

平成 21 年 5 月 10 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760174
 研究課題名 (和文) 機能性流体クラッチを用いた安全性の高い足部痙性シミュレータ
 研究課題名 (英文) Highly safe leg-robot to simulate spastic movements of brain-injured patients using MR Fluid clutch
 研究代表者
 菊池 武士 (TAKEHITO KIKUCHI)
 大阪大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号：10372137

研究成果の概要：超高齢社会を迎え、わが国では脳卒中患者が 140 万人以上、その半数が片麻痺を発症すると言われている。このような中、理学療法士らによる適切な医学的リハビリテーションが患者の QOL の向上、自立支援には必要不可欠である。そこで本研究では、様々な筋トーン異常（折りたたみナイフ現象や固縮）や反射異常（クローヌス）を再現可能な足関節ロボットを開発し、PT 学生が機能異常の理解や、治療手技の習熟の可能な環境を提供した。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2007 年度 | 1,500,000 | 0 | 1,500,000 |
| 2008 年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,400,000 | 270,000 | 2,670,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学

キーワード：人間機械システム, リハビリテーション科学, 運動療法学

1. 研究開始当初の背景

超高齢社会を迎え、わが国では脳卒中患者が 140 万人以上、その半数が片麻痺を発症すると言われている。このような中、理学療法士らによる適切な医学的リハビリテーションが患者の QOL の向上、自立支援には必要不可欠である。しかし理学療法士 (PT) の養成校の現場では、本来対象とすべき筋緊張に異常をきたした患者の関節を目の当たりにすることはほとんどなく、通常は健常者による模擬によって手技の練習が行なわれる。中枢神経系異常を原因とした筋緊張の異常は、日常経験することではなく、被験者となる学生 (以下、PT 学生) もその神経病理学的

理解が十分でない状況で実習を行わざるを得ない。このような環境では、実際の患者の徴候を再現することは不可能である。また、実際の患者を被験者にすることが可能であったとしても、折りたたみナイフ現象などは、最初のチェック動作（異常な筋緊張を誘発するための初期の運動刺激）で出現すれば、それ以降、他動的に動かされたことにより抑制がかかり出現しにくくなる。一旦抑制のかかった病的徴候を実習のために惹起することは倫理的に許されることではない。

2. 研究の目的

本研究では、様々な筋トーン異常（折り

たたみナイフ現象や固縮)や反射異常(クローヌス)を再現可能な足関節ロボットを開発し、PT学生が機能異常の理解や、治療手技の習熟の可能な環境を提供する。具体的には、関節可動域訓練および筋力増強訓練の実習教育が可能な足ロボットシステムの開発を目指す。

医療・看護教育シミュレータは市販のものが多数存在するが、人体の力学的特性を再現するためには能動的に動作可能なシミュレータが必要となり、そのようなものは市販では存在しない。また、近年、ダイレクトドライブモータを用いた膝関節の訓練シミュレータに関する研究開発が行われているが、モータによるダイレクトドライブは暴走時の危険性を考慮して多くの安全対策が必要であり、製造責任への配慮が過大となるだけでなく、ユーザサイドでの使用上の配慮等負担も大きくなる。理学療法の手技は患者と極めて近接して行うため、安全に対する配慮は非常に重要である。

本研究で開発する痙性シミュレータは、力発生源であるモータとそれを操作するPT学生の間にはMR流体クラッチ(図1参照)を介在させたロボット機構(そのイメージを図2に示す)を用いる。これにより、ダイレクトドライブ方式よりも数段高い安全性を有するシステムの実現が可能である。

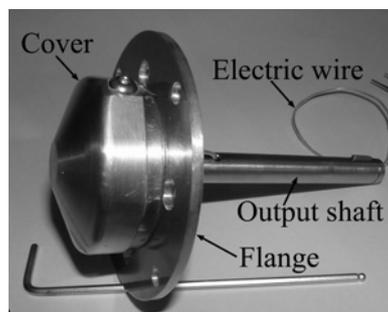


図1. MR 流体クラッチ

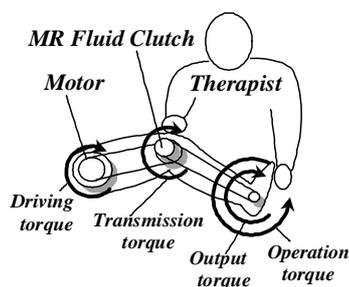


図2. 概念図

3. 研究の方法

(1) 研究の対象

足関節は下腿部と足部よりなる関節であり、下腿部の骨(太いほうをけい骨(tibia),

細いほうを腓骨と言う)と足部の骨(特に距骨(talus))の接合部である。足関節の動作は実際には三次元的であるが、本システムではこのうち、底背屈の一軸動作を対象とする。すなわち、内反、外反等は扱わない。

足関節の背屈(つま先を持ち上げる動作)は、主に前けい骨筋(tibialis anterior)の収縮により引き起こされる。底屈(背屈の逆方向)は主に腓腹筋(gastrocnemius)とヒラメ筋(soleus)によって引き起こされる。腓腹筋とヒラメ筋は共通の腱(これをアキレス腱と言う)によって踵骨隆起に接合している。また、腓腹筋は足関節と膝関節にまたがる二関節筋であり、足関節の底屈のみでなく膝関節の屈曲にも関与している。ヒラメ筋は足関節に対する単関節筋であるため足関節の底屈のみに関与する。足関節の正常な底背屈は歩行動作において重要である。

筋は筋紡錘および腱紡錘(ゴルジ腱器官)の二つのセンサを有する。筋紡錘は筋の長さおよびその変化速度を検出する。腱紡錘は筋張力の情報を検出する。上位中枢からの指令値は一旦、脊髄を經由し、筋の収縮力の指令値は α 運動ニューロンによって、また筋紡錘の感度調整信号は γ 運動ニューロンによって連絡している。 α 運動ニューロンからの指令により筋が収縮すると筋紡錘は弛んで感度が低下してしまう。これを防ぐために α 運動ニューロンと γ 運動ニューロンは連動して変化する(α - γ 連関)。

筋紡錘からの変化速度の情報は求心性のIa線維によって、また長さに関する情報はII線維によって脊髄にフィードバックされる。これらの信号は α 運動ニューロンに興奮性の信号として伝えられる。すなわち、筋を速やかに伸張すると反射的に筋は収縮する。これを伸張反射と言う。

同様に腱紡錘からの情報はIb線維によって脊髄にフィードバックされる。腱紡錘は一種のリミットスイッチであり、筋(腱)への張力がある一定値を超えるとその筋への抑制性の信号を出力して収縮を弱める。これと同時に、拮抗する筋の興奮性を高めて筋の破断を防ぐ。

人間の巧みな動作は、上位中枢からの的確な指令と上記の反射メカニズムをうまく使うことで実現している。脳卒中片麻痺における異常動作は末梢神経系の反射メカニズムの異常ではなく、上位中枢からの指令が正常に行われなかったために発生していると考えられる。具体的な症状としては痙縮(速度に依存した筋緊張)、折りたたみナイフ現象(痙縮を発生させ続けた際にある関節角度で急に抵抗力がなくなる現象)およびクローヌス(律動的な異状反射挙動)を単独もしくは複合的に発生する。本シミュレータではこれらの異常挙動を模擬することを目的とする。

(2) 足関節トルクを制御するためのMR流体クラッチ

本研究で開発する痙性シミュレータは、図2に示したように力発生源であるモータとそれを操作する操作者の間にトルク制御クラッチを介在したシステムとする。駆動用モータとしては運動の方向と速度（静止も含める）のみを制御し、介在するトルク制御クラッチによって出力トルクを制御する。このとき、クラッチには高いトルク/慣性比と良好な応答速度が要求される。

開発するシステムにおいては、研究代表者らが開発したコンパクトMR流体クラッチを採用した。コンパクトMR流体クラッチは、多重円盤-微小ギャップ構造(図3参照)を採用し、従来のMR流体クラッチよりも高いトルク/慣性比を実現している。

内部の電磁コイルへの電流入力によって磁場を発生し、MR流体の粘性変化により伝達トルクを制御できる。電磁コイルへの電流供給用ワイヤは出力軸の中心を通して引き出した。本クラッチは、最大トルク約5.0Nm（1A印加時）、基底摩擦トルク0.15Nm（回転速度1rad/sの時）、重量237gである。

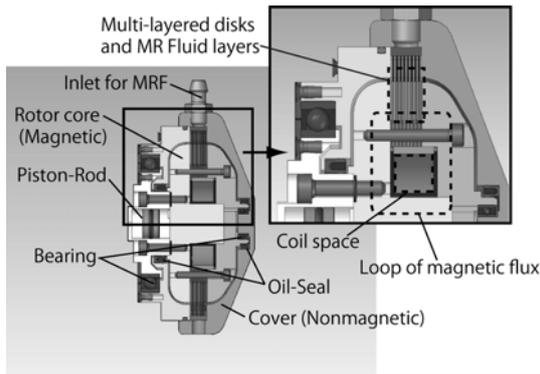


図3. コンパクト流体クラッチ

(3) 足部痙性シミュレータ

開発した下肢ロボットの外観を図4に、基本構造を図5に示す。駆動用アクチュエータとしては前述のDD(ダイレクトドライブ)モータを用い、カップリングによって下肢ロボットと駆動用DDモータを連結して使用する。

足関節の角度はポテンショメータ（緑測器製、CP-2FK、電気角度340度）により計測する。足関節におけるトルク出力は前述のMR流体クラッチ(図中の“Compact MRF Clutch”)を使用する。

サイズおよびトルクの関係上、MR流体クラッチは膝関節部に搭載し、ベルトプーリ機構によってふくらはぎ部分までに20/48の減速で伝達し、そこからさらに足部までリンク機構によって3/5(=21mm/35mm)に減速する。したがって、全体として1/4の減速に相当する。

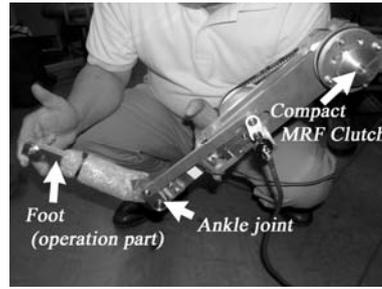


図4. 足部痙性シミュレータ

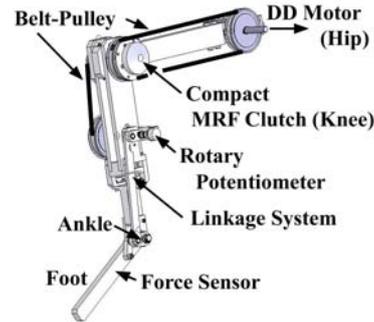


図5. 足部痙性シミュレータの基本構造

4. 研究成果

(1) 痙縮の実現

痙縮を再現するための制御フローを図6に示す。この全工程において、DDモータはサーボロックされている。すなわち、ロボットからの能動的な動作はなく、操作者が与える運動に対して抗力を提示するだけのパッシブモードにて制御を行う。図5では、 T はロボットにより提示するトルク[Nm]、 ω は足関節の回転速度[rad/s]を表している。 η は粘性係数[Nms]であるが、ここでは痙縮を粘性力と仮定して制御した。

実験結果を図7に示す。MRクラッチの適切な速度制御により、速度に比例した痙縮の模擬的な挙動を提示できた。

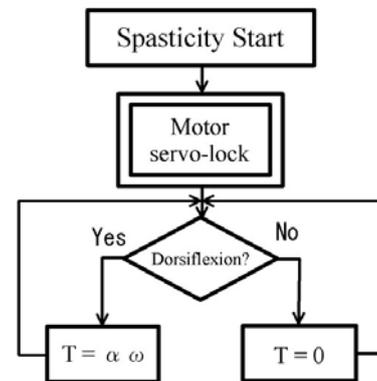


図6. 痙縮の制御フロー

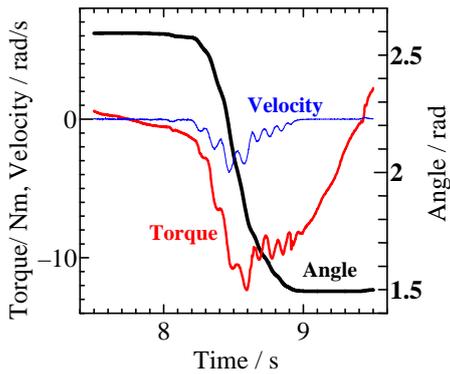


図7. 実験結果：痙縮

(2) クローヌスの実現

クローヌスを発現するための制御フローを図8に示す. この制御フローでは, 実験開始時には DD モータはサーボロックされているが, 一旦, クローヌスモード (Ankle clonus) に突入すると一定速度で速度制御される. 操作者はクローヌスを発現するために足部を他動的に回転させてその速度を ω_{clonus} よりも大きくしなければならない. クローヌスモードにおいては, MR クラッチを ON-OFF 制御することによりクローヌス特有の律動的挙動を再現する. 図9に実験結果を示す. 足間接における律動挙動が再現されていることがわかる.

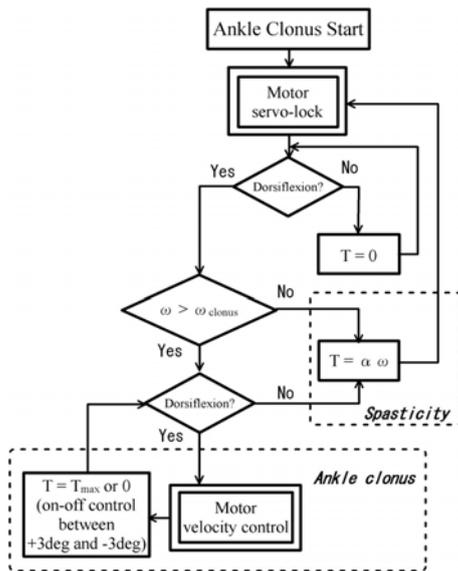


図8. クローヌスの制御フロー

(3) 総括

以上のように, 本システムを使用すれば制御アルゴリズムを変えるだけで様々な異常動作を再現することができ, 訓練者は人を対象とする訓練とは違い, 自分が納得できるだけ手技の練習を行うことができる. 主な操作

者としては理学療法を学習中の学生となるが, これらの模擬動作により, 操作者は適切な検査手法等を力覚を通じて理解することができる.

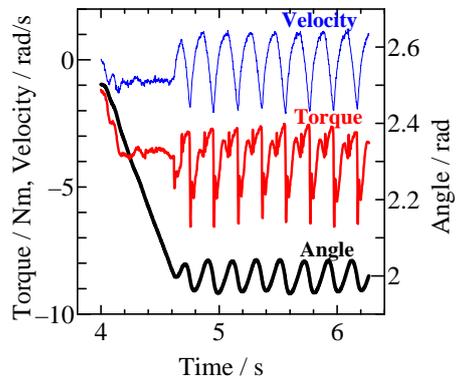


図9. 実験結果：クローヌス

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

① 菊池 武士, 小田 邦彦, 山口 紗代, 古荘 純次, コンパクトMR流体クラッチを用いた足部痙性シミュレータの開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 7 or 8, in press (2009), 査読あり

[学会発表] (計10件)

① Takehito Kikuchi, Kunihiro Oda, Junji Furusho, Simulation of Clonic Movement with Leg-Robot Driven by Compact MR Fluid Clutch, The 2009 IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics, in press (2009. 6, Kyoto, Japan).

② Takehito Kikuchi, Kunihiro Oda and Junji Furusho, Development of Leg-Robot for Simulation of Spastic Movement with Compact MR Fluid Clutch, The 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, in press (2009. 5, Kobe, Japan).

③ 菊池 武士, 小田 邦彦, 古荘 純次, コンパクトMR流体クラッチを用いた足部痙性シミュレータによる痙性挙動の実現, 第48回日本生体医工学会大会, p. 361 (2009. 4, 東京).

④ 菊池 武士, 小田 邦彦, 古荘 純次, コンパクトMR流体クラッチを用いた足部痙性シミュレータおよび神経-筋制御系モデルに基づく力覚制御, 第9回システムインテグレーション部門講演会, pp. 619-620 (2008. 12 長良川国際会議場, 岐阜).

⑤ 菊池 武士, 小田 邦彦, 趙 暁輝, 田中大貴, 古荘 純次, コンパクトMR流体クラッ

チを用いた足部痙性シミュレータの開発,
第26回日本ロボット学会学術講演会, 3K3-10
(2008.9, 神戸大学).

⑥ Takehito KIKUCHI, Kunihiko ODA and
Junji FURUSHO, Leg-robot with MR Fluid
Clutch and its haptic control for virtual
spastic movements, The 3rd
Japan-China-Korea Joint Workshop on
Robotics, pp.1-2 (2008.9 in Toyama,
Japan).

⑦ Takehito KIKUCHI, Kunihiko ODA, Sayo
YAMAGUCHI and Junji FURUSHO, Leg-robot
with MR Clutch to realize virtual spastic
movements, The 11th International
Conference on Electrorheological Fluids
and Magnetorheological Suspensions,
(2008.8 in Dresden, Germany).

⑧ 菊池 武士, 山口紗代, 趙曉輝, 小田邦彦,
古荘純次: MRクラッチを用いた足部痙性
シミュレータの開発, 日本機械学会 2008 年
ロボティクス/メカトロニクス講演会,
2P2-F12 (2008.6, 長野市).

⑨ 菊池 武士, 山口 紗代, 小田 邦彦, 古
荘 純次, MRクラッチを用いた足部痙性シミ
ュレータに関する基礎研究, 第47回日本生
体医工学会大会, pp.635-636 (2008.5, 神戸
市).

⑩ 菊池 武士, 山口 紗代, 小田 邦彦, 古
荘純次: MRクラッチを用いた足部痙性シミ
ュレータの開発, 第8回計測自動制御学会シ
ステムインテグレーション部門講演会,
pp.1166-1167 (2007.12, 広島国際大学).

[その他]

ホームページ等

[http://www-dyna.mech.eng.osaka-u.ac.jp/
research/PDF2008/bme2008-leg-robot.pdf](http://www-dyna.mech.eng.osaka-u.ac.jp/research/PDF2008/bme2008-leg-robot.pdf)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊池 武士 (TAKEHITO KIKUCHI)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 10372137

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし