

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 1日現在

機関番号：26402
 研究種目：挑戦的萌芽研究
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23656166
 研究課題名（和文） 医療分野への応用を意識した外部電源・力センサを必要としないマスタースレーブの開発
 研究課題名（英文） Development of a master-slave system without external power supply and force sensor for medical application
 研究代表者
 井上 喜雄（INOUE YOSHIO）
 高知工科大学・工学部・教授
 研究者番号：50299369

研究成果の概要（和文）：

バッテリー交換が不要で、力センサなしでも力覚を有するという従来にはない新しい概念の双方向のマスタースレーブシステムの基礎技術として、2台のモータおよびエネルギー回生を用いた制御システムを提案することができた。その基礎理論を確立し各種のパラメータのエネルギー効率への影響度を明確にするとともに、基礎実験により提案法の妥当性を検証した。さらに、提案する理論を用いて外部電源が不要で力覚を有する義手の実験装置を試作し、柔軟物の把持が可能であることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

As a new force feedback bilateral master-slave system without large external power supply and force sensor, we have developed a new control system using two DC-motors and energy recycling. We have derived the fundamental theory of the system and clarified the effect of the parameters on the energy efficiency and we have vilified the validity of the proposed method by carrying out the fundamental experiment. Further more, we have manufactured a proto-type of the prosthetic hand and confirmed that it can grip flexible material.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械力学・制御

キーワード：マスタースレーブ，エネルギー回生，義手，力覚，バイラテラル

1. 研究開始当初の背景

人間が生活で使用使用するインテリジェントなアクチュエータの一つである電動義手では、筋電位によりモータを制御する方法がとられており、学習によって、ある程度動かせるようにはなるが、壊れやすいものの

把持のような微妙な動作を行うことは難しい。人間の場合には位置制御の機能に加えて力覚を有していることから微妙な動作を可能にしているが、現状の筋電義手では、そのような制御を行うことは困難である。

特に、両前腕を失った人にとっては、義手が頼りであることから、微妙な動作に対するニーズは大きい。また、電源としてはバッテリーが用いられているが、電力を消費してしまえばバッテリーを交換するか充電する必要が生じる。一般的に、人間が着用して使用するアクチュエータでは、外部から電源を補充することが困難なので、駆動源をいかに確保するかは常に問題となる。もし、バッテリー交換が不要でかつ力覚を有する電動義手が開発できれば、使用者の生活レベルが格段に向上すると考えられる。

2. 研究の目的

電動義手のように人間が生活のなかで着用するアクチュエータを長時間使用する場合には、その動力源をどのように確保するかは大きい問題である。また、人間が壊れやすいものを把持するような場合には力覚が重要な役割を果たしており、義手を用いる場合でも力覚があれば微妙な把持が可能となる。そこで、(1)バッテリー交換が不要で、(2)力センサなしでも力覚を有するという従来にはない新しい概念のマスタースレーブシステムの基礎技術をエネルギー回生技術を用いて開発し、力覚を有しバッテリー交換が不要な義手の開発への応用の可能性を探る。さらに上記の技術を拡張し、より汎用性のある技術を開発し、医療分野の他のアクチュエータや医療以外の分野へも応用可能なキー技術に育てていくことを目的とした。

3. 研究の方法

図1に示しているような2台のモータを用いたマスタースレーブに関して、機構・電気・制御連成系としての近似モデルでの理論検討、詳細モデルでの数値シミュレーションと基礎実験を平行して実施する。まず、速度制御の回路を含ま

ない1次基本モデルからスタートし理論の妥当性を確認し、2次モデルでは外部電源および力センサなしで力覚を有するマスタースレーブが実現可能であることを明らかにする。また、理論・数値シミュレーションを用いて、パラメータの影響度を把握するとともにマスタースレーブの基本設計技術としてまとめる。

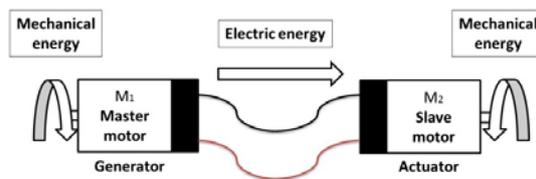


図1 2台のDCモータおよびエネルギー回生を応用したマスタースレーブシステムの概念図

次に、得られた設計技術を用いて、健全な肘関節で反対側の手を駆動する義手を設計製作し、実験により外部エネルギーの補充なしでも壊れやすいものが把持できることを確認する。さらに、基礎実験装置により、義手の実験で出てきた課題への対応を行なうとともに、バイテラル機能などに関する実験により機能の拡大をすすめ、義手以外への応用について検討する。

4. 研究成果

4.1 提案するシステムの概念および理論

本研究では、図1に示したように2台のDCモータを電気配線で結合し、一方のモータ（マスターモータ）を外部から動かせば、モータが発電機として動作し、力学的エネルギーを電気エネルギーに変換する。発生した電気エネルギーでもう一方のモータ（スレーブモータ）を駆動し、再度力学的エネルギーに変換するという考え方を基本としている。もし、電気回路内などにエネルギーロスがなけ

れば、マスター側でした仕事がスレーブ側にそのまま伝わる。また、2つのモータで電流を共有しているため、マスターモータとスレーブモータのトルクは比例する。2つのモータのアクチュエータ係数が等しければ、マスター側とスレーブ側のトルクはおおむね等しくなる。したがって、力センサなしでも力覚を有することになる。また、同じ特性のモータの場合には、電気回路の抵抗などによるロスのおかげでスレーブモータの速度がマスターモータよりも低下するものの、操作側でした仕事を再生してスレーブ側を駆動しているため駆動するための外部エネルギーが少なくすむことになる。

その基本的な考えかたの妥当性を確認し、各種パラメータの影響度を明らかにするために図2のような解析モデルについて、力学系の2つの運動方程式と電気回路の微分方程式を連立させて理論解析を実施した。

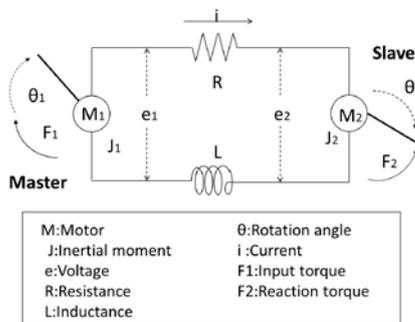


図2 基本システムの解析モデル

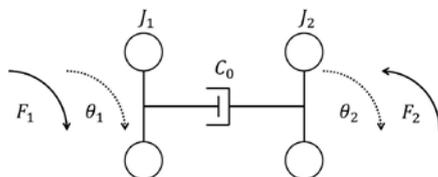


図3 等価な機械系モデル

人間が操作するマスタースレーブシステムを想定していることから、比較的ゆるやかな現象であると仮定すれば、連立微分方程式

のなかから電気回路の変数を消去することが可能となり、図3のような等価な機械系モデルが得られることを示した。

図3のシステムの等価な減衰定数 C_0 は、2つのモータのアクチュエータ係数が A (等しい場合) であるとすれば

$$C_0 = \frac{A^2}{R}$$

となる。このモデルをもとに、 P_M , P_S をそれぞれマスター側、スレーブ側の仕事率とし、エネルギー効率 e を、

$$e = P_S / P_M = \dot{\theta}_2 / \dot{\theta}_1$$

エネルギーの損失率 e_L を

$$e_L = 1 - e$$

で定義すれば、

$$e_L = T_S R / (A^2 \dot{\theta}_1) = (R / A^2) \times (T_S / \dot{\theta}_1)$$

となり、伝達トルクが大きくなれば、また入力速度が遅くなれば損失率が大きくなり、効率が低下することを示した。

また、図2、3を参照すれば、双方向に動作可能なシステムであることがわかる。

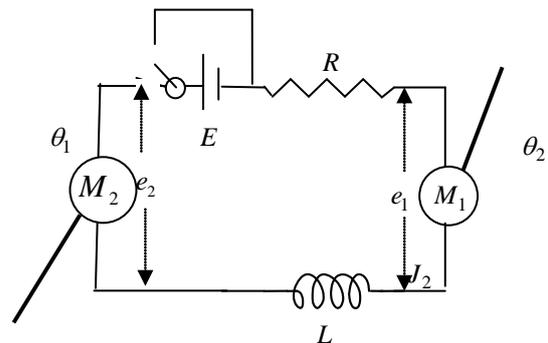


図4 速度低下防止のためのエネルギー補充モデル

基本モデルでは、電気回路内でのエネルギー損失などによりスレーブ側の速度がマスター側と比べて低下してしまう。それを防止するために、図4に示すような考え方で、小型バッテリーなどの外部電源より損失するだけのエネルギーを補充し、マスター側とスレーブ側の速度を一致させることを試みた。

その効果を実験により検証するためにHブリッジ回路を用いた図5のようなシステムを試作した。

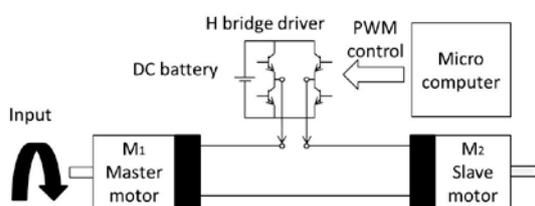


図5 エネルギー補充システムの概要

図5のシステムでマスター側の速度をランダムに変化させた場合のマスター側、スレーブ側の角変位の計測値の比較結果を図6に示している。図より両者はよく一致しており、スレーブはマスターとほぼ同一の動きをしていることを確認した。また、マスター側とスレーブ側のトルクはほぼ等しく、力センサなしでも力覚を有することを確認した。

図5のような同一のアクチュエータ係数のモータを用いる場合には、スレーブにマスターと同じ動作をさせるためには、外部電源からのエネルギー補充が必要である。

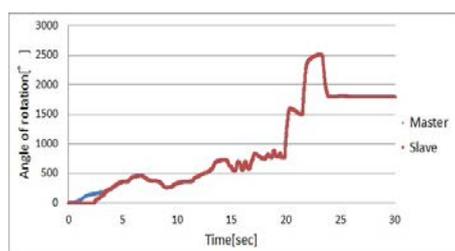


図6 マスターとスレーブの角変位

そこで、スレーブ側のアクチュエータ係数をマスター側よりも小さくすれば、あたかも増速機を挿入したことと同等になることを利用することにより、エネルギーロスがあっても、条件によっては図7のようにスレーブ側の速度のほうが早くなる。図は、スレーブ側の負荷が小さい場合であり、負荷が大きく速度が小さい場合には、増速効果があってもスレーブ側の速度はマスター側よりも低下する場合がある。

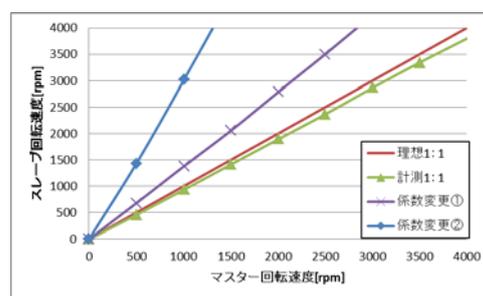


図7 異なったアクチュエータ係数のモータを用いた場合の実験結果

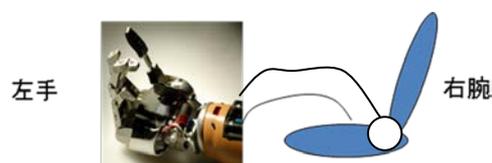


図8 提案する義手の概念図

本研究では、図8のような一方の肘に装着マスターモータでもう一方の腕に装着した義手を駆動し、義手で物を把持した場合の反力を肘部で直接感じることができること、およびバッテリー交換なしでも使用できることを特長としたマスタースレーブ型の義手の開発を目的としているので、図7で示したようなスレーブモータのアクチュエータ係数をマスター部よりも小さく設定した義手の検討を行った。制御しなければスレーブ側の速度がマスター側よりも大きくなる場合

には、ブレーキをかけつつエネルギーをバッテリーに回収し、ブレーキ側の速度が小さくなってしまふ場合や、速度ゼロでものを把持している場合にはバッテリーからエネルギーを供給し、トータルでエネルギー収支がマイナスにならないシステムをめざし、図9のような義手の実験装置を試作し、実験を行い柔軟なものでも把持できることを確認した。今後、模擬臨床実験などを実施し、バッテリー交換なしで使用できる条件の検討やより使用しやすい形状の検討などを行い実用化を目指していく予定である。



図9 試作した義手実験装置の外観

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

(1) Chunguang Li, Yoshio Inoue, Tao Liu, Lining Sun, Validation of bimanual coordinated training supported by a new upper-limb rehabilitation robot: a near-infrared spectroscopy study, Disability and Rehabilitation: Assistive Technology, Vol. 8, No. 1, Pages 38-48, January.2013, doi:10.3109/17483107.2012.671439

(2) C.Li, Y.Inoue, T.Liu, K.Shibata, Modeling and Verification of a Bimanual-Coordinated Training System, Advanced Robotics, Advanced Robotics, Vol.25, 2011, 1969-1989., DOI: 10.1163/016918611X588880

〔学会発表〕(計7件)

(1) 井上喜雄, 市原哲也, 山本哲弘, 赤嶋成

信, 芝田京子, 劉涛, エネルギー回生型双方向マスタースレーブの開発, 日本設計工学会四国支部講演会, pp.61-64, 高松, 2013/03/19

(2) 井上喜雄 劉涛 芝田京子 市原哲也 山本哲弘, 上肢リハビリテーションのためのエネルギー回生型双方向マスタースレーブ, シンポジウム: スポーツアンドヒューマンダイナミクス2012, 311, 11/16, 豊橋

(3) 伊賀上貴幸, 井上喜雄, 芝田京子, 劉涛, 市原哲也, 能動的リハビリテーションのためのエネルギー回生型マスタースレーブの研究, ABML2011, 2011/11/4, 東京

(4) 市原哲也, 伊賀上貴幸, 井上喜雄, 芝田京子, 劉涛, エネルギー回生を応用したマスタースレーブに関する研究, 日本機械学会, D&D2011, 2011/9/5, 高知

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 喜雄 (INOUE YOSHIO)

高知工科大学・工学部・教授

研究者番号: 50299369

(2) 研究分担者

辻内 伸好 (TSUJIUCHI NOBUTAKA)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号: 60257793

芝田 京子 (SHIBATA KYOKO)

高知工科大学・工学部・准教授

研究者番号: 00307117

小池 関也 (KOIKE SEKIYA)

筑波大学・人間総合科学研究科・准教授

研究者番号: 50272670

長谷 和徳 (HASE KAZUNORI)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号: 10357775

武政 龍一 (TAKEMASA RYUICHI)

高知大学・医歯学系・講師

研究者番号: 20294837