observatory role. SPIE Vol. 4841-184, Anglo Australian Observatory.
- [18] J. Brzeski, P. Gillingham, D. correl, J. Dawson, A. Moore, R. Muller, S. Smedley, and G. Smith. Echidna - the engineering challenges. SPIE Vol. 5492, Anglo Australian Observatory.
- [19] P. Gillingham, S. Miziarski, and U. Klauser. Mechanical features of the ozpoz fiber positioner for the vlt. Technical report, Anglo Australian Observatory.
- [20] Center for Advenced Instrumentation Durham University. Kmos overview. http://www.dur. ac.uk/cfai/projects/kmos/, page consultée le 13 octobre 2010.
- [21] P. Vartholomeos, K. Mougiakos, and E. Papadopoulos. Driving principles and hardware integration of microrobots employing vibration micromotors. IEEE 978-1-4244-1263-1, National Technical University of Athens.
- [22] Frédéric Giamarchi. Petits robots mobiles. editions Techniques et scientifiques Françaises, mai 2000.
- [23] Yann Leidwanger. *Robots mobiles intelligents*. editions Techniques et scientifiques Françaises, février 2006.
- [24] Jean-Daniel Chappuis. Résistance des matériaux. Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, 2008.
- [25] Jean-Daniel Chappuis. Mécanique de la particule. Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, 2008.
- [26] Jean-Daniel Dessimoz. *Robotique et automatisation industrielle*. Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, septembre 2009.
- [27] Lorenzo Zago. *Bases de Métrologie*. Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, janvier 2009.
- [28] P. Spanoudakis, L. Giriens, S. Henein, A. O'Hare, E. Onillon, P. Schwab, P. Theurilla, Y. Welte, and L. Zago. Design and development of configurable slit mask for keck telescope. Technical report, Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique, 2006.
- [29] P. Spanoudakis, L. Giriens, S. Henein, A. G. Hug, E. Onillon, P. Schwab, and P. Theurilla. Integration and tests of the configurable slit mask for keck telescope. Technical report, Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique, 2008.
- [30] P. Spanoudakis, L. Giriens, L. Lisowski, E. Onillon, P. Schwab, and P. Theurilla. Integration of the configurable slit mask in the mosfire instrument. Technical report, Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique, 2009.
- [31] Ramon Estaña (Co-oridinator). Micron public report. Technical report, Project funded by the European Community under the Information Society Technologies Programme, 2006.
- [32] Walter Driesen. Concept, modeling and experimental characterization of the Modulated Friction Inertial Drive (MFID) locomotion principle, Application to mobile microrobots. PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008.