

令和 3 年 4 月 19 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03549

研究課題名（和文）「柔」のしなやかさと「剛」の精密さをあわせ持つ手術ロボット基盤技術開発とその実装

研究課題名（英文）Surgical robots with combined flexibility and rigidity - fundamental technology development and implementation

研究代表者

荒田 純平（ARATA, JUMPEI）

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：40377586

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 15,070,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、内部に帯状弾性体を内蔵し、ばねとしての有効長を変更することで関節剛性を可変とする新たなロボット関節を実現した。実験評価によって、提案した構造は関連研究と比較して小型であり、幅広い剛性変化を行うことが可能であった。これにより、この可変剛性機構モジュールを用いて、剛と柔を手術の局面で使い分けるとのことができる手術ロボット・システムを構築する事が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

より優れた機構の探索は、根本的に安全性の担保を求められる医療ロボット分野において必須である。そこには従来の産業機械では存在しなかった要求が多く存在し、新たな研究開発の必要性が広大に残されている。例えば、コンピュータによる電算処理はロボット制御に広く活用されているが、力センサシステムの手術ロボット搭載が困難なのは、その複雑さゆえに安全性の担保が不可能であり、簡便かつ安定な機構的解決手段が求められると考えられる。本課題は機械技術の新たな活用として、医療ロボットの基盤技術を提供するものであり、学術的、社会的に意義を有すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a robotic joint module that contains an elastic belt that allows the control of effective length of spring, thus the joint stiffness. The experimental evaluations revealed that the developed prototype is compact and capable of larger range of variable stiffness. From these results, we concluded that the developed joint is applicable for a surgical robot, making the rigidity from soft to hard depending on the surgical procedures.

研究分野：ロボット工学

キーワード：医療システム 手術ロボット 可変剛性

## 1. 研究開始当初の背景

現在の手術ロボットは、従来の産業ロボットと等しく高剛性であり、人間が日常的に行うような自身の筋緊張を和らげることで衝撃を吸収する「しなやか」な動作が出来ない。よって、いわば常に緊張状態で手術を続けているような状況であり、ふとした周辺組織との接触が大きな損傷を与える危険性ははらんでいる。本課題ではこの問題を解決するため、申請者がこれまでに研究を行ってきた、柔軟要素の大変形を機構に内包する柔軟メカニズムを活用し、手術ロボットに搭載可能な小型、軽量で、かつ広い可変剛性域を有する可変剛性機構モジュールを開発する。さらに、この可変剛性機構モジュールを用いて、剛と柔を手術の局面で使い分けられることのできる手術ロボット・システムを構築し、動作検証する。本課題で新たに提案する可変剛性機構は、手術ロボットのみにとどまらず、今後求められるロボットと人間が直接関わる活用において、有益と考えられる。

## 2. 研究の目的

### (1) 剛なロボット

従来の産業応用におけるロボットの担う役割は、精密さが重要となる繰り返し作業が一般的であるため、「剛」である必要があった。しかしながら人体の筋骨格構造は、対象に対して機械的インピーダンスが可変であり、日常生活においても動作戦略に意識的、また無意識的に活用されている。例えば、我々は小さな字に筆記のような精密作業を行うときには筋を一定量緊張させることで「剛」として動作精度を高めている (Niemeyer2003, 2009)。一方で、ふと対象物を拾い上げるような粗の動作においては、筋の緊張を和らげることで身体を「柔」とし、思いがけない身体と対象物や周辺環境との衝突を和らげる役割を果たす。

### (2) 剛と柔な動作が求められる手術ロボット

医師が自在に操作を行うためのマスタスレーブ型手術ロボット (以下、手術ロボット) が安全性を担保しながら、今後よりその真価を発揮するためには、新たな技術革新が必要である。現在の手術ロボットは、従来の産業ロボットと同じく、その機械構造そのものが「剛」であり、いわば常に緊張状態で手術を行っている。しかしながら、従来のマニュアルによる腹腔鏡下手術においては、緻密な作業が求められる局面 (剛) に加えて、例えば、①手術の対象となる術野へのアプローチ、②針糸の運針、③術野確保のための比較的大きな管腔臓器の移動、等でしなやかに対象へアプローチし、周辺組織や器具同士で接触が起こった場合でも発生する応力を和らげることで組織へダメージを回避し、むしろその接触による振る舞いから周辺組織、器具との距離を測る、膜組織の連結の強固さを観察する、などの局面 (柔) に多く活用される。もし、このような「柔」な操作を既存の手術ロボットで行った場合、組織への甚大なダメージを招く恐れがある。実際に 2010 年には国内において、手術ロボットによる内視鏡視野外での医師の意図しない臓器圧排によって、死亡事故が発生している。

### (3) 現状の問題点

この問題の解決方法の一つとして、力センサをロボット本体へ配置し、測定した外力をもとに能動的にロボットの動作を生成することで、擬似的にロボットの剛性を可変とする手法が提案されている (Salisbury1980)。当該手法を手術ロボットへ導入することによって、理論上システムの機械的インピーダンスを制御可能であり、剛と柔を併せ持つ動作が達成される。しかしながら、この手法には以下の問題点がある。

- ① 十分に機械的インピーダンスを減ずる (つまり機構透明性を高める) には、制御ゲインを高める必要があり、システムが不安定になる可能性がある。
- ② 手術で用いられる電気メスなどのいわゆるエネルギーデバイスは、大きなノイズ源と知られており、ひずみゲージなどの電気式力センサは誤動作の危険がある。
- ③ 腹腔鏡下手術のように体内に挿入する手術ロボットは、先端器具、挿入孔、その他周辺環境と接触する。これら外力を網羅的に測定するには、無数の力センサが必要である。
- ④ 患者人体と直接的に接する力センサは、滅菌・消毒が可能である必要がある。あるいは単回使用 (ディスポーザブル) とする場合には、非常に安価である必要がある。しかしながら、このような力センサは現市場に存在しない。

これらの問題点をすべて克服する力センサシステムの手術ロボット搭載は極めて困難であり、現在上市される手術ロボットへの実装は例が無い。よって、現在の手術ロボットは「剛」にとどまり、冒頭に述べた危険性を内包している。

本課題ではこの様な問題を解決するため、手術ロボットの各関節部分に搭載可能な、従来にない弾性要素の大変形を活用した可変剛性機構を開発し、ロボットとして実装、評価検証を行う事を目的とする。

本研究では、要求仕様は以下のように設定した：

- 大きさ：  $\phi 100 \times 100$  mm 以下.
- 重量：1kg 以下.
- 最高剛性： 12.6 Nm/deg 以上.
- 最低剛性： 0.63 Nm/deg 以下.

この可変剛性範囲は、長さ 300 mm のアームを持つマニピュレータと長さ 300 mm の鉗子を想定して決定した.最高剛性は、人体の臓器の中で最も重い臓器である、肝臓 程度の重さ:1 kg のものを持ち上げる際(関節部に 6 Nm 程度の外力トルクが働く際)に鉗子先端の誤差が 5 mm 以内となるように、最低剛性は、鉗子先端に小さな力:1 N が働く際(関節部に 0.6 Nm 程度の外力トルクが働く際)に鉗子先端が 10 mm 以上変位するように設定した.

### 3. 研究の方法

#### (1) 提案機構

本課題で開発した可変剛性機構についてその概要を示す. 提案機構の概略図を図1 (左, 中) に示す. この機構は、ベースとなるフレーム、駆動入力リング(青色)、駆動出力軸(灰色)、2つの弾性体ホルダ(緑色)、2本の帯状弾性体(茶色)、2つの剛性変更リング (a)・(b)、4つのローラ群 2組 (a)・(b)(赤色, 黄色)からなる. 駆動入力リングは帯状弾性体及び弾性体ホルダを介して駆動入力軸に接続されている. 剛性変更リング (a)・(b) はそれぞれローラ群 (a)・(b) に固定されており、このローラが帯状弾性体を挟み込む構造となっている. 駆動入力リングと剛性変更リングはいずれも駆動出力軸を中心に回転する.

図1 (中) のように、最高剛性時、駆動出力軸に接続された弾性体ホルダはローラと接しており、駆動出力軸へ加えられた外力はローラが受け持つため、帯状弾性体の有効長はゼロであり、高剛性となる. 一方、低剛性時は弾性体ホルダとローラとの間の帯状弾性体が外力によって変形し、低剛性となる. 剛性変更リング (a)・(b) を駆動入力リングに対して相対的に回転させることでこの有効長が変化するため、剛性が可変となる. また、剛性変更リング (a)・(b) と駆動入力リングを共に回転させることで、帯状弾性体の有効長を保ちつつ駆動出力軸の回転角度を変更可能である. なお、2つの剛性変更リングは同一の回転中心をもち、反対方向に同じだけ回転させるため、構成次第で1つのアクチュエータで駆動可能であり、本実装ではこれをギヤを用いて連結し、1つのアクチュエータで駆動する. 図1 (右) に本研究で開発した試作機の外観を示す.

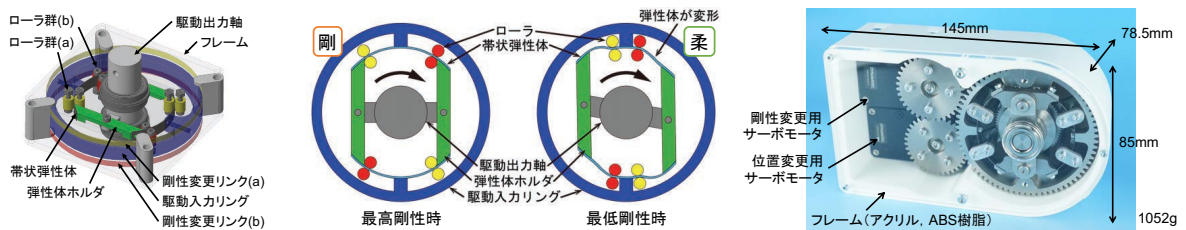


図1 開発した可変剛性機構 (左：機構概要, 中：可変剛性のしくみ, 右：試作機外観)

#### (2) 評価

本研究で提案する可変剛性機構について、その剛性変化特性の評価、及び弾性体厚と剛性の関係の評価を目的として実験を行った. 本実験で用いた装置の構成図を図2に示す. 試作機の駆動入力軸及び剛性変更リング (a)・(b) をフレームと固定した. 駆動出力軸は剛性の高いカップリングを用い、トルクセンサを介してサーボモータに固定しており、トルクセンサ-サーボモータ間の軸にはギヤを用いてエンコーダを接続した. サーボモータの角度位置司令に対しての誤差が無視できないほど大きく、内蔵のエンコーダの分解能も十分でなかったため、別のエンコーダを用いて角度計測を行った. 実験では、サーボモータを用いて試作機にトルクを加え、その時の角度変位とトルクを記録した. 全ての機器は PC から制御可能となっており、この PC で記録まで行った.

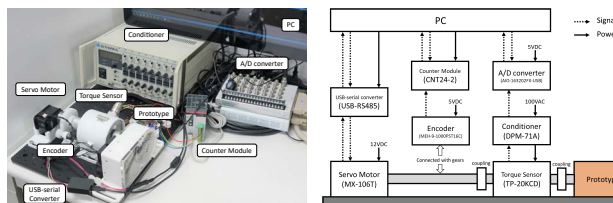


図2 評価装置外観 (左：実験システム外観, 右：装置接続構成)

実験結果を図3に示す。有効長の長さを変えた場合（100, 75, 50, 25, 0%）について、関節の回転剛性を示している。高剛性時には位置指令を与えても弾性体の変形や出力軸の角度変位が小さかったのに対し、低剛性時には弾性体が大きく変形し、出力軸に角度変位が生じていた。弾性体有効長が短い高剛性時は、グラフがほぼ一定の傾きの直線であり、これを一定の剛性と考えるとその剛性は約 1.6836 Nm/deg であった。一方、弾性体有効長が長い低剛性時は、外力による角度変位が大きくなるにつれて徐々に剛性が高くなり、傾きが急になっていることがわかる。低剛性時には、外力による角度変位が小さいうちは低い剛性を、角度変位が大きくなると高い剛性を示したが、これは、角度変位が生じたとき、これが小さいうちは弾性体に働く力が主に曲げであるのに対し、大きくなると引張圧縮の力が無視できなくなるためだと考えられる。実験結果にはヒステリシスが見られるが、これは部品同士の摩擦や、ギヤのバックラッシが原因と考えられる。

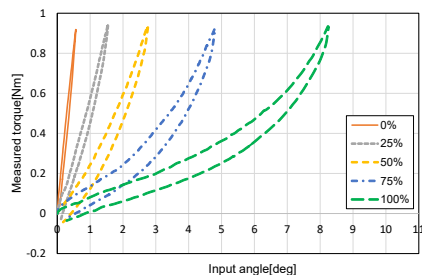


図3 実験結果

#### 4. 研究成果

本課題では、内部に帯状弾性体を内蔵し、ばねとしての有効長を変更することで関節剛性を可変とする新たなロボット関節を実現した。実験評価によって、提案した構造は関連研究と比較して小型であり、幅広い剛性変化を行うことが可能であった。これにより、この可変剛性機構モジュールを用いて、剛と柔を手術の局面で使い分けられることのできる手術ロボット・システムを構築する事が可能となった。本課題は機械技術の新たな活用として、医療ロボットの基盤技術を提供するものであり、学術的、社会的に意義を有すると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kenichiro Seto, Kazuo Kiguchi, Jumpei Arata
2. 発表標題 Compact and Lightweight Variable Stiffness Mechanism Using Elastic Band for Medical Robots
3. 学会等名 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀬戸謙一郎, 木口量夫, 荒田純平
2. 発表標題 医療ロボットへの導入を目指した帯状弾性体を用いた可変剛性機構の開発
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会予稿集
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	木口 量夫  (KIGUCHI KAZUO)  (90269548)	九州大学・工学研究院・教授    (17102)	
研究分担者	橋爪 誠  (HASHIZUME MAKOTO)  (90198664)	九州大学・先端医療イノベーションセンター・名誉教授    (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------