

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05871

研究課題名(和文) 機械的機能を電気的機能に置き換えた力覚を有する次世代型ロボットの開発

研究課題名(英文) Development of next-generation robot with force sense by replacing mechanical functions with electrical functions

研究代表者

立花 邦彦 (Tachibana, Kunihiko)

高知工科大学・総合研究所・助教

研究者番号：10747794

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：手術支援ロボットや工作用・作業用の産業用ロボットでは、移動量の拡大や縮小、および力覚が必要とされるようになった。特に手術支援ロボットでは力覚を有することの要求が高まってきている。当該研究では力覚を持たせるだけでなく力覚の可変および移動量の可変を行うことのできる次世代型ロボットの基礎技術を確立するため、直列接続型マスタ・スレーブシステムを適用した試作ロボットを製作し、個別要素および装置全体としての技術の構築を行った。今後、得られた知見を基に実用化に向けて研究を継続する予定である。

研究成果の概要(英文)：In recent years, surgical robots and industrial robots have come into wider use. These robots do not yet provide a force sense to the surgeon/operator, but such force sense will be necessary on the next generation robots. We have proposed a master-slave system of the series connection type that generates a force sense using conventional bilateral control without a force sensor and a reduction gear. The system can change a force sense and moving amount by electrical control. Basic technology of the system is confirmed with a prototype robot. In future studies, we apply these technology to achieve a practical robot.

研究分野：工学

キーワード：モーションコントロール マスタ・スレーブ 力覚

1. 研究開始当初の背景

(1) 腹腔鏡下手術は低侵襲であることから、近年QOL (Quality Of Life)向上のため、手術件数が増加している。この施術においては、術者が手術器具を直接操作するため、操作力を術者が感じ取ることができる。また、近年では手術支援ロボットが開発され、多くの医療現場で使用されるようになった。しかし、手術支援ロボットは力覚を有しないため、術者は手術器具がどの程度の力で施術を行っているのかを把握することが出来ない。このことにより、医療事故が発生することもあり、医療関係者からは、力覚を有する手術支援ロボットの開発が望まれている。

(2) 産業用ロボットで力覚が必要とされる場合、各種のセンサを用いることにより実現している。しかし、センサを用いなければならぬことで、装置や制御系が複雑になってしまうという問題がある。さらに、特定の目的を達成するために、専用のセンシング機構や制御システムが必要となり、力覚を有しないロボットに比べ高額になることから、普及が進んでいない。

2. 研究の目的

(1) 一般的にDCモータは機械式減速機と組み合わせで使用するが、機械式減速機では減速比が固定されているために、任意に減速比を変更することができない。そこで、減速機能を電気的に行えるようにし、移動量の拡大や縮小を任意に設定可能な機構と制御方法を確立する。

(2) 機械式減速機では、動力伝達において損失が大きく、ヒステリシスもあることから、微小な力を伝達することができないという問題がある。この問題を解決するため、機械式減速機を用いない機構とすることで、微小な力を操作者が感じ取ることができ、また、力覚比を任意に設定可能な制御方法を確立する。

(3) 本研究では、機械式減速機を使用しない、DCモータの直列接続方式によるマスタ・スレーブシステムにより、前述2項目を具現化することが目標である。ここでは、精密制御や適正な力覚が求められる手術支援ロボットを主な用途として想定した。

3. 研究の方法

(1) 基礎実験として、機械式減速機を組み合わせていない、数種類の出力の異なる2個のDCモータを組合せ、移動量を可変できること、および、力覚を得ることができると、力覚比も可変できることを確認した。理論上、2個のDCモータの組合せに制限はないが、実験に使用するDCモータを入手する都合上、マスタ1対スレーブ20の出力比までの組合せにより実験を行った。

(2) 応用実験として、市販されている鉗子を改造し、手術支援ロボットを模擬した試作機を製作し、移動量および力覚比が可変できること、および、鉗子の操作精度に問題がないのかについて実験を行った。本研究では鉗子自体の開発は研究対象ではないため、入手した鉗子を手動で動かす場合に必要となる力を、スレーブ側での必要出力として設計し、この出力と同じか小さな出力をマスタ側で発生することができるような構成とした。

4. 研究成果

(1) 出力の異なるDCモータの組合せ

直列接続型マスタ・スレーブシステムの概要を図1に示す。回路に流れる電流は1つであり、マスタとスレーブの出力が同じであれば、マスタに加えた力と同じ大きさの力がスレーブから出力される。これはDCモータの出力 = トルク定数 × 電流で一義的に決まるためである。しかし、出力の異なるDCモータを組み合わせるとなると、トルク定数や定格電流値が異なるために、制限を受けて任意の組合せができない。そこで、シャント回路をどちらか一方のDCモータに付加することで、この制限を無くすことが出来ることを確認した。なお、実験ではマスタ側を小出力、スレーブ側を大出力のDCモータとしたため、シャント回路は常にマスタ側に付加した。表1に使用したDCモータの例として、最小出力と最大出力の定格を示す。

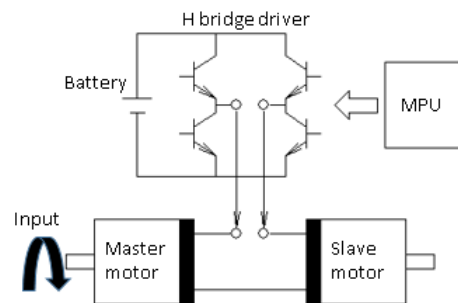


図1 直列接続型マスタ・スレーブ

表1 使用DCモータ定格(一例)

定格出力	定格電流	トルク定数
4.5W	0.23A	19.3mNm/A
90W	1.57A	52.5mNm/A

表1に示した組合せでは、回路電流が1.57Aとなるように制御し、 $1.57A - 0.23A = 1.34A$ がシャント回路に流れるようにすると、マスタに4.4mNm印加したとき、スレーブでは82.4mNmの出力を得ることができた。トルクは回転型トルクセンサにより測定した。

(2) 力覚の可変

力覚の可変は、DCモータの定格を超えない範囲で行う、という制限がある。短時間であれば定格を超えても、DCモータが焼損することはないが、連続的に定格を超えて使用

すると焼損することがある。力覚を可変することができる原理は前項で説明したように、出力=トルク定数×電流であるから、マスタの電流が増えるようにすれば、マスタでの出力が増加し、その逆を行えばマスタの出力が減少する。例として、出力が同じDCモータを使用した実験結果を図2に示す。マスタ側にシャント回路を接続している。この図から、例えば最初に分流率50%で使用していて、その後、分流率を30%にすれば、マスタ側の出力は50%から70%に増加することが分かる。2つのDCモータのトルク比が変わっていることは、すなわち力覚が変わっていることになる。

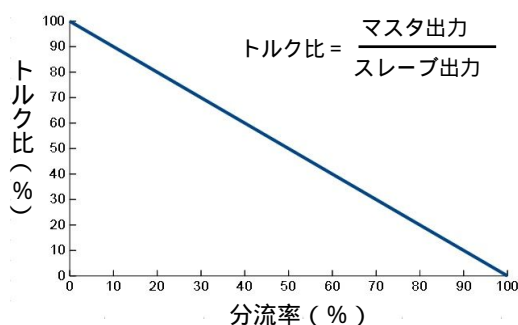


図2 分流によるトルク比

(3) 移動量の可変

本研究では、500パルス/1回転のエンコーダをDCモータ出力軸に取り付け、移動量(回転角度)の制御を行った。従って、0.72度がエンコーダの分解能の限界であった。実験では、マスタの回転角を1/1、1/2、と1/5まで縮小した角度にスレーブが回転するのかについて確認した。2つのDCモータの相対位置制御を行う事で、精度良く制御を行う事ができることを確認した。ただし、エンコーダの分解能により、±1パルス分の残留偏差が残ることがあった。

(4) 試作ロボット

設計に際して、機械式減速機の代わりに磁気ギアを使用することも検討したが、現在入手可能なものは大きく重いことが判明し、磁気ギアは使用しないこととした。鉗子は図3に示す市販品を改造して使用したが、この鉗子はすでにロール(鉗子軸方向に対して)があり、これを含めてXYZ軸の平行移動とピッチ・ロール・ヨーの3軸回転、鉗子先端の開閉、鉗子先端の曲げの8自由度を持たせた。

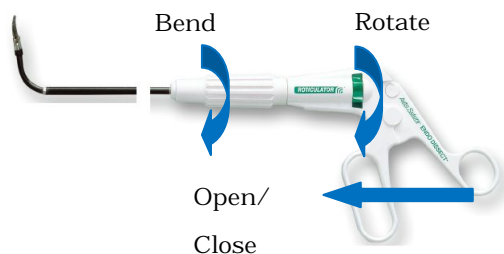


図3 鉗子

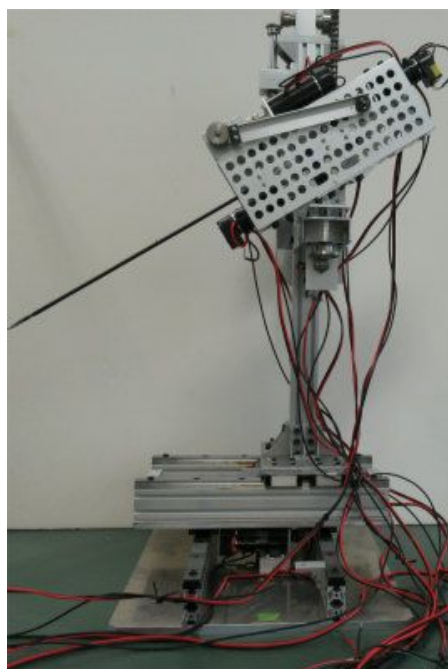


図4 スレーブユニット

図4にスレーブユニットの写真を示す。鉗子を駆動するためのDCモータと駆動金具や固定金具が必要なため、鉗子収納部の質量を軽減することができず、後述する問題の原因となった。DCモータの組合せとしては、マスタとスレーブがそれぞれ、20Wと60W、60Wと90Wなどであり、出力比が大きく異なる組合せとはなっていない。

製作した試作ロボットを使用し、基礎実験で得られた結果と同じ結果が得られるのが確認を行った。8自由度を持たせているが、鉗子先端の曲げとXYZ軸については、作動確認のみとした。手術支援ロボットでは、端部先端が対象物に触れた、掴んだという力覚が重要であるため、これらを重点としている。

相対位置制御を行うことで、マスタとスレーブの位置(角度)を一致させる制御を行うが、具体的な制御方法として、P(比例)制御、PID制御、および内部モデル制御により比較を行った。ここまで説明を行っていなかったが、直列接続型マスタ・スレーブでは、2つのDCモータの位置(角度)が一致するように制御を行うと、それぞれのモータが発生するトルクは、出力=トルク定数×電流の式より決まった比率となることから、トルク制御を行わなくても、受動的にトルクが制御される。このことから、位置制御を正確に行うことが重要となる。P制御では残留偏差が残ることは知られており、実験においても最大で約5度の位置誤差が発生し、0.25秒程度の操作遅れもあった。PID制御では動作開始時にスレーブ側に数度の遅れが発生するが、その後はマスタの動きに追従し、残留偏差も発生していないことを確認した。しかし、使用しているエンコーダの分解能により、見かけ上残留偏差が残っていないような状態でも、積分器にはエンコーダの誤差分が

蓄積され、意図しない時点でDCモータが回転する可能性があることも分かった。そこで、内部モデル制御（逆伝達関数制御）を適用することとした。この制御ではシステム同定と呼ばれる動作機構の特性値を求める作業が必要であり、得られた結果から制御用定数を決めるため、システム同定により得られた値の確かさがそのまま制御の性能に影響を及ぼす。何度か作動実験を行い、最適と思われる定数を最終的な定数とした。この制御により、鉗子で物を挟む場合に力覚を正しく得ることが出来、また、力覚を可変できるのかについて、人工皮膚を用いて確認を行った。複数人に評価を行ってもらい、適正な力覚が得られていること、可変されていることが確認された。鉗子のロールについても同様の結果が得られた。しかし、ピッチおよびヨーに関しては、初期位置から±5度程度以下の小さな移動では操作に重さを感じなかったが、±20度程度の大きく移動させた操作では操作に重さを感じた。この原因は、鉗子を取り付けている機構の質量や慣性モーメントの影響が、顕著に現れたものと思われる。一方、移動量の可変に関しては、設定した比率に対応した動きとなることが確認できた。

(5) シャント回路

異なる出力のDCモータを組み合わせるため、また、力覚を可変するために必要となるシャント回路には、当初、可変抵抗器を用いていた。しかし、可変抵抗器は電気エネルギーを熱エネルギーに変換するため、装置としてエネルギーの無駄が生じていた。そこで、可変抵抗器を半導体スイッチ回路に置き換えることを考えた。電力用MOS-FETを組み合わせ、シャント回路に流れる電流の時間幅を変化させることにより、図5に示すようにDCモータに流れる電流の平均値が変わるようにし、実験により問題が無いことを確認した。

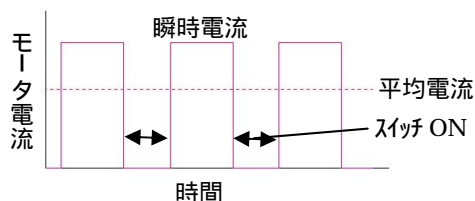


図5 DCモータの平均電流

(6) まとめ

従来、機械的機能で行っていたものを電氣的機能に置き換えて、装置として成立することが確認できた。力覚を得ることが出来、力覚比を可変できること、移動量を可変できることも確認し、目標を達成することができた。しかし、一方で、装置の機構の質量や構造、構成が原因となり、作動制御に影響を与えることで、装置としての性能を低下させることも分かった。今後は、これらの悪影響を低減させることや、制御で補正を行うことなどについて、さらに改善を進める。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

立花邦彦、井上喜雄、渡橋和政、直列接続型マスタ・スレーブアクチュエータの力覚可変の一方法、日本機械学会学会誌、査読有り、Vol.82 No.834、2016年2月、15-00506 P.1-P13
DOI: <https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00506>

〔学会発表〕(計 3件)

立花邦彦、手術支援ロボットの設計開発と課題、日本設計工学会、2018年

立花邦彦、力覚を有する手術支援ロボットの開発(第一報)、日本機械学会、2016年

立花邦彦、直列接続型マスタ・スレーブアクチュエータのパラレル制御、日本機械学会、2015年

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1件)

名称：直列型モータを用いた制御装置

発明者：井上喜雄、岡宏一、芝田京子、立花邦彦

権利者：高知県公立大学法人

種類：特許

番号：特願2015-237916

出願年月日：平成27年12月4日

国内外の別：国内

取得状況(計 0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

立花 邦彦 (TACHIBANA, Kunihiro)

高知工科大学・総合研究所・助教

研究者番号：10747794

(2) 研究分担者

井上 喜雄 (INOUE, Yoshio)

高知工科大学・総合研究所・教授

研究者番号：50299369

(3) 連携研究者

岡 宏一 (OKA, Koichi)

高知工科大学・システム工学群・教授

研究者番号：10160649

(4) 連携研究者

渡橋 和政 (ORIHASHI, Kazumasa)

高知大学・教育研究部・教授

研究者番号：70204295