



〈特集：特別講演（第31・32回合同年次学術集会より）〉

医療応用に向けたマイクロロボットの開発

齊藤 健^{1)*}、金子 美泉¹⁾、内木場 文男¹⁾、佐伯 勝敏²⁾、武藤 伸洋³⁾、見坐地 一人⁴⁾、
山下 裕玄⁵⁾、後藤田 卓志⁶⁾

Development of microrobots for medical applications

Ken Saito¹⁾, Minami Kaneko¹⁾, Fumio Uchikoba¹⁾, Katsutoshi Saeki²⁾, Shinyo Muto³⁾,
Kazuhiro Misaji⁴⁾, Hiroharu Yamashita⁵⁾, Takuji Gotoda⁶⁾,

Summary Recently, robotics has been applied to several medical applications. Microrobots, particularly, are expected to have medical applications, including medical examination, microsurgery, and drug delivery. However, miniaturizing the basic components of a microrobot, including actuators, sensors, controllers, and power sources, is difficult. The authors are studying microrobots using microfabrication technology. They had previously proposed a millimeter-sized insect-type microrobot with a silicon body, an integrated circuit controller, and a shape memory alloy actuator. The microrobot could perform walking motion without a computer program. This article reviews the mechanical and electrical components of our microrobot's system. Also, it introduces the medical–engineering collaboration project of microrobots for medical applications. This study evolves existing endoscopes using microfabrication technology.

Key words: Microrobot, Medical Application, Endoscopic Surgery, Colorectal Cancer, Low-Invasive Medical Tool

¹⁾ 日本大学理工学部精密機械工学科

²⁾ 日本大学理工学部電子工学科

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1

³⁾ 日本大学工学部機械工学科

〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1

⁴⁾ 日本大学生産工学部数理情報工学科

〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1

⁵⁾ 日本大学医学部外科学系消化器外科学分野

⁶⁾ 日本大学医学部内科学系消化器肝臓内科学分野

〒101-8309 東京都千代田区神田駿河台1-6

*連絡先（責任著者）：齊藤 健

日本大学理工学部精密機械工学科

Tel: +81-47-469-5497

E-mail: saito.ken18@nihon-u.ac.jp

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

²⁾ Department of Electronic Engineering, College of Science and Technology, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi-shi, Chiba 274-8501, Japan

³⁾ Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Nihon University, 1 Nakagawara, Tokusada, Tamuramachi, Koriyama, Fukushima 963-8642, Japan

⁴⁾ Department of Mathematical Information Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University, 1-2-1, Izumi-cho, Narashino-shi, Chiba 275-8575, Japan

⁵⁾ Division of Digestive Surgery, Department of Surgery, Nihon University School of Medicine, 1-6 Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8309, Japan

⁶⁾ Division of Gastroenterology and Hepatology, Department of Medicine, Nihon University School of Medicine, 1-6 Surugadai, Kanda, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8309, Japan

I. 緒言

世界の手術用ロボット市場は2025年には1兆3000億円規模に成長する見通しであるが、「da Vinci Surgical System: Intuitive Surgical」が実質的に独占状態である。しかし、da Vinciの数千件におよぶ特許が期限切れを迎え、国外で手術用ロボットの開発が盛んにおこなわれている。国内においても急速に進む高齢化や外科医不足などを背景に、医療用ロボットの開発が進められている。da Vinciは高価であるため、国内において価格競争力があるロボットの開発が進めば、現状で導入が困難な病院においても普及が進む潮流である。

国立がん研究センターによる2020年のがん統計予測において、罹患数が一番多いのは大腸がんであると発表された。現在、大腸がんの手術は腹腔鏡下手術でおこなわれるのが一般的で、腹壁に小孔のみを開けての手術であり患者負担も小さく回復も早い。一方、大腸ポリープ切除は、軟性内視鏡を用いた内視鏡手術がおこなわれ、リンパ節転移リスクのない早期大腸癌に対しては粘膜下層剥離術による切除を軟性内視鏡のみを用いて行われている。前述の通り、腹腔鏡下手術においてはda Vinciを用いたロボット支援下手術が導入され、2018年には直腸癌に2022年には結腸癌にも保険収載された。しかし、内視鏡手術においてロボットの活用はほとんど進められておらず、検査のみを対象としたカプセル内視鏡のみが実用化されている。

我々は、内視鏡に代わり大腸内を自由に移動する医療用マイクロロボットの実現を目指して研究を進めている。医療用マイクロロボットの実現は、検査の省力化および手術に対する医療従事者や患者の負担の軽減につながる。また、従来腹壁に穴をあける必要があった腹腔鏡外科手術も、複数のマイクロロボットを協働させることで、大腸内部から複雑な手術を実施できる可能性がある。患者に対するより低侵襲医療の実現は、医療分野の喫緊の課題である。

本稿では開発を進めている医療用マイクロロボットについて、着想の基となった昆虫型マイクロロボット¹⁾を説明するとともに、開発が必要な要素技術について説明する。

II. 昆虫型マイクロロボット

高機能な医療用マイクロロボットを内視鏡と同程度の外径で実現するには、ロボットを構成する要素技術の小型化が必須である。はじめにマイクロロボットの現状について簡単に紹介する。

現在、センサやアクチュエータ、マイクロコントローラ、電源を全て搭載したマイクロロボットは、数センチメートルで実現されている²⁾。数ミリメートルサイズのマイクロロボットも実現されているが、センサやマイクロコントローラ、電源は非搭載もしくは外部接続である^{3,4)}。昆虫に匹敵するマイクロロボットの実現には、多くのブレイクスルーが必要である。そこで我々は、生物を手本として工学的に応用するバイオミメティクス⁵⁾として、昆虫を模倣したマイクロロボットの開発を進めている^{6,7)}。

Fig. 1に、我々が微細加工技術を用いて開発した、ミリメートルサイズの昆虫型マイクロロボットを示す¹⁾。ロボットの上部には集積回路で実現したハードウェアニューラルネットワークを搭載した。昆虫型マイクロロボットの大きさは、 $9.0 \times 4.6 \times 6.4$ mm、重さは162 mgであった。アクチュエータとして利用した人工筋肉ワイヤ (Ti-Ni合金) は、トキ・コーポレーション株式会社製のBioMetal[®] Helix BMX50を用いた。人工筋肉ワイヤは、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、形状記憶合金に約75mA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0.2sから1.0s程度の通電加熱が必要である。人工筋肉ワイヤはリニアアクチュエータ

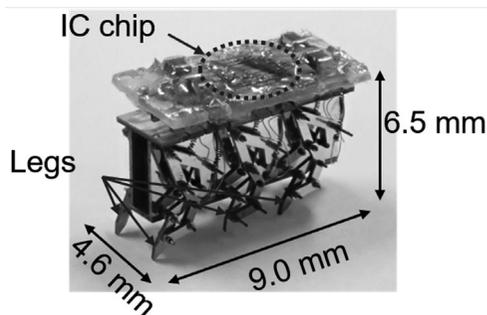
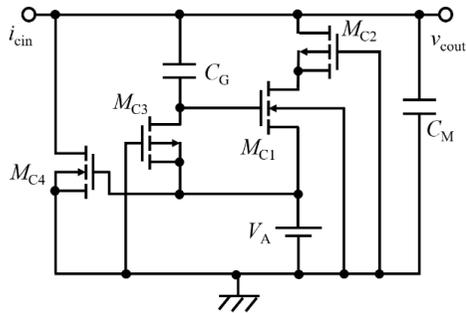


Fig. 1 昆虫型マイクロロボット

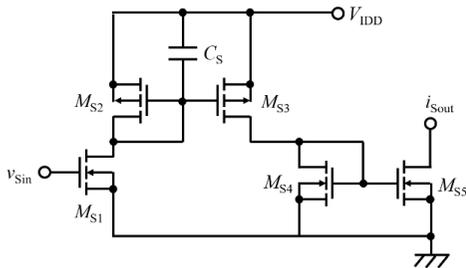
であり、リンク機構を利用して足踏み動作に変換するために機械的な工夫を行った。人工筋肉ワイヤおよび固定ピン、軸以外は全てシリコンウェハに微細加工技術を施して作製しているため、将来的にはシリコンデバイスを筐体の一部としてロボットに直接実装可能である（昆虫型マイクロロボットの詳細は文献⁹⁾に記載している）。

ハードウェアニューラルネットワークの構成要素であるニューロンモデルは、生物のニューロンと同様に、時空間加算特性、閾値、不応期を有し、電気的な振動パターンの生成が可能なパルス形ハードウェアニューロンモデルを使用した。パルス形ハードウェアニューロンモデルは回路構成が簡単であり、集積回路技術を用いて容易に実装可能である。

Fig. 2にパルス形ハードウェアニューロンモデルの回路図を示す⁵⁾。図中(a)は細胞体モデル、(b)は抑制性シナプスモデルである。ハードウェアニューラルネットワークはパルス形ハード



(a) 細胞体モデル



(b) 抑制性シナプスモデル

Fig. 2 パルス形ハードウェアニューロンモデル (参考文献5) の図を改変)

ウェアニューロンモデルをネットワーク化した。集積回路の設計試作には、最小幅0.35 μm 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。集積回路で実現したハードウェアニューラルネットワークを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ロボットの歩行動作が生成可能である（ハードウェアニューラルネットワークの詳細は文献^{6,7,9)}に記載している）。

日本大学医学部との研究打ち合わせで、昆虫型マイクロロボットは消化器系に対して十分に小型であり、医療用途に使用可能であるとのアドバイスを基に医療用マイクロロボットについて着想を得た。マイクロロボットの開発で培った微細加工技術は、ロボットに必要な要素技術の小型化に有効である。また、集積回路技術を用いて生物の視覚神経系や運動神経系を模倣するハードウェアニューラルネットワークの開発は、将来的にサイズの的にマイクロロボットに搭載が困難な人工知能システムに代わる制御システムの開発につながる可能性がある。微細加工技術および集積回路技術を組み合わせることで、従来にない医療用マイクロロボットの実現を目指す。

Ⅲ. 医療用マイクロロボット

大腸内を自由に移動する医療用マイクロロボットの実現には、新たな要素技術の設計および開発が必要である。医療用マイクロロボットはチタン合金製であり、直径2cm程度のサイズで脚部を折りたたみタマゴ型になることで、少ない抵抗で大腸内に挿入が可能である (Fig. 3)。医療用マイクロロボットは大腸内に挿入後に、脚部を展開し自由に移動しながら大腸内腔の検査を実施する (Fig. 4)。一般的な大腸内の内視鏡検査では、最深部まで挿入したのちに炭酸ガスをもちいて腸管を膨らませ、引き抜きながら検査を実施する。しかし、操作には熟練が必要である。大腸内を自由に移動可能であれば、目視検査にて一度通過した後であっても患部に戻

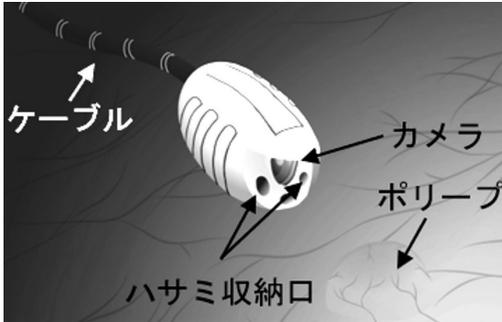


Fig. 3 医療用マイクロロボット (挿入時)



Fig. 4 医療用マイクロロボット (展開時)

りポリープの切除が可能であり、医療従事者や患者の負担の削減につながる。したがって、医療用マイクロロボットにはハサミやスネア等の医療用器具の搭載を計画し、ポリープの切除などに対応する。さらに、複数の医療用マイクロロボットを挿入することにより協働させ、従来開腹手術や腹腔鏡外科手術で行っていた複雑な手術にも対応可能である。医療用マイクロロボットの開発に必要な要素技術を以下に示す。

- (1) 医療用マイクロロボットの筐体デザインおよび機構設計
- (2) 脚部等の可動部の設計および試作
- (3) カメラ、ライト、アクチュエータなどのデバイス開発
- (4) ハサミ、鉗子、スネアなどの医療器具の開発
- (5) プロトタイプロボットの試作
- (6) ROS2をもちいた制御システムの開発
- (7) HNNICの開発

既存技術で対応可能な要素技術については企業との連携を深め、ロボットの開発を進める予定である。

IV. まとめ

本稿では、開発を進めている医療用マイクロロボットについて、まず着想の基となった昆虫型マイクロロボットについて説明した。また、医療用マイクロロボットの開発に必要な要素技術やイメージ図について説明した。

現在、筐体デザインおよび機構設計を実施している状況である。

謝辞

本稿の研究は、令和2年度日本大学学術研究助成金 総合研究の助成を受けたものです。また、本稿の研究の一部は、JSPS科研費 JP18K04060、日本大学理工学研究所先導研究推進助成金、および令和4年度日本大学特別研究の助成を受けたものです。本研究昆虫型ロボットの作製は、日本大学理工学研究所マイクロ機能デバイス研究センターの支援を受け、学生の協力を得ました。学生諸君に感謝の意を表します。本研究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、シノプシス株式会社、日本ケイデンス株式会社、メンター株式会社の協力で行われたものです。本チップ試作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オンセミコンダクター新潟(株)、凸版印刷(株)の協力で行われたものです。

The authors would like to thank Enago (www.enago.jp) for the English language review.

本論文内容に関連する著者らの利益相反：なし

文献

- 1) Kawamura S, Tanaka D, Tanaka T, Noguchi D, Hayakawa Y, Kaneko M, Saito K, Uchikoba F: Neural networks IC controlled multi-legged walking MEMS robot with independent leg mechanism, *Artificial Life and Robotics*, Vol.23, Issue 3, pp.380-386. 2018
- 2) Hoover M.A., Steltz E., and Fearing S.R: RoACH: An autonomous 2.4 g crawling hexapod robot. In *Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, France, 22–26 September, pp. 26–33, 2008.
- 3) Wood R.J., Finio B., Karpelson M., Ma K., Pérez-Arancibia N.O., Sreetharan P.S., Tanaka H., and

- Whitney J.P.: Progress on "Pico" Air Vehicles. *The International Journal of Robotics* 31(11), pp. 1292–1302, 2012.
- 4) Vogtmann D., Pierre R.S., and Bergbreiter S.: A 25 MG MAGNETICALLY ACTUATED MICROROBOT WALKING AT > 5 BODY LENGTHS/SEC. *Proc. of the IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Las Vegas, NV, USA*, pp. 179–182, 2017
- 5) Cho K., and Wood R.: *Biomimetic robots*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, Chap. 23, 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) Ken Saito, Masaya Ohara, Mizuki Abe, Minami Kaneko and Fumio Uchikoba: Gait Generation of Multilegged Robots by using Hardware Artificial Neural Networks, *Advanced Applications for Artificial Neural Networks, INTEC*, pp. 29-50. (2018)
- 8) Saito K, Contreras D. S., Takeshiro Y, Okamoto Y, Nakata Y, Tanaka T, Kawamura S, Kaneko M, Uchikoba F, Mita Y, and Pister K. S. J.: Study on Silicon Device of Microrobot System for Heterogeneous Integration, *Proc. of 2018 International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC2018)* pp.33-37. (2018)
- 9) Kurosawa M, Sasaki T, Usami Y, Kato S, Sakaki A, Takei Y, Kaneko M, Uchikoba F, and Saito K: Neural networks integrated circuit with switchable gait pattern for insect-type microrobot, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 26, Issue 3, pp. 297-303. 2021