

氏名(本籍)	劉毅(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152号
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当者
学位授与の年月日	令和3年3月24日
学位論文題目	Study on a Novel Home-based Tele-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. Background

Along with the globally growing life expectancy, the incidence of age-related diseases including stroke is increasing rapidly. Acute stroke is the beginning of a long-term struggle with physical damage and the subsequent disability. This situation creates a massive demand for stroke rehabilitation. However, conventional rehabilitation therapy still remains focused on the in-hospital phase, with its emphasis on intensive manual therapy by the physical therapist, which is a labor-intensive process and consumes significant medical resources. In order to reduce the therapists' burden as well as delivering meaningful restorative therapy to stroke patients, robot-assisted rehabilitation has been deployed in the recovery process.

2. Challenges

1) Most of the existing rehabilitation systems are bulky and heavy, which are not suitable for home-based rehabilitation.

2) The comfortability and safety of patient-robot interaction are major concerns for rehabilitation robots.

3) Robotic systems lack the practical experience of a skilled therapist who is trained well to perform appropriate force field.

3. Research purposes and approaches

In order to provide comfortable and safe human-robot interaction to the patient and allow the therapist to remotely help the patient perform efficient and supervised home-based upper limb rehabilitation, a novel home-based tele-rehabilitation system has been proposed.

To achieve the mentioned research purpose above, the research approaches are described as follows:

- 1) Design a novel portable exoskeleton device that integrates a variable stiffness actuator to provide adjustable power assistance.
- 2) Propose an sEMG-based real-time stiffness control to improve the safety and comfortability of human-robot interaction for each individual patient
- 3) Develop a tele-rehabilitation system that allows the participation of skilled therapists to guide the patient's rehabilitation remotely

4. Research topics

- I. Design and characteristic evaluation of a powered variable-stiffness exoskeleton device (PVSED)
- II. Implementation of an sEMG-based stiffness control for bilateral training
- III. Development of a tele-rehabilitation system for home-based upper limb rehabilitation

5. Conclusions and future work

In this research, a novel home-based tele-rehabilitation has been proposed to facilitate a safe and comfortable recovery process for upper limb rehabilitation.

1) A novel powered exoskeleton device (PVSED) which integrates a VSA was designed and evaluated by performance trials. The proposed PVSED is light-weight and portable, which is suitable for home-based rehabilitation. Additionally, it can adjust the output stiffness using an integrated variable stiffness actuator (VSA) to adapt to the training requirements and individual's physical condition.

2) An sEMG-based real-time stiffness control was proposed to promote comfortable home-based bilateral rehabilitation. With the aid of the proposed sEMG-based real-time joint stiffness control, the PVSED is capable of providing appropriate power assistance based on the patient's motion intention.

3) A novel home-based tele-rehabilitation system was developed to deliver effective rehabilitation and supervise the patient remotely. The proposed tele-rehabilitation system provides alternative control methods for rehabilitation, i.e., therapist-in-charge mode and patient-in-charge mode. In the former mode, a haptic-enabled guided training method is proposed to allow the therapist to guide the patient to perform rehabilitation movement by means of a haptic device. Meanwhile, the contact force on the patient side is delivered to the therapist by the haptic device and used as a reference for therapists to adjust the training parameters. In the latter mode, an sEMG-based supervised training method is proposed to allow the patient to independently perform robot-assisted bilateral rehabilitation at home. Meanwhile, the therapist can feel how

the patient is performing based on his/her biological signals and further evaluate the patient's recovery process.

Future work will focus on the performance evaluation of the proposed home-based tele-rehabilitation system with post-stroke patients.

審査結果の要旨

審査申請者の博士学位論文「家庭用遠隔リハビリテーションシステムに関する研究」(**Study on a Novel Home-based Tele-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、可変剛性アクチュエータを用いた低コスト、小型・軽量な外骨格リハビリテーション装置の設計、開発を行い、家庭内での応用を可能にすると共に、健常側に得られた sEMG という筋電信号から患者の動きをくみ取って、可変剛性アクチュエータによる支援装置の駆動剛性を調整することで、マン・マシンが協調し合うリハビリテーションを実現した。また、医療施設に限らず、家庭内でも容易にリハビリテーションが行えることを目指すために、インターネットを通じた TCP 通信を使い、リハビリ装置を遠隔制御することにより、家庭内でも遠方の病院にいる医師の指導・治療を受けることを可能にした研究として高く評価できると考えられる。

高齢化社会の深刻化に伴い、脳卒中により身体に機能障害が生じた人々が増えている。そして、このような人たちの身体機能を最大限に回復させるため、有効なリハビリテーションの展開が不可欠となるが、医療現場では介護士、療法士の数が不足している。また、身体に障害を持つ人は医療機関への移動が困難であり、さらに、リハビリテーションは長期に渡り継続しなければならない場合が多いため、コスト面でも負担が大きい。そのため、身体障害者は十分なリハビリテーションを受けることができていないのが現状だと言える。この問題に対する有効な解決策として、病院で療法士により行われているリハビリテーションを家庭内でも受けられるリハビリテーションシステムの開発が急務となっている。

以下に本論文の代表的な成果を要約する。

- 1) 小型・軽量の外骨格リハビリ装置の開発。この装置では、可変剛性アクチュエータを用い、障害者の残存能力を考慮することから、ロボットの駆動剛性を変換し、適切な動作支援やパワーアシストを提供することが可能になる。アクチュエータには剛性を変換するため、レバーに可動ピボットを設計し、ピボットの位置を変化させることにより、レバー両側にあるバネと出力リンクのてこ比が変化することでパワーアシストのレベルが調整することで、可変剛性を実現できた。

- 2) sEMGを用いたバイラテラルリハビリテーションの提案。sEMGを用いて可変剛性リハビリテーションシステムは筋電位を利用し、健常側から得られた運動情報を用いて身体障害者自身でも外骨格ロボットの剛性を調節することが可能となる。さらに、障害者の運動状態を考慮することより、外骨格ロボットによる人と機械が協調し合うリハビリテーションシステムを構築する可能性を示している。それにより、リハビリテーションシステムによるバイラテラルトレーニングの効率と快適さが両立できた。
- 3) TCP通信を用いた遠隔リハビリテーションシステムの構築。インターネットを通じたTCP通信を使い、支援装置を遠隔制御することで、家庭内（いわゆるスレーブ側）で遠方の病院（いわゆるマスター側）にいる医師の指導と治療を受けることが可能になる。さらに、開発した遠隔操作用のインタフェースにより、医師は患者のデータをリアルタイムで観察すると共に、訓練パラメーターを遠隔調整することが可能にした。

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、安全性と有効性を実証した。

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) 開発した外骨格リハビリ装置は被介護者自身が装着することで、衰えた運動能力を補うことで、自立支援やリハビリテーション訓練にも用いられている。さらに、可変剛性アクチュエータを用いて、患者の状況に応じて、力補助のレベル調整を行うことが可能になる。
- 2) 提案したsEMGを用いたバイラテラルリハビリテーションは筋電信号から患者の動きをくみ取って、可変剛性アクチュエータによる装置の駆動剛性を調整することで、適切な力補助を提供し、マン・マシンが協調し合うリハビリテーションを実現することが考えられる。
- 3) 構築した遠隔リハビリテーションシステムは患者の状況に応じて、二つの制御モードが選べる。一つは医師による訓練モードで、医師が支援装置を遠隔操作することで、患者にリハビリテーションを提供できる。もう一つは患者による訓練モードで、患者自身が支援装置を使ってバイラテラルリハビリテーションを行って、遠方の医師はリアルタイムフィードバックにより患者の回復状況を判断することが可能になる。

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 **2 編**を含む複数の学術論文を掲載された。研究成果はいずれも独自に完成したものである。

- [1] **Yi Liu**, Shuxiang Guo, Ziyi Yang, Hideyuki Hirata, et al., “A Home-based Bilateral Rehabilitation System with sEMG-based Real-time Variable Stiffness”, *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2020.
DOI: 10.1109/JBHI.2020.3027303. (SCI IF: 5.223)
- [2] **Yi Liu**, Shuxiang Guo, Hideyuki Hirata, et al., “Development of a powered variable-stiffness exoskeleton device for elbow rehabilitation”, *Biomedical Microdevices*, Vol.20, No.3, 2018. DOI: 10.1007/s10544-018-0312-6. (SCI IF: 2.176)
- [3] **Yi Liu**, Shuxiang Guo, et al., “Preliminary Design of a Novel Teleoperation Interface for Home-based Upper Limb Rehabilitation”, *Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 1553-1557, October 13-16, Beijing, China, 2020. (EI)
- [4] **Yi Liu**, Shuxiang Guo, et al., “Performance Evaluation of a Powered Variable-stiffness Exoskeleton Device for Bilateral Training”, *Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 2163-2167, August 4-7, Tianjin, China, 2019. (EI)

最終試験結果の要旨

令和3年1月26日に公聴会の開催を行った。公聴会では審査申請者に、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参加者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、医療応用を目指す家庭用遠隔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。

1. 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。

2. 本研究の要点とその貢献についての説明は何か。

回答：

理論方面について

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。

応用方面について

- 軽量の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。
- 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。

3. 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。

4. 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で、家庭での軽度脳卒中患者と上肢の障害がない患者に対応でき、使える。

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。