

氏名(本籍)	龐 牧野 (中華人民共和国)
専攻	知能機械システム工学専攻
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第108号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当者
学位授与の年月日	平成27年3月24日
学位論文題目	Study on Characteristic Evaluation and Control of an Upper Limb Rehabilitation System
論文審査委員	(主査) 郭 書祥 (副査) 平田 英之 (副査) 鈴木 桂輔

論文内容の要旨

1. Outline of the research

Stroke is the leading cause of disability in adults. With the development of robotic technology, many robot systems have been developed for stroke rehabilitation training. For such kind of robot rehabilitation systems, human kinesiology, which involves anatomy, physics, and neural science, is strongly involved. It has a direct relationship with human musculoskeletal structure. This thesis focuses on the characteristic evaluation and control of an upper limb rehabilitation system. The system is designed to have the ability for bilateral rehabilitation training and remote force evaluation. Our developed upper limb exoskeleton device (ULED) and haptic device were used in this system.

Firstly, a black-box-like upper limb motion classification method was proposed to recognize upper limb gestures using electromyography (EMG) signals. Given the circumstance of EMG signals which is time-variable and unstable, an autoregressive (AR) model based feature extraction and back-propagation neural network algorithm was designed. Considering the binary-like recognition results are inconvenient for our ULED control, a Hill-type musculotendon model based continuous upper limb motion prediction method was proposed. A state-switching algorithm was designed to deal with the problem of time-variable characteristic of EMG signals. The proposed method was applied on bilateral rehabilitation training using ULED. Finally, a human-environment interaction force evaluation system based on human kinesiology and EMG signals was proposed. The proposed system allows an observer to evaluate the force of operator (or

patient) or interact with the operator remotely, which has a potential for remote rehabilitation training.

2. Research results

2.1 Development of upper limb motion classification method for ULED control

In this part, we proposed a black-box-like upper limb motion classification method to recognize upper limb gestures which are forearm flexion and extension, forearm pronation and supination, and palm flexion and extension. To eliminate the influence of time-variable property of EMG signals, many feature extraction methods were applied and neural network and support vector machine classifier were used. Given the circumstance of different properties of different methods, an AR model based feature extraction method and BPNN classifier were applied to control our ULED for bilateral rehabilitation training.

2.2 Design and evaluation of continuous upper limb motion prediction method for bilateral rehabilitation training

The disadvantage of the proposed motion recognition method is that the results are binary-like ones which are inconvenient for the control of our ULED in bilateral motion. Therefore a continuous upper limb motion prediction method was developed. The predicted motion is forearm flexion and extension. To construct the relationship between EMG signals and forearm motion, a musculoskeletal model and Hill-type muscular model were applied to find the dynamic equation. The EMG signals were used to calculate muscle activation levels. To eliminate the influence of time-variable property of EMG signals, a state-switching algorithm was developed. The root-mean-square (RMS) error of the proposed method is below 10 degree. The experimental results show that the proposed method has the ability to provide smooth control reference for our ULED in bilateral rehabilitation training.

2.3 Development of remote human-environment interaction force evaluation system

Not only motion but also force or torque is also important in rehabilitation. In this part a remote human-environment interaction force evaluation system was developed. The proposed system can transfer the interaction force of an operator/patient to an observer remotely and allow the remote observer to feel the identical force. The motions are touch motion and push motion. Our proposed motion recognition method was applied to discriminate the motion of the operator firstly. Then, using the equation obtained from musculoskeletal model and Hill-type muscular model, the isometric interaction force was calculated. Seven muscles were used to record EMG signals and a least-square-like algorithm was developed to calculate the parameters involved in the

equation. A “Phantom Premium” was used to represent the interaction force for observer.

3. Conclusions and future work

In this thesis, the characteristic evaluation and control of an upper limb rehabilitation system was proposed. The contribution of our work is that: 1) multiple-DoF-motion was recognized for ULED rehabilitation device control; 2) a quantitative relationship between elbow joint and EMG signals were developed to prediction forearm motion continuously; and 3) a remote human-environment interaction force evaluation system was design based on motion recognition and muscular force prediction method. The experimental results showed that the recognition accuracy rate was above 98% and RMS errors for elbow joint prediction were below 10 degree. For the remote interaction force evaluation system, the RMS errors are below 3.2 N. In the future, a more elegant algorithm would be developed to classify more complex upper limb motion and a higher accuracy prediction results for interaction force prediction with more complicated motions would be obtained.

審査結果の要旨

審査申請者の博士学位論文「上肢リハビリテーションシステムの特性評価と制御に関する研究」(**Study on Characteristic Evaluation and Control of an Upper Limb Rehabilitation System**)について、本審査委員会にて審査を行った結果、本論文は、医学と工学の間にあるバイオメディカルエンジニアリングの領域において、本研究室にて開発した上肢外骨格リハビリテーション装置を用いて、sEMG 信号による家庭用リハビリシステムの特徴評価方法を確立し、また、患者らの健全肢の sEMG 信号の収集と分析により、上肢運動パターンを識別して、外骨格装置を制御し、患肢両側協調訓練の実現を行おうとする試みと、さらに、患者の回復効果を評価するため、sEMG 信号を利用し、上肢力を予測し、遠隔的に回復効果の評価を可能にした研究として高く評価できると考えられる。

脳卒中は全世界的な人間が直面しており、ヒトの健康を損なう影響のある主要な疾患の一つである。脳卒中は認知障害、言語障害、運動障害などの病を引き起こす。特に運動障害は生活面において重要である。脳卒中向けリハビリテーションの伝統的な手法は患者の状態を確認しながら、リハビリテーション部門の医師が 1 対 1 で行うものである。このようなリハビリ方法はおびただしい医療の資源を消耗する。かつ日本の少子高齢化社会の影響により、リハビリ療法士の数は患者数の増加に伴って減少し、ニーズを満たすことはますます困難である。ロボット技術はこの問題を解決できる方法であるが、存在しているリハビリロボットシステムが莫大で、高価である。家庭用軽型の上肢リハビリシステムの開

発が急務となっている。

以下に本論文の特徴的な成果を要約する。

- 1) 患者を自主的に回復に訓練させるために、パターン認識法についての両側運動制御法を提案した。上肢筋肉のEMGの信号を計測することを通して、肘屈曲、前腕の内部回転外旋、および手平の屈曲と伸展運動の識別を可能にした。また、EMG信号は時間変化変動に影響されることを改善するために、各種特徴量の抽出及び認識を明らかに検証した。
- 2) EMG信号のパターン認識方式は連続のコマンドしか提供できないし、制御信号不足という問題を解決するために、肘関節連続動作予測の方法を提案し、上肢筋肉の骨格モデルを確立した。そしてHill筋肉モデルでsEMGの信号と肘関節屈曲運動の近似数学関係を明らかにした。
- 3) sEMG信号により、人体と外部環境との接触力の予測方法を提案した。この予測方法は力センサーを使用しないという前提で、ただsEMG信号により、手平が下向きに押すと、水平押すという動作をする時に、物との接触力を予測することができた。また、運動中の動的モデリングを回避するために、パターン認識の方式でそれぞれの違った動作を計測する。力の予測を行うため、上肢筋肉骨格モデルおよびHill筋肉モデルにより、sEMG信号と接触力の近似数学表示式を築いた。この方法で行った実験結果としては、予測できるRMS誤差が効果的な2.20N以内であった。
- 4) 遠隔的なリハビリ回復効果を評価することを実現するため、遠隔的な力評価システムを提案した。人体と外部環境との接触力という予測方法が基礎として、患者の自宅内でも外部との接触力を計測し、そして連続的な予測結果をインターネットにより直接医者のもとに提供できる。その後、医者はHaptic Device 'Phantom Premium'により、リアルタイムで患者の発生した同様の力の効果を感じることができ、回復効果を評価して、患者にアドバイスをできる機能を開発した。
- 5) 以上の実験結果とその考察により、提案したシステムの操作性と有効性とを実証した。

本論文のバイオ・医療分野における応用への貢献は以下のようにまとめられる。

- 1) 上肢のEMG信号について、リアルタイムでの上肢運動パターンの識別を実現した。EMG信号のいくつかの特徴抽出処理方法に対して、識別効果を比較し、最適な構成方法を選択した。そして、高い識別率方法を検証した。
- 2) 仮想接触力フィードバックの原理の適用により、触覚装置を利用して、バイラテラル協調訓練の概念を示し、リハビリ効果の評価システムを提示した。
- 3) 軽量の外骨格型上肢用のリハビリ装置を開発した。この装置では受動的な訓練と能動的な訓練の両方を実現することができる。開発した装置にそれらの機能を持たせるために、特別な機械構造を工夫し、従来の抵抗制御に改良を加えた。
- 4) 遠隔の力評価システムを開発した。連続的な予測結果をインターネットにより、直接

医師のところに提供できるため、遠隔リハビリテーション支援システムの確立に貢献できる。

以上により、本論文はその新規性、発展性を高く評価できる。本審査委員会は申請者が香川大学大学院の博士（工学）の学位授与に値するものであると判定した。

本学位論文に関する内容として、学会誌に英文**2編**、および国際会議論文**3編**を含む複数の学術論文を發表している。研究成果はいずれも独自に完成したものである。

- [1] **Muye Pang**, Shuxiang Guo, Hidenori Ishihara, Hideyuki Hirata, “An EMG-based Quantitative Representation Method for the Upper Limb Elbow Joint Angle in Sagittal Plane”, *Journal of Medical and Biological Engineering(JMBE)*, DOI: 10.5405/jmbe.1843, 2014.
- [2] **Muye Pang**, Shuxiang Guo, and Zhibin Song, “Study on the sEMG driven Upper Limb Exoskeleton Rehabilitation Device in Bilateral Rehabilitation,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 24, No. 4, pp. 585-594, 2012.
- [3] **Muye Pang**, Shuxiang Guo, and Songyuan Zhang, “Interaction Force Transfer for Characteristic Evaluation of Touch Motion,” *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 1237-1242, 2014.
- [4] **Muye Pang**, and Shuxiang Guo, “A Novel Method for Elbow Joint Continuous Prediction using EMG and Musculoskeletal Model,” *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 1240-1245, 2013.
- [5] **Muye Pang**, Shuxiang Guo, Zhibin Song, and Songyuan Zhang, “A Surface EMG Signals-based Real-time Continuous Recognition for the Upper Limb Multi-motion,” *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp.1984-1989, 2012.

最終試験結果の要旨

平成 27 年 2 月 12 日に公聴会を開催した。公聴会では、審査申請者は、学位論文の内容に関する発表を約 50 分間行い、引き続き口述試験による審査委員および外部専門家からの質疑に的確に回答することを求めた。また、公聴会后、口述試験により、医療応用を目指す上肢用のリハビリテーションシステムの操作性と安全性について、その開発経緯と理論モデル、評価結果及び専門知識の確認を実施し、本審査委員会において、最終試験とした。

最終試験における学位論文に対する質疑応答の概要は以下のとおりであり、審査申請者はすべての的確に回答した。

- 本研究の要点とその貢献についての説明は何か。

回答：

理論に基づいて、

- (1) 受動訓練の場合、マスターとスレーブシステムでは運動情報とトルク情報を実時間で伝達することが可能である。
- (2) 積極的な訓練の場合、伝統的な抵抗制御を改善することで、フィードバック駆動性がない装置にでも、人間の動作とほぼ同時に装置が追従することが可能である。この結果は、関連の研究への参考性が高いと考えられる。

応用に基づいて、

- (1) 軽量な外骨格型リハビリ装置は、家庭用リハビリテーション装置の実現に当たって、意義が大きい。
 - (2) マスタスレーブモデルによって、遠隔リハビリテーションの応用性が高い。
 - (3) 個人の運動情報を抽出して、治療効果が高いリハビリテーションを実現できる。
- 他の研究に比べて、本研究において提案した装置が家庭でのリハビリテーションを行いやすい点は何か。

回答：家庭用リハビリテーションを目指すために、本研究では外骨格型リハビリ装置の開発を提案した。この装置は重さが軽量で、装着しやすく、携帯しやすく、人間上肢運動に近い動きができるなどの点で、家庭でのリハビリテーションが行いやすい利点がある。

- 本研究ではリハビリテーションの安全性を何と考えるか。

回答：安全性はリハビリテーションに対して重要なことである。本研究では、2つの方法によって安全性を確保している。一つはハードウェアによる方法である。クラッチによって、装置と患者間の接触力が大きい場合、装置が止まる設計になっている。もう一つはソフトウェアによる方法である。運動範囲と装置提供力を測定して危険な場合、装置がすぐ止まる設計となっている。

- どのような患者にこの装置を使えるか。

回答：この装置は軽量で携帯できることによって、家庭での軽度脳卒中患者と上肢の癒着がない患者に対応できる。

本審査委員会における審査は、学位論文の内容、研究方法論を確認しようとするものである。

本審査委員会は、提出された博士学位請求論文が博士（工学）の学位に値するものであり、かつ審査申請者は専門領域に関する十分な学識と研究能力を有するものと判断した。以上より、本最終試験の評価を合格とする。