

## 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

### Study on master-slave system implementing energy regeneration for active rehabilitation

○伊賀上貴幸 (高知工大院) 井上喜雄 (高知工大) 芝田京子 (高知工大)  
劉濤 (高知工大) 市原哲也 (高知工大院)

Takayuki IGAUE, Kochi Univ. of Tech.

Yoshio INOUE, Kochi Univ. of Tech.

Kyoko SHIBATA, Kochi Univ. of Tech.

Tao LIU, Kochi Univ. of Tech.

Tetsuya ICHIHARA, Kochi Univ. of Tech.

**Abstract:** In recent years, the number of patients with a disabled limb is increasing globally, with development of the aging society. The study proposes “The wearable master-slave system implementing energy regeneration for active rehabilitation” that is expected to be used for the equipment to assist rehabilitation for above patients. The proposed system consists of two identical DC-motors and has two main advantages. One is miniaturization of drive sources with energy regeneration and the other is force sensing without force sensors. In this paper, I describe the theory of the proposed system and report the result of experimental characterization and a challenge to performance upgrade.

**Key Words:** Master-Slave, Energy regeneration, Force sensing

#### 1. はじめに

現在、高齢化社会の進行に伴って、上肢や下肢に障害を有する患者が増加しつつある。その障害を克服するためには、効果的なリハビリテーション（以下リハビリ）を行えるかどうかが重要である場合が多い。

一般的には、麻痺した上肢のリハビリに関しては、看護師などから患者が受動的にリハビリを受ける場合が多いが、近年それを自分の意思で行えば脳神経との関連で回復が早くなるということも言われている。その実現のために、健常な上肢を動かしてそれをセンシングした信号により障害を持つ側の上肢を空気圧で駆動するという研究が報告<sup>(1)</sup>されているが、空気圧源や外部電源が必要となる。また、力覚が必要な場合には力センサも必要となり装置が大掛かりになることが懸念される。もし、コンパクトで外部電源が不要な、ウェアラブルなリハビリ支援装置が実現できれば、在宅や社会生活を行いながら、時間や場所に囚われず自分の意思でリハビリを行うことが可能となると考えられる。

そこで本研究では、エネルギー回生技術を用いたマスタースレーブシステムを提案する。提案するシステムでは、電気回路を共有する2つのDCモータにより構成されているため、一般的なマスタースレーブシステムとは異なり、マスター側での力学的エネルギーを発電機としてのマスター側のDCモータにより電気エネルギーに変換し、その電気エネルギーでスレーブモータを駆動して再び力学的エネルギーに変換してスレーブ側を駆動することになる。そのような方法を用いれば、大型の外部動力源を用いずマスタースレーブとしての動作が可能になると考えられる。この特徴を利用すれば、このシステムを用いたリハビリ支援機器は、使用者が身に付けられる程の小型化が実現できるものと考えられる。

さらに、本システムにはもう1つの大きな特徴がある。それは、2つのDCモータが電流を共有することにより、直接トルク

が伝達されるため、力センサを用いなくても力を感じながらの操作が可能となる点である。この利点は、小型な装置でありながら、力覚を持った操作が実現でき、特に人の使用する機器には、非常に有効に働くであろうと考えられる。

これら2つの特徴を持った本システムを使用することで、例えば、健常な部位のエネルギーを回生し、障害を有する部位を動かすといった新しい考えのウェアラブルな装置の実現が期待できる。さらに、力覚を持って操作をすることにより、使用者が自身の意思に基づいた、安心安全且つ能動的なリハビリが可能となり、効果の向上に寄与できるものと考えている。

ここでは、提案するシステムの概要および原理について示した後、提案するシステムに基づき製作した装置を用いて行った各種の実験結果について報告する。

#### 2. システムの概要

##### 2-1 システムのモデル

提案するシステムのモデルを図1に示す。

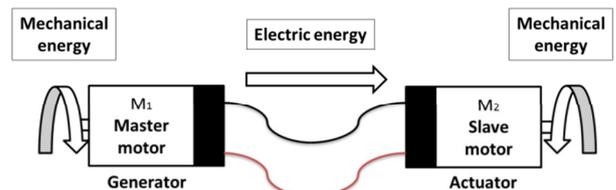


Fig.1 model of proposed system

図のように提案するシステムは、2つのDCモータにより構成され、一方のモータをマスター、もう一方をスレーブとし、2つのモータ間は電氣的に接続されている。マスターに対して仕事（力学的エネルギー）が加えられると、マスターのモータは発電機として働き、加えられた仕事を電気エネルギーに変換し、

スレーブのモータへと回生する。それを受けたスレーブのモータはアクチュエータとして働いて、電気エネルギーを仕事に変換して動作する。このように、DCモータの特性を活かして、エネルギーの変換・回生を行うことで動作するシステムである。

また、本システムでは操作を加えられたモータが発電機として動作するため、どちらのモータがマスターになっても動作できる、バイラテラルなシステムであることも特徴である。

## 2-2 システムの利点

従来のマスタースレーブシステムと比較して、本システムは2つの利点を持っている。1つ目は、エネルギー回生により、従来のモータを用いたマスタースレーブシステムでは無駄になっていたマスターモータの発生するエネルギーを有効に利用できる点である。それにより、駆動源を小型化できる可能性がある。2つ目は、2つのモータが1つの電気回路内に存在し、共通の電流が流れることにより、力センサを用いなくてもマスターでスレーブの反力を感じながら、すなわち力覚を持って、操作が可能となる点である。

## 2-3 システムの原理

提案するシステムは図2のような電気回路として表すことができる。

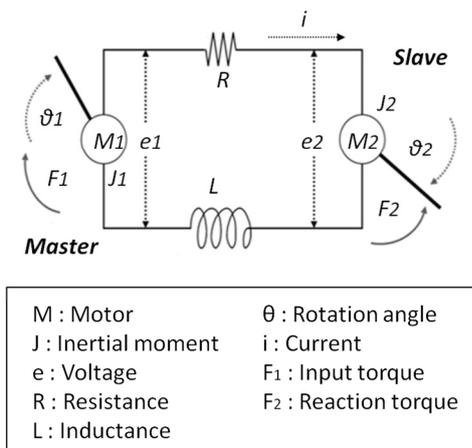


Fig.2 Equivalent circuit

DCモータの特性として、トルク  $T$  が流れる電流  $i$  に、誘導電圧  $e$  が回転速度  $\dot{\theta}$  に比例するという関係がある。つまり、

$$T = Ai \quad (1)$$

$$e = A\dot{\theta} \quad (2)$$

となる。ここで、 $A$  はアクチュエータ係数（トルク係数、逆起電力定数の総称でありモータ固有の値）である。この関係を用いてマスターとスレーブの運動方程式を立てると、それぞれ

$$J_1\ddot{\theta}_1 = -T_1 + F_1 = -A_1i + F_1 \quad (3)$$

$$J_2\ddot{\theta}_2 = T_2 - F_2 = A_2i - F_2 \quad (4)$$

さらに、電気回路の運動方程式は

$$L\dot{i} + Ri = e_1 - e_2 \quad (5)$$

となる。マスターとスレーブに同じアクチュエータ係数のモータを使用するとして

$$A_1 = A_2 = A \quad (6)$$

とし、比較的緩やかな動作を考え、インダクタンス  $L$  の影響を無視すれば式(5)は

$$i = A(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) / R \quad (7)$$

と変形することができる。さらに、式(7)を式(3)、(4)に代入し、電気系の変数である電流  $i$  を消去すれば

$$J_1\ddot{\theta}_1 = -(A^2/R)(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + F_1 \quad (8)$$

$$J_2\ddot{\theta}_2 = (A^2/R)(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) - F_2 \quad (9)$$

となる。ここで

$$C_0 = A^2/R \quad (10)$$

と置けば、以下のように等価な機械系としての運動方程式が得られる。

$$J_1\ddot{\theta}_1 = -C_0(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + F_1 \quad (11)$$

$$J_2\ddot{\theta}_2 = C_0(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + F_2 \quad (12)$$

これらの式は、機械系の変数  $\theta$  のみで表されており、 $C_0$  を等価な減衰定数と考えれば、以下の図3のような、2つの慣性モーメントが減衰で結合された機械系のみと等価である。

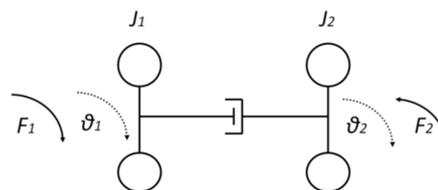


Fig.3 Equivalent mechanical system

ここで、2つの慣性モーメント、つまり2つのモータの慣性力が十分小さい場合であれば、近似的に

$$F_1 = F_2 \quad (13)$$

となり、スレーブの反力とマスターで加える力が等しくなる。つまり、力センサを用いなくてもマスターでスレーブの反力を直接感じながら操作することが可能となる。

システムの運動性能に関しては、反力が小さければスレーブを動かすための駆動源を用いなくてもスレーブとマスターは同等の速度で動作する。しかし、マスタースレーブ間が減衰で接続されているため、反力が大きくなると減衰によりエネルギーが失われマスタースレーブ間に速度差が生じてしまう。この速度差は等価な減衰定数が十分に大きくなれば生じないと思われるため、等価な減衰定数の向上が性能改善には重要であると思われる。また、この機械系の減衰によって失われるエネルギーは、等価な電気回路の抵抗  $R$  によって失われるエネルギーと一致するため、この電気エネルギーの損失を解決することによって、運動性能の改善を図ることが可能となると思われる。

### 3. 運動性能の改善

前章で述べたように、本システムにはマスターからスレーブへの回生の途中で、電気系の抵抗によりエネルギーが失われるために、マスタースレーブ間に速度差が生じてしまうといった問題がある。そこで、本章では、いくつかの性能改善方法を提案し、実機を用いてその有効性を確認した結果を報告する。

#### 3-1 追加電源によるエネルギー補充

性能を改善する方法の1つとしては、電気回路内で失われる電気エネルギーを、外部電源などを用いて電圧として補充する方法である。追加する電圧量を決定する方法としては、いくつか考えられるが、ここでは速度フィードバックを使用した方法を紹介する。

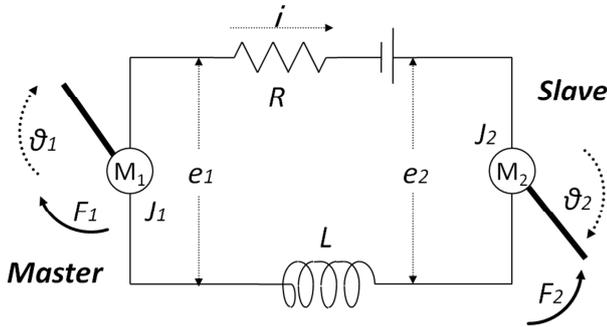


Fig.4 Circuit with improvement method

2つのモータの速度を、エンコーダなどを用いてリアルタイムにセンシングし、マスタースレーブ間の速度差を計測する。その速度差により

$$e = p(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \quad (14)$$

式(14)で表現される電圧を図4のように回生の途中に加えることで、電気回路の式は

$$\begin{aligned} Li + Ri &= e_1 - e_2 + e \\ &= e_1 - e_2 + p(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \end{aligned} \quad (15)$$

となり、インダクタンスLの影響を無視すれば

$$\begin{aligned} Ri &= e_1 - e_2 + p(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \\ &= (A + p)(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \end{aligned} \quad (16)$$

となる。これにより等価な減衰定数Cは

$$C = A(A + p)/R = C_0 + Ap/R \quad (17)$$

となり、pを大きくすることによって、等価な減衰定数Cを十分大きくすることが可能となると思われる。また、電気的に見れば、失われる分の電気エネルギーを速度差に応じて補充することにより、性能改善が実現すると考えられる。

#### 3-2 特性の異なるモータの組み合わせ

この方法は、マスターとスレーブでアクチュエータ係数Aの異なるモータを使用することにより、増速機能を実現する方法である。ここでは

$$A_2 = nA_1 \quad (18)$$

とし、マスター、スレーブ、電気回路それぞれの運動方程式を立て電気系の変数である電流*i*を消去することで、マスターとスレーブの運動方程式はそれぞれ

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\theta}_1 &= -(A_1^2/R)(\dot{\theta}_1 - n\dot{\theta}_2) + F_1 \\ &= -C_1(\dot{\theta}_1 - n\dot{\theta}_2) + F_1 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} J_2 \ddot{\theta}_2 &= (A_1^2/R)(n\dot{\theta}_1 - n^2\dot{\theta}_2) - F_2 \\ &= C_1(n\dot{\theta}_1 - n^2\dot{\theta}_2) - F_2 \end{aligned} \quad (20)$$

となる。ここでC<sub>1</sub>が十分に大きければ、

$$\dot{\theta}_1 = n\dot{\theta}_2 \quad (21)$$

が成り立つ。これにより、アクチュエータ係数の組み合わせを変更することで、速度変換機構などを用いなくても増速・減速が可能となる。これを用いれば、電気系のエネルギー損失を受けても、スレーブがマスターよりも速く動作することは可能であると思われるので、動作性能の改善に効果が期待できると思われる。

#### 3-3 確認実験

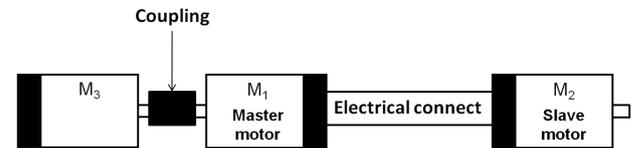


Fig.5 Experimental methodology

上述した、アクチュエータ係数を変更する方法が、実際の装置でも効果を発揮できるかの確認のために、簡単な計測実験を行った。図5に示すように、安定した回転数を得るための入力用モータをマスターのモータにカップリングを用いて締結し、入力用モータを動作させたときのマスター、スレーブのモータの回転数を、同特性のモータを用いた場合、異なるアクチュエータ係数の場合の2種類計測した。その結果を図6に示す。

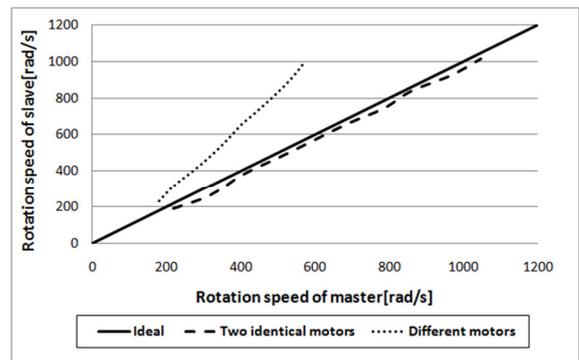


Fig.6 Comparison of rotational speed

図より、まずマスターとスレーブに同じモータを用いた場合には、マスタースレーブの速度が 1:1 である理想と比較して、電気系の抵抗のエネルギー損失によりスレーブで速度が低下していることが確認できる。対して、異なるアクチュエータ係数のモータを組み合わせた場合には、スレーブで大幅に速度が増加していることが確認できる。この結果より、アクチュエータ係数の変更による増速効果を実機でも確認することができた。

#### 4. 速度制御実験

3章で紹介した、リアルタイム速度フィードバックを使用して電圧を補充する性能改善方法を用いて、速度制御実験を行った。

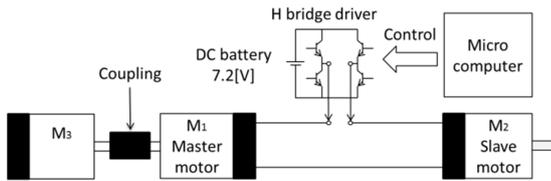


Fig.7 Speed control system

図7に実験装置の概略を示す。図のように、マスターからスレーブへの回生途中に、モータの正逆転の切り替えに用いられることの多いHブリッジドライバを接続し、定電圧の外部電源からのエネルギーの供給方向を切り替えることができるような回路構成となっている。これにより、マスターの回転方向に合わせてエネルギーの供給方向を決定でき、双方向回転に対して速度制御を行うことが可能となる。

制御の流れは、まずマスターの回転方向を判別し、エネルギーの供給方向を決定する。その後、マイコンからのPWM出力により、外部電源への接続、非接続を高速で切り替えることで、エネルギーの大きさを任意に調整し、補充を行っている。

ここで、回路に補充される電圧を考えると、外部電源への接続時間を $T_1$ 、非接続時間を $T_2$ 、外部電源電圧(一定)を $E$ とすれば、実際に補充される電圧 $e$ は近似的に

$$e = \frac{T_1}{T_1 + T_2} E \quad (22)$$

となる。これに基づいて、この実験では図8に示すような制御システムにより、PWM信号のデューティ比を計測した速度差に応じてリアルタイムで変化させることによって、補充する電圧の大きさを決定している。

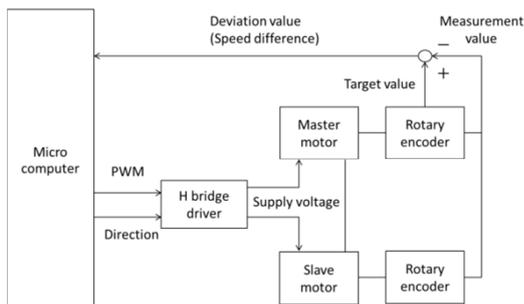


Fig.8 System configuration

ここでは入力用モータ $M_3$ により、マスターモータの回転速度を緩やかに変化させ、それに対するスレーブの追従の様子を計測した結果を図9に、マスターモータに手動で双方向の入力を与えた場合の計測結果を図10に示す。なお、図10の回転速度は、正が正転、負が逆転を表している。

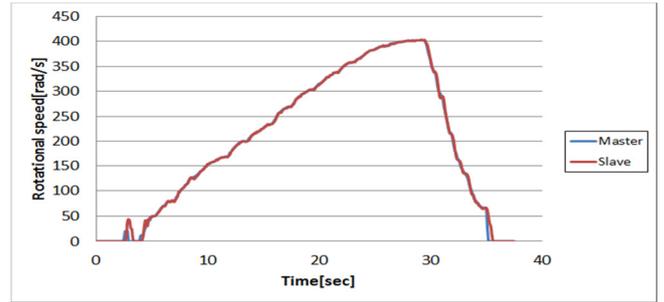


Fig.9 Speed control result 1

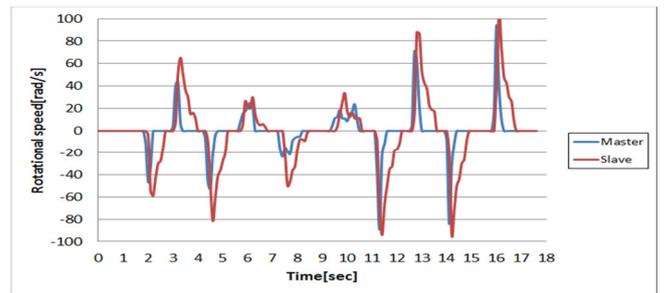


Fig.10 Speed control result 2

まず図9より、緩やかな速度変化に対しては、マスターとスレーブの回転速度がほぼ一致していることが確認できる。しかし終盤のマスターの立下り時に、スレーブの追従に若干の遅れが見られる。そこで、先程よりも急激な速度の変化を手動で与えた場合の結果を図10より確認すると、その追従の遅れがより顕著に表れている。双方向回転のマスターの立上がり時には、若干のオーバーシュートはあるものの、十分な速さで追従しているが、マスターの立下り時、スレーブの回転速度がマスターを上回った場合に追従の遅れが確認できる。これは、スレーブの減速が、モータの慣性のみによるものであるためと思われる。この問題は、モータの短絡制動を用いる、エネルギーを削減する向きに外部電源を接続するなどの方法で解決を図っていく。

#### 5. おわりに

能動的なリハビリを支援する機器への応用を目的として、エネルギー回生を用いたマスタースレーブシステムを提案し、その問題点である、電気系の抵抗によるエネルギー損失に関して改善方法の提案、有効性の確認を行った。さらに、エネルギー補充法を用いた制御により速度差の改善の実現性と、その課題を確認した。結果として、提案システムの妥当性を確認し、リハビリ支援機器等への応用の見通しが得られた。

#### 参考文献

- (1) 藤本 弘道, 空気圧式ゴム人口筋を用いた脳卒中患者向け上肢リハビリ支援スーツ, モーションエンジニアシンポジウム, 2008, C3-2-2-10, 2008.