

Intégration de MEMS avec un SoC dans un microrobot

Olivier-Don Truong, Neila Kaou et Sylvain Martel

Laboratoire de NanoRobotique, Département de génie informatique, École Polytechnique de Montréal (EPM),
Montréal (Québec), Canada
Courriel: sylvain.martel@polymtl.ca

Résumé- Cet article présente une technique d'intégration de moteurs électrostatiques avec un circuit microélectronique de type SoC pour la conception d'un robot miniature de $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$. Plus précisément, une technique d'assemblage de pièces d'un microrobot à l'aide d'un moule et une technique d'interconnexion compacte et intégrable sur une structure en trois dimensions à l'aide de techniques de microfabrication.

I. INTRODUCTION

Le WalkingDie (voir Fig. 1) est un robot avec une dimension totale inférieure à $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ et un poids de l'ordre de 8 mg qui est destiné à opérer au niveau nanométrique à l'aide d'une pointe intégrée de microscope à effet tunnel (Scanning Tunneling Microscope – STM). Le concept d'utiliser des robots miniatures pour des opérations au niveau moléculaire vient du projet NanoWalker [1]. L'idée du projet WalkingDie comparé au projet NanoWalker est d'augmenter la densité de robots capables de travailler à l'échelle nanométrique en réduisant le volume du robot d'un facteur de l'ordre de un millième par rapport au volume du robot NanoWalker. Cependant, ce niveau de miniaturisation se traduit par une diminution significative du nombre d'opérations exécutées par chaque robot mais qui peut dans certains cas être compensé par une plus grande densité de robots par unité de surface. Les limites de miniaturisation du WalkingDie sont déterminées principalement par les moteurs électrostatiques et les roues sur lesquelles ces derniers sont montés pour permettre au robot de se déplacer. Un des plus grands défis de ce projet se situe au niveau de l'intégration de toutes les composantes et ceci tant au niveau de l'assemblage mécanique qu'au niveau des interconnexions électriques. Il est possible aujourd'hui de réaliser des « Micro Electro Mechanical Systems » (MEMS) et l'électronique sur des SoC (System-on-Chip), mais l'intégration et l'assemblage des deux technologies dans une même structure représente un défi technologique d'une grande envergure.

II. CONTRÔLE DU ROBOT

Le robot est contrôlé par un SoC [2] qui génère des séquences aux moteurs électrostatiques permettant de contrôler

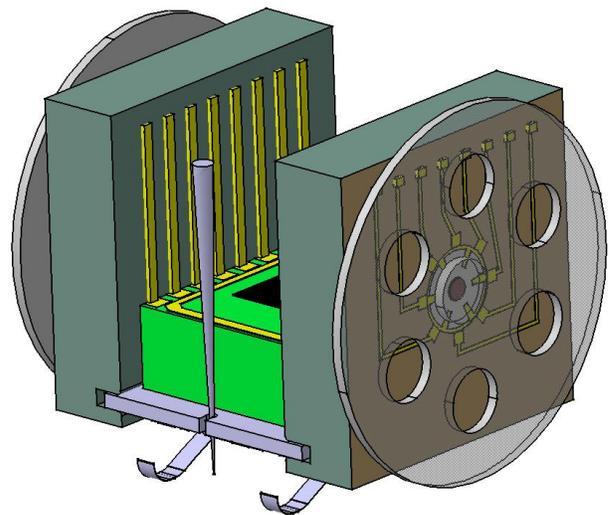


Fig. 1. Structure du micro robot Walking Die représentée sous Catia

la direction et la vitesse du WalkingDie. La fréquence des signaux détermine la vitesse des moteurs tandis que l'amplitude de la tension électrique détermine la force fournie par les moteurs électrostatiques. Cette force est limitée par la saturation de l'effet capacitif dû aux surfaces fixes entre les palmes du rotor et les pads du stator. Le SoC est essentiel car il reçoit les commandes venant de l'extérieur, les traite et coordonne le robot dans ses mouvements. Le SoC possède une mémoire de 60 Ko (Kilo-octets) avec une dissipation de puissance de $16.72\ \mu\text{W}$ répartie sur une surface de $1.44\ \text{mm}^2$. L'augmentation de température du SoC résultante est $\sim 29\ ^\circ\text{C}$ lorsqu'il est placé dans un environnement à température ambiante. L'expansion thermique de la base d'aluminium provoquée par cette variation de température est de l'ordre de 0.07%, ce qui est négligeable dans ce cas. Le SoC est réalisé avec une technologie $0.18\ \mu\text{m}$ (micromètre) et mesure $1.2\ \text{mm} \times 1.2\ \text{mm}$ avec une épaisseur de $500\ \mu\text{m}$.

III. MOTEURS ÉLECTROSTATIQUES

Les moteurs électrostatiques rotatifs qui font avancer le WalkingDie sont réalisés dans du silicium fortement dopé à

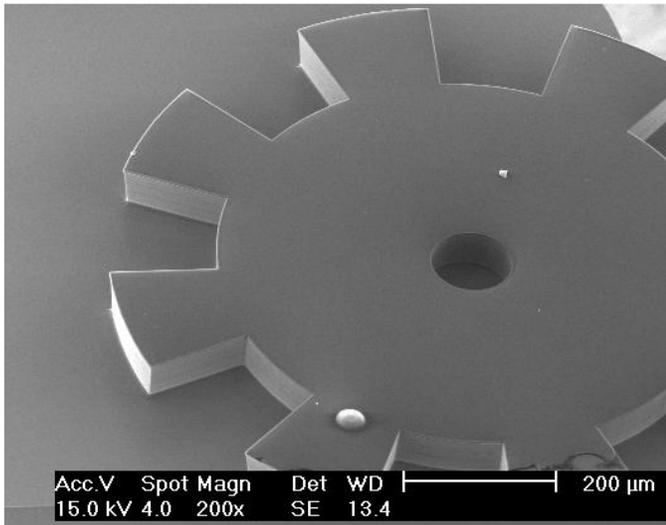


Fig. 2. Rotor du moteur électrostatique en silicium obtenu par DRIE ayant une épaisseur de 80 μm observé au microscope à balayage électronique

l'aide d'une procédure de gravure profonde (DRIE). L'appareil utilisé pour réaliser cette gravure profonde est un « Ion Coupled Plasma » (ICP) (Plasmalab system 100 de la compagnie OXFORD). Cette technologie nous permet de réaliser des gravures profondes afin d'obtenir des structures bien définies ayant des épaisseurs importantes Fig. 2. L'épaisseur du moteur électrostatique est la dimension prépondérante car elle permet d'une part une plus grande robustesse mécanique et d'autre part de produire une plus grande force pour la rotation des moteurs. Ce type de moteur a déjà été utilisé pour produire un commutateur optique pouvant soutenir un poids important [3]. Le procédé de dépôt des couches minces MUMPs, souvent utilisé pour fabriquer des moteurs électrostatiques en MEMS, n'est pas utilisé car il ne permet pas l'obtention d'épaisseur importante qui est essentielle dans ce cas particulier. La Fig. 3 nous permet de

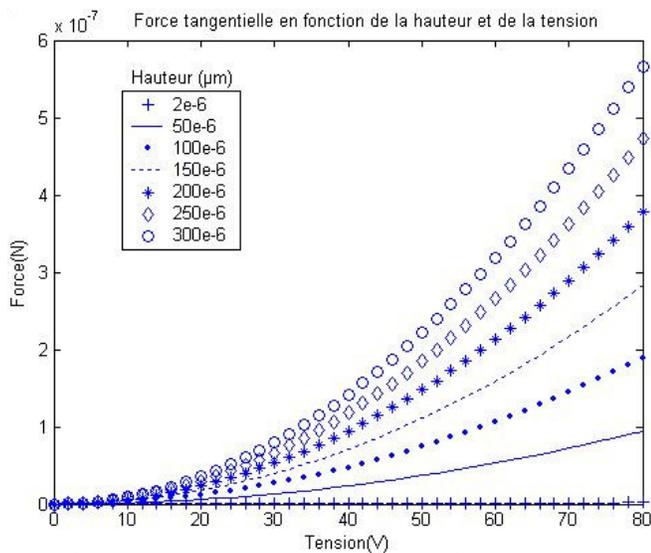


Fig. 3. Évolution théorique de la force tangentielle (Éq. 1) du moteur électrostatique en fonction de la hauteur et de la tension électrique.

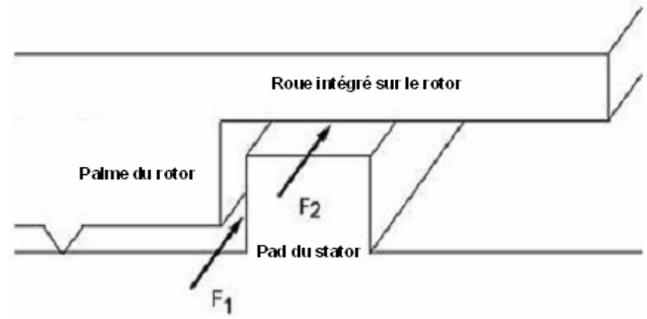


Fig. 4. Dessin entre la force latérale F1 (Palme du rotor/Pad du stator) et de la force superposée F2 (Roue intégré sur le rotor/Pad du stator).

voir l'augmentation significative des forces tangentielles fournies en fonction de l'épaisseur du moteur. En effet, la force augmente linéairement avec l'épaisseur (rapport 1:1). Les moteurs du WalkingDie sont constitués de 2 parties : le stator qui comprend les pads d'alimentation et la base du moteur; et le rotor qui est solidaire à la roue. Le rotor possède une hauteur de 200 μm et un rayon de 500 μm. L'espacement entre les palmes du rotor et les pads du stator est de 15 μm. La force électrostatique tangentielle est déterminée par l'Éq. 1 qui est la force que chaque palme peut développer selon sa surface mise en regard avec celle des pads. Si on considère que le rotor utilise 4 palmes en même temps, la force tangentielle du moteur est estimée à 1.508 μN (F₁ dans la Fig. 4). Cette force F₁ est calculée avec la hauteur du rotor qui est vis-à-vis de la surface latérale du pad et qui peut être considérée comme une force latérale. On peut augmenter cette force à l'aide de la roue faisant partie du rotor car la roue augmentera la force électrostatique tangentielle avec la surface de chaque dessus de pad sur le stator. On considère que c'est une force superposée du moteur avec la roue. C'est ainsi qu'on verra avec l'Éq. 1 et avec l'utilisation de 4 palmes à la fois, la force tangentielle superposée du moteur (F₂ sur la Fig. 4) est estimée à 0.717 μN. Si on additionne la force latérale et la force superposée, on obtient une force totale estimée de 2.225 μN pour le moteur électrostatique avec la roue et donc une force totale pour le robot de 4.45 μN avec les deux roues. De plus, cette structure permet de toujours garder le rotor accroché au stator à l'aide de la force électrostatique normale. Notons cependant que dans ce cas, la force de frottement sera augmentée sensiblement.

$$F_{\text{tangentielle}} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 H V^2}{2d} \quad (1)$$

ϵ_0 = permittivité du vide;

ϵ_r = permittivité de l'air;

H = hauteur de la palme du rotor;

d = distance entre le pad du stator;

V = la différence de potentiel entre le pad et le rotor.

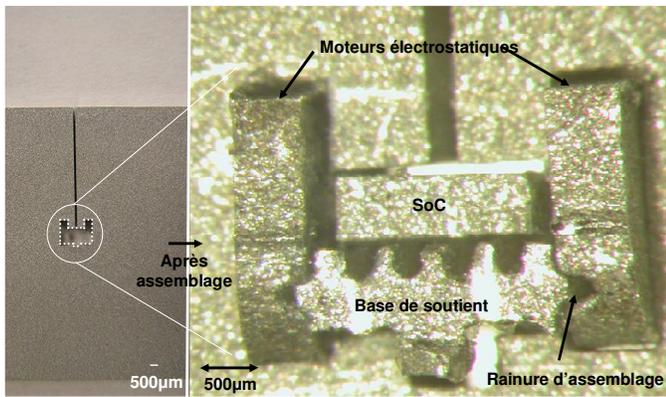


Fig. 5. Validation de la technique d'assemblage du Walking Die: moule vide (à gauche) et après assemblage (à droite).

IV. TECHNIQUES D'ASSEMBLAGE

L'assemblage du robot représente une étape critique et fastidieuse de sa réalisation. La première option envisagée était d'utiliser des microgrippers [4] et des micromanipulateurs. Cette solution n'assurerait pas un bon positionnement des pièces du WalkingDie. Une technique d'auto-assemblage qui consiste à utiliser un moule qui positionnera automatiquement les pièces avec une grande précision a été retenue. Le moule de positionnement et d'assemblage a été fait avec un « Electro Discharge Machine » (EDM) avec un léger jeu pour l'insertion des pièces. L'épaisseur de 1 mm de ce dernier a été choisie afin de faciliter le retrait du robot après assemblage. La première étape est de déposer les 2 moteurs électrostatiques sur les fentes de côté du moules (Fig. 5). Sur l'endos de ces moteurs nous réalisons une rainure dédiée à l'alignement de la base et du moteur (Fig. 5). Cette même rainure servira au collage des différentes composantes. En effet la colle cyanoacrylate se rendra par capillarité au niveau des points de contact. Dans le prototype en métal du robot que nous avons

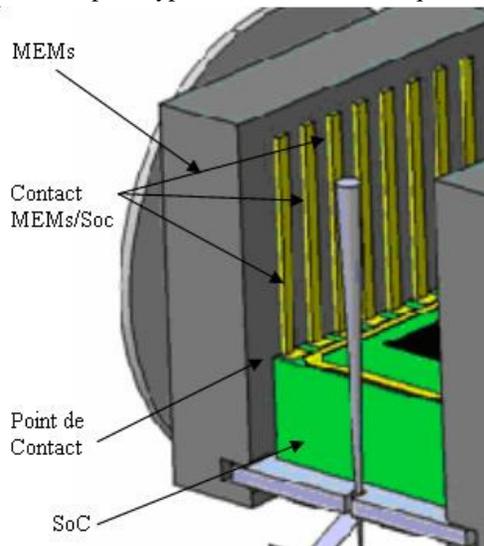


Fig. 6. Agrandissement de la partie du WalkingDie pour les interconnexions électriques.

fait avec l'EDM, un pourcentage d'erreur sur le positionnement n'excédant pas 5% a été relevé au microscope électronique à balayage (Scanning Electron Microscope – SEM). Ces résultats démontrent l'efficacité de la technique d'assemblage mise en pratique par rapport à l'échelle d'application qui est microscopique. La conséquence principale du désalignement est de diminuer le rendement du moteur étant donnée que l'on augmente la friction. Comme expliqué dans la partie précédente sur les moteurs électrostatiques, le rotor et la roue seront construits en une seule pièce permettant ainsi d'obtenir plus de force et de minimiser les erreurs d'assemblage.

V. INTERCONNEXIONS ENTRE LES COMPOSANTES

Les interconnexions électriques entre les composantes du WalkingDie sont également une partie complexe de ce projet. Il s'agit de concevoir des interconnexions dans une structure en 3 dimensions à l'échelle du micromètre. Les interconnexions permettront la communication entre les moteurs électrostatiques et le SoC. Ces interconnexions devront être les plus courts possibles afin de ne pas perdre la puissance du signal envoyé et de minimiser le poids du robot. De plus, elles ne doivent pas obstruer la roue du moteur électrostatique qui est à une distance d'environ 30 µm au dessus des pads de connexion du moteur. Pour réaliser ces interconnexions, nous nous sommes inspirés d'un laboratoire de recherche au Danemark [4] qui ont réalisé des connexions type micro-vias de 100 µm de large traversant les gaufres de silicium de 500 µm d'épaisseur. Les technologies utilisées pour leur réalisation sont la gravure profonde anisotrope (DRIE) pour produire les trous et l'électrodéposition de cuivre pour leur remplissage. Nous allons intégrer ce procédé lors de la fabrication de nos MEMS. Les contacts MEMS/SoC seront effectués sur la face arrière du moteur (voir Fig. 6). Cette connexion se fera avec une technique de déposition de métal ciblé au platine au point de contact (voir Fig. 6). Cette méthode d'interconnexions est compacte avec le moins de perte de puissance possible et n'obstruera aucunement les autres composantes du robot.

VI. CONCLUSION

Le projet WalkingDie porte sur la réalisation d'un microrobot capable d'interagir à l'échelle atomique. Pour se faire, l'utilisation de technologies telles que MEMS pour la partie électromécanique et la commande numérique sur puce de type SoC représentent des technologies clés indispensables à la réussite du projet.

Cependant, Malgré la maturité des deux technologies, leur intégration représente encore un défi tant au niveau électrique que mécanique. Par le développement de technologies d'intégration et d'assemblage, le projet Walking Die a pour mission de relever ce défi pour réaliser un robot des plus petits dans le monde.

REMERCIEMENTS

Ce projet est supporté en partie par une Chaire de Recherche du Canada (CRC) en conception, fabrication et validation de micro/nanosystèmes, une subvention CRSNG et le Gouvernement du Québec. Les auteurs remercient également Alexandre Raymond-Caron pour son travail de modélisation de la structure du WalkingDie et la Canadian Microelectronics Corporation (CMC) pour la fabrication du SoC.

REFERENCES

- [1] Martel S. and Hunter I., "Nanofactories based on a fleet of scientific instruments configured as miniature autonomous robots," *Journal of Micromechatronics*, Vol. 2, No. 3-4, pp. 201-214, 2004
- [2] André, W., Delafosse, J. A., and Martel, S., "Walking-die : using MEMS and SoC for a miniature robot designed for nanoscale operations," *CCECE 2003 - Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toward a Caring and Humane Technology, 4-7 May 2003*, pp. 1827-30, 2003.
- [3] Yasseen, A. A., Mitchell, J., Streit, T., Smith, D. A., and Mehregany, M., "A rotary electrostatic micromotor 1*8 optical switch," *Proceedings IEEE Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems, 25-29 Jan. 1998*, pp. 116-20, 1998.
- [4] Ansel, Y., Schmitz, F., Kunz, S., Gruber, H. P., and Popovic, G., Development of tools for handling and assembling microcomponents *Journal of Micromechanics and Microengineering: 12th Micromechanics Europe Workshop (MME'01), 16-18 Sept. 2001*, vol. 12, no. 4, pp. 430-7, Jul, 2002-. 0960-1317. Inst. of Microtechnology Mainz, Germany.
- [5] Rasmussen, F. E., Frech, J., Heschel, M., and Hansen, O., "Fabrication of high aspect ratio through-wafer vias in CMOS wafers for 3-D packaging applications," *IEEE International Solid-State Sensors and Actuators Conference, 8-12 June 2003*, pp. 1659-62, 2003.