

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2011～2014
課題番号：23760218
研究課題名(和文)体内組立モジュール型手術ロボットの研究

研究課題名(英文)Study on surgical modular robot

研究代表者

原田 香奈子 (Harada, Kanako)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：80409672

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：単孔式腹腔鏡手術，モジュール型手術ロボット，Needlescopic surgeryのコンセプトを組み合わせた新しい手術ロボットのコンセプトを提案した．提案したコンセプトでは，単孔式腹腔鏡手術のように臍部から様々な種類のロボット・モジュールを挿入し，体内で3 mmのシャフトと組み立てることで手術ロボットを構成して診断や治療を行う．DCマイクロモータ3台を搭載した直径16 mm，長さ51 mmのロボット・モジュールを試作し，胸腔モデル内において内視鏡下でのシャフトへの組み立てと屈曲，回転，把持の動作を確認した．また，提案するコンセプトのメリットと課題を明らかにした．

研究成果の概要(英文)：A new surgical robot has been proposed by combining advantages of Single Incision Laparoscopic Surgery), modular robotic surgery, and needlescopic surgery. In the proposed concept, robotic modules with diagnostic or therapeutic functions are inserted in a body cavity via an incision in umbilicus and then assembled to 3-mm shafts inserted through incisions in the abdominal wall. A robotic module with 3 degrees of freedom (DoF), namely, bending, rotation and grasping, was designed. Its prototype, measuring 16 mm in diameter and 51 mm in length, was fabricated to demonstrate the proof of the concept.

研究分野：医用工学

キーワード：手術ロボット モジュールロボット SILS needlescopic surgery 低侵襲手術

1. 研究開始当初の背景

内視下手術に続く次世代の低侵襲手術として、様々な新しい術式が提案されている。例えば、臍の切開創から複数の術具を挿入して行う治療は単孔式内視鏡手術 (SILS : Single Incision Laparoscopic Surgery) と呼ばれ、内視鏡を自然孔 (口や膣) から挿入し、管腔壁を経て体腔内に到達して治療を行う方法は自然開口部越経管腔の内視鏡手術 (NOTES : natural orifice transluminal endoscopic surgery) と呼ばれる (図1)。これらの手技は、現在の内視鏡手術よりも低侵襲であり術後疼痛が少ない。さらに体表の傷が小さい、あるいは傷がないため美容的に優れ、革新的な術式として世界的に注目されている。患者にとってはメリットの大きい手術であるが、その一方で医師にとっては極めて困難な手術となる。革新的超低侵襲手術を支援するための新しい手術デバイスの開発が求められている。

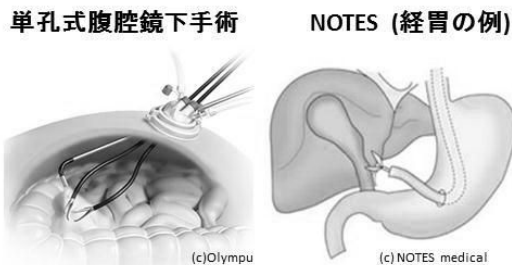


図1 単孔式腹腔鏡手術とNOTESのコンセプト

手術ロボットとカプセル内視鏡は実用化され、すでに世界中の病院で導入されている。しかしながら、従来の手術ロボットは大型であり、カメラや術具を挿入するために複数の切開創が必要である。また、切開創の数しか術具を挿入することができず、挿入できる術具の径も制限されるため診断や治療が限定されるという問題がある。市販されているカプセル内視鏡は、搭載したカメラによる撮像のみ可能であり、組織採取や治療を行うことができない。

このような背景から手術デバイスの小型化・高機能化が求められており、体内で高度な治療を行うことが期待されている。国内外で行われている研究は、軟性内視鏡に多自由度細径鉗子を複数搭載するような内視鏡型のアプローチとカプセル内視鏡に消化器管内移動用あるいは治療用の“手足”を搭載するカプセル型が主流となっている (図2)。いずれの方式においても従来の内視鏡あるいはカプセル内視鏡の延長上のコンセプトであり、体内に挿入できる診断用・治療用デバイスの大きさや数が限られるという問題は解決できていない。特に搭載される治療用デバイスが細径であるため機能や発生できる力が限られることが問題であり、これを解決する画期的なコンセプトの導入が期待されている。



図2 手術ロボットの小型化・高機能化

小型化・高機能化を実現する究極の手術ロボットとして、研究代表者らはこれまでにモジュール型手術ロボットを提案してきた。モジュール型手術ロボットとは口などの自然開口部、あるいは臍にあけた穴からロボット・モジュールを複数挿入し、腹腔内などの空間にてロボット・モジュールを組み立てることで手術ロボットを構成するものである。手術後は組み立てたロボットを再度ロボット・モジュールに分解して取り出す。モジュール型手術ロボットの主なメリットとしては、(1)患者に応じてロボットの形状や搭載する診断用・治療用デバイスをカスタマイズできること、(2)従来の内視鏡型アプローチやカプセル内視鏡型アプローチと比較して診断用・治療用デバイスのサイズを大きくできるため、搭載する自由度や発生力などの性能を高めることができること、(3)複数の診断用カメラやセンサ、治療デバイスが搭載可能であり、それらを同時に用いた高度な診断や治療が実現できること、(4)モジュールの着脱が可能であるため、術中のデバイスの追加や故障したデバイスの交換が可能となり、システム全体がロバストになること、などが挙げられる。これらのメリットを図3に例示する。

本研究は、このモジュール型ロボットのコンセプトをさらに発展させた手術ロボットを提案するものである。従来のモジュール型手術ロボットでは、体内に足場となる場所がなく、ロボット・モジュール同士の位置決めや組み立てた後のロボット全体の位置決めが困難であった。また、大きな力を発生することが困難であるという問題があった。本提案ではこれらの問題を解決するコンセプトを提案する。

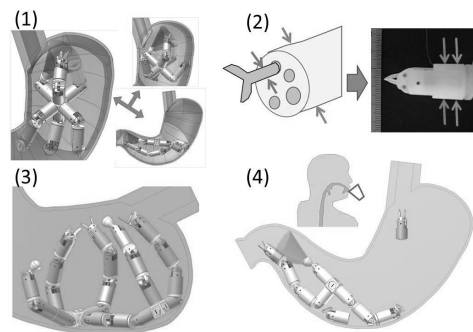


図3 モジュール型手術ロボットのメリット

2. 研究の目的

上記の問題を解決するため、これまでの単孔式腹腔鏡手術とモジュール型手術ロボットのコンセプトに更に Needlescopic surgery のコンセプトを組み合わせた手術ロボットを提案した(図4)。本研究では、プロトタイプを作成し、提案した新しい手術ロボットのコンセプトの有用性を検証することを目的とする。

Needlescopic surgery は直径 3 mm 以下の術具を体壁から挿入することにより行う内視鏡手術であり、体表の傷が目立たない手術として注目を集めている。しかし、細くて長い術具を使用するためシャフトのたわみが大きく、また術具先端の力が小さいという問題がある。提案するコンセプトでは、単孔式腹腔鏡手術のように臍部を切開して様々な種類のロボット・モジュールを挿入し、体内で 3 mm のシャフトに取り付けて使用する。このアプローチでは、体表の傷を最小限にしながらも体内に様々な機能をもつ診断用・治療用モジュールを挿入できる。Needlescopic surgery では術具が細すぎることが問題であるが、提案する手法では診断用・治療用モジュールの径を大きくすることが可能となるため、高性能の診断・治療を実現することができる。また、従来のモジュール型ロボットでは足場となる場所がないため、大きな力を発生することが困難であったが、提案する手法ではシャフトによりモジュールを固定できる。最初にカメラを搭載したロボット・モジュールを挿入することができれば、その画像を見ながら安全かつ正確に他のロボット・モジュールを挿入することが可能になる。また、カメラやセンサを搭載したロボット・モジュールを複数導入することにより、特殊カメラやセンサによる診断を行いながらの治療を行うことが可能になると期待できる。

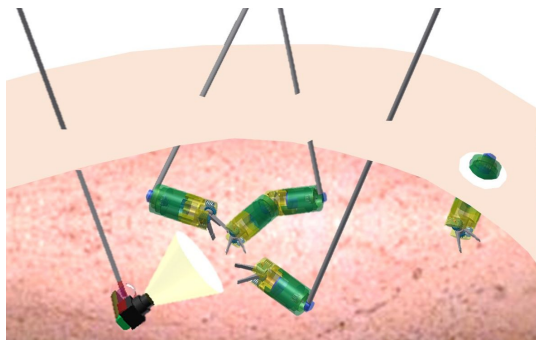


図4 提案する新しい手術ロボットのコンセプト

3. 研究の方法

提案する手術ロボットのコンセプトの有用性を検証するため、3自由度のモジュールを設計した。設計したロボット・モジュールを図5に示す。このロボット・モジュールは $\pm 90^\circ$ の屈曲、 360° の回転、把持が可能で

ある。把持部の先端を独立して動かすことにより、屈曲と把持を実現させている。屈曲と把持の機構を独立させた場合と比較して、屈曲の回転中心より先の長さを短くすることが可能であるため、体腔内などの狭小空間においてのタスクに有利である。ロボット・モジュールの全体のサイズは直径 16 mm、長さ 51 mm となっている。モジュールとシャフトとの接続については、シャフトの端部にネジ切り加工を行い、シャフトをモジュールに差し込んで回転することで固定することとした。

今回は把持のみを行うモジュールを設計したが、実際にシステムを設計する場合は様々な種類のロボット・モジュールを設計する必要がある。例えば、複数のモジュールをあらかじめ組み立てて挿入し体内で展開することでロボットの構造となる構造用モジュール、診断を行うためのカメラやセンサを搭載した各種診断用モジュール、把持、剥離、切除などの治療を行うための各種治療用モジュールなどを設計する必要がある。この場合はシャフトとの接続部やモジュール同士の接続部分の設計を共通にして汎用化を行う。シャフトとの接続やモジュール同士の接続については、内視鏡下での組み立てが必要となるため、更に簡便に接続する方法を検討する必要がある。本研究では、コンセプトを実証することが目的であるため、モジュールは一種類とし、組立手法もやや複雑だが確実な手法を採用している。

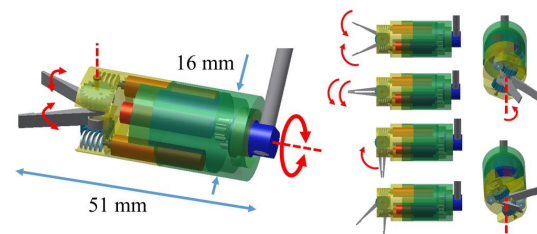


図5 ロボット・モジュールの設計

ロボット・モジュールの駆動には DC マイクロモータ (SBL04-0829 and PG04-227, Namiki Precision Jewel Co., Ltd., Tokyo, Japan) を 3 台使用した。モータのギア比は 337:1 であり、ストール・トルクは $10.6 \text{ mN}\cdot\text{m}$ 、112 rpm での回転が可能である。モータの制御は Aisenke 社によって開発されたマイコン Nodino Robotics™ F4-DiscoverFree により行った。モータを Back Electro-Motive Force (BEMF) モードで駆動することで 0.178° の分解能での位置決めが可能となる。F4-DiscoverFree はこのモータ専用カスタマイズされたライブラリを有している。将来的には無線による制御が可能な構成となっており、電源以外には有線とする予定である。電池を搭載することにより完全に無線化することも可能であるが、モジュールの大きさが大きくなるという問題がある。ロボット・

モジュールの動作時間も制限されるため、現時点の技術では給電は有線で行うことが望ましいと考える。

製作したロボット・モジュールの写真を図6に示す。基本的な動作を確認するため、本研究ではギア及びギアを固定するためのシャフト以外の構成部品は3Dプリンタを用いて製作した。



図5 ロボット・モジュールのプロトタイプ

製作したモジュールの動作確認を行った結果を図6に示す。1歳小児の胸腔のスペースを再現したモデルにおいて、内視鏡下でロボット・モジュールのシャフトへの組立を行うことができた。また、同じく内視鏡下でロボット・モジュールの屈曲、回転、把持の動作を確認した。把持の先端を独立して動作することで屈曲と把持を実現できる設計としたため、狭い内視鏡視野内でもモジュールの動作を確認することができた。



図6 ロボット・モジュールの動作確認
(右：内視鏡画像)

モジュールの動作は問題なく確認できたが、3Dプリンタで製作した部品の強度や精度が不十分であり、先端がたわむ、ガタが大きい、などの問題が生じた。今回はコンセプトを確認するための試作であったため、加工の一部で3Dプリンタを用いたが、今後、金属材料を用いることによりこれらの問題は解決できると考えられる。

本研究により提案した新しい手術ロボットのコンセプトの有用性を示すことができた。一方で今後の臨床応用を検討していく上での課題も明らかになった。技術面では、ロボット・モジュールの更なる小型化、複数のロボット・モジュールの協調、複数のロボット・モジュールを直観的に操作するためのユーザ・インターフェースの開発、ロボット・モジュールとシャフトの容易な組み立てと分離、複数のシャフトの位置決め、ケーブルの取り回しなどの課題について取り組む必要がある。また、ロボット・モジュールを滅菌対応にするための工夫も必要となる。コスト面での課題も大きい。モータも高価であり、

ギアもすべて特注となるため、ロボット・モジュール1個あたりのコストが高くなる。それでも一般的な手術ロボット・システムと比較して安価となるが、ロボット・モジュールの再利用やそのための洗浄性評価なども検討する必要がある。

4. 研究成果

単孔式腹腔鏡手術、モジュール型手術ロボット、Needlescopic surgeryのコンセプトを組み合わせた新しい手術ロボットのコンセプトを提案した。提案したコンセプトでは、単孔式腹腔鏡手術のように臍部から様々な種類のロボット・モジュールを挿入し、体内で3mmのシャフトと組み立てることで手術ロボットを構成して診断や治療を行う。DCマイクロモータ3台を搭載した直径16mm、長さ51mmのロボット・モジュールを試作し、胸腔モデル内において内視鏡下でのシャフトへの組み立てと屈曲、回転、把持の動作を確認した。また、提案するコンセプトのメリットと課題を明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計1件)

Zackary Hewitt, Kanako Harada, Ekawahyu Susilo, Shinichi Tanaka, and Mamoru Mitsuishi, "Robotic Modules Entering Single Port for Needlescopic Surgery", 第23回日本コンピュータ外科学会大会, 大阪, 2014年11月8-9日, JSCAS Vol.16, No.3 (Special issue), 185-186.

6. 研究組織

研究代表者

原田 香奈子 (HARADA, Kanako)

東京大学・大学院工学系研究科・特任講師
研究者番号: 80409672