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

齊藤 健*, 高藤 美泉*, 内木場 文男*

MEMS Microrobot Using Artificial Brain Realized by Integrated Circuit

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

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

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

1. はじめに

生物の安定した移動機構や高度な自律性を持つ制御機構などを、機械的・電氣的に模倣し、ロボットに実装する研究が注目されている^{1)~4)}。特に、昆虫などの小型生物を模倣することで、移動機構・制御機構・センサ・電源などの、小型化・高機能化・低消費エネルギー化などをを目指す研究がおこなわれている。昆虫程度のサイズに小型化したマイクロロボットは、作物の受粉や資源の収集のほか、人間の体内における医療補助や装置の微小部分における組み立て作業など、多くの分野での活躍が期待できる。マイクロロボットの移動機構の小型化には、従来の機械加工技術による構成要素の作製には限界があるため、集積回路技術を基にした微細加工技術を用いた開発が進められている^{5),6)}。マイクロロボットの制御機構の高機能化には、現在のマイクロコントローラなどをもちいたプログラム制御では、生物のように高度な自律性を実現することは困難である。一方で、生物は優れた制御機構をコンパクトな脳で実現している。そこで、生物の脳がもつ優れた制御機構を応用するために、神経細胞をソフトウェアまたはハードウェアでモデル化し^{7),8)}、ネットワーク化することで高度な機能を実現する研究が行われている^{9),10)}。

われわれは、平面構造であるセンサや移動装置などの作製に応用されている微細加工技術を拡張し、立体構造であるロボットの筐体にすべてシリコンウェハを用いた機械機構について研究をおこなっている。また、生物の脳をアナログ電子回路でモデル化し、ロボットの動作制御をおこなう電気機構についても研究をおこなっている。筐体にシリコンウェハを用いることで、微細な機械機構および電気機構を融合し、Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 技術でマイクロロボットを実現することが可能である^{11),12)}。

本稿では、昆虫の六足歩行動作を模倣した、4.0 × 4.0 × 5.0 mm サイズの MEMS マイクロロボットシステムについて解説する。はじめに、マイクロロボットの機械機構について紹介し、つぎに、マイクロロボットの電気機構につい

て述べる。最後に MEMS マイクロロボットシステムとして、機械機構に電気機構を実装した結果について説明する。

2. MEMS マイクロロボットの微細な機械機構

2.1 機械機構の構成要素

Fig. 1 に構築をおこなった MEMS マイクロロボットの構成要素の展開図を示す。マイクロロボットの構成要素である、フレーム構造、回転アクチュエータ、およびリンク機構は、フォトリソグラフィプロセスにより厚みが 100 μm, 200 μm, 385 μm, 500 μm のシリコンウェハ上に部品の形状をパターンニングし、Inductively Coupled Plasma (ICP) ドライエッチング¹³⁾をおこない加工した。マイクロロボットの脚は六足とし、昆虫の中でも蟻の歩行パターンを模倣した。構築を行った 4.0 × 2.7 × 2.5 mm サイズのマイクロロボットは、筐体、2 組の回転アクチュエータ、6 本の脚、2 組のリンク機構で構成した。作製をおこなった MEMS マイクロロボットの重さは 0.020 g であった。回転アクチュエータは 4 本の人工筋肉ワイヤ¹⁴⁾でロータを回転し、リンク機構はロータの回転動作を脚に伝達する。ロボットの筐体を構成する各フレーム構造 (トップフレーム、センターフレーム、フロントフレーム、リアフレーム) は、各フレームをホゾとミゾで組み合わせ、シアノアクリレートを用いて固定した。また、ロータ、脚、リンク、フレームの接合

Fig. 1 Exploded view of the micro mechanical system of the fabricated MEMS microrobot

Fig. 2 Locomotion mechanism of the MEMS microrobot

は軸を用いて接続した。本稿では、人工筋肉ワイヤとしてトキ・コーポレーション製のBioMetal[®] Helix BMX50を用いた。(マイクロロボットの機械機構の詳細は参考文献^{11),12)}を参照)。

2.2 微細機械機構の動作

人工筋肉ワイヤは形状記憶合金 (Ti-Ni 合金) の一種であり、高温時 (70°C) に 50% 程度に収縮し、放熱時に弛緩する。本稿では、人工筋肉ワイヤに約 75 mA の電流を流し、ジュール熱により収縮させ、電流を遮断することで放熱し弛緩させた。人工筋肉ワイヤを収縮させるためには 0.2 s から 1.0 s 程度の通電加熱が必要である。

Fig. 2 に MEMS マイクロロボットの歩行機構を示す。図中 (a) に示した回転アクチュエータを動作するための駆動波形をもちいて、図中 (b) に示したロボットの歩行動作を実現した。また、Fig. 2(a) の駆動波形を逆順である D, C, B, A の順番で人工筋肉ワイヤに駆動波形を入力した場合、ロボットは後進歩行をおこなう。左右のロータの回転速度に差をつけることで方向転換も可能であるが、本稿では前進・後進歩行のみに限定する。

3. MEMS マイクロロボットの微細な電気機構

3.1 電気機構の構成要素

3.1.1 人工脳

人工脳の基本構成要素である細胞体モデルおよび抑制性シナプスモデルは、生物の脳を構成する神経細胞が出力するパルス波形そのものをモデル化した、アナログ電子回路モデルである。本稿では 4 個の細胞体モデルを、12 個の抑制性シナプスモデルで全結合し、マイクロロボットの歩行動作の生成を行った。

Fig. 3 に人工脳の構成要素である、細胞体モデルと抑制性シナプスモデルを示す。Fig. 3(a) は細胞体モデルの基本回路図を示している。細胞体モデルは、生体の神経細胞と同様に相対不応性、出力パルスのアナログ性、および時間的に変化する負性抵抗特性をもつ。すなわち、細胞体モデルは電圧制御型負性抵抗素子をもつ発振器モデルである。

(a) Circuit diagram of the cell body model

(b) Circuit diagram of the inhibitory synaptic model

Fig. 3 Components of the artificial brain

細胞体モデルの回路定数は、発振周期 2 s、パルス幅 0.5 s での発振条件を満たす回路定数である、 $C_G = 10 \mu\text{F}$ 、 $C_M = 2.2 \mu\text{F}$ 、 M_{C1} 、 M_{C2} : $W/L = 10$ 、 M_{C3} : $W/L = 0.1$ 、 M_{C4} : $W/L = 0.3$ とし、電源電圧を $V_A = 3.0 \text{ V}$ とした。Fig. 3(b) は抑制性シナプスモデルの基本回路図を示している。シナプスモデルは、生物と同様に時空間的加算特性をもち、細胞体モデルが出力するパルス波形を抑制性シナプスモデルにより時空間的に加算する。本稿では、抑制性シナプスモデルの回路定数はシナプス結合荷重が 1 倍となる、 $C_{IS} = 1 \text{ pF}$ 、 M_{IS1} 、 M_{IS2} 、 M_{IS3} 、 M_{IS4} 、 M_{IS5} : $W/L = 1$ 、とし、電源電圧 $V_{DD} = 3.0 \text{ V}$ とした。

Fig. 4 に構築をおこなった人工脳の概略図を示す。抑制性の結合は細胞体モデルの発振を抑制するため、抑制性シナプスモデルで全結合した 4 つの細胞体モデルは、同時に電源電圧を供給した場合、はじめはランダムに発振するが徐々に抑制しあい、最終的に 4 相同期となる。本稿では簡単のため、細胞体モデルの発振の順番をアース端子による短絡で制御したが、外部刺激を想定したトリガパルスの入力により発振の順番を自由に変更できる。また、外部刺激により変更した順番は同期現象により、次の外部入力を与えるまで保持 (記憶) することが可能である。図中の各細胞モデルの出力端子の v_{C1out} 、 v_{C2out} 、 v_{C3out} 、 v_{C4out} が人工脳の出力電圧である。

3.1.2 電流出力回路

Fig. 4 に示した人工脳は電圧出力であるが、回転アクチュエータは電流駆動である。そこで、電圧出力を電流出力に変換するため、多段のカレントミラー回路を接続した。Fig. 5 の電流出力回路を人工脳に付加することで、ドライブ回路を必要とせずに人工脳により回転アクチュエータの直接駆動が可能である。

3.1.3 ペアチップ

Fig. 6 に集積回路で実現した人工脳のペアチップ写真を

Fig. 4 Schematic diagram of the artificial brain

Fig. 5 Circuit diagram of the current output circuit

Fig. 6 Picture of bare chip of artificial brain realized by integrated circuit

示す。設計試作には、最小幅 $0.35\ \mu\text{m}$ の4メタルレイヤ・2ポリシリコンレイヤの集積回路デザインルールを利用し、 $2.5 \times 2.5\ \text{mm}$ のベアチップを試作した。チップの外周部には30個のパッドを配置し、ワイヤーボンディングにより外部回路と接続する。ベアチップの中心部が人工脳であり、人工脳の出力端子とパッドの間に電流出力回路を挿入した。パッドの耐電流を考慮し、人工筋肉ワイヤ1本につき2個のパッドを使用した。

3.2 微細電気機構の動作

Fig. 7に、人工脳のベアチップに人工筋肉ワイヤを接続した場合の出力波形の一例を示す。同図は、MEMSマイクロロボットの駆動に必要なFig. 2(a)の波形の条件を満たしており、作製した人工脳のベアチップがロボットを駆動可能であることを示している。

4. 実装結果

Fig. 8に集積回路で実現した人工脳をMEMSマイクロロボットに実装した結果を示す。機械機構であるMEMSマイクロロボットの大きさは、 $4.0 \times 2.7 \times 2.5\ \text{mm}$ 、重さは $0.020\ \text{g}$ であった。電子機構である集積回路で実現した人工脳の

Fig. 7 Example of output waveform of bare chip IC

Fig. 8 Assembled MEMS microrobot system

大きさは、 $4.0 \times 4.0 \times 2.5\ \text{mm}$ 、重さは $0.059\ \text{g}$ であった。

Fig. 9にMEMSマイクロロボットシステムの歩行動作の一例を示す。図中(a)~(d)まで10秒毎の画像を示している。同図は、集積回路で実現した人工脳をMEMSマイクロロボットに実装することで、コンピュータプログラムやアナログデジタルコンバータが不要な、マイクロロボットの歩行動作が実現可能であることを示している。

5. まとめ

本稿では、昆虫の六足歩行動作を模倣した、 $4.0 \times 4.0 \times 5.0\ \text{mm}$ サイズのMEMSマイクロロボットシステムについて解説した。マイクロロボットの機械機構は微細加工技術をもちいて作製し、電気機構は集積回路技術をもちいて構築をおこなった。MEMSマイクロロボットシステムとして、機械機構に電気機構を実装した結果、コンピュータプログラムやアナログデジタルコンバータが不要な、マイクロロボットの歩行動作が実現可能であることを説明した。

今後、ロボットのシリコン筐体への人工脳の直接実装を目指し、研究をおこなう必要がある。また、マイクロロボットへセンサを搭載し、センサからの情報入力を基に人工脳が情報処理し、一例として、障害物を自律的に回避するなどの機能を発揮する研究を行う。駆動波形を生成する人工脳、センサからの情報入力を基に情報処理を行う人工脳を、同じ基本要素である細胞体モデルやシナプスモデルで構成し、現在のマイクロコントローラなどを用いたデジタル制御のロボットと比べ、より生物の柔軟な制御に近いロボットを作製が可能である。

Fig. 9 Example of locomotion of the MEMS microrobot system

謝 辞

本稿の研究の一部は、科研費(23760243, 25420226)、日本大学理工学部プロジェクト研究、日本大学学術研究助成金(総 14-002)の助成を受けたものである。MEMS マイクロロボットの作製は日本大学マイクロ機能デバイス研究センターで実施した。また、本稿の研究の一部は、東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通し、日本ケイデンス、シノプシス、メンターの協力でおこなわれたものである。チップ試作はデジアンテクノロジーにより作製した。

(2016.7.25- 受理)

文 献

- 1) M. K. Habib, K. Watanabe, and K. Izumi: "Biomimetics Robots: From Bio-inspiration to Implementation," Proc. of The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Taipei, Taiwan, Nov., pp. 143–148, 2007
- 2) M. K. Habib: "Biomimetics: Innovations and Robotics," International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems, Vol. **4**, No. 2, pp. 113–134, 2011
- 3) A. T. Baisch, P. S. Sreetharan, and R. J. Wood: "Biologically-inspired locomotion of a 2g hexapod robot," Proc. of the IEEE IROS 2010, pp. 5360–5365, 2010
- 4) B. R. Donald, C. G. Levey, C. D. McGray, I. Paprotny, and D. Rus: "An untethered, electrostatic, globally controllable MEMS micro-robot," J. Microelectromechanical Systems, Vol. **15**, pp. 1–15, 2006
- 5) E. Edqvist, N. Snis, R. C. Mohr, et al.: "Evaluation of building technology for mass producible millimeter-sized robots using flexible printed circuitboards," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. **19**, No. 7, p. 11, 2009
- 6) B. R. Donald, C. G. Levey, C. D. McGray, I. Paprotny, and D. Rus: "An Untethered, Electro-static, Globally Controllable MEMS Micro-Robot," JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL

SYSTEMS, Vol. **15**, No. 1, pp. 1–15, 2006

- 7) 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
- 8) R. FitzHugh: "Impulses and physiological state in theoretical models of nerve membrane," Biophys. J., Vol. **1**, pp. 445–466, 1961
- 9) F. Rosenblatt: "The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain," Psychological Review, Vol. **65**, No. 6, pp. 386–408, 1958
- 10) K. Aihara, T. Tanabe, and M. Toyoda: "Chaotic Neural Networks," Physics Letters A, Vol. **144**, No. 6,7, pp. 333–340, 1990
- 11) K. Saito, A. Matsuda, K. Saeki, F. Uchikoba, and Y. Sekine: "Synchronization of Coupled Pulse-Type Hardware Neuron Models for CPG Model," The relevance of the time domain to neural network models, Springer Series on Cognitive and Neural Systems, pp. 117–133, 2011
- 12) K. Saito, M. Takato, and F. Uchikoba: "Silicon Micro Robot with Neural Networks," IGI Global Engineering Creative Design in Robotics and Mechatronics, pp. 1–10, 2013
- 13) J. K. Bhardwaj and H. Ashraf: "Advanced silicon etching using high-density plasmas," Proc. SPIE Micromachining and Microfabrication Process Technology, Vol. **2639**, pp. 224–233, 1995
- 14) D. Homma: "Metal Artificial Muscle 'BioMetal Fiber,'" RSJ, Vol. **21**, pp. 22–24, 2003

著者紹介

齊藤 健 (さいとう けん)

博士 (工学)。2007 年より日本大学文理学部物理・物理生命システム科学科助手。2010 年より同大理工学部精密機械工学科助手。2011 年より助教。現在に至る。人工脳、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。

高藤美泉 (たかとう 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。マイクロロボットへの搭載を目的としたセラミック材料による小型エネルギーシステムの研究に従事。エレクトロニクス実装学会、電子情報通信学会、日本セラミックス協会会員。

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、同大理工学部精密機械工学科教授。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、IEEE、American Society of Mechanical Engineers、電気学会、精密工学会、日本セラミックス協会会員。