

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760243

研究課題名(和文) アナログ高集積化回路による人工知能を搭載したMEMSマイクロロボットの開発

研究課題名(英文) Development of MEMS microrobot with artificial intelligence circuit by analog integrated circuit

研究代表者

齊藤 健 (SAITO, Ken)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：70580174

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円、(間接経費) 750,000円

研究成果の概要(和文)：研究成果は機械工学および電子工学分野に分けられる。機械工学分野では、従来シリコンウェハの微細加工は主に平面構造のデバイスの作製にもちいられていた。本研究では微細加工技術をもちいて部品を作製し組み立てることにより、立体構造のロボットを作製した。その結果、6足のマイクロロボットでは世界最小の5mmを切るサイズでの歩行に成功した。

電子工学分野では、マイクロロボットの動作制御には主にプログラミング制御がもちいられていた。本研究では生物の脳を模倣したアナログ高集積化回路による人工知能回路を作製した結果、プログラミング無しでの動作制御に成功した。

研究成果の概要(英文)：Achievements of my research can divide into mechanical engineering and electronic engineering. Usually, micro fabrication of silicon wafer was used to construct the planar structure devices in mechanical engineering. In this research, mechanical components fabricated by micro fabrication technology were assembled using manual assembly to construct the microrobot which is space structure. As a result, less than 5 mm size hexapod microrobot performed locomotion. The size of the hexapod microrobot was smallest in the world.

Programmed control has been the dominant system among the motion control of microrobot. In this research, artificial intelligence circuit by analog integrated circuit was constructed. As a result, motion control without program was realized by artificial intelligence circuit which mimics the brain of living organisms.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：MEMS マイクロロボット アナログ 高集積化回路 人工知能 ハードウェアニューラルネットワーク

### 1. 研究開始当初の背景

マイクロロボットの研究開発が活発に行われているが、現在の技術では生物のように高度な機能を実現することは難しい。そこで近年、生物の持つ高度な機能を機械工学的、電子工学的に模倣する、*biomimetics* が注目されている[1]。しかし、特に高度な機能が必要となる人体内における低侵襲医療補助、精密機械などの狭小空間メンテナンスなどへの応用には、さらなる小型化や高機能化が必要である。マイクロロボットのさらなる小型化や高機能化には、小型のアクチュエータ、小型のエネルギー源、予測不能な状況に対応しうる柔軟な制御システムなどの開発が必要である。

ロボットの小型化については、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、A. M. Flynn によって IC プロセスを基にした微細加工技術で実現したアクチュエータを用いることで、ロボットのさらなる小型化が可能であると提案された[2]。以来、微細加工技術を用いてアクチュエータやセンサなどを小型化し、マイクロロボットに搭載する研究が行われている[3]。しかし、微細加工技術は主に平面構造のデバイス作製にもちいられており、立体構造を持つロボットの作製は難しかった。そこで、微細加工技術をもちいた立体構造をもつマイクロロボットの開発が望まれていた。

ロボットの高機能化について、一般的にマイクロコントローラを利用したプログラム制御がマイクロロボット制御の主流である。しかし、現在のマイクロコントローラ等をもちいたプログラム制御では、生物のように柔軟で優れた制御を実現することが困難である。一方で、昆虫等の小型の生物はニューラルネットワークを用いて、優れた情報処理機構を非常にコンパクトなシステムで実現している。そこで、生物のニューラルネットワークがもつ優れた情報処理機構を工学的に応用するために、ニューロンをハードウェアでモデル化し、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。しかし、多くのハードウェアニューロンモデルは回路にインダクタを含むため高集積化が困難であった。そこで、マイクロロボットに搭載するためにアナログ高集積化回路に対応した、ハードウェアニューロンモデルが必要である。

### 参考文献

- [1] A. T. Baisch, P. S. Sreetharan, R. J. Wood, Biologically-inspired locomotion of a 2g hexapod robot, IEEE IROS 2010, pp.5360-5365, 2010.
- [2] Flynn, A. M. Gnat Robots (And How They Will Change Robotics), MIT Artificial Intelligence Laboratory, MIT Artificial Intelligence Laboratory Working Papers, WP-295, 1987.

[3] P. Valdastrì, P. Corradi, A. Menciassi, T. Schmickl, K. Crailsheim, J. Seyfried, P. Dario, Micromanipulation, Communication, Swarm Intelligence Issues in a Swarm Microrobotic Platform, Robotics and Autonomous Systems, 54 pp.789-804, 2006.

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、5 mm 程度のマイクロロボットに、アナログ高集積化回路による独自の人工知能回路を搭載し、ロボットの歩行動作の制御ができるシステムを構築することである。

本研究はロボット本体の機械工学的研究、およびロボットを歩行制御する人工知能回路である電気電子工学的研究の2つのアプローチで別々に進展し、最終的に統合を試みる。

#### (1) 機械工学的研究の目的

平面構造であるセンサやアクチュエータなどの作製に应用されている、IC プロセスを基にした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マイクロロボットシステムの機械機構について研究をおこなう。すなわち、ロボットを構成するフレーム部や脚部を含む各パーツについても、シリコンウェハに微細加工を施した、新しいコンセプトのマイクロロボットを提案する。5 mm を切るサイズでのマイクロロボットの実現は、人体内における低侵襲医療補助、精密機械などの狭小空間メンテナンスなどへの応用の足がかりとなる。

#### (2) 電気電子工学的研究の目的

ロボットの歩行動作を制御する人工知能回路をアナログ高集積化回路で構築する研究をおこなう。回路にインダクタを含まず、アナログ高集積化回路に対応したハードウェアニューロンモデルをもちいる結果、プログラムの記述が必要ないロボットの動作制御の実現が可能である。また、チップ素子などの表面実装タイプの電子素子を用いた回路に比べ、大幅な小型化が期待できる。

#### (3) 機械、電気電子工学的研究の融合

マイクロロボットの筐体にシリコンウェハを用いることで、アクチュエータなどの機械工学的研究と、制御システムなどの電気電子工学的研究を融合する結果、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となる。

### 3. 研究の方法

本研究は、ロボット本体の機械工学的研究、およびロボットを歩行制御する人工知能回路である電気電子工学的研究に大きくわけて研究を進める。

機械工学的研究において、ロボットの設計は、MEMS マイクロロボットのダウンサイジングや、歩行に適した形状などに対する検討を行う。特に、MEMS マイクロロボットのアクチュエータである人工筋肉ワイヤについて、長

さの最適化やフレーム部・可動部への固定法、人工知能回路への接続法を新たに検討する。また、より消費電力が少ないアクチュエータ機構の開発も合わせて進める。

電気電子工学的研究において、人工知能回路の設計ではアナログ高集積化回路による独自の人工知能回路の設計を行う。人工知能回路は電子回路シミュレータ等を用いて回路定数を決定したのち、ディスクリート素子を FR4 基板に表面実装し、回路を構築する。回路動作を確認したのち、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じ IC チップ化を行う。2 つの研究計画は適時それぞれの研究成果を適応可能な状態とし、MEMS マイクロロボットに独自の人工知能回路を搭載し、ロボットの歩行動作の自律的な制御ができるシステムを構築する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 機械工学的研究成果

人工筋肉ワイヤ駆動の MEMS マイクロロボット

人工筋肉ワイヤを駆動源とした回転型アクチュエータを作製し、 $4.0 \times 2.7 \times 2.5$  mm のサイズで MEMS マイクロロボットの作製に成功した。

図1に作製した人工筋肉ワイヤ駆動の MEMS マイクロロボットを示す。人工筋肉ワイヤ駆動のアクチュエータは変位が大きく発生力が大きい半面、消費電力が大きい結果であった。

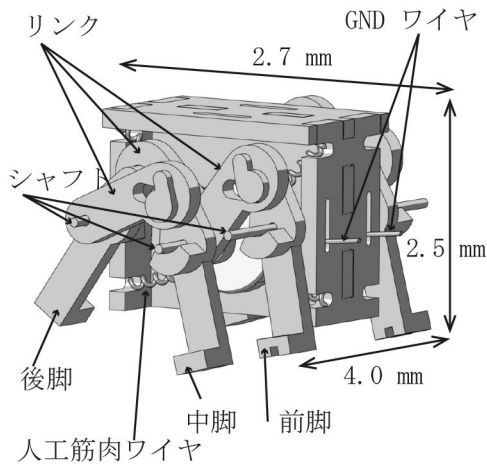


図1 人工筋肉ワイヤ駆動の MEMS マイクロロボット

##### 圧電素子駆動の MEMS マイクロロボット

圧電素子を駆動源とした回転アクチュエータを作製し、 $4.0 \times 4.6 \times 3.6$  mm のサイズで MEMS マイクロロボットの作製に成功した。

図2に作製した圧電素子駆動の MEMS マイクロロボットを示す。圧電素子駆動のアクチュエータは消費電力が小さい半面、発生力が小さい結果であった。

##### (2) 電気電子工学的成果

人工筋肉ワイヤの駆動用人工知能回路

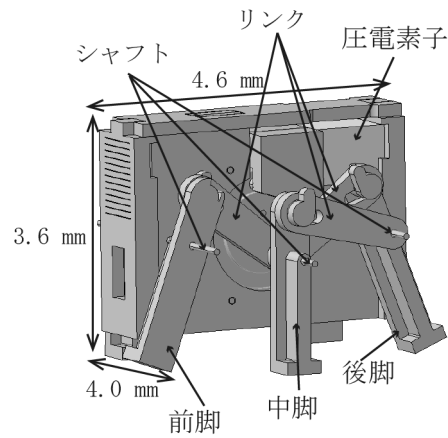


図2 圧電素子駆動の MEMS マイクロロボット

図3に人工筋肉ワイヤの駆動用人工知能回路のレイアウトパターンを示す。設計試作には、最小幅 0.35 mm の 4 メタルレイヤ・2 ポリシリコンレイヤの IC デザインルールをもちい、 $1.93 \times 1.93$  mm のベアチップを試作した。チップの外周部には 20 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可能である。

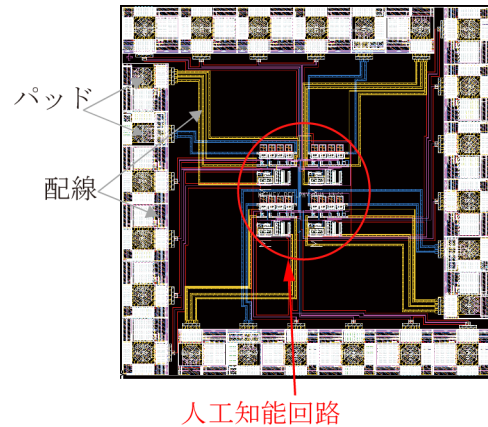


図3 人工筋肉ワイヤの駆動用人工知能回路

図4に作製した IC チップの実測波形を示す。同図は、人工知能回路が 4 相の逆相同期波形を出力し、4 本の人工筋肉ワイヤを順番に通電加熱可能であることを示している。この結果より、構築した人工知能回路の IC ベアチップはロボットの前進歩行を実現可能であることを示している。

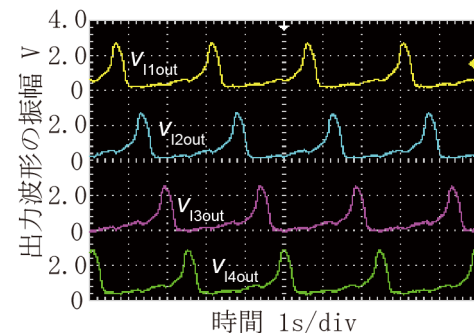


図4 実測波形(人工筋肉ワイヤ用)

圧電素子の駆動人工知能回路

図5に圧電素子の駆動人工知能回路のレイアウトパターンを示す。設計ルールは図3と同様である。

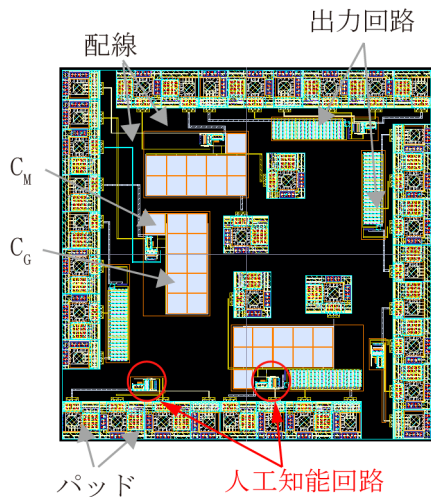


図5 圧電素子の駆動人工知能回路

図6に作製したICチップの人工知能回路の電源電圧を変化した場合の周波数特性を示す。同図より、作製したICチップの人工知能回路は電源電圧を変化することで、アクチュエータである圧電素子の振動数を変化可能であることを示している。

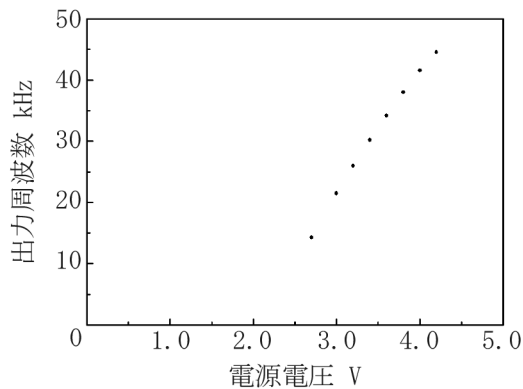


図6 電源電圧を変化した場合の周波数特性

図7に作製したICチップの実測波形を示す。同図は、人工知能回路がパルス波形を出す

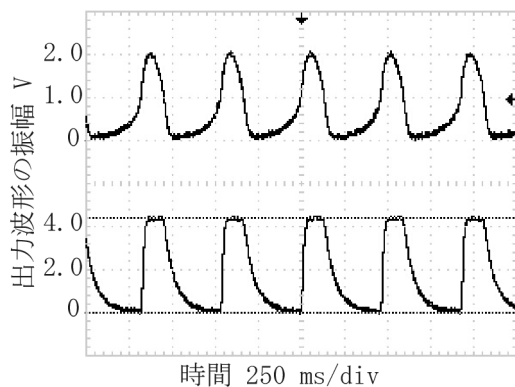


図7 実測波形(圧電素子用)

力し、圧電素子を駆動可能であることを示している。この結果より、構築した人工知能回路のICペアチップはロボットの前進歩行を実現可能であることを示している。

(3) 機械、電気電子工学的成果の融合

ロボット本体の機械工学的研究、およびロボットを歩行制御する人工知能回路である電気電子工学的研究の結果、2つの研究成果を融合した。

図8に人工筋肉ワイヤ駆動のMEMSマイクロロボットの歩行動作の一例を示す。ロボットの歩行は、歩幅が0.88 mmの場合に、26.6 mm/minであった。

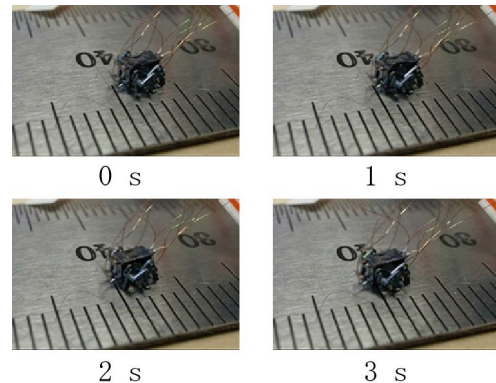


図8 歩行動作の一例(人工筋肉ワイヤ)

図9に圧電素子駆動のMEMSマイクロロボットの歩行動作の一例を示す。ロボットの歩行は、歩幅が0.88 mmの場合に、180 mm/minであった。

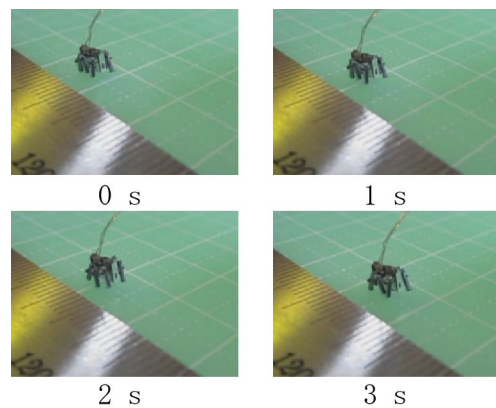


図9 歩行動作の一例(圧電素子)

図8、9より、本研究により構築を行った、5 mm程度のマイクロロボットは、アナログ高集積化回路による独自の人工知能回路が出力する駆動波形を用いて、コンピュータプログラム無しでのロボットの歩行動作の制御が可能であることを明らかにした。

本研究で提案したロボットシステムは、将来的に機械工学、電気電子工学、情報工学、生体工学などの多数の研究分野にプラットフォームを提供でき、様々な分野を一つのロボットシステムとして統合化できる可能性を秘めている。また、現在の技術で

は哺乳類の脳そのものを工学的に応用することは難しい。しかし、哺乳類の脳に比べ、規模が小さいシステムである小型の昆虫などに特有な、反射的な動作や捕食活動などを実現できる可能性があるため、生物に近いロボットを人工的に構築できる可能性がある。

#### 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6件)

Minami Takato, Masaki Tatani, Hirozumi Oku, Yuki Okane, Junichi Tanida, Shinpei Yamasaki, Ken Saito and Fumio Uchikoba, A Millimeter-Sized Robot by a Piezoelectric Impact-type Rotary Actuator and a Hardware Neuron Model, International Journal of Advanced Robotic Systems, Peer review 2014 Accepted (now printing)

Ken Saito, Kazuto Okazaki, Tatsuya Ogiwara, Minami Takato, Katsutoshi Saeki, Yoshifumi Sekine and Fumio Uchikoba, Locomotion Control of MEMS Microrobot Using Pulse-Type Hardware Neural Networks, Electrical Engineering in Japan, Peer review, Volume 186, Issue 3, 2014, pp.43-50 DOI: 10.1002/eej.22473

齊藤 健、高藤 美泉、関根 好文、内木場 文男、AI 制御によるバイオミメティクス MEMS マイクロロボット、日本ロボット学会誌、査読有、Vol.31、No.7、2013、pp.684-688

DOI: 10.7210/jrsj.31.684

Ken Saito, Minami Takato, Yoshifumi Sekine and Fumio Uchikoba, Biomimetics Micro Robot with Active Hardware Neural Networks Locomotion Control and Insect-Like Switching Behaviour, International Journal of Advanced Robotic Systems, Peer review, vol.9, 2012, pp. 1-6

DOI:10.5772/54129

Fumio Uchikoba, Minami Takato and Ken Saito, Hardware Neural Networks Controlled MEMS Rotational Actuators and Application to Micro Robot, Journal of Mechanics Engineering and Automation, Peer review, vol.2, 2012, pp. 499-506,

<http://www.davidpublishing.com/Download/?id=8213>

齊藤 健、岡崎 一人、荻原 龍矢、高藤 美泉、佐伯 勝敏、関根 好文、内木場 文男、パルス形ハードウェアニューラルネットワークによる MEMS マイクロロボットの歩行動作制御、電気学会論

文誌 C、査読有、vol. 132(7)、(2012)、pp. 1094-1100

DOI: 10.1541/ieejieiss.132.1094

##### [学会発表](計14件)

岡根 佑樹、前角 和明、高藤 美泉、内藤 友香、小原 広輝、浅野 洋平、石原 優毅、岩田 蛸、奥 大純、多谷 大樹、日高 智浩、齊藤 健、内木場 文男、ANN 制御システムを搭載した昆虫型 MEMS マイクロロボット、第 28 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会、2014 年 3 月 7 日、東京都

Kazuaki Maezumi, Shinpei Yamasaki, Hiroki Obara, Yuka Naito, Kei Iwata, Masaki Tatani, Yuki Okane, Yuki Ishihara, Tomohiro Hidaka, Yohei Asano, Hirozumi Oku, Minami Takato, Ken Saito, Fumio Uchikoba, Hexapod-Type SMA Driven MEMS Microrobot with Mounted Bare Chip Artificial Neural Networks IC, The Nineteenth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2014, January 23 2014, Oita, Japan.

齊藤 健、高藤 美泉、山崎 晋平、前角和明、小原 広輝、内藤 友香、岩田 蛸、多谷 大樹、岡根 佑樹、石原 優毅、日高 智浩、浅野 洋平、奥 大純、関根 好文、内木場 文男、ニューラルネットワークベアチップを用いた MEMS マイクロロボット用の駆動波形の生成、電気学会電子回路研究会、2013.11.29、東京都

Shiho Takahama, Junichi Tanida, Minami Takato, Fumio Uchikoba and Ken Saito, Biomimetics Micro Robot with CMOS IC Neural Networks Locomotion Control, 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, November 13 2013, Vienna, Austria.

内藤 友香、山崎 晋平、高藤 美泉、内木場 文男、齊藤 健、MEMS マイクロロボットの歩行および旋回動作を生成するパルス形ハードウェアニューラルネットワークの構築、電気学会電子・情報・システム部門大会、2013.9.5、北海道

Shiho Takahama, Junichi Tanida, Shinpei Yamasaki, Minami Takato, Fumio Uchikoba, Ken Saito, IC Implementation of Pulse-Type Hardware Neural Networks for Generation of Driving Waveform of MEMS Micro Robot, Annual Conference of Electronics, Information and Systems Society, I.E.E. of Japan, September 4 2013, Hokkaido, Japan.

Minami Takato, Shinpei Yamasaki, Shiho Takahama, Junichi Tanida, Ken Saito, Fumio Uchikoba, Insect Type MEMS Micro

Robot Controlled by CMOS IC of Hardware Neural Networks, Twelfth European Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems, September 4 2013, Taormina, Italy.

Ken Saito, Shiho Takahama, Shinpei Yamasaki, Minami Takato, Yoshifumi Sekine, and Fumio Uchikoba, IC Chip of Pulse-Type Hardware Neural Networks for Hexapod Walking MEMS Micro Robot, International Joint Conference on Neural Networks, August 5 2013, Texas, USA.

Minami Takato, Masaki Tatani, Junichi Tanida, Shinpei Yamasaki, Ken Saito, Fumio Uchikoba, Piezo Impact Type MEMS Rotary Actuator and Application to Millimeter Size Robot, IEEE-International Ultrasonics symposium 2013, IUS 3-A-3, July 22 2013, Prague, Czech Republic.

Minami Takato, Ken Saito, and Fumio Uchikoba, Insect Type MEMS Miniaturized Robot with Hardware Neural Networks Control System, International Symposium on Highly-Controlled Nano- and Micro-Scale Functional Surface Structures for Frontier Smart Materials 2013, 2013 April 20, Kanagawa, Japan.

齊藤 健、高藤 美泉、関根 好文、内木場 文男、AI 制御によるバイオミメティクス MEMS マイクロロボット、日本ロボット学会学術講演会、2012.9.17、北海道

Ken Saito, Tatsuya Ogiwara, Shinpei Yamasaki, Kazuto Okazaki, Shiho Takahama, Minami Takato, Fumio Uchikoba, CMOS Neural Networks Controlled Micro Robot Targeting System on Si Frame, International Conference on Electronics Packaging 2012, April 19 2012, Tokyo, Japan.

Kazuto Okazaki, Tatsuya Ogiwara, Minami Takato, Akane Iiduka, Shiho Takahama, Mai Fujiwara, Ken Saito and Fumio Uchikoba, MEMS MICRO ROBOT USING MOSFET BASED PULSE-TYPE HARDWARE NEURAL NETWORKS FOR MOTION CONTROL, MEMS 2012, January 30 2012, Paris, FRANCE.

Tatsuya Ogiwara, Kazuto Okazaki, Yutaro Kezuka, Shinpei Yamasaki, Minami Takato, Ken Saito, Fumio Uchikoba, Development of MEMS micro robot using piezoelectric actuator mechanism, Seventeenth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2012, January 19 2012 Oita,

Japan.

〔図書〕(計1件)

Ken Saito, Minami Takato Yoshifumi Sekine and Fumio Uchikoba, IGI Global, Engineering Creative Design in Robotics and Mechatronics, (2013), pp.1-10.

〔その他〕

ホームページ等

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

受賞等

研究代表者が電気学会の電子・情報・システム部門誌での論文が認められ、平成24年度電子・情報・システム部門誌論文奨励賞を受賞した(雑誌論文)。

報道等

北日本放送「Forefront とやまの医療界前線 2014」にて MEMS マイクロロボットの紹介が放送された。

6. 研究組織

(1)研究代表者

齊藤 健 (SAITO, Ken)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：70580174

(2)研究協力者

内木場 文男 (UCHIKOBA, Fumio)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：60366557