

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 21 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(c)

研究期間：2008 年度 ～ 2012 年度

課題番号：20500397

研究課題名（和文）血管内移動を目的にした自走カテーテルの研究

研究課題名（英文）Study on Self-propelled Catheter Aimed at Moving in Blood Vessels

研究代表者

中里 裕一 (NAKAZATO YUICHI)

日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：90265372

研究成果の概要（和文）：

本研究は、薬液や造影剤の注入、血管の拡張あるいは閉塞などを行うカテーテル手術を自動的に行うシステムの開発を目的としている。特にカテーテルの挿入作業は術者の技能や経験に依存するため、自走式のカテーテルの開発を行った。生理食塩水の圧送・吸収による複数の節に分かれたバルーンの周期的な膨張・収縮による蠕動運動を利用した自走式のカテーテルの開発をした。この結果を基に、移動メカニズムのモデル構築の検証も行った。

研究成果の概要（英文）：

A catheter used by a treatment and a diagnosis of circulatory organ system needs mastery of skills of a operator for the insertion to the body of a patient. This study focused on the point and is aimed for movement in a blood vessel and development of the catheter which can do various operation automatically. This mechanism uses peristaltic movement by the expansion / the shrinkage of a period of plural balloons by pressure filling / removing of a saline. Then, in order to create a detailed design plan, the various experiments for grasping the characteristic of a balloon required to build an expression model are conducted. Moreover, in this study, in order to verify the detailed mechanism at the time of a run, an expression model is built as an equation of motion. From these results, a simulation is performed using numerical analysis software.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
2012 年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用生体工学・生体材料学

キーワード：機構開発,水圧,能動カテーテル,蠕動運動,血管内移動

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初さまざまな研究者によって、管状の円筒内を移動する走行機械の開発が行われていた。ガス管や水道管の亀裂や繋ぎ目における断裂の検査など、工業目的に開発されているものが多いが、腸内や血管内の走

行を目的に開発される医療分野への応用を掲げた研究もいくつか散見された。前者の管口径は十数 cm から数 cm で、後者に比較して口径が大きく、管内壁が円弧状に均一・平坦であるため、車輪やクローラを用いた移動機構が採用されることが多った。後者の管口径

は十数mmから数mm程度で、毛細血管にいたっては μm 単位であることもある。前者に比較して口径が非常に小さく、管内壁は分岐や突起・弁が存在し、起伏に富んでいる。口径は不均一で柔軟性があり、粘性が高いため、車輪やクローラを用いた移動機構には向かない。血管内の走行を目的に開発される他研究では、楔形状を移動体前後に設け、移動体自体が伸縮することで楔形状の抵抗の小さい方（鋭角方向）への移動を可能にしているもの、また移動体を圧電素子や形状記憶合金などで伸縮駆動し、進行方向にのみ高加速度で駆動することでインチワーム推進させる機構などが提案されていた。しかしながら、楔形状は管口径の変化に敏感で、管形状の変化に対応しづらく、また駆動形態によっては血管内壁を傷つける可能性がある。さらに圧電素子や形状記憶合金を用いたインチワーム推進は、通電時における発熱や微弱電流のリークが懸念されており、生体への使用に懸念を示す関係者も多く、決定的な手法が開発されていなかった。

2. 研究の目的

生物界における移動機構に注目すると、ミミズや一部の虫、微生物は粘膜や微細な毛などの摩擦を利用して、巧みに移動を実現している。研究者らは特にミミズが行うような蠕動運動を機械的に再現する。本研究では水圧、特に生理食塩水を作動流体に用いて、膨張・収縮を繰り返す蠕動運動によって内径数mmの血管内の移動が可能な微小移動機構を提案する。生理食塩水であれば万が一の事故による破損によって漏水が起きても、問題が少ない。構成部材は生ゴムとシリコンによってのみ構成され、生体への影響は特に問題にならないと考えられる。また、ミミズや線虫などに見られる蠕動運動は、形状変化や重心移動を使った移動形態で、作動流体により体節が膨張・収縮・伸展・縮小を繰り返すだけで移動が行えるため、微小な血管内壁を傷つけずに移動が可能である。材質や駆動方式から、微細な血管内に挿入でき、安全で、確実な駆動方法と考えられる。もし、この移動機構をカテーテルと組み合わせれば、患部に自ら到達することが可能な能動型のカテーテルが実現できる。

最終的には動物実験などを行い、生体において実際に内径数mmの血管内の駆動ができることを確認する予定であったが、生体実験は動物保護等の観点から実施が難しく、再現性も乏しいため、人間の血管を精巧に再現した「血管シミュレータ」を使った検証を実施することとした。ついで、これら知見から得られた結果を通して、数学モデルの同定、パラメータの絞込み、最適化などを行い、最終的な機構の開発を行うこととした。

3. 研究の方法

本研究では、外部にピストン状の水圧発生源を有し、ピストンの往復運動により、駆動部本体に作動流体を注入・吸引することによってその胴体の長さを変え、蠕動運動を行わせる。研究当初、研究者らはすでに進行方向に直列に並んだ2つの体節から構成された蠕動運動型の血管内微小移動機構の開発に成功していた。各体節は生体親和性の高い生ゴムもしくはシリコンによってのみ構成され、生体内には作動流体である生理食塩水と生ゴム・シリコンのみが挿入される。図1に示すように、この運動は2つの体節のうち、後方にある体節に作動流体を注入し縦方向に伸展させつつ、周方向にも膨らませることで、体節を長く太くする。次に前方にあるもう一方の体節にも作動流体を注入し、同様に体節を長く太くする。この際、後方にある太くなった体節部が管内壁と接触し摩擦によって静止状態となり、前方にある体節を前に押し出す。ついで後方にある体節から作動流体を吸引し、体節を収縮させることで体節は細く短くなる。この際、太くなった前方体節部が管内壁と接触し摩擦によって静止状態となっているため、細くなった後方体節部は管内壁から多少離れ摩擦が小さくなるため、後ろの体節は前へ引き寄せられる。この一連の動作を繰り返すことで、前方から後方へ伸縮波が伝播し、2節による蠕動運動が行われ移動する。

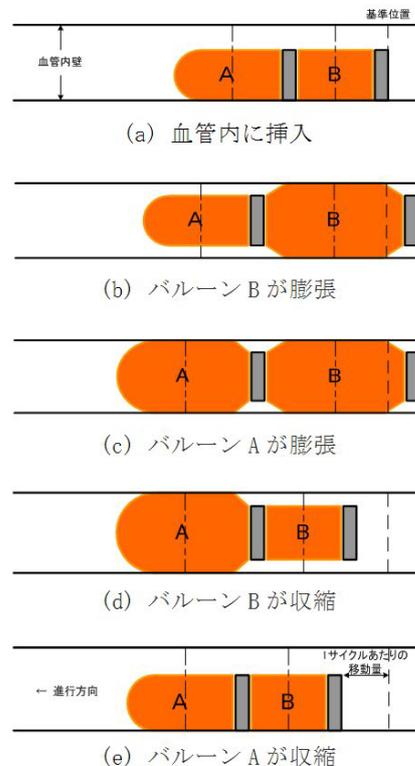


図1 バルーンを備えた移動機構

しかしながら、本機構では生ゴムの膨張によって得られる摩擦力によってのみ駆動するため、2つの体節のみの駆動では、カテーテルを患部まで到達させる駆動トルクが得られにくい。そこで、ミミズのように多数の体節を持った駆動体を開発し、カテーテルをこの駆動体で包囲することで、患部までの区間全体に体節が接触する機構を開発できれば、前記問題点が氷解する。しかし、複数の体節に、作動流体を別々に注入・吸引する機構を取り付けることは、機構の複雑化を招くだけで懸念ではない。図2に示すように研究者らは体節間を隔てる角膜に適当な開口部を設け、駆動体最後端部に作動流体を注入することで、後端部に近い体節から順次長く太くし、最先端部まで注入が完了した時点で、今度は最後端部の体節から作動流体を吸入すると、体節は後端部から順次短く細くなるため、後端部の体節より管内壁から離れ摩擦が減少し、前へ引き寄せられる。この一連の動作を繰り返すことで、2節の場合と同様に、前方から後方へ伸縮波が伝播し、多数の節よる蠕動運動が行われると着想した。研究当初すでに2体節のみによる駆動実験が済んでいることから、理論的には本駆動方法が可能であることが予想された。研究では、実際に上記着想に沿った機構を開発するとともに、各駆動条件の同定、開口部形状の最適化などの解析を行い、最終的には人間の血管組織の弾性特性や摩擦特性を生体に忠実に再現した特殊シリコン製の血管モデルを利用した実機試験を行った。

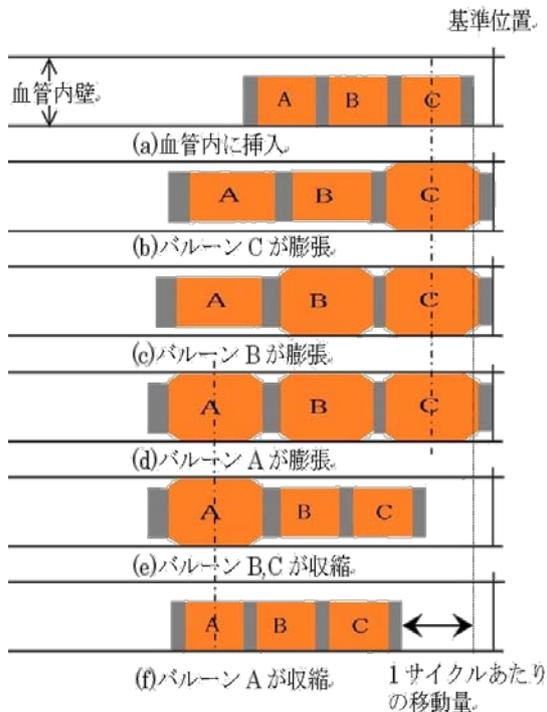


図2 多数(3以上)のバルーンを備えた移動機構

4. 研究成果

(1) 血管内の移動に適した機構の作製

図3に示すような移動機構の製作を行った。この機構は節の一つ一つが、閉塞した血管の拡張のために用いられている従来の一般的なバルーンカテーテルと類似の構造を有し、血管内壁を傷つけるような硬さや形状を持った部品、および製作が困難な複雑な構造などが存在しないことが利点である。また、推進のための動力に熱や電気などのエネルギーを直接用いていないため、これらが生体に悪影響を及ぼすおそれがない。バルーンにおける液体(生理食塩水)の流入出は、衛生面を考慮し、使い捨てを前提とした医療用のシリンジによって行う。このシリンジを任意の速度およびストロークで動かすために、モータを利用した電動リニアスライダを組み合わせた駆動システムを自作した。外観を図4に示す。

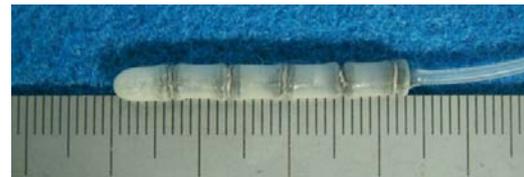
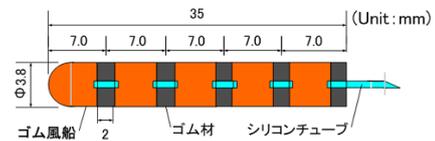


図3 能動カテーテル外観

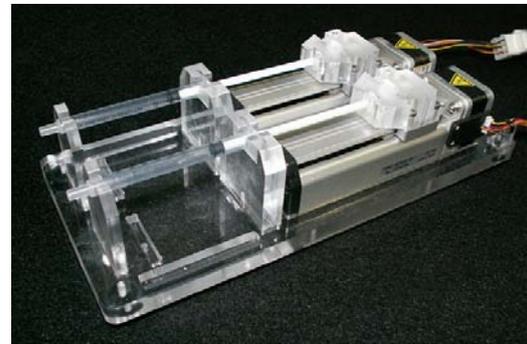


図4 流体圧送・吸引アクチュエータ

(2) 制御システム・駆動結果

前項で述べた能動カテーテルにリニアスライダを取り付けた一連の装置に、制御用のパーソナルコンピュータを介して、リニアスライダの駆動速度やストローク量、位置の制御を行い、能動カテーテルの駆動実験を行った。実験に用いた管は動脈内を想定し、内径6[mm]、外径8[mm]のシリコンチューブを使用した。模擬血液は、ドップラ疑似血液テスト材(モデル707G)を使用して測定した。図5にシステム全体を示す。能動カテーテルに圧送する食塩水の水量は0.9[m1]とした。この値

は、カテーテルが破損しない範囲で最大の膨張量が確保できる値であることを実験的に確認している。移動速度は、単位当たりの吐出量を 2[ml/s]から 4[ml/s]まで変化させて計測した。カテーテルの水平移動を走行制御装置にて行ない、管内を 30[mm]走行させ、走行にかかった時間を測定する。

図 6 に駆動結果を示す。走行実験の結果、食塩水を圧送する速度の値が大きいほど、カテーテルの移動速度が大きくなることが判明した。

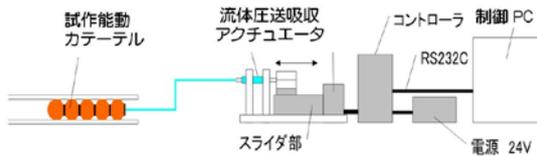


図 5 能動カテーテルシステム全体

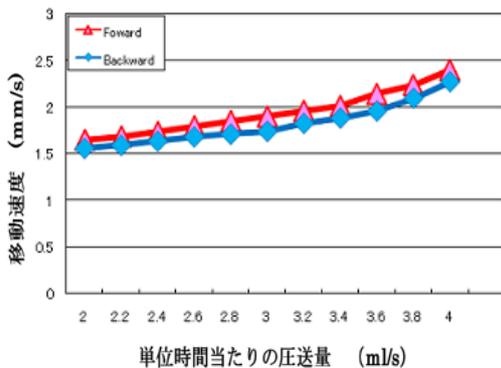


図 6 カテーテル駆動実験結果

(3) 分岐への対応・屈曲機構の開発

実際のヒトの血管は直線状であることはまれで、凹凸や分岐を含む複雑な形状を呈している。本研究でも実際の使用を考え、分岐などに対応可能な屈曲機構を開発した。図 7 に開発した屈曲機構の原理図および外観を示す。

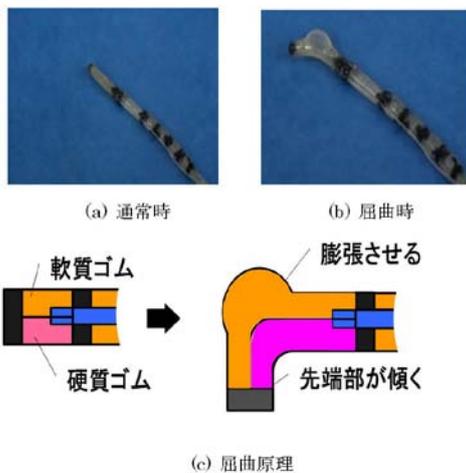


図 7 屈曲機構原理およびお駆動時外観

能動カテーテル先端部には図 7 の原理図に示すような弾性係数の異なる軟質ゴムと硬質ゴムを採用し、圧送流体の水圧差を利用することで屈曲部の一部を膨張させ、1 自由度の屈曲動作を可能にする機構を提案した。

実際にこの機構に水圧を加え、屈曲角と圧送量の関係を実験的に求めた。図 8 に実験結果を示す。図より、圧送量と屈曲角はほぼ比例の関係を示し、最大 86[°]の屈曲を得ることが出来た。

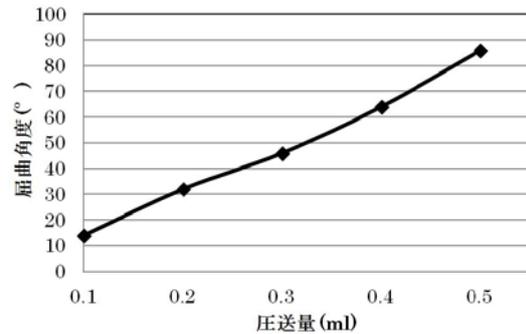


図 8 屈曲機構における圧送量と屈曲角の関係

(4) 数学モデルの同定

本研究で開発した能動カテーテルについて走行時における詳細なメカニズムを検証するため、数式モデルを構築し、運動方程式を作成したうえで数値解析ソフトウェア (MathWorks_MATLAB7.0.4) を用いてシミュレーションを行う。能動カテーテルの運動モデルを構築するため、能動カテーテルの運動モデルを質量 m_i の関節とバネ定数 K のバネと粘性係数 D のダンパで表現する。図 9 に能動カテーテルの運動モデルを示す。

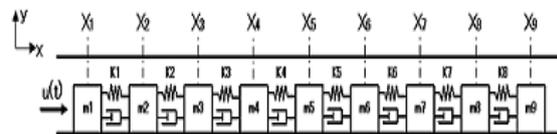


図 9 能動カテーテルの運動モデル

能動カテーテルの運動方程式をニュートンの運動方程式によって導出する。ここで、 x は軸方向の変位、 y は鉛直方向の変位、 m_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) はカテーテルの質量、 K_i はバネ定数、 D_i は粘性係数、 $u(t)$ はカテーテルの圧送量、 g は重力加速度、 c は単位時間当たりの体積増加量、 ρ は密度、 t は時間を表す。能動カテーテルの運動方程式をニュートンの運動方程式によって導出すると、質量 m_1 の運動方程式は

$$m_1 \frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} = -K_1 \{x_1(t) - x_2(t)\} - D_1 \frac{d\{x_1(t) - x_2(t)\}}{dt} - u(t) - f_1(v_1)$$

質量 m_i ($i=2, 3, \dots, 8$) の運動方程式は

$$m_i \frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} = K_{i-1} \{x_{i-1}(t) - x_i(t)\} - K_i \{x_i(t) - x_{i+1}(t)\} +$$

$$D_{i-1} \frac{d\{x_i(t) - x_{i+1}(t)\}}{dt} + D_i \frac{d\{x_i(t) - x_{i-1}(t)\}}{dt} - f_i(v_i)$$

質量 m_9 の運動方程式は

$$m_9 \frac{d^2 x_9(t)}{dt^2} = K_8 \{x_8(t) - x_9(t)\} + D_8 \frac{d\{x_8(t) - x_9(t)\}}{dt} - f_9(v_9)$$

となる。各式をラプラス変換して伝達関数を求めると

$$G(s) = \frac{X_1(s)}{F(s)} = \frac{\{D_1 s + K_1\} X_2 + 1 - F_{\beta}(v_1)}{M_1 s^2 + D_1 s + K_1}$$

を得る。ここで、各パラメータを $M=0.9$ [g]、 $D=0.005$ [Ns/m]、 $K=0.47$ [N/m] とした時のシミュレーション結果を図 10 に示す。

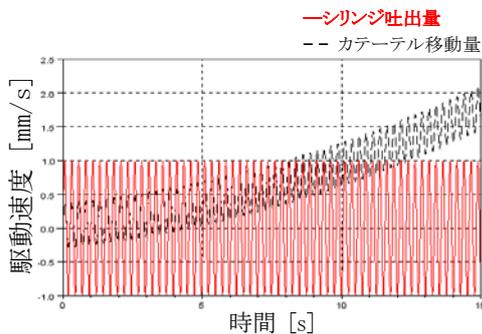


図 10 シミュレーション結果

グラフの実線はシリンジの送り量 [mm]、破線はカテーテルの変位 [mm] を示す。入力 25 [rad/s] 時にカテーテルの変位の振幅は、 0.5 [mm] であった。カテーテルの移動速度は 0.2 [mm/s] である。 25 [rad/s] は実験で使用したシリンジにおいて 4 [ml/s] の圧送量に相当する。図 10 からカテーテルの移動速度は前進において平均 2.4 [mm/s] であることから、実験データと比較して平均変位量の値はほぼ一致することが判明した。

(5) 本システムの評価

(1)～(4)の研究結果より、生理食塩水を作動流体に用い、ミミズが行うような膨張・収縮を繰り返す蠕動運動を 3 節以上の多数の節を持った機構において再現し、内径数 mm の血管内の移動が可能な微小移動機構を実現し、実験およびシミュレーションよりその有効性の確認を行った。前進の最高移動速度が 2.4 mm/s、後退の移動速度が 2.3 mm/s であった。本機構の評価として①人間の血管を精巧に再現した「血管シミュレータ」を使った検証、および②血流環境下での移動速度測定を実施した。

①「血管シミュレータ」を使った検証

血管シミュレータとしてファイナ・バイオメディカル有限会社の「テーラーメイド超精密手術シミュレータ“EVE”」を用いた。本

機は本臓器モデルとして世界の病院や医療機器メーカーに導入され、日本脳神経外科分野の専門医師試験に技術評価媒体として採択されている、など信頼性が高い。しかしながら、上行大動脈(内径約 32mm)、下行大動脈(内径約 24mm)、総頸動脈(内径約 7.3mm)、細動脈(内径約 0.2mm)、と「動脈」と言っても大きさのレンジが 100 倍以上あり、本システムでは全てに対応できない。そのため、本研究では比較的広範囲に亘って存在する内径 8mm 程度の動脈(鎖骨下動脈、総頸動脈など)付近における駆動実験を行った。実験の様子を図 11 に示す。



図 11 血管シミュレータにおける駆動実験

実験では、模擬血液としてドップラ疑似血液テスト材(モデル 707G)を使用した。血管の部位や方向などによって駆動速度が大幅に変化したものの、提案システムでの前進後退動作を確認し、カメラ画像解析により速度解析を行った結果、最大 1.7 [mm/s] での移動を実現した。

②血流環境下での移動速度測定

学会発表などの場において、関連する医師から、血流環境下での移動速度測定の重要性が指摘されたため、上記疑似血液を実際の血流 (60 cm/s) と同じ流速を与え、本システムに適用して実験を行った。実験結果を図 12 に示す。

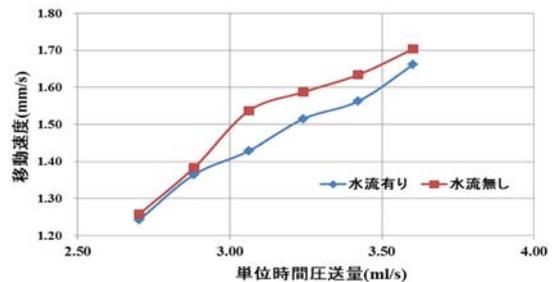


図 12 血流が移動速度に与える影響

実験は①で最大速度が得られた区間・条件で行い、血流ありと無しでの比較を行った。実験の結果、カテーテルは血流に流されることなく最大 1.66 mm/s の移動速度で前進した。水流なしでの移動速度とほぼ同様の移動が行えることが確認できた。

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 2 件)

- ① Yuichi NAKAZATO, Yukihiro SONOBE, Shigeki TOYAMA, Development of an In-pipe Micro Mobile Robot using Peristalsis Motion Driven by Hydraulic Pressure, *Micromechanics and Microactuators*, (Mechanisms and Machine Science, Vol. 2), Springer, 査読有, 2012, pp. 23-30.

http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-2721-2_3

- ② Yuichi NAKAZATO, Yukihiro SONOBE, Shigeki TOYAMA, Development of an In-pipe Micro Mobile Robot using Peristalsis Motion, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Springer, 査読有, Vol. 24, No. 1, January (2010), pp. 51-54.

DOI:10.1007/s12206-009-1174-x

[学会発表] (計 13 件)

- ① 野澤拓哉、中里裕一、能動カテーテルの研究、日本機械学会 2012 年度年次大会講演論文集、2012 年 9 月 12 日、金沢大学(石川県)

- ② 野澤拓哉、高橋良文、中里裕一、遠山茂樹、能動カテーテルの研究、日本機械学会平成 24 年度ロボティクスメカトロニクス講演会講演論文集、2012 年 5 月 29 日、アクトシティ浜松(静岡県)

- ③ 中里裕一、ぜん動運動型能動カテーテルの研究、2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集、2011 年 9 月 21 日、金沢大学(石川県)

- ④ 野澤拓哉、加藤優太、中里裕一、遠山茂樹、能動カテーテルの研究-屈曲機構の研究-、日本機械学会平成 23 年度ロボティクスメカトロニクス講演会講演論文集、2011 年 5 月 27 日、岡山コンベンションセンター(岡山県)

- ⑤ 大音師真澄、中里裕一、遠山茂樹、加藤優太、野澤拓哉、能動カテーテルの力学的基礎研究、2010 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集、2010 年 9 月 28 日、名古屋大学(愛知県)

- ⑥ 加藤 優太、中里裕一、血管内の移動を目的とした管内走行マイクロロボットの研究・開発 -血管径のレンジ差に対応した移動機構の開発-、生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2010 講演論文集、2010 年 9 月 19 日、大阪大学基礎工学部棟(大阪府)

- ⑦ Yuichi NAKAZATO, Yukihiro SONOBE, Shigeki TOYAMA, DEVELOPMENT of IN-PIPE MICRO MOBILE ROBOT USING PERISTALSIS MOTION DRIVEN by HYDRAULIC PRESSURE, Proceedings of MAMM (Workshop on Microactuators and Micromechanisms) 2010, International Federation for the

Promotion of Mechanism and Machine Science, May 28 2010, Aachen(Germany)

- ⑧ 大音師真澄、中里裕一、遠山茂樹、ぜん動運動を利用した能動カテーテルに関する研究-血管移動時における力学的解析-、日本機械学会福祉工学シンポジウム講演論文集、2009 年 9 月 25 日、高知工科大学(高知県)

- ⑨ Yuichi NAKAZATO, Yukihiro SONOBE, Shigeki TOYAMA, Development of In-pipe Micro Mobile Robot using Peristalsis Motion, Proc. of The 3rd International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, June 6 2009, Ramada Plaza Jeju Hotel(韓国)

- ⑩ 園部元裕、中里裕一、遠山茂樹、蠕動運動による血管内移動マイクロロボットの研究、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009 講演論文集、2009 年 5 月 25 日、福岡国際会議場(福岡県)

- ⑪ 園部元裕、中里裕一、遠山茂樹、ぜん動運動を利用した自走カテーテルの開発、日本機械学会福祉工学シンポジウム 2008 年度講演会講演論文集、2008 年 9 月 17 日、山口大学工学部(山口県)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://leo.nit.ac.jp/~nakazato/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中里 裕一 (NAKAZATO YUICHI)

日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：90265372

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

遠山 茂樹 (TOYAMA SHIGEKI)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究

院・教授

研究者番号：20143381