

令和元年6月26日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03059

研究課題名(和文) 運動機能再建のための統合化リハビリテーションシステムの実用化

研究課題名(英文) Development of an Integrated Rehabilitation System for Reconstruction of Motor Function

研究代表者

永井 清 (Nagai, Kiyoshi)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：40198289

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)： 効率的なリハビリテーションシステムを実用化するための本研究で得られた主な研究成果は以下のとおりである。

- (1)人の腕を保持しながら動作させる上肢装着型リハビリロボットに適切な動作を生成するための機構設計と制御系設計で構成される冗長駆動法が精緻化された。
- (2)人の運動生成前に運動意図を検出するための脳波を用いた代表周波数法の検出精度が評価され、また、脳波を用いた注意適正判別の方法が導入された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の社会的意義は、効率的な運動機能回復訓練を行う統合化リハビリテーションシステムの実用化により、脳卒中患者の社会復帰を促進しようとするところである。

本研究の上肢装着型リハビリロボットに関する学術的意義は、人の腕を柔らかく保持しながら動作を誘導するリハビリロボットとするため、必要な運動自由度よりも多くの関節を有する冗長なロボット機構とし、かつそれを制御する手法を明らかにしたことである。また、脳波を用いた運動意図の事前検出法と運動中の注意適正判別手法に関する学術的意義は、運動機能回復訓練を効率的にする手法の着眼点を明らかにしたことである。

研究成果の概要(英文)： The main results obtained in this research to realize an efficient rehabilitation system for stroke rehabilitation are as follows:

- (1) The redundant drive method which consists of mechanical design and control system design has been refined in order to make rehabilitation robots attached at human arm produce appropriate motions to hold and move the arm.
- (2) Detection accuracy of the representative frequency method using EEG (Electroencephalogram) for detecting motor intention prior to its onset has been evaluated, and a method of detecting focus of attention using EEG has been introduced.

研究分野：ロボット工学

キーワード：リハビリロボット 医用ロボット 運動機能回復訓練

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は、以下の2点を主な研究背景とし、運動機能再建のための統合化リハビリテーションの実用化を目指して行われたものである。

### (1) リハビリロボットに関して

装着した人の腕の動作を誘導するための位置制御機能や力制御機能を持ち、臨床応用の有効性が示されているリハビリロボットが開発されてきているが、運動機能回復訓練の効率についての議論は必ずしも十分ではない。運動機能回復訓練により適したロボットの構成方法を明らかにするとともに、運動機能再建手法の効果を向上させるための手法の検討を踏まえて、リハビリシステムの基本構成を見直す必要がある。

### (2) 運動機能再建手法に関して

脳卒中リハビリテーションにおける運動機能回復訓練の効果を向上させる方法として、患者の運動意図の生成タイミングに合わせて機能的電気刺激により体性感覚を刺激することの有用性や、患者の自発的な動作を誘導する際にリハビリ医などがタッピング刺激を加える促進法の有用性が報告されている。これらは、運動機能再建手法における効果を大きく向上させるための重要な観点になり得るものである。

## 2. 研究の目的

脳卒中リハビリテーションの一つである運動機能回復訓練支援のためのリハビリロボットシステムに関する研究として、研究代表者はこれまでに、(a)脳波を用いた運動意図の事前検出法として、自己相関関数が0となるまでの時間を用いて判定する自己相関法、および脳波の代表周波数を検出して用いる代表周波数法の開発に取り組んできた。また、(b)構築を進めている冗長駆動法に基づき、ロボット先端に加わる力に応じたコンプライアント動作(順応動作)を生成する上肢装着型リハビリロボットの開発に取り組んできた。本研究では、これらの要素技術をもとに、効果的な運動機能再建手法のための統合化リハビリテーションシステムを実用化することを研究の目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、以下の二つの方法で取り組んできた。

### (1) 冗長駆動法に基づく上肢装着型リハビリロボット

本研究では、運動機能回復訓練中の患者に対して、腕を柔らかく支持しながら誘導し、同時に安全性も確保するため、上肢装着型リハビリロボットにコンプライアント動作(外力を受けて変位を生じる順応動作)を生成させるための冗長駆動法を精緻化した。この際、多自由度の上肢装着型リハビリロボットに適用可能なものとするを重視した。

### (2) 脳波を用いた運動意図の事前検出法、および運動中の注意適正判別手法

運動意図の事前検出法については、自己相関関数が0となるまでの時間を用いて判定する自己相関法と脳波の代表周波数を検出して用いる代表周波数法を融合させ、運動意図の識別率を70%程度以上に向上させること、および運動意図の発生推定時刻の時間精度を0.1秒程度以内に向上させることに取り組んだ。また、その結果を踏まえて、運動意図の事前検出法の目的としていた運動機能回復訓練の効率化に資する運動中の注意適正判別手法の開発に取り組んだ。

図1は、本研究で実験対象とした試作リハビリロボットシステムである。リハビリロボット、および脳波を用いた運動意図の事前検出と運動中の注意適正判別については以下で述べる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 冗長駆動法に基づく上肢装着型リハビリロボット

冗長駆動法は、ロボットの手先にコンプライアント動作を生成するための機構設計と制御系設計から構成される手法であり、研究代表者らが開発した。本研究では、その精緻化を進めた。図2は、冗長駆動法により生成しようとするコンプライアント動作の特性（外力に対する変位の特性）を表しており、機構設計により機構の低慣性化を図った上で、制御系設計により高い周波数帯域までの可変コンプライアント動作の生成を行うことを意味している。

図3は、実験に用いたリハビリロボットの試作機の概要図であり、装着した人の前腕からロボットに加わる外力( $F_E$ )に応じて腕を支持するロボットの手先が上下方向に動作する。このロボットの機構設計では、二つのアクチュエータを二つのリンクの駆動にそれぞれ割り当てるのではなく、二つの駆動力の和と差によって第1リンクと第2リンクを駆動する構造としたが、このことにより、ロボットの手先慣性を以下の式のように整理できることがわかった。

$$M_r = \underbrace{\frac{M_r}{L_1}}_{\text{手先慣性}} + \underbrace{\frac{M_r}{L_2}}_{\text{リンク部の慣性}} + \underbrace{\frac{M_1}{L_1} + \frac{M_2}{L_2}}_{\text{関節部の慣性}}$$

手先慣性の低減化にかかわるこの事実は、リハビリロボットのさらなる多自由度化においても適用され得るものである。試作機では、第2リンクの慣性( $M_{L2}$ )と第2関節の慣性( $M_2$ )が小さくなるように機構設計を行っており、第2リンクを持たない非冗長ロボットに比べて、手先慣性が37%低減化されている。

図4は、冗長駆動法に基づく制御の概念図であり、ロボット全体の手先部とともに第1リンクの先端部にも制御によって生成させる粘弾性を付加することにより、機構の運動学的な冗長性を利用することを意味している。

本研究では、冗長駆動法に基づく制御系設計において、手先外力に対する望ましい手先位置の目標値算出部と、その手先位置の目標値に追従させる位置制御部により制御側を構成することとした。このような構成とした理由は、リハビリロボットの機構内部に摩擦が存在する場合でも、望ましいコンプライアント動作を生成するためである。

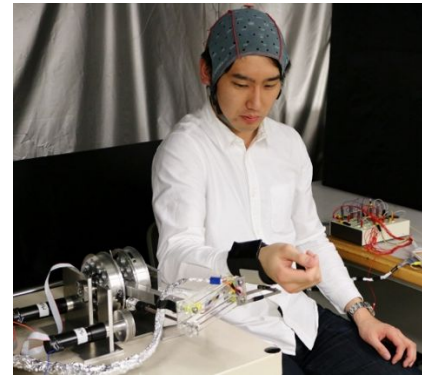


図1 試作リハビリロボット

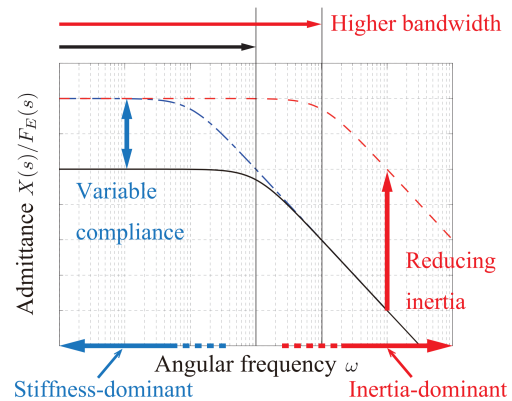


図2 コンプライアンス動作の特性

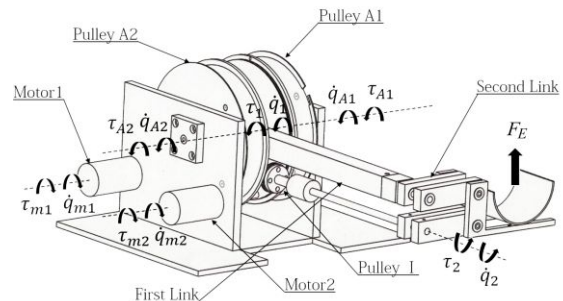


図3 リハビリロボットの試作機の概要図

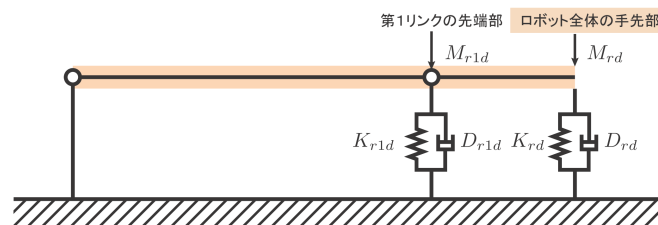


図4 冗長駆動法に基づく制御の概念

機構設計によりロボット全体の手先部の慣性が低減化されているため、本研究の制御系設計により、一定外力が加わった場合の手先変位は、図5に示すように、先に第2リンクが素早く動作することで望みのコンプライアント動作が生成される。また、第1リンクが第2リンクに追従するように動作するため、第2リンクは元の姿勢に戻り、第2リンクの小さな動作範囲が有効に生かせることになる。

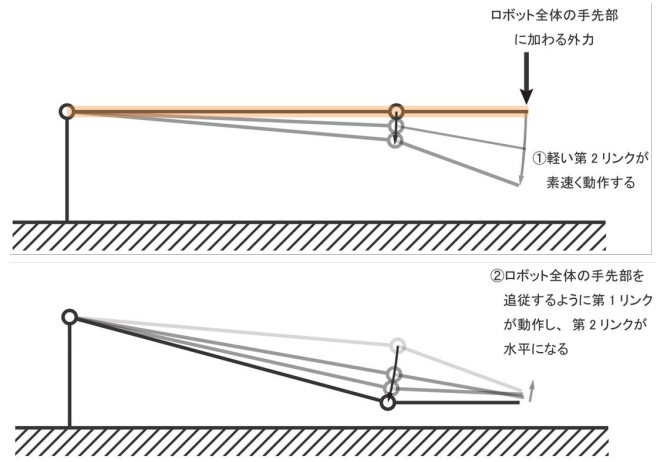


図5 外力に応じて生成されるコンプライアント動作

制御系設計についてのこの研究成果は、さらなる多自由度においても適用可能なものである。また、アクチュエータの駆動力と速度、およびパワーの性能限界内で高い周波数帯域までのコンプライアント動作を生成させやすくするものであるため、人の腕を柔らかく支持しながら動作誘導を行うことが要求される上肢装着型リハビリロボットの実用化に資するものとなる。

(2)脳波を用いた運動意図の事前検出法、および運動中の注意適正判別手法

本研究では、運動機能回復訓練を効率化させる手法として、運動意図の事前検出を行うために研究代表者らが開発した代表周波数法の精緻化に取り組んだ。代表周波数法は、運動意図の発生に先立って脳波のアルファ帯域(8~13Hz)における脳波強度の低下として現れる事象関連脱同期(Event-Related Desynchronization: ERD)に着目し、運動意図の発生をパワースペクトル重心位置( $X_G$ )の変化として検出する手法である。

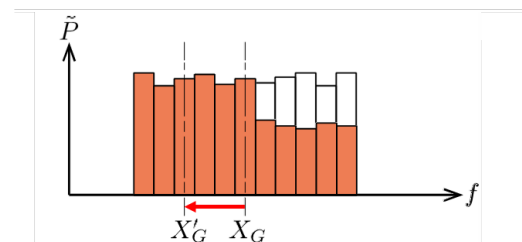


図6 脳波のパワースペクトル重心位置の変化

図6は、代表周波数法の技術的な要点である、脳波のパワースペクトル重心位置( $X_G$ )の変化の検出を概念的に表したものである。運動意図の発生に伴う事象関連脱同期によりアルファ帯域の脳波強度が低下し、パワースペクトルの重心位置が図に示すように低周波方向に変化する。アルファ帯域の境界には個人差があるが、代表周波数法は、事象関連脱同期を利用する際に、アルファ帯域の境界を指定せずに適用できるという利点もある。

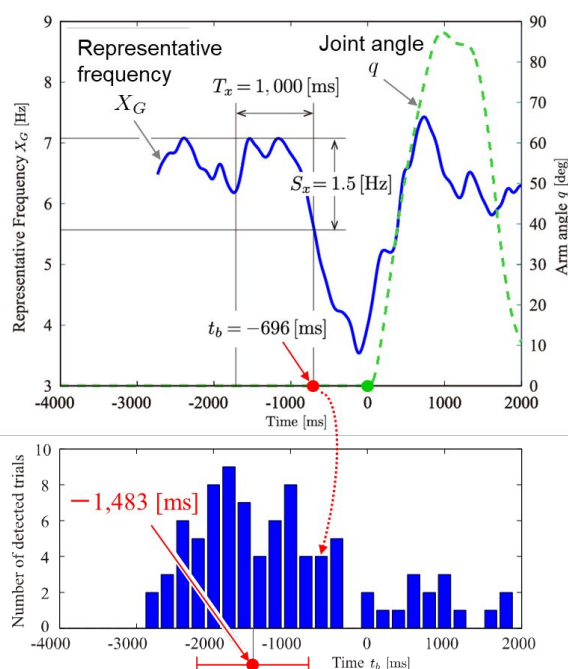


図7 代表周波数法による運動意図の検出

図7は、代表周波数法による運動意図の事前検出精度についての実験結果を示したものである。ここでは、代表周波数の時々刻々の値が1秒間に1.5Hz以上低下したことを閾値として

運動意図の発生検出としており、図の上部は、運動意図発生の 696 ミリ秒前に検出した例である。本研究では、トレーニングを行っていない参加者を対象として、このような運動意図の検出を 90 回行ったところ、その 79%において運動意図が検出できた。また、運動意図検出の平均時刻は、運動意図発生時刻を基準とするとその 1,483 ミリ秒前であり、検出時刻の標準偏差は 723 ミリ秒であった。この結果は、代表周波数法による運動意図発生の事前検出が可能であることを示している。

本研究ではさらに、運動意図の事前検出精度を向上させるため、過去と現在の脳波データのマッチングに取り組んだ。しかしながら、計測した脳波における運動意図情報の SN 比の低さのため、使用している計測装置では改善可能性の乏しいことが判明した。このため、当初計画については、脳波と筋電により算出した脳・筋コヒーレンスによる運動機能の回復度合いの評価可能性の解析に留め、その代わりに、運動意図の事前検出法の目的としていた運動機能回復訓練の効率化に資する運動中の注意適正判別手法の開発に取り組み、脳波計測における SN 比が支障とならない定常状態視覚・体性感覚誘発電位を用いることにより、視覚優位であるかそれとも体性感覚優位であるかという、個人差のある注意の向け方の判別ができることを示した。

## 5 . 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 7 件)

吉田将貴、櫻田武、永井清、定常状態視覚・体性感覚誘発電位を用いた運動中の注意適正判別手法の提案、第 39 回バイオメカニズム学術講演会 (SOBIM2018)、2018 年

宮村悠雅、吉川恒夫、永井清、受動要素を用いたインピーダンス制御におけるアクチュエータの必要性能の低減化に関する考察、第 18 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(SI2017)、2017 年

T. Goto, H. Dobashi, T. Yoshikawa, R. C. V. Loureiro, W. S. Harwin, Y. Miyamura and K. Nagai, Utilization of Kinematical Redundancy of a Rehabilitation Robot to Produce Compliant Motions under Limitation on Actuator Performance, 2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR2017)、2017 年

曹健愷、清水拓也、吉田将貴、土橋宏規、永井清、脳卒中リハビリの評価に向けた脳-筋同調性の解析方法に関する研究、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 (ROBOMECH2017 in FUKUSHIMA)、2017 年

K. Nagai, T. Goto, T. Shimizu, H. Dobashi, K. Ito, Y. Hayashi, R. C. V. Loureiro, S. J. Nasuto and W. S. Harwin, Feasibility Study on EEG Driven Robotic System to Realize Efficient Stroke Rehabilitation, The 14th IEEE/RAS-EMBS International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR2015)、2015 年

五藤孝彬、永井清、土橋宏規、コンプライアント動作生成のための冗長駆動マニピュレータの機構特性の解析、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 (ROBOMECH2015 in KYOTO)、2015 年

清水拓也、土橋宏規、伊藤宏司、永井清、代表周波数法による運動意図の検出に関する検討、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 (ROBOMECH2015 in KYOTO)、2015 年

〔その他〕

研究室ホームページ：<http://www.robot.ritsumei.ac.jp/index.html>

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：土橋 宏規

ローマ字氏名：(DOBASHI, Hiroki)

所属研究機関名：和歌山大学

部局名：システム工学部

職名：講師

研究者番号(8桁): 50634490

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：櫻田 武

ローマ字氏名：(SAKURADA, Takeshi)

研究協力者氏名： William Harwin (英国レディング大学)

研究協力者氏名： Rui Loureiro (英国 UCL)

研究協力者氏名： Slawomir Nasuto (英国レディング大学)

研究協力者氏名： Yoshikatsu Hayashi (英国レディング大学)

以上