

## 学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| 学位論文題目<br>(Dissertation Title) | Development of Muscle Function Evaluation and Training Support System for Slowing the Progress of Frailty |
| 氏 名 (Name)                     | XU TAOJIN   |

In Health Japan 21, which is a recent health policy in Japan, one of the main target is to extend people's healthy life expectancy. Healthy life expectancy is the average period during which people can live independently and the sum of healthy and unhealthy life expectancy is the average life expectancy. According to a survey performed by Ministry of Health, Labour and Welfare of Japan, frailty is the third leading factor that inhibit healthy life expectancy. Therefore, in order to extend people's healthy life expectancy, it is important to recognize the frailty of the body at an early stage and slow its progress through intervention treatment.

Frailty is a common geriatric disease among elderly people, including mental frailty, social frailty and physical frailty. Physical frailty can seriously affect oral function, mobility function and upper limb function of the elderly, and ultimately lead to a decline in quality of daily life. Moreover, frailty is a dynamic process from healthy to disability and incorporates multiple stages. People in apparently vulnerable and mildly frail stage are more likely to enter the next stage. Recognizing physical frailty at its early stage, choosing the appropriate intervention treatment and routine exercise are important for slowing the progress of frailty.

Recently, evaluation of physical frailty mainly focus on oral function, mobility and upper limb function. Quantitative indicators like bite force, muscle mass, walking speed and muscle strength arc commonly used to quantify physical frailty symptom. The muscle strength, motion control ability and exercise tolerance are important aspect of muscle function and are closely related to the ability to perform activities in daily life. On the other hand, since the comprehensive evaluation indicators of frailty has not been established yet, the means and methods for assessing frailty are highlights of recent research.

In this paper, from the perspective of upper limb function, we established an analytical muscle model to estimate muscle strength and established a motion capture system to measure upper limb movement. Based on the muscle analysis model, a system for evaluating muscle function was developed from the perspective of exercise volume. In addition, based on the evaluation method of muscle function, indexes for frailty evaluation were proposed. Furthermore, in order to delay the progression of muscle frailty, we established a strength training support system that can help trainee perform the appropriate exercise while recording the frailty state.

This doctoral dissertation contains 6 chapters:

In Chapter 1, the aging society and the prevalence of frailty were reviewed, conceptual and intuitive images about the frailty were presented, means and methods of frailty evaluation were introduced, and finally, the purpose and research outline of this manuscript were drawn.

In Chapter 2, we use the method of musculoskeletal modeling to estimate muscle state during exercise. An evaluation method for quantifying function of a specific muscle during upper limb exercise training was proposed. A detailed three-dimensional model of the upper extremity, including major muscles make up the elbow flexor and extensor, was built base on public references and database. The modeling process and principle were introduced in detail. At last, the

exercise of biceps curl to lift a dumbbell was simulated to verify the effect of each muscle.

In Chapter 3, we talk about the development of muscle function measurement and evaluation system. The system incorporates an acceleration and gyro sensor, a load cell, a camera and a personal computer for data collection and display. Forearm movement is measured using a wireless transmission module and gyro sensor. The force during resistance training is measured by attaching a load cell to Thera-Band. Posture changes are estimated using camera and OpenPose. Specifically, when performing the biceps curl exercise, the resistance force is recorded by the load cell and the motion of the forearm is measured by the acceleration & gyro sensor. With the obtained data, a segmentation algorithm is proposed segment the data in to small segments. At last, based on the preprocessed data, indexes for quantifying fatigue and recovery ability, muscle motion control ability and exercise tolerance were proposed to assess muscle function.

In Chapter 4, based on the segmentation algorithm and indexes proposed in Chapter 3, we evaluate physical frailty from the perspective of muscle function. An experiment of multiple subjects was carried out and the muscle motion control ability and exercise tolerance of their elbow flexor were evaluated. We use the quotient of acceleration and deceleration time during flexing stage to quantify motion control ability of elbow flexor. A larger quotient means a longer acceleration phase and a stronger ability of subject to control his flexor muscle. The coefficient of variation of force data during holding phase was used to quantify exercise tolerance. A bigger coefficient of variation means a bigger fluctuation in force, indicating a low ability of subject in keeping the force at a constant value. By using those indexes, the physical frailty state of subject can be determined.

Chapter 5 describes the application of our system in the field of muscle rehabilitation. With the improved measurement and evaluation system established in Chapter 3, and using the muscle strength analysis model related to muscle strength from the amount of exercise proposed in Chapter 2, we established a support system that can encourage trainee move toward their established goal while recording the improvement status of the exercise state and strength.

The conclusion is drawn and the future work is discussed in Chapter 6.

(様式 9 号)

## 学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

|  |  |
|--|--|
| 氏 名  | Xu Taojin  |
| 審 査 委 員  | 主 査：江 鐘偉   |
|  | 副 査：陳 獻  |
|  | 副 査：南 和幸   |
|  | 副 査：藤井文武   |
|  | 副 査：森田 実   |
| 論 文 題 目  | Development of Muscle Function Evaluation and Training Support System for Slowing the Progress of Frailty (フレイルの進行を遅らせるための筋力機能の評価とトレーニング支援システムの開発) |
| <p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>虚弱（フレイル）には、精神的虚弱と社会的虚弱、身体的虚弱があり、高齢者化の進行に伴う老人性疾患である。フレイルは健康から障害までの動的なプロセスであり、明らかに脆弱で軽度の段階にある人は、次の中度・重度の段階に入っていく。フレイルの状態を早期に認識し、介入治療または日常予防を適切に取り組むことで、その進行を遅らせることが可能と考えられる。身体フレイルの評価は、主に口腔機能、運動性および上肢機能に焦点を当てている。現在、日本におけるフレイルの評価方法に、日本版 CHS 基準 (Cardiovascular Health Study) が適用され、歩行速度、筋力（握力）、活動性低下、体重減少、倦怠感・易疲労感の 5 項目を指標にしている。アンケート設問による評価を中心としており曖昧さが残るものの、フレイルを定量的に評価する方法はまだ十分に確立されていないため、近年に注目されている研究課題である。</p> <p>本論文では、上肢機能を対象とし、上肢の運動をウェアラブル加速度センサ、ロードセル、カメラなどで計測する簡便なシステムを構築することと、上肢筋力の解析モデルに基づき上腕の運動量から筋力の強度を評価する方法を開発する。また、筋力解析モデルに基づきフレイルに関する評価指数を提案する。さらに、筋力低下の進行を遅らせることを目指して、フレイルの状態を記録・表示しつつ、適切な運動を行える筋力トレーニング支援システムを考案し開発する。</p> <p>本論文は緒論・結言を含め 6 章から構成されている。</p> <p>第 1 章では、フレイルの概念、高齢化に伴うフレイルの社会問題、フレイルの状態を早期認知し予防することの重要性を述べ、現在フレイルの評価方法と基準化の取り組みを紹介するとともに、本論文の目的と取組を紹介する。</p> <p>第 2 章では、筋骨格モデリングを使用して運動中の筋肉の状態を推定し、上肢運動トレーニングによる特定の筋肉の作用と、機能を定量化するための上肢筋力解析モデルを提示する。上肢の肘関節運動は、主に肘の屈筋と伸筋の作用によるもので、これらの 3 次元筋力モデルを、パブリ</p> |  |

(別紙様式第 10 号)

ックリファレンスとデータベースに基づいて構築し、その解析方法を提示する。例としてダンベルを持ち上げるための上腕7つの筋力シミュレーションを行い、各筋肉の作用効果ならびに解析モデルの妥当性を検証する。

第3章では、筋力機能の測定および評価システムの開発について説明する。本システムは、加速度センサ・ジャイロセンサ、ロードセル、カメラと、データ収集と表示のためのPCから構成される。上腕の運動を無線加速度センサとジャイロセンサで計測し、上腕運動時にかかる負荷は、Thera-Band にロードセルを取り付けて計測する。姿勢変化等は、カメラで計測し OpenPose 技術を用いて推定する。具体的に、肘の曲げ伸ばし運動を行う際に、ロードセルによる抵抗力を記録、加速度・ジャイロセンサによる肘の運動を計測、得られたデータに対して上肢の各運動状態に分割、疲労および回復能力、筋肉運動能力、運動耐性を評価する解析アルゴリズムを開発し、筋力・運動機能を評価する方法を提案する。

第4章では、第3章で提案した筋力と運動機能の評価方法とアルゴリズムを用い、筋肉強さの観点から身体の脆弱性を評価することを検討する。複数の被験者に対して、肘の曲げ伸ばし運動実験を実施し、屈筋の運動能力と運動耐性を評価することを試みる。曲げまたは伸ばし各段階における加速区間の時間と減速区間の時間の比を用いて、肘屈筋の運動制御能力を定量化する。比が大きいと、加速段階が長くなり、被験者が屈筋を制御する能力が強いことを示す。保持フェーズ中の力変動係数を使用して、運動耐性を定量化する。さらに、移動機能に関わる歩行障害の出現が、プレフレイルの段階から身体機能障害の発生に関連することに着目し、杖などを使用して歩行支援するために必要な上肢筋力を算出して、上肢筋力を計測・評価する手法を提案するとともに、上腕筋力によるプレフレイルやフレイルの評価基準値を検討する。

第5章では、筋力リハビリテーションへの応用を目指すためトレーニングシステムを構築する。第3章の計測と評価システムを改良し、第2章で提案した筋力解析モデルを組み込んだ、上肢トレーニングシステムを構築する。

第6章では、この研究の結論と今後の展望について述べる。

本審査会ならびに公聴会において、筋力モデルのパラメータの設定、男女による基準の違い、プレフレイルとフレイルの評価値の決め方、上肢の運動性に関する算出と評価方法、Openpose または加速度センサによる上肢の運動角度算出方法、被験者に対して負荷の決め方などについて活発な質問があった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、有効性、実用性ともに優れ、博士(工学)の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文 計4編)

- 1) [Taojin Xu](#), Zhongwei Jiang, Hiroyuki Omiya, Honbin Xu. Upper-limb Muscle Model for Evaluation of Frail Elderly, International Conference on Innovative Application Research and Education, pp.1-2, 2017.
- 2) [Taojin Xu](#), Zhongwei Jiang, Minoru Morita, Jongyeob Jeong. Muscle Training Assistant System for Elbow Flexor Rehabilitation, International Conference on Innovative Application Research and Education, pp.23-24, 2018.
- 3) Yu Junwei, Xu Hongbin, [Xu Taojin](#), Zhang Chengjie, Lu Shiqing. Structure Design and Finite Element Analysis of a Rope Traction Upper Limb Rehabilitation Robot, Journal of Mechanical Transmission, 42(12), pp.93-97, 2018.
- 4) [Taojin Xu](#), Zhongwei Jiang, Jongyeob Jeong, Minoru Morita, Hongbin Xu. Integrated System for Monitoring Muscular States during Elbow Flexor Resistance Training in Bedridden Patients, Journal of healthcare engineering, Vol.2019, pp.1-11, 2019.