

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 4 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420226

研究課題名(和文)ニューラルネットワークIC搭載無索化MEMSマイクロロボットの開発

研究課題名(英文)Development of Harnessless Microrobot with Mounted Neural Networks IC

研究代表者

内木場 文男 (UCHIKOBA, Fumio)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：60366557

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ニューラルネットワークICを搭載した全長5mm以下のマイクロロボットを開発した。ロボットの機構部にはMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) によってシリコンウェハから高精度に加工した微細部品を用いた。筐体内部には素材自体が伸縮をする形状記憶合金、あるいは圧電体を利用した回転アクチュエータを組み込んだ。一方で、生物の脳を模倣した人工ニューラルネットワーク電子回路を開発して、これをCMOSICにすることで制御回路の小型化を進め、ロボットに搭載をした。開発したロボットにおいては外部に電源供給を必要としたがそれ以外はすべて搭載し、昆虫と同じ6足歩行を実現した。

研究成果の概要(英文)：Microrobot with mounted neural network IC was developed. The robot size was less than 5mm of total length. Micro components with high accuracy were fabricated by MEMS (Micro Electro Mechanical Systems). A rotary actuator composed of shape memory alloy or piezoelectric element that showed displacement as material property was built in the robot body. Artificial neural networks that mimicked the brain of real organisms were developed by electrical circuits. For the miniaturization of the circuit, CMOS ICs were fabricated and mounted on the robot. Only external power supply was connected to the robot. This robot realized the hexapod foot step locomotion similar to insects.

研究分野：工学

キーワード：マイクロロボット MEMS 昆虫型ロボット ニューラルネットワーク 人工筋肉 人工筋肉ワイヤー P
ZT 歩行ロボット

1. 研究開始当初の背景

ロボットの目指す方向のひとつに小型化がある。例えば生体内部での活用を考える場合、ロボットの全長は数ミリメートル以内に限定される。一般的なロボットでは機械加工によって筐体を製作し、デジタルプロセッサを用いて制御する。その場合、小型化にはおのずと限界があり、全長 1cm を切るロボットの実現は難しい。

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) がロボットの筐体を著しく小型化する技術として注目されている。MEMS は IC (集積回路) の製造方法を機械機構に適用した技術であり、シリコンウェハを用いて製作する。ただし MEMS を用いた場合でも報告されているロボットは、例えば外部からの電界、磁界を利用し、あるいは歩行という形態をとらず、這うことによって移動し、歩行を実現できる水準には達していない。

一方で、ロボットは大きさにかかわらずマイクロプロセッサとソフトウェアプログラムの組み合わせによる制御がほぼ独占的に用いられている。プログラムによって決められた応答を何度でも正確に実行することができる反面、想定外の事態に対応することは難しい。実際の生物においては一部の器官が欠落しても、他の組織の機能で代替して目的を果たすことがしばしば行われる。生物ではデジタルではなく、脳の中の神経回路網 (ニューラルネットワーク) によって制御が実現されている。

脳の神経回路網を人工的に模倣する研究が広く実施されている。ソフトウェアを利用して、ネットワークの基本単位になるニューロンの機能と電気信号を数値計算で処理する。しかしながら、計算能力の限界のためにごく小規模なものでも、多くの時間が必要になり、ロボットのようなリアルタイムの運動制御に適用することは難しい。

ニューラルネットワークを電子回路で模倣するハードウェアニューラルネットワークの取り組みがある。ソフトウェアと比べると簡便性に欠けるところがあり、研究が限られている。しかしながら、電気信号を回路で直接扱うので計算を瞬時に終え、出力を利用することができる。そのためロボットの運動制御を実現する可能性がある。また、単一の電子回路を繰り返し用いることで大規模なネットワークができる。電子回路の IC 化による高集積化を利用すれば、小型で大規模な人工ニューラルネットワークの実現の可能性がある。

我々はこれまでに MEMS を利用して超小型ロボットを研究してきた。筐体にデジタル IC を搭載し、6 脚を使って移動をするものを実現した。また、個別素子を電子基板上で作製し、ハードウェアニューラルネットワークによってロボットを制御した。一部の回路では CMOSIC 化をして小型化を行った。

2. 研究の目的

本研究では、全長 5mm 以下のロボットの筐体を MEMS で製作し、人工ニューラルネットワークによって制御することとし、この筐体に極力多くの機能を搭載し、6 足歩行を実現することを目的とした。動力の発生源には圧電素子、また、形状記憶合金の一種である人工筋肉ワイヤを用いた。直線的な変位を回転運動に変えるアクチュエータ、リンク機構を用いて昆虫を模した 6 足歩行の運動を作り出すこととした。ハードウェアニューラルネットワークは IC 化を進めてロボット本体に搭載することとした。

3. 研究の方法

(1) 昆虫型ロボットの構成

筐体には電気エネルギーを機械的運動に変え回転運動を発生するアクチュエータを内蔵した。回転運動はリンク機構に接続、歩行運動に変換し、昆虫のような 6 足歩行を実現した。制御回路は IC と周辺回路を基板上に作製してこれらをロボットに搭載した。図 1 に本研究の昆虫型ロボットの概略図を示す。内蔵した回転アクチュエータについては圧電素子を用いたものと人工筋肉ワイヤを用いたそれぞれのものを開発した。電源は外部から供給した。

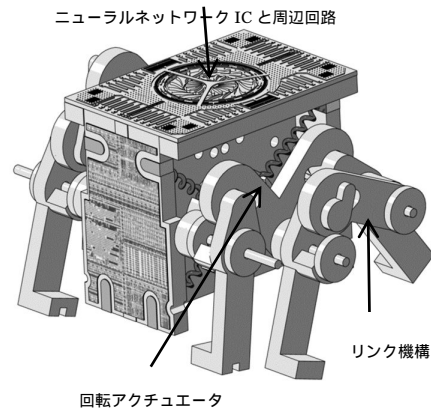


図 1 昆虫型ロボットの概略図

(2) 圧電素子による回転アクチュエータ

圧電体は電圧をかけることによって物質がひずむ圧電効果を示し、電界で駆動するので、消費電力を抑えることができる。さらに応答時間は 0.1ms 程度なので十分に速い。しかしながら電圧印加による変化率は $10^{-6}/V$ 程度と小さいので本研究に直接用いることはできない。そのため、インパクト機構を用いた回転アクチュエータを開発した。インパクト型の回転アクチュエータは円板状の回転体の円周部を圧電体によって打撃し、その衝撃で回転を発生する。

本研究では積層セラミック素子に打撃ヘッドを取り付け、中心に配置したロータを回転させる構造とした。図 2 にその構造を示す。

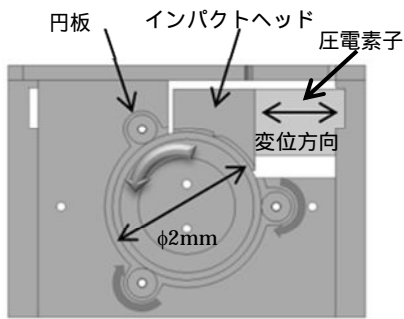


図2 圧電インパクトタイプ回転アクチュエータの概観図

(3) 人工筋肉ワイヤーによる回転アクチュエータ

形状記憶合金は金属の相変化を利用し高温相の形状を記憶する。本研究では形状記憶合金の一種である人工筋肉ワイヤーを用いた。人工筋肉ワイヤーでは、金属結晶の方位を配向することによって高温時に収縮し低温時に伸張する二方向性を示す。筐体の内部には直径1.2mmのMEMSによって製作した円板状のロータを設置し、人工筋肉ワイヤーによって筐体の対角線4方向に固定した。図3に回転アクチュエータの展開図を示す。ロータは筐体内部に2個形成した。

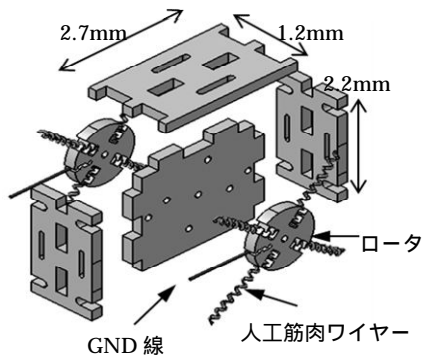


図3 人工筋肉ワイヤーを用いた回転アクチュエータの展開図

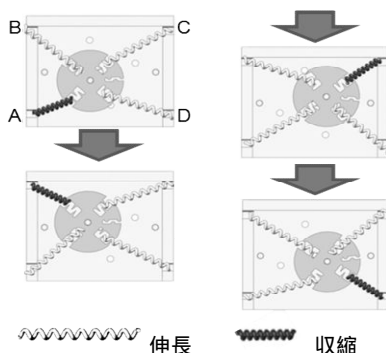


図4 通電加熱と回転運動

4本の人工筋肉ワイヤーに順番に通電をすることによって回転運動を得る。図4ではABCDにAから順にDへと通電加熱を施し時計

回りに回転をする例を示す。通電の順序を逆転することによって、回転を反時計回りにすることができる。

(4) リンク機構

アクチュエータの回転運動を6足歩行に変換するために図5に示すリンク機構を用いた。リンク機構には3本の軸を用いて、中央の軸を回転アクチュエータに接続し、軸が円運動することによって歩行運動を実現する。反対側のアクチュエータでは位相を180度ずらし、6本の脚の運びが昆虫と同様になるようにした。

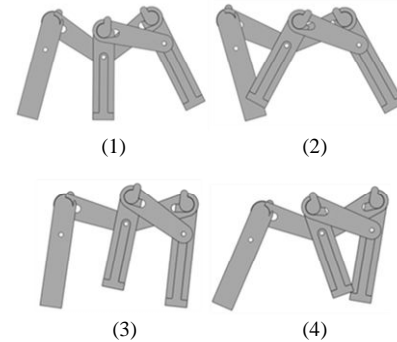


図5 リンク機構と回転アクチュエータによる脚の動作

(5) 昆虫型ロボットの歩行と制御信号

生物の脳の神経回路網はニューロンと呼ばれる単位組織が複数網目状に結合しネットワークを構築する。ニューロンの中にある細胞体から軸索と呼ばれる組織が伸び、他のニューロンの細胞体から伸びる樹状突起とシナプスを經由して結合する。生体のニューラルネットワークでは一種の非同期パルス発振回路網と考えることができ、発振閾値、正負の極性結合、空間的・時間的可算性、不応期の存在などの特徴がある。

ニューロン中の細胞体を電子回路で再現し圧電インパクト回転アクチュエータの制御信号として用いた。図6に用いた細胞体モデルの回路図を示す。発振閾値、非同期、不応期の存在などのパルス発振の特徴を示す。実際の回路においては圧電体を駆動する電圧を取得するために増幅回路を追加した。

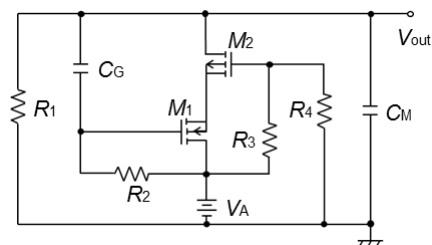


図6 圧電インパクト回転アクチュエータ制御用細胞体モデル

生体において運動の基本となる筋肉屈伸の周期的なリズム信号は相互結合型ニュー

ラルネットワークのひとつである CPG (Central Pattern Generator) が発生していることが知られている。人工筋肉回転アクチュエータには細胞体と抑制性シナプスを CPG 結合させたものを用いた。CPG の結合を図 7 に示す。CPG の 4 個のニューロンの出力を人工筋肉ワイヤーの通電に対応させた。シナプスは結合に負の極性、空間的・時間的・可算性、シナプス結合加重を持たせた。

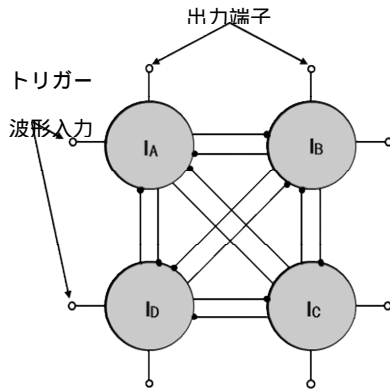


図 7 細胞体と抑制性シナプスによる CPG

細胞体モデル、CPG それぞれ、CMOSIC を作製した。実際の IC 製作に当たっては外部ファウンダリーを利用した。一例として CPG のチップサイズは 1.93mm 角であり、図 8 にそのレイアウトを示す。一部の定数の大きなキャパシタンスは IC に取り込むことができず基板に搭載し接続した。また、人工筋肉ワイヤーを駆動する電流容量を取得するためにトランジスタを用いた。

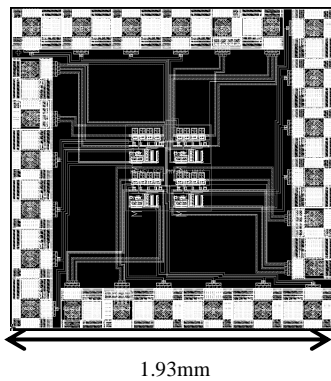


図 8 CPG モデル CMOSIC レイアウト

(6) 圧電インパクト回転アクチュエータ搭載ロボット

圧電インパクト回転アクチュエータにリンク機構と脚を取り付けロボットの動作評価を行った。組み立てたロボットを図 9 に示す。全長 4.6mm、幅 4.0mm、高さ 3.6mm であった。ロボットから 2 本の導線が引き出され制御回路に接続される。細胞体モデルからの出力信号をロボット入力し脚が歩行動作をしていることが観察された。25kHz に調整した時に回転数は 60rpm であった。また、最大の歩行速度は毎分 180mm であった。

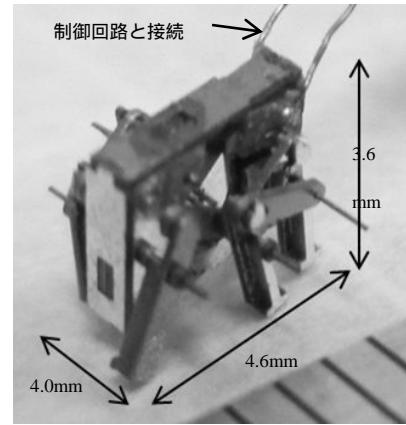


図 9 圧電回転アクチュエータ搭載昆虫型ロボット

(7) 人工筋肉ワイヤー回転アクチュエータ搭載ロボット

図 10 に人工筋肉回転アクチュエータ搭載マイクロロボットを示す。IC 化したニューラルネットワークは付帯回路とともにロボットに搭載した。ロボット本体の全長は 2.7mm、幅 4.0mm、高さ 2.5mm であった。片側のロータから 4 本、両側から 8 本、接地用とあわせて 9 本の導線が引き出されている。このうち電源に接続されるもの以外はすべてロボットに搭載した制御基板に接続した。電源を接続することによってロボットは 6 足歩行を示し移動を実現した。

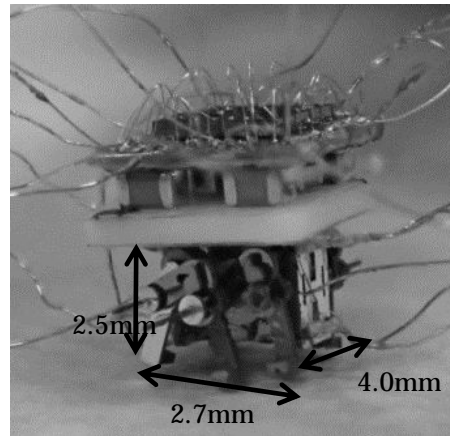


図 10 人工筋肉回転アクチュエータ搭載昆虫型ロボット

4. 研究成果

ミリメートルサイズの昆虫型歩行ロボットの開発を行った。機構部品は IC 製造技術を基本とする MEMS を用いて作製し、積層圧電素子を利用したインパクト型回転アクチュエータと形状記憶合金の一種である人工筋肉ワイヤーを利用した回転アクチュエータをそれぞれ開発した。これにリンク機構を組み合わせることによって昆虫の歩行動作を実現した。制御には生体の神経回路網を模倣した電子回路によるハードウェアニュー

ラルネットワークを開発し、さらに IC 化して適用した。昆虫型ロボットは歩行動作を実現した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8 件)

Yuki Ishihara, Yuka Naito, Kazuaki Maezumi, Yuki Okane, Hirozumi Oku, Masaki Tatani, Minami Takato, Ken Saito, Fumio Uchikoba, IC design of driving circuit of MEMS microrobot using pulse-type hardware neuron model, *Artificial Life and Robotics*, 査読有, vol.21, 2016, pp.201-206, DOI: 10.1007/s10015-016-0273-x

Ken Saito, Kei Iwata, Yuki Ishihara, Kazuki Sugita, Minami Takato, Fumio Uchikoba, Miniaturized rotary actuators using shape memory alloy for insect-type MEMS microrobot, *Micromachines*, 査読有, vol.7, 2016, online, DOI:10.3390/mi7040058

Kei Iwata, Hirozumi Oku, Yuki Okane, Yohei Asano, Masaki Tatani, Yuki Ishihara, Kazuki Sugita, Satohiro Chiba, Satoko Ono, Mizuki Abe, Minami Takato, Ken Saito, Fumio Uchikoba, MEMS microrobot controlled by mounted neural networks IC with two types Actuators, *Journal of Robotics, Networking and Artificial Life*, 査読有, vol.2, 2016, pp.213-216

Minami Takato, Yuka Naito, Kazuaki Maezumi, Yuki Ishihara, Yuki Okane, Hirozumi Oku, Masaki Tatani, Ken Saito, Fumio Uchikoba, Development of impact-type rotary actuator and application for MEMS microrobot by bare chip IC of hardware neuron model, *Artificial Life and Robotics*, 査読有, vol.20, 2015, pp.359-365, DOI: 10.1007/s10015-015-0239-4

Ken Saito, Yuki Ikeda, Minami Takato, Yoshifumi Sekine, Fumio Uchikoba, Development of quadruped robot with locomotion rhythm generator using pulse-type hardware neural networks, *Artificial Life and Robotics*, 査読有, vol.20, 2015, pp.366-371, DOI: 10.1007/s10015-015-0240-y

Kei Iwata, Yuki Okane, Yohei Asano, Yuki Ishihara, Kazuki Sugita, Satohiro Chiba, Satoko Ono, Minami Takato, Ken Saito, Fumio Uchikoba, Hexapod type microrobot controlled by power type IC of artificial neural networks, *WSEAS Transactions on Circuit and System*, 査

読有, vol.14, 2015, pp.134-141
Minami Takato, Masaki Tatani, Hirozumi Oku, Yuki Okane, Junichi Tanida, Sinpei Yamasaki, Ken Saito, Fumio Uchikoba, A millimeter-sized robot by a piezoelectric impact-type rotary actuator and hardware neuron model, *International Journal of Advanced Robotic System*, 査読有, vol.11, 2014, DOI: 10.5772/58671

Ken Saito, Kazuaki Maezumi, Yuka Naito, Tomohiro Hidaka, Kei Iwata, Yuki Okane, Hirozumi Oku, Minami Takato, Fumio Uchikoba, Neural networks integrated circuit for biomimetics MEMS microrobot, *Robotics*, 査読有, vol.3, 2014, pp.235-246, DOI:10.3390/robotics3030235

[学会発表](計 10 件)

Kei Iwata, Hirozumi Oku, Yuki Okane, Yohei Asano, Masaki Tatani, Ishihara, Kazuki Sugita, Satohiro Chiba, Satoko Ono, Mizuki Abe, Minami Takato, Ken Saito, Fumio Uchikoba, MEMS microrobot controlled by mounted neural networks IC with two types actuators, The 2016 International Conference on Artificial Life and Robotics, 2016.1.29 沖縄コンベンションセンター(沖縄県宜野湾市)

Kei Iwata, Yuki Okane, Yuki Ishihara, Kazuki Sugita, Satoko Ono, Mizuki Abe, Satohiro Chiba, Minami Takato, Ken Saito, Fumio Uchikoba, Insect-type microrobot with mounted bare chip IC of artificial neural networks, The 29th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2016.1.24 (Shanghai China)

Daisuke Tanaka, Daichi Nagashima, Tomohiro Hidaka, Minami Takato, Fumio Uchikoba, Ken Saito, Gait pattern changing of quadruped robot using pulse-type hardware neural networks, 21st International Symposium on Artificial Life and Robotics, 2016.1.20 ビーコンプラザ(大分県別府市)

Ken Saito, Kazuki Sugita, Yuki Ishihara, Kei Iwata, Yohei Asano, Yuki Okane, Satoko Ono, Satohiro Chiba, Minami Takato, Fumio Uchikoba, Insect-type MEMS microrobot with mountable bare chip IC of artificial neural networks, 21st International Symposium on Artificial Life and Robotics, 2016.1.20 ビーコンプラザ(大分県別府市)

阿部水樹, 中村麻衣, 高藤美泉, 齊藤 健,

佐伯勝敏, 内木場文男, 関根好文, STDP 特性の電子回路モデル化に対する検討, 電気学会電子情報システム部門電子回路研究会, 2015.11.13 徳島大学(徳島県徳島市)

杉田和貴, 小野聡子, 千葉哲玄, 石原優毅, 浅野洋平, 岩田 蛸, 岡根佑樹, 高藤美泉, 関根好文, 内木場文男, 齊藤 健, CMOSIC による人工ニューラルネットワークを搭載した MEMS マイクロロボットの歩行動作, 電気学会電子情報システム部門電子回路研究会, 2015.11.12 徳島大学(徳島県徳島市)

Yuki Ishihara, Kazuki Sugita, Masaki Tatani, Hirozumi Oku, Minami Takato, Fumio Uchikoba, Ken Saito, IC design of pulse-type hardware model for piezo electric type MEMS microrobot, 41st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2015.11.9, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

日高智浩, 田中 大介, 高藤美泉, 内木場文男, 齊藤健, パルス形ハードウェアニューラルネットワークを用いた 4 足ロボットの歩行リズム生成, 平成 27 年電気学会電子・情報・システム部門大会, 2015.8.26 長崎大学(長崎県長崎市)

杉田和貴, 小野聡子, 千葉哲玄, 石原優毅, 浅野洋平, 岩田 蛸, 岡根佑樹, 高藤美泉, 内木場文男, 齊藤健, MEMS マイクロロボットの駆動波形を生成する人工ニューラルネットワークの CMOSIC 設計, 平成 27 年電気学会電子・情報・システム部門大会, 2015.8.26 長崎大学(長崎県長崎市)

Ken Saito, Minami Takato, Fumio Uchikoba, Silicon artificial neural networks locomotion rhythm generator for MEMS microrobot system, 4th International Symposium on Energy Challenges and Mechanics, 2015.8.11, (Aberdeen UK)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.eme.cst.nihon-u.ac.jp/~uchikoba/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内木場 文男 (UCHIKOBA, Fumio)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号: 60366557