

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—

Study on In-pipe Micro Robot Moving in the Blood Vessel —Development of the Movement Mechanism Corresponding to the Difference of the Blood Vessel Diameter—

○ 加藤 優太 (日本工大) 正 中里 裕一 (日本工大)

Yuta KATO, Nippon Inst. Tech., Gakuidai4-1, Miyashiro-machi, Minamisaitama-gun, Saitama-ken
Yuichi NAKAZATO, Nippon Inst. Tech.

The patient's load is requested from reduction Minimally Invasion on a clinical site.

This RTD has aimed at the development of the In-pipe Micro Robot thought that the examination in the blood vessel and the removal of the tumor, etc. are useful.

As the drive system for the robot, the expansion of the balloon by the force feed of the physiologic saline and the peristalsis movement mechanism using shrinkage were designed and produced.

In the experiment that used the prototype, it was confirmed that running by a straight line route of hard pipe made of the acrylic resin horizontally set up in air, a straight line route of Y character divergence route and soft pipe made of silicon rubber, and curve routes was possible (6mm both of pipe diameter).

Key Words: In-pipe Robot, Micro Robot, Peristalsis, Blood Vessel, Intravascular, Minimally Invasion

1. はじめに

日本人の三大死亡原因は悪性新生物(がん)、心疾患、脳血管疾患などの生活習慣病である。このうち、心疾患と脳血管疾患の死因は、血管が狭窄して発症する循環器疾患であり、これらの年間死亡者数はおよそ30万人にもなる。治療には低侵襲性のカテーテルが多用され、血管内手術を行う。

侵襲性とは、生体を傷つけること全てを指す。手術において病変部の切開部分が大きいと入院期間が長くなり、治療費が高くなるなど患者の負担が増す。そのため、患者の負担を軽減するという目的から臨床行為において低侵襲性が求められる。低侵襲治療において一般的なのはカテーテル治療であり、他には、マイクロスコーピックサージェリーや内視鏡手術などがある。

カテーテル治療とは、カテーテルと呼ばれる細管を用いた、血管内における治療行為である。これは、患者の体表に創ったわずかな傷からカテーテルを血管内へ挿入し、病変部での投薬や血管の拡張・閉塞などの治療を行う。これにより、血栓の溶解、血流の確保、出血の停止、悪性腫瘍への選択的な血流の遮断などが可能である。しかしながら、このカテーテル挿入の作業は熟練を要し、成功の可否は術者の技術や経験に依存する。この治療法は治療目的に応じて複数あり、代表的なものでは、血管拡張療法の一つとして冠動脈血栓を治療する経皮的冠動脈形成術(PCI)などがある。⁽²⁾

本研究では術者の技能や経験に頼るところが大きい受動的なカテーテルではなく、術者の技術や経験に頼る事なく、患部までの移動や医療行為を自動で行い、術者および患者双方の負担が軽減できる能動的なカテーテルへの応用を目的とした管内走行マイクロロボットの開発を行う。

能動的カテーテルは、管の内部を移動するという点から管内走行ロボット(in-pipe robot)に、そして小型であるという点からマイクロロボット(micro robot)に分類される。管内走行ロボットの研究は多く行われていても、血管内を走行するマイクロロボットの研究は、それほど多く行われていないのが現状である。⁽¹⁾

本研究では、従来の移動機構を改良し、血管径のレンジ差に対応した移動機構の開発を行う。

2. 管内走行マイクロロボットの移動機構

能動的カテーテルとしての管内走行マイクロロボットにおける移動機構には、次のような制約がある。

- (1) 小型であるため、回転機構など複雑なものを高精度に製作することが難しい。また、寸法効果により回転軸-軸受間の摩擦が大きく影響する。
- (2) 血管内で使用するため、血管内壁を傷つけるような機構は用いることができない。また、ひだや弁といった起伏や粘液(血液)などが移動の障害として存在する。

ここで、生物界における移動機構に注目すると、上記の問題を一部の昆虫や微生物は粘膜や細毛などの摩擦を利用して解決している。そこで、ミミズの移動機構であるぜん動運動の動作原理を応用し、これを機械的に再現する移動機構として、ゴム製バルーンによる膨張・収縮方式を採用した。

バルーンによるぜん動運動を採用する利点を以下に述べる。

- (1) 車輪などの推進機構と比較して血管内を傷つけにくい。
- (2) 生理食塩水を作動流体として用いているため、血管での破損による影響が少ない。
- (3) 治療のためにアクチュエータを付加せずとも、風船治療やステント治療に応用できる。

以上のことから、ロボット表面と管内壁との摩擦を利用する移動を考案した。動作の様子を模式的に表したものをFig. 1に示す。

この機構は、流体の圧送により2つのバルーンを交互に膨張・収縮させることで生じるぜん動運動を利用するものである。膨張時には大きな面積で管内壁と接触するため、移動や保持に必要な摩擦力が充分確保できるものと考えられる。

本研究で開発するロボットは血管内を走行できる管内走行マイクロロボットを目指している。このため、ロボットの直径を血管内壁の直径より小さくしなければならない。しかし、人間の冠動脈血管の直径は、6mmと非常に細い。そのため、ロボット本体にエネルギー源やアクチュエータを全て搭載することは困難と判断される。そこで管状に細長く、駆動源を外部から供給して自走するロボットの開発を行なった。この方式の採用により、ガイドワイヤーがなくてもロボットの自走が可能となる。

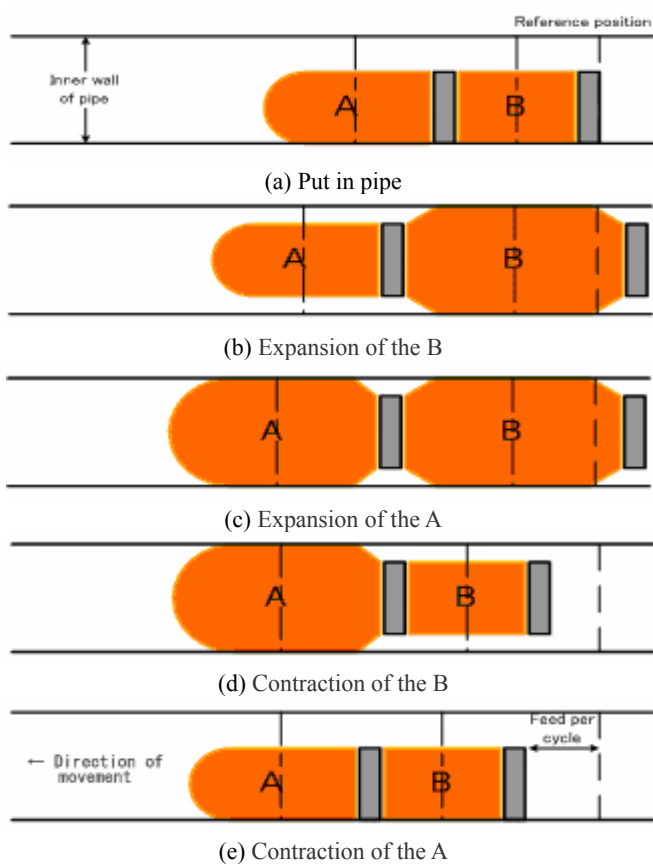


Fig.1 Transferring mechanism

3. 設計・開発

3.1 設計

開発したロボットは、能動カテーテルへの応用を目的としており、安全性として生体に対する電流作用を考慮にいたした設計を行っていく必要がある。特に、心臓を対象とした治療を行う場合、 $100\mu A$ の微弱電流でもマイクロショックと呼ばれる心室細動を引き起こす。

そこで、ロボットの駆動源には生体の適合性を考慮し、生理的食塩水を採用した。これにより、血管内にてロボットが破損した場合でも患者へ及ぼす影響を最小限に抑えられる。

3.2 流体圧送機構

食塩水の圧送・吸取をする機構として、ステッピングモータとボールネジで構成される電動スライダに注射器を組み合わせたアクチュエータを考案、製作した。これを2系統並列に配置したものの外観を Fig.2 に示す。ロボットはシリコンゴムチューブ(内径 0.1mm, 外形 2mm, 長さ 1m)を介してアクチュエータに接続され駆動力を得る。

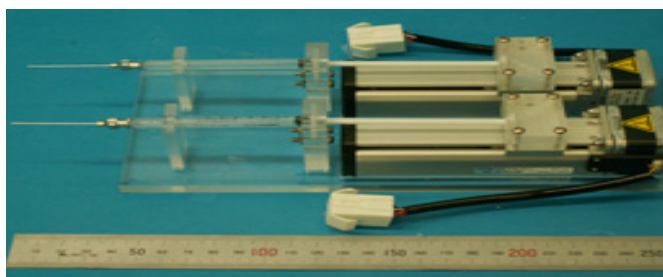


Fig.2 Actuator

3.3 ロボットの構造

ロボットは、推進機構を備えるものは Fig.3 に示すような内部構造を持ち、各節の膨張・収縮をそれぞれ別のアクチュエータによって操作する。このタイミングを適切に制御することで、前進だけでなく後退することも可能である。実際に製作したロボットの外観を Fig.4 に示す。

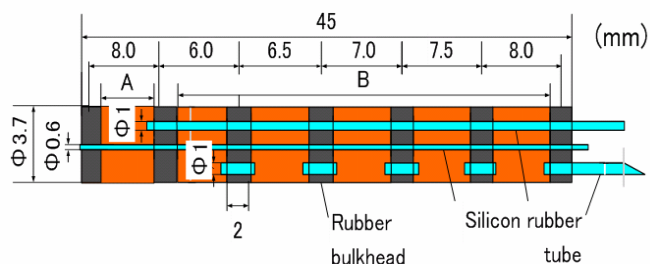


Fig.3 Internal structure

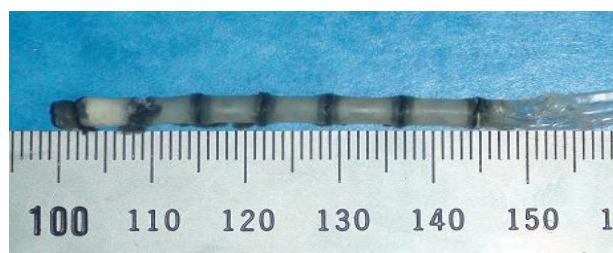


Fig.4 Appearance of the Robot

4. 走行実験

管内走行マイクロロボットについて走行制御装置を使用した前進移動速度を求めた。圧送する食塩水の水量は 0.9ml とした。この値は、ロボット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。吐出量は $9 \times 10^{-7} m^3/s$ から $9 \times 10^{-8} m^3/s$ ずつ減らして、カテーテルに圧送する生理食塩水の単位時間あたりの圧送量を 9 段階に変化させ計測した。実験に用いた管は動脈内を想定し、内径 6mm, 外径 8mm のシリコンチューブを使用した。

ロボットの水平移動を走行制御装置にて行ない管内を 30mm 走行させる。また、30mm はロボットの先端から先端までの距離とする。動作毎に 1 回ずつ走行にかかった時間を測定する。

走行実験の結果、食塩水を圧送する量および速度の値が大きいほど、ロボットの移動速度が大きくなることが判明した。

5. 結言

考案・製作した機構は全て、単純な環境の下では実際に動作可能なことが確認された。

走行経路として用いた管は、弾性や内部を満たす液体の有無などの点で実際の血管に近いとはいえないので、能動のカテーテルの開発をするためには、模擬血管の開発が当面の課題となる。また、現在の推進方式が人体に悪影響を及ぼさないかということ把握する必要がある。一方で、現在のロボットの寸法では、動脈など血管の中でも比較的太い部位にしか適さないため、小型化も必要である。

そこで現在は、人体モデルによるシミュレータを用いて開発したデバイスの検証を行ない、臨床現場の実際についての詳細な調査と、ロボットの小型化・高性能化の両面から研究開発を進めていく。

参考文献

- (1) 藤田博之, マイクロマシンの世界, 株式会社工業調査会
- (2) 百村伸一, 心臓カテーテル, メジカルビュー社