応用論文

理学療法手技の訓練を目的とする足部痙性シミュレータ (Leg-Robot) による足クローヌスの再現と 理学療法学科学生による性能評価

菊池武士¹⁾, 小田邦彦²⁾

1. 緒言

超高齢社会を迎え、わが国では脳卒中患者が200万人以上、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 (Physical therapist, 以下, PTと略) 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 (学生同士) 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、日常経験することは少なく、被験者となる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難しい。臨床現場において、PTらは検査測定結果に基づいてリハビリテーションの到達目標や訓練プログラムを決定する。しかしながら、多くの検査方法は定性的で検査者の習熟度に大きく依存することが現場の大きな課題となっている。的確な検査測定を実施できない場合、その後の訓練プログラムも不適切になり患者に多大

Demonstration of Ankle Clonus by the Leg-Robot, a Leg-shaped Haptics Simulator of Patients for the Purpose of Educational Training of Physical Therapy and its Performance Evaluation by Students of School of Physical Therapy

Takehito KIKUCHI, Kunihiro ODA

Abstract :

We have developed the Leg-Robot, a leg-shaped haptic simulator of patients with any nerve disease for the purpose of educational training of physical therapy. In this paper, we suggest a control method to demonstrate ankle clonus with the Leg-Robot and evaluate its performance by students of school of physical therapy. According to the comparison of the experimental results of young students and a matured physical therapist, we were able to find obvious differences between their manners of manual tests.

Key words :

Physical therapy, Education, Haptics simulator, Compact MR fluid clutch, Clonus

1) 山形大学大学院理工学研究科, Yamagata University

2) 大阪電気通信大学医療福祉工学部理学療法学科, Osaka Electro-Communication University

な不利益を与える可能性もある。スキルの高いPTら療法士を養成することは障害者の福祉において重要な課題である。

そこで本研究では、様々な筋緊張異常（痙縮、折りたたみナイフ現象、固縮等）¹⁻⁸⁾や反射異常（クロウヌス等）⁹⁻¹³⁾を再現可能な足部痙性シミュレータを開発し、理学療法を学ぶ学生（以下、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ことを目的とする。このシステムを用いることにより、従来の人の模擬動作による手技の練習に比べて次の利点がある。

- (1) 同じ特性を繰り返し再現することができ、学生は納得がいくまでトレーニングできる。人間は疲労等により常に一定の特性を保つことは困難である。また、異常な状態を故意に起こすことは障害者本人には不利益なことであり、障害者本人を実験台としてそのような状態を繰り返し発生させることは倫理的に許されることではない。
- (2) 訓練中の角度、力を計測することにより、手技の習熟度を定量的に評価することができる。これまで、このような試みはあまり行われておらず、スキルの定量評価に向けての有益な情報となりうる。
- (3) 希少な症例であっても、その特性をモデル化することにより再現することが可能である。同時に、そのようなモデル自体が病状の機序を理解する手掛かりになる可能性もある。

同様の考え方のもとで、人体各部位の痙性を模擬するロボット（シミュレータ）に関するいくつかの研究があり、文献14）にまとめられている。これらの多くは、モータおよび減速機による力覚の提示が行われており、駆動側の慣性や摩擦、コギング等が力覚の低下につながっている。また、工学用途で用いられるモータ等のアクチュエータは一般的に人が直接接触しながら操作することを想定しておらず、2重3重の安全対策が必要となる。一部ブレーキの

みを用いて高い安全性を確保したものもあるが、ブレーキのみのシステムではロボットからの能動的な動作がないために、異常反射のような挙動を再現することができない。

そこで著者らは、上記のような人間—機械共存システムにおいて人が安全に操作することができるアクチュエータの開発を目的として、コンパクトMR流体クラッチ（Compact MR Fluid Clutch, CMRFC）¹⁵⁾を開発した。また、このCMRFCとモータを組み合わせることで安全性の高い動作を実現するアクチュエータとし、上述のような目的を達成するための足部痙性シミュレータ（Leg-Robot）を開発した¹⁶⁾。

これまで、このLeg-Robotを用いて痙縮、折り畳みナイフ現象、足クロウヌスを再現する制御方式を提案した¹⁷⁾。しかし、PT学生に対して本装置を適用したことはなく、実際に想定されている使用者であるPT学生が教育システムとして本装置を使用する際に必要な機能や性能を本システムが有しているか確認する必要がある。そこで、本稿では、既報16)で開発された装置に視覚フィードバック（教示画面）を付加し、実際のPT学生に対して教示システムとして使用した結果を報告する。模擬する症状としては、足クロウヌスを取り上げる。足クロウヌスの制御方式としては、既報16)および17)に異なる方法を報告しているが、本稿では臨床における足クロウヌスへの理解をよりよく反映した制御方式として既報16)の方式を基礎とし、一部変更する。改良された制御方式に対して熟練PTによるパラメータ調整を行う。

2. 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（Leg-Robot）

2.1 概要

Leg-Robotでは、モータとそれを操作する操作者の間にコンパクトMR流体クラッチ（CMRFC）を介在させ（図1）、モータによる速度の制御とクラッチによるトルクの制御を分離して従来のアクチュエー

図1 足部痙性シミュレータ (Leg-Robot) の概念図
Fig.1 Basic concept of the Leg-Robot

図2 Leg-Robot の内部構造
Fig.2 Inner structure of the Leg-Robot

タと比較して高い安全性を確保する。このような制御方式は、具体的には、下記の3つの点で、従来のロボットシステムより有利である。

- 1) MR 流体クラッチがトルクリミッタとして働き、モータの異常動作時には瞬時にトルクを切断することができる。
- 2) クラッチを切断状態にすれば、モータ側の摩擦や慣性を操作側に伝えることはない。これにより、最大出力時には高トルクでありながら、無負荷状態には低慣性、低摩擦の特性を再現することができる。このことは、足関節のように高トルク、低慣性、低摩擦の力覚特性を再現するために有利である。
- 3) たとえば、痙縮や折り畳みナイフ現象など、単に他動運動に対する抵抗力を提示するだけの場合には、モータを動作せずにクラッチをブレーキとして使用することができる。この場合、本装置はパッシブな力覚提示装置となり、さらに高い安全性を有する。

上記の1) に関して、クラッチに異常動作が発生した場合を考える。クラッチの異常動作としては、①断線による無負荷状態と②制御器の故障による意図しない最大出力状態が考えられる。重力に反して

荷重を保持するような用途では①の危険性が高いが、今回の用途には該当しない。②が起こった場合、クラッチの最大伝達トルクを出力してしまうために安全とは言い難いが、モータとクラッチの両方が異常状態にならない限りは安全回路等によってどちらかの出力を遮断することとすれば、既存システムより高い安全性を確保できる。

本研究の対象部位として足関節を選定した理由は、上記の2) に加えて、足関節における筋緊張異常、反射異常は正常な歩行の妨げとなり、ADLの質の低下に深く関わるからである。

2.2 基本構造

図2に Leg-Robot の内部構造を示す。ダイレクトドライブモータ (DD motor, M-JS2014, NSK Corp. Japan, 最大トルク: 14 Nm, 最大回転速度: 3.0rps) を駆動源として使用した。トルクはベルト - プーリ機構およびリンク機構を介して、DDモータが設置されている股関節軸から足関節軸まで伝達される。減速比は合計で約1/4である。CMRFCの最大伝達トルクは約5Nmであるため¹⁵⁾、足関節軸における最大発生トルクは約20Nmとなる。トルクの応答速度は約20Hzであり、足クロウスの律動挙動 (3 ~ 10Hz)⁹⁻¹³⁾ を再現するのに十分高速な応答を示す。

各関節角度は回転型ポテンシオメータ (CP-2FK,

表 1 Leg-Robot の仕様

Table1 Specification of Leg-Robot

Maximum torque on ankle joint [Nm]	20
Maximum rotational velocity on ankle joint [rad/s]	4.5
Bandwidth of torque response [Hz]	50

Midori Shokki, Japan) によって計測した。足底のプレートにはひずみゲージにより自作したトルクセンサを内蔵し、ユーザによる足部の操作力が測定可能である。Leg-Robot の仕様を表 1 に示す。

2.3 実験環境

本稿における実験系の外観を図3に示す。Leg-Robot を力覚提示装置として使用し、Leg-Robot の大腿部を台に固定した。これにより、動作可能な部分は下腿部および足部（関節としては膝関節および足関節）となる。膝関節は受動関節であり、力覚を提示しない。足関節には操作状況（関節角度、速度、および操作力）に応じてプログラミングされた力覚が提示される。下腿部には熱可塑性樹脂で人間の下腿を模擬して成形されたカバーを装着した。操作者は安定した足関節の動作を生成するために、下腿部をしっかり押さえて足部を操作する必要がある（図4参照）。

3. Leg-Robot による足クローヌスの再現

3.1 クローヌスの臨床的理解

足クローヌスは、臨床的には、「足関節に対する急激な背屈方向への他動運動（徒手）によって惹起される律動的な不随意運動」と理解されている¹⁸⁾が、その詳細の機序は不明な点が多い⁹⁻¹³⁾。しかし古典的神経生理学により定性的には、「神経機能障害による筋紡錘の異常な感度上昇により、主にひらめ筋の伸張反射¹⁹⁾が異常に亢進した状態であり、背屈方向への他動運動がこれを誘発して発生する」と理解されている。このような神経生理学による定性的な

図 3 実験系の外観

Fig.3 Experimental setup

図 4 実験風景

Fig.4 A scene of an experiment

機序の理解、および現場の経験に基づいて、理学療法士らは次の2つの点に注意して手技を実施することが求められている。

- 1) 異常に亢進した伸張反射を誘発するため、足クローヌスの検査の初期に十分に速く足部を背屈させる必要がある。
- 2) クローヌスの律動挙動が持続するように、手技の途中においては一定以上の徒手力によって足部を押し続ける必要がある

3.2 制御方法およびパラメータの設定

前節に示したクローヌス検査における注意事項1)

図5 足クローヌスの制御フロー
Fig.5 Control flow of ankle clonus

および2) を学習者に教示することを目的として、Leg-Robot より足クローヌス様の動作および力覚を再現する制御手法を提案する。制御フローを図5に示す。

図5の制御フローは次の3つの状態を有する。

- (1) Initial state : 本実験においては力覚の提示をしない。
- (2) Stretch reflex : 底屈方向への一定トルクを一定時間提示する。
- (3) Free interval : 一定時間底屈トルクを提示しない。

制御フローは実験の初期には常に上記の Initial state から開始する。本研究では、この初期時間にお

いて Leg-Robot からの力覚を提示しない (ループ A)。Stretch reflex においては、Leg-Robot はあらかじめ設定された一定期間 (t_s [s])、同様に設定された一定のトルク (T_s [N]) を底屈方向に提示する (ループ B)。これにより、ヒラメ筋の伸張反射により患者の足部が底屈方向に伸張する挙動を Leg-Robot が模擬することとなる。Free interval は Stretch reflex から次の Stretch reflex までの間欠期間として設けられている。この状態ではあらかじめ設定された一定期間 (t_f [s]) においてトルクの提示をしない (ループ C)。

操作者による操作条件が式 (1) を満たすとき、状態は Initial state から Stretch reflex へと変化する。

$$\omega > \omega_{tr} (>0) \text{ および } \theta > 0 \quad (1)$$

ここで、 θ [rad]、 ω [rad/s] はそれぞれ足関節の背屈方向の角度、角速度を示す。前述のとおり、足クローヌスはヒラメ筋の伸張反射によって誘発される。従って、底屈位 ($\theta < 0$) ではクローヌスは発生しない。足関節が背屈位 ($\theta > 0$) でかつ、 ω が状態変化の閾値 ω_{tr} [rad/s] (ただし、 ω_{tr} は正の定数) を超えたとき、伸張反射が起こる。適切な検査を実施するには検査の初期において素早く足部を押し上げ、足関節の角速度が ω_{tr} [rad/s] を超えるようにしなければならない。また、この ω_{tr} [rad/s] を変化させることにより様々な症状の患者を Leg-Robot に模擬させることもできる。

制御の状態が Stretch reflex の後、操作条件が式 (2) を満たすとき、状態は Stretch reflex から Free interval へと変化する。

$$T_{ave} > T_{tr} \quad (2)$$

ここで T_{ave} [Nm] は Stretch reflex の期間における操作者の操作トルクの平均値である。この平均トルクが設定された閾値 T_{tr} [Nm] を超えるとき、本制御フローは次の伸張反射を継続して提示することを決め、それまでの間欠期間として Free interval 状態と

表2 実験で使った制御パラメータ

Table2 Control parameters for ankle clonus

ω_{tr} [rad/s]	4.0
T_{tr} [Nm]	5.0
T_s [Nm]	12.0
t_s [s]	0.12
t_f [s]	0.05

なる。もし、式 (2) を満たさなかった場合、状態は Stretch reflex から Initial state に戻る。適切な操作条件を維持することにより、Stretch reflex と Free interval を交互に起こさせたとき (ループ D)、Leg-Robot はクロノス様の律動的な挙動を示す。

本稿で用いる各パラメータの値を表2に示す。これらの数値は経験豊富な熟練のPT2名によって本装置を操作してもらい、患者に近い挙動、力覚を再現する条件として決定した。Leg-Robot が再現するクロノス様の律動の周波数 f [Hz] は次式で決定することができる。

$$f = 1 / (t_s + t_f), \quad (3)$$

本実験においては、 $f = 5.9\text{Hz}$ ($= 1 / (0.12 + 0.05)$) となる。足クロノスに関する文献⁹⁻¹³⁾によれば、多くの患者で足クロノスの律動周波数は5～6Hzに集中することが知られており、トルクは10～20Nmと言われている。したがって、今回の設定値が妥当であることが分かる。 ω_{tr} および T_{tr} は再現する患者の症状の重症度に関係しており、いずれの値も大きくなるに従いクロノスが起こりにくくなる。すなわち症状が健常に近づくことを意味するが、その分、検査が難しくなる。今回の条件は、熟練のPTであればクロノスを起こすことができるがクロノス等の知識が全くない工学系学生がクロノスを起こすことができなかった条件として表2のように設定した。

実際の足クロノスにおいて、このような症状が軽い (検査が難しい) 場合にはクロノスの律動回数は数回しか起こらないほうが一般的である。しか

図6 熟練PTによる操作結果

Fig.6 Result of operation by a matured PT

し、律動回数が十分に起こらない場合、訓練者が十分な手技の練習を行うことが困難となる。また、訓練者の習熟度を評価することも困難となる。そこで今回は、実際のクロノスの特徴に対して律動回数に関する特徴を除外する。すなわち、適切な方法で操作した場合には律動は際限なく継続できるものとする。また、実際のクロノスの場合、過度に背屈を行った場合には逆に律動が消失する現象も見られるが、これに関しても今回は再現していない。このような、実際の足クロノスとロボットによる模擬の差異については、実験の前に被験者に説明することとした。

3.3 設定したパラメータによるクロノスの再現

前節に提示したパラメータを設定し、クロノスを模擬するLeg-Robotを熟練PTが操作した場合の実験結果を図6に示す。Leg-Robotで再現された足クロノスの律動周波数は約6Hz、トルクは約10～15Nmとなり、想定どおりであった。また、複数回の試行に対してその再現性は良好であった。

4. 理学療法学科学生による実証実験

4.1 被験者

被験者は理学療法学科の学生7名 (19～21歳) と

図7 クローヌス試験における教示画面
Fig.7 Visual feedback for clonus tests

熟練のPT 1名（54歳）である。すべての学生は講義でクローヌスに関する神経生理学と診断方法に関して学習済みであり、学生同士での手技実習も経験している。2名に関しては病院での実習を実施済みであり、内1名は実際にクローヌスの患者の診断を行った経験がある。本稿では実習経験済みの学生2名を Experienced student（Eで示す）、その他の学生5名を Unexperienced student（Uで示す）、および熟練PTを Matured PT（Mで示す）と定義する。

4.2 方法

実験は次の3つのステップによって実施した。

- 1) Step1：学習前の試行、情報の提示なし。
- 2) Step2：学習期間、図7の教示画面を提示する。
- 3) Step3：学習後の試行、情報の提示なし。

Step 1と3は1分間の時間制限を設けた。もし、被験者が1分間でクローヌス様の律動挙動を発現させることができなかった場合は試行の失敗（Failure）とする。試行の成功は5回の律動を連続して発現した場合を条件とした。試行の成功の場合、初めの律動が起こった時間を実験結果として記録した。

Step2においては各被験者とも納得のいくまで（時間制限を設けずに）装置を用いて足クローヌス検査の練習を実施した。また、このステップにおいてのみ、図5に示した教示画面をパソコンディスプレイ

表3 実験結果

Table3 Experimental results

Subject	Before learning [s]	After learning [s]
U1	Failure	12.8
U2	Failure	1.7
U3	Failure	19.1
U4	Failure	12.1
U5	9.6	9.4
E1	Failure	2.8
E2	18.6	13.0
M1	8.8	13.9

レイに表示して、各自の操作状態を視覚的に被験者にフィードバックした。教示画面は、Leg-Robotの形態（A）、制御フローの各状態を色で示したもの（B）、操作トルク（C）、足関節の角速度（D）の4つの情報を含む。CおよびDはそれぞれの数値がリアルタイムで高さが変化する棒グラフで表示され、それぞれの閾値 T_{tr} および w_{tr} も表示した。これにより、被験者は操作の目標を視覚的に明確に理解することができる。

4.3 結果

実験結果を表3に示す。Before learning は前述のStep1におけるクローヌスを発現させた時間[s]（1分間でできなかった場合はFailure）を示し、After learning はStep3における時間[s]である。U1からU5はUnexperienced student、E1およびE2はExperienced student、M1はMatured PTを表す。E2は、病院実習にて実際のクローヌス患者の診断を行った経験のある学生であり、学習前からLeg-Robotによるクローヌスを実施できている。これに対してE1は病院実習を行ったがクローヌス患者の診断を行っておらず、他の多くのUnexperienced studentと同様に学習前にはクローヌスの発現に失敗している。

4.4 考察

Unexperienced studentの中で唯一、U5のみが学習前にもクローヌスを発現できており、学生同士の実

図8 被験者 U4 の実験データ (学習前)
Fig.8 Experimental data of U4 before leaning

図10 被験者 E2 の実験データ (学習前)
Fig.10 Experimental data of E2 before leaning

図9 被験者 U4 の実験データ (学習後)
Fig.9 Experimental data of U4 after leaning

図11 被験者 M1 の実験データ (学習前)
Fig.11 Experimental data of M1 before leaning

習でも手技のコツをつかみ、適切な手技の方法を身につけることができる学生もいることが分かる。逆に E1 は病院実習後であるが、実習中に実際の足クローヌスの患者を検査しておらず、経験不足が実験結果として現れたものと考えられる。学習後にはすべての被験者がクローヌスの発現に成功しており、Step1 の試行ではクローヌスの検査方法が獲得されていなかった学生も Step2 の学習期間によって手技の獲得がなされた結果と言える。

図8および9に被験者U4における学習前後の操作データをそれぞれ示す。実線が足関節角度を示し、破線が操作トルクを示す。学習前においては、クローヌスを発現するための初期の速度が規定値に届

かず、伸張反射がほとんど起こらない。図8の約50.2秒の位置において一度だけ伸張反射が発現したが、その後の継続的な徒手力が足りないためにクローヌス様の律動挙動に移行させることができない。多くの Unexperienced student において同様であり、初めにおこる伸張反射に驚いて徒手の力が緩んでしまい、適切な検査を継続できない。これに対して、学習後には検査中の徒手の力を緩めることなく一定以上で維持できるため、図9のように律動的な挙動を発現させることができる。

図10および11に被験者E2およびM1の学習前の操作データをそれぞれ示す。前述のごとく、被験者E2は学生の中で唯一実際のクローヌス患者を検査し

た経験があり、E2, M1とも本実験の学習の効果はあまりなかったため学習前のデータを示した。どちらの被験者も学習前のステップですでにクロウヌスの律動を発現することができた。両者の結果を比較すると、M1の角度振幅のほうが、より一定に近い角度を中心に律動していることが分かり、安定した検査が実施できていることが分かる。本システムを使えば、経験者の中でもその習熟度を評価することができ、その習熟度をより明確な指標で示すことができれば、より高度な習熟度向上に役立つ可能性がある。

3.3節に示した図6と上記の図11の実験データはどちらも熟練PTによる実験結果であり、いずれも約6Hzのクロウヌス様律動挙動を持続することに成功している。クロウヌスは足部の底屈筋の伸張反射によって誘発されるといわれており、通常は底背屈の中立位から背屈側で起こる。しかし、足部の背屈角度は制限があるため、徒手の力が大きすぎると角度制限によって律動挙動を継続することができない。熟練PTによる手技(図6, 図11)では、トルク値は最大ピークで15Nm程度であり、平均すると約10～12Nmとなっている。今回、Leg-Robotに設定した伸長反射によるトルクは12Nm(表2参照)であることから、ロボットによる反射トルクと操作者による操作トルクが一周期において平均的に釣り合い、限られた角度範囲でも継続した律動を実現していると思われる。これに対して、学習後の未経験学生(図9)や経験済み学生(図10)の結果では操作トルクは熟練PTのそれよりもやや大きい。その結果、律動による平均角度は次第に背屈側にずれ、いずれ律動を継続できなくなる。今回の模擬では背屈角度範囲による制限は行っていないが、実際には適切な検査ができない可能性もある。

5. 結言

本稿では、コンパクトMR流体クラッチ(CMRFC)

を介した安全なアクチュエータシステムを用いることにより、障害者の足関節異常挙動および力覚を提示する足部痙性シミュレータ(Leg-Robot)を開発し、臨床的な知識に基づいた足クロウヌスの模擬動作を生成する制御手法を提案した。さらにこのシステムを理学療学科学生に適応し、Leg-Robotによる足クロウヌスの性能評価を行った。熟練PTの結果と比較することにより、本システムが理学療法スキルの定量評価の有益な手段となる可能性を示唆する結果が得られた。本稿で模擬した足クロウヌスは、学習と評価を目的としたことから足クロウヌスの特徴の一部を再現した模擬的な足クロウヌスとも言える。より詳細の特徴も再現し、さらにリアリティを高めることも必要と考えられる。これは今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 真島英信: 生理学. 東京文光堂, 1986.
- 2) 田中勲作: 痙縮の神経機構, リハビリテーション医学, 32(2): 97-105, 1995.
- 3) Volker D. and Thomas S.: Spastic movement disorder: impaired reflex function and altered muscle mechanics, *Lancet Neurology*, 6: 725-733, 2007.
- 4) Lance J.W.: Disordered muscle tone and movements, *Clinical and Experimental Neurology*, 18: 27-35, 1981.
- 5) Elovic E.P., Simone L.K. and Zafonte R.: Outcome assessment for spasticity management in the patient with traumatic brain injury: the state of the art., *J. Head Trauma. Rehabil.*, 19(2): 155-177, 2004.
- 6) Lee K.C., Carson L., Kinnin E., et al.: The Ashworth Scale: a reliable and reproducible method of measuring spasticity, *J. Neurol. Rehabil.*, 3, 205-209, 1989.
- 7) Braddom R.L.: *Physical Medicine & Rehabilitation* (Third edition): chapter 31, Spasticity Management, Saunders Elsevier, 651-665, 2007.
- 8) Justus F., Lehmann M.D., Robert P., et al.: Spasticity: Quantitative Measurements as a Basis for Assessing Effectiveness of Therapeutic Intervention, *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 70: 6-15, 1989.
- 9) Joseph M.H. and Rymer W.Z.: A Simulation Study of Reflex Instability in Spasticity: Origins of Clonus, *IEEE Transaction on Rehabilitation Engineering*, 7(3): 327-340, 1999.

- 10) Dimitrijevic M.R., Nathan P.W. and Sherwood A.M.: Clonus: the role of central mechanisms, *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 43: 321-332, 1980.
- 11) Geoffrey W.E.: Clonus, Beats provoked by the application of a rhythmic force, *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 39: 266-274, 1976.
- 12) Jannel A.B, Timothy D.J. and Susan J.H.: Clonus after human spinal cord injury cannot be attributed solely to recurrent muscle-tendon stretch, *Exp. Brain Res.*, 149: 222-236, 2003.
- 13) Hultborn H., Demton M.E., Wienecke J., et al.: Variable amplification of synaptic input to cat spinal motoneurons by dendritic persistent inward current, *Journal of Physiology*, 552: 945-952, 2003.
- 14) 升谷保博, 西村敦: (解説)人体の関節特性を模擬する患者ロボット, *日本ロボット学会誌*, 26(3), 226-229, 2008.
- 15) Kikuchi T., Ikeda K., Kakehashi T., et al.: Development of compact MRF clutches for human-friendly actuator, *ROMANCY 17 Robot Design, Dynamics, and Control*, 359-364, 2008.
- 16) 菊池武士, 小田邦彦, 山口紗代, 他: 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*, 27(8): 933-941, 2009.
- 17) Kikuchi T., Oda K. and Furusho J.: Development of Leg-Robot for Simulation of Spastic Movement with Compact MR Fluid Clutch, *Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1903-1908, 2009.
- 18) 田崎義昭, 斎藤佳雄, 坂井文彦: ベッドサイドの神経の診かた 改訂 16 版, 南山堂, 2004.
- 19) 赤澤堅造: 生体情報工学, 東京電機大学出版局, 2001.