ニューラルネットワーク IC 搭載 MEMS マイクロロボットにおける *Heterogeneous Integration*

内木場 文男*, 金子 美泉*, 齊藤 健*

Heterogeneous Integration on Neural Networks IC Mounted MEMS Microrobot

Fumio UCHIKOBA*, Minami KANEKO*, and Ken SAITO*

* 日本大学理工学部 (〒 274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)

* College of Science and Technology, Nihon University (7-24-1 Narashinodai, Funabashi-shi, Chiba 274-8501)

1. はじめに

電子デバイスの高密度・高集積化への実装技術の果たす役割の重要性は誰もが認めるところであり、例えば半導体メモリの分野ではパッケージング機能とともに大きな一翼を担ってきた。もちろんシリコンウェハ上での素子の高密度・高集積化はメモリ容量の高密度・高集積化に直接つながるが、実装技術においてもシリコン基板の 3D、多層積層など寄与するところが大きい。シリコン上での高密度・高集積化では、フォトリソグラフィ技術の進展による細線化と大規模化という比較的明確な方向がある一方で、実装技術においては、シリコン基板の多層化、これらの接続、インターポーザ、樹脂基板、封止など、さまざまな課題があり、そのため多様な材料、技術が密接に関係してくる。これまでにさまざまな材料を取り入れ、また多くの周辺技術を巻き込み進展をしてきた。

このような状況のもと実装技術は Heterogeneous Integration という切り口での見方がされるようになり、IEEE CPMT Society, SEMI, IEEE EDS, IEEE Photonics Society, ASME EPPD Division がスポンサーとなり 2031 年までの Heterogeneous Integration Roadmap の策定がおこなわれている¹⁾。立ち上げ時のワーキンググループは、具体的なデバイス、横断的なトピック、製造プロセス、特定の応用分野、シミュレーション・設計手法などの多角的な切り口で構成されている。一見するとシリコン半導体のパッケージングに根差した従来の範疇の実装技術と軌を一つにするようにも見える。しかしながら、MEMS, Wearable, Medical and Health など例えば可動部分があったり、高度な柔軟性を付与する必要があったりなど、従来の方向とは違うものも含まれている。

著者らが取り組んでいるマイクロロボットは、従来の実装技術の延長から外れたところにあるかもしれない。全長 5 mm 程度のきわめて小さな歩行ロボットであり、筐体をシリコン部材で構成し、6 足あるいは 4 足で歩行動作をしながら移動をする^{2)~7)}。また、ニューラルネットワーク IC

を独自に開発し、ロボットの歩行制御を行っている。6 足歩行ロボットでは、IC をベアチップ搭載し、周辺回路とともにロボットの上部筐体に搭載し、電源は外部から銅線を介して供給するが、歩行を実現している。一方、4 足歩行ロボットではニューラルネットワーク IC の制御に従い、4 足歩行動物に特有な歩容変化を実現している⁸⁾。われわれのマイクロロボットは見方を変えれば、半導体 IC を搭載したパッケージに歩行機構が付加されて、移動が可能になると考えることもできる。その場合、IC 実装を主にとりあつかう Heterogeneous Integration とのあいだに技術的な共通点が少なからずあるようにも思える。素子間の接続、高集積化、電流・熱管理などは実装の技術を踏襲するが、その一方で、ロボット本来の機能である運動性能の確保という点では新たな課題を持つ。本稿では歩行システムとして先行している 6 足歩行ロボットについて Heterogeneous Integration の観点を加え解説をしていく。また、マイクロロボットとしてあるべき姿もさがしてみる。

2. マイクロロボットの構造と動作

マイクロロボットは、5 mm 程度の全長で歩行を実現する。回転アクチュエータを内蔵した筐体とリンク、脚からなる機械機構の上に生体の神経機構を模倣したニューラルネットワーク IC を中心とした制御部を配置している。機械機構を構成する部材は MEMS プロセスを利用し、シリコンウェハをドライエッチングでパターニングすることによって製作する。ニューラルネットワーク IC はわれわれが独自に設計開発したパルス型ハードウェアニューラルネットワーク IC を用いている。本来搭載することが望ましい電源は現在のところ外部から電線を用いて供給している。マイクロロボットの構成を図 1 に示す。筐体の内部には左右一対の回転アクチュエータが組み込まれ左右それぞれ 3 足分の動力を発生する。回転アクチュエータのロータは MEMS 工程によってシリコン基板から製作する。ロータから 4 方向に人工筋肉ワイヤが取り付けられている。人工筋肉ワイヤは形状記憶合金の一種であり、昇温によって収縮、常温に

戻すことで元の長さに復元をする2方向性の運動を示す。通常の形状記憶合金では高温時に記憶した形状が復元する1方向性の運動だけを示すが、人工筋肉ワイヤでは線材に成形をするときに結晶配向をさせることによって2方向性を実現している。本研究では多くの変位を得るためにヘリカル形状の試料を採用している。人工筋肉ワイヤの他端は筐体の頂角付近に溝を設けそこに固定する。このワイヤに順番に電流を流して通電加熱をすることによって回転運動を得る。ロータの熱容量がそのままアクチュエータの回転速度に影響を与えるのでロータは極力小型軽量なものが適している。図2に回転アクチュエータの構造を示す。

回転アクチュエータのロータの中心に超硬の軸を垂直に接続し、回転運動をリンク機構に伝達する。リンク機構は回転運動を6足歩行の歩容に変換をする。またリンク機構の先端に脚を接続する。図3にアクチュエータの人工筋肉ワイヤの収縮と歩行との関係を示す。左右のアクチュエータの通電では対角線の人工筋肉ワイヤに通電することによって、常に3点が地面に設置する昆虫と類似した6足歩行を再現することができる。また、通電するワイヤの順序を反転させることによって前進後退の切り替えができる。

実際の生物においては神経回路網（ニューラルネットワーク）が生体の制御を司る。基本構成はニューロンと呼ばれる神経組織であり、ニューロンの中には核を持つ細胞体があり、細胞体から軸索が伸び電気信号パルスが発生する。電気信号パルスは後段のニューロンの樹状突起にシナプスを経て伝搬をする。神経細胞中の膜電位とパルスの発火については1950年代にHodgkinとHuxleyによって詳細

図1. MEMS マイクロロボットの構成

図2. 回転アクチュエータの構造

に検討がなされ、4つの変数を持つ連立微分方程式の形にモデル化された⁹⁾。この業績にはノーベル生理学賞が与えられている。図4にニューロンと神経細胞の膜電位の変化の様子を示す。

シナプスには前段の細胞体のパルスを時間的、空間的に加算する特性があり、また、入力に応じて後段ニューロンのパルス発進を促進する興奮性、あるいは抑制する抑制性シナプスがそれぞれある。パルスの寄与度はシナプス荷重で表現される。動物の歩行などのリズムはCentral Pattern Generator (CPG) と呼ばれる器官で生成されることが知られ

図3. 人工筋肉ワイヤの収縮と歩行との関係

図4. ニューロンと神経細胞の膜電位の変化

(a) 抑制性シナプス

カレントミラー回路

ロボット本体の形状は全長，横，長さ，それぞれ，2.7，4.0，2.5 mm であり，重量は 20 mg であった。IC のチップ

キャパシタ →

ニューラルネットワーク IC を搭載した MEMS マイクロロボットの歩行

人工筋肉ワイヤはNi-Ti合金系の形状記憶合金の一種であり、銅線およびシリコンとの接合は難しい。また、この部分には機械的可動部分であり、そのため固定部には応力が印加される。形状記憶合金の接合固定にはさまざまな方法が提案されているが、微細な形状の場合、カシメ金具を用いた機械的な固定が一般的に用いられる。シリコン管体との接合においては電気的な導通をとる必要がなく、機械的な強度だけを必要とするので、人工筋肉ワイヤを挟み込む形の溝をシリコン管体に形成して機械的に保持ができる

図 9. ロータのサイズと温度分布

ようにした。一方、電気的な導通が必要な部分では、当初導電性接着剤、また、カシメ金具を使っていたが、現在はスポット溶接で実施している。接続部分にも熱がかかり導電性接着剤では導電性に劣化が見られた。また、接着剤自体にも熱容量があるために回転アクチュエータの回転速度の減少の一因ともなっていた。カシメ金属の使用では導電性の劣化が見られなかったが、熱容量の観点から除去を試みた。その結果、スポット溶接を採用することとした。スポット溶接部分は若干の硬化を伴うものの安定した電気伝導を得た。

このマイクロロボットにおいては熱に関して2つの検討項目がある。一つ目が回転アクチュエータの放熱であり、前述したように人工筋肉ワイヤが熱駆動型であるために、昇温降温のサイクルが回転アクチュエータの繰り返し速度の限界となる。具体的には人工筋肉ワイヤの冷却速度が問題となるが、実際には接続するロータの熱容量が影響を与えた。図9にロータを変えた場合の温度分布を示す。大型のロータでは他のワイヤ冷却が進まず室温に戻ってないこと、また筐体などが昇温していることが観察される。小型ロータでは他のワイヤの冷却が進んでいることが観察される。本研究ではロータの繰り返し速度を1.2秒とした。このとき C_M 、 C_G はそれぞれ $4.7 \mu\text{F}$ 、 $1 \mu\text{F}$ であった。

一方で、搭載したICの熱管理も課題となる。ICは一出力あたり90 mA デューティ比1/4のパルスを通電している。そのためCPG回路の周辺部にカレントミラー回路を配置している。図10にサーモグラフィーを用いて測定した通電後のICチップ表面CPG部の温度変化を示す。(a)はICに負荷をつないで実際に動作をさせた時の様子を示す。100°C程度にまで温度が上昇していることが示される。一方で、カレントミラー回路に印加される電源を切った状態での温度を(b)に示す。カレントミラー回路を動作させない場合はほぼ室温を維持している。これらの結果からICの

(a)カレントミラー動作

(b)カレントミラー動作なし

図 10. ICチップ表面の温度上昇

発熱はCPGではなく主に大電流を扱うカレントミラー回路であることがわかる¹¹⁾。

4. マイクロロボットの今後の方向

マイクロロボットの運動性能向上の障害になっているのは、制御部分の重量と大きさになっている。具体的にはキャパシタの定数が大きくICに内蔵できないことに起因している。キャパシタの定数は細胞体の発振周期を決めるものであるが、発振原理を見直すことにより内蔵可能な定数で同じ発振周波数をえることが可能になる。マイクロロボットの筐体はシリコンウエハを部材としているので、キャパシタが内蔵できればIC回路を筐体に直接書き込むことができる。その場合、運動性能の向上が見込まれる。FR4

図 11. 将来目指すニューラルネットワーク搭載 MEMS マイクロロボット

基板を廃止する場合、IC 本体と人工筋肉ワイヤとの電気接続を考える必要が出てくる。これに関しては新たな課題となる。シリコン上の配線と直接導通が取れば、配線用の導体を排除することができる。電力供給に関しては大きな問題として残り続けそうであるが、例えば磁気結合などの電力伝送を今後取り上げることとする。その場合、シリコン部材のほかに磁性材料を新たに導入することになる。このロボットは温度変化によってアクチュエータが動作するので、放熱には敏感になる。電力を必要としないアクチュエータへの変更もその都度行っているが、現在のところ人工筋肉ワイヤが最も適している。その場合には熱が蓄積しないよう設計を加える必要もある。このシステムにセンサ、無線 I/O、マニピュレータなどを搭載することも将来考えられる。可動部以外を封止すれば、パッケージから足が出て、移動するマイクロロボットのようにすることができるかもしれない。図 11 に将来目指すマイクロロボットの概念を記す。

5. マイクロロボットと Heterogeneous Integration

ベアダイ搭載、ワイヤ接続、サーマルマネジメントなどマイクロロボットでの技術課題は、従来の実装技術の課題によく似ている。Heterogeneous Integration Roadmap と軌を一にする部分であるように思われる。また、本稿では触れていないが、使用環境に応じて制御部を封止する必要も出てくる。その場合はいよいよパッケージング技術の適用が検討される。一方でマイクロロボットは、可動部があり、可動範囲は Heterogeneous Integration で扱う範囲を超えるように思われる。Heterogeneous Integration roadmap では MEMS のような可動部を内包するパッケージ、また体表に張り付けるような極度な柔軟性を求めるものも守備範囲にしている。そのような観点ではマイクロロボットのような広範囲に可動するものも取り扱うかもしれない。マイクロロボットにはそのものが歩行移動という従来の電子部品で扱われなかった運動性能を第一に考える必要がある。これに関しては Heterogeneous Integration Roadmap とは異なる範囲になると思われる。

6. まとめ

全長 5 mm 程度のニューラルネットワーク IC 搭載マイクロロボットについて Heterogeneous Integration という切り口で検討を加えた。IEEE CPMT など策定している Heterogeneous Integration roadmap で取り扱う実装技術と必ずしも軌を一にするものではないが、ベアダイ搭載、ワイヤ接続、サーマルマネジメントなどで共通の部分がかった。一方でロボットには一義的に運動性能が要求される。Heterogeneous Integration roadmap では MEMS, Wearable, Medical and Health などの分野も検討範囲であり、ある程度の可動性、柔軟性を考慮するようである。しかしながら、本稿で扱ったマイクロロボットはもうすこし違うところにあるように思われる。本稿ではマイクロロボットの具体的な構造、歩行原理、歩行動作、将来への取り組みを示した。将来的には本稿で扱うマイクロロボットはいわば、半導体パッケージに足が生えて運動をするものとも考えられる。その場合、Heterogeneous Integration との間にもっと多くの接点があるのかもしれない。

謝 辞

本研究にかかわる部材作成においては日本大学理工学部マイクロ機能デバイス研究センターの MEMS 製造ラインを使用した。ここに感謝の意を表す。

(2017.7.21- 受理)

文 献

- 1) IEEE CPMT web page, "Heterogeneous Integration Roadmap," <http://cpmt.ieee.org/technology/heterogeneous-integration-roadmap.html>, 2017
- 2) K. Okazaki, T. Ogiwara, D.-S. Yang, K. Sakata, K. Saito, Y. Sekine, and F. Uchikoba: "Development of a pulse control-type MEMS microrobot with a hardware neural network," *Artificial Life and Robotics*, Vol. **16**, pp. 229–233, 2011
- 3) K. Saito, M. Takato, Y. Sekine, and F. Uchikoba: "Biomimetics micro robot with active hardware neural networks locomotion control and insect-like switching behaviour," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. **9**, pp. 1–6, 2012
- 4) K. Iwata, Y. Okane, Y. Asano, Y. Ishihara, K. Sugita, S. Chiba, S. Ono, M. Takato, K. Saito, and F. Uchikoba: "Hexapod type microrobot controlled by power type IC of artificial neural networks," *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, Vol. **15**, pp. 133–140, 2015
- 5) K. Sugita, D. Tanaka, S. Ono, S. Chiba, K. Iwata, Y. Han, M. Takato, K. Saito, and F. Uchikoba: "SMA actuator and pulse-type hardware neural networks IC for fast walking motion of insect-type MEMS microrobot," *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 431–435, 2016

- 6) 齊藤 健, 高藤美泉, 内木場文男: “集積回路で実現した人工脳をもちいた MEMS マイクロロボット,” エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **19**, No. 6, pp. 394–397, 2016
- 7) K. Sugita, T. Tanaka, Y. Nakata, M. Takato, K. Saito, and F. Uchikoba: “Hexapod type MEMS microrobot equipped with an artificial neural networks IC,” Journal of Robotics, Networking and Artificial Life, Vol. **4**, No. 1, pp. 28–31, 2017
- 8) D. Tanaka, Y. Uchiumi, S. Kawamura, M. Takato, K. Saito, and F. Uchikoba: “Four-leg independent mechanism for MEMS microrobot,” Artificial Life and Robotics, online 2017
- 9) A. L. Hodgkin and A. F. Huxley: “A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve,” J. Physiol, Vol. **117**, pp. 500–544, 1952
- 10) 関根好文, 山崎昭広, 黒澤開輝, 佐藤典子: “ Λ 形トランジスタを用いた汎用形ハードウェアニューロンモデル,” 電子情報通信学会論文誌. D-2, 情報・システム情報処理, Vol. **J78-D-2**, No. 1, pp. 131–139, 1995
- 11) M. Takato, Y. Nakata, Y. Uchiumi, T. Tanaka, K. Saito, and F. Uchikoba: “Thermal management of silicon microrobot driven by neural networks IC control SMA actuator,” Proceedings of International Conference on Electronics Packaging, pp. 193–198, 2017

著者紹介

内木場文男 (うちこば ふみお)
博士 (工学)。1985 年 TDK 株式会社入社。1988 年マサチューセッツ工科大学客員研究員。2003 年日本大学理工学部精密機械工学科助教授。現在、同教授。日本大学理工学部マイクロ機能デバイス研究センター責任者。MEMS, マイクロロボット, 積層セラミック技術, ハードウェアニューラルネットワーク IC に関する研究に従事。エレクトロニクス実装学会, IEEE, アメリカ機械学会, アメリカセラミック学会, 電気学会, 電子情報通信学会, 精密工学会, 日本ロボット学会, 日本セラミックス協会各会員

金子美泉 (かねこ みなみ)
博士 (工学)。2015 年より日本大学理工学部精密機械工学科助手。MEMS, マイクロロボット, 積層セラミック技術に関する研究に従事。エレクトロニクス実装学会, アメリカセラミック学会, 機械学会, 電子情報通信学会, 日本セラミックス協会各会員

齊藤 健 (さいとう けん)
博士 (工学)。2007 年日本大学文理学部物理・物理生命システム科学科助手。2010 年日本大学理工学部精密機械工学科助手。現在、同准教授。現在カリフォルニア大学バークレー校客員研究員を併任。人工脳, MEMS, マイクロロボットに関する研究に従事。電子情報通信学会, 電気学会, 日本神経回路学会, 日本神経科学学会, 日本ロボット学会, 日本機械学会, INNS, ANNS 各会員