

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Gait Pattern Analysis and Lower Limb Muscle Weakness Evaluation Using Wearable 6MWT System (ウェアラブル 6 分間歩行テストシステムを用いた歩行パターン解析と下肢筋虚弱評価)
氏 名 (Name)	張 芸金 / ZHANG YUNJIN
<p>高齢化が進む現代において、高齢者の QOL (生活の質) 向上と健康寿命の延伸は重要な課題となっている。加齢に伴う筋機能低下 (サルコペニア) や筋骨格系障害は、日常生活動作能力の低下や転倒リスクの増加を招き、QOL を著しく損なう要因となる。これらの問題を早期に発見し、適切な介入を行うことが、高齢者の健康維持には不可欠である。</p> <p>フレイルの診断基準である J-CHS 基準やサルコペニアの AWGS 基準では、共通の身体機能指標として握力 (HS) と歩行速度 (WS) が用いられている。歩行は単なる移動手段に留まらず、筋骨格系および循環器系の健康維持に不可欠な基本的かつ重要な活動である。歩行が筋機能低下や筋骨格系障害の予防に最も重要であるという報告があり、歩行能力の評価は高齢者の健康状態を把握する上で重要な鍵となる。</p> <p>しかし、J-CHS 基準は、2 つの身体機能指標 (HS、WS) と 3 つの質問項目 (意図しない体重減少、自己申告による疲労、身体活動の低下) の合計 5 項目で構成され、3 点以上をフレイル、1 点以上をプレフレイル、0 点をノンフレイルと評価する。この基準は調査票に大きく依存した半客観的な評価方法であるため、筋機能低下による身体的フレイルを正確に特定できない場合があり、また、筋力低下の程度を定量化した指標が提示されていない。さらに、歩行速度の閾値 (5m 歩行テストで 1m/s) の採用や、身体的な疲労感や身体活動状態の評価は個人の主観に依存し、客観的な推定方法が不足している。</p> <p>一方、臨床現場では、慢性呼吸器疾患や心疾患患者の運動能力評価に 6 分間歩行テスト (6MWT) が広く用いられている。6 分間歩行距離 (6MWD) は、患者の運動耐容能や日常生活への影響を判断する重要な指標である。先行研究では、6MWD が 400m 以下の場合は、日常生活における歩行能力に制限があることが報告されている。慢性呼吸器疾患や心疾患を患う患者は、フレイルを発症しやすい傾向にあり、特に慢性閉塞性肺疾患 (COPD) 患者では、フレイルの合併率が高いことが知られている。本研究では、6MWT が運動耐容能評価に有能である点に着目し、歩行データを計測・分析することで、身体的フレイルを客観的かつ早期的に発見し、早期介入による重症化予防と健康寿命の延伸に貢献することを目指す。</p> <p>また、現在の J-CHS 基準によるフレイル診断や AWGS 基準によるサルコペニア診断では、病態の程度を数値で示す客観的な指標が不足しており、介入効果の評価や病態進行の正確なモニタリングが困難であるという喫緊の課題を抱えている。6MWT から歩行筋機能低下や、その後の介入による改善効果を定量的に評価するための新しい指標があれば、個別化された医療介入やリハビリテーションの最適化に貢献することが期待される。</p> <p>現在の歩幅測定方法は、一定距離での平均値算出に留まり、個々の歩容変化の把握や詳細な歩行状態の可視化が困難という課題がある。直線距離測定が困難な環境でも 6MWD を正確に推定し、より詳細な歩容分析データを提供できれば、医療専門職が高齢者などへの個別最適化された歩行指導プログラムの立案と評価に寄与することが期待される。</p> <p>本研究では、高齢者の運動耐容能評価に着眼し、6MWT を簡便に実施できるウェアラブルデバイスを開発する。このデバイスは加速度センサで歩行データを計測し、そのデータから歩幅、歩調、歩速、距離などの歩容に関する詳細なパラメータを正確に算出する。J-CHS 基準の診断結果と比較・検討することで、下肢筋機能低下に起因する身体フレイルの評価方法を確立する。さらに、歩行筋力強度 (WMS) 指数を新たに導入し、J-CHS 基準によるフレイル診断結果ならびに AWGS 基準によるサルコペニア診断の結果と比較検討し、病態評価または介入効果の可視化における有効性と有用性を検証する。さらに歩行データから各歩の歩幅や速度、下腿部の角度可動域を算出するアルゴリズムを開発し、既定のコースに依存し</p>	

様式 7 号（第 12 条，第 31 条関係）

（様式 7 号）(Format No.7) 日本語版

ない歩容の分析結果を可視化する方法を提案する。本研究で得られた成果は、フレイルやサルコペニアの早期発見と適切な介入が可能になることで、高齢者の QOL 向上と健康寿命の延伸に貢献することが期待される。

本論文は、6 章から構成される。

第 1 章では、本研究の背景と目的について述べる。

第 2 章では、従来の 6MWT における手動記録の限界と、運動能力指標が主に 6MWD および 6 分間平均速度に限定される課題に対処するため、ウェアラブルデバイスを開発した。このデバイスは、データの自動収集と多様な環境下での測定を可能にする。さらに、歩幅や歩調といった詳細な歩行データをより効果的に取得するため、ウェアラブルセンサの最適な取り付け位置と、歩行パラメータを正確に算出するアルゴリズムを確立した。

第 3 章では、フレイル評価基準である J-CHS 基準に含まれる主観的な指標が身体的虚弱性の客観的評価を妨げるという課題に対し、6MWT 中に得られる多様な歩行データ指標（例：歩行速度の変動、歩幅、歩調など）を抽出した。これらの指標と J-CHS 基準の各項目との関連性を詳細に分析した結果に基づき、6MWT の歩行データのみを用いた新しいフレイル判定方法を提案した。提案手法の有効性は、臨床検査における J-CHS 基準による診断結果との比較検討により検証された。

第 4 章では、高齢者の歩行筋機能低下や、介入による改善効果を定量的に評価する指標が不足しているという課題に対し、6MWT データと 6 分間歩行エネルギー消費量 (6MWEE) の関係性を調査した。この分析に基づき、新しい指標である歩行筋力強度 (WMS) 指数を提案し、J-CHS 基準および AWGS 基準による診断結果との比較検討を通じて、WMS 指数の有効性を検証した。また、病態進行評価およびリハビリテーション等による改善効果の定量的可視化の観点からその有用性を示した。

第 5 章では、理学療法士や作業療法士が安全で効率的な歩行を促進するための客観的な歩容分析データを提供することを目的に、6MWT データに基づき下腿部の振れ角度と各歩の距離を精度よく算出するアルゴリズムを開発した。これにより、従来の一步の距離測定方法（一定距離を歩かせ、その距離を歩数で割る）における課題、すなわち直線距離が未知の場合に各歩の距離算出が困難であるという問題が解決される。本アルゴリズムを適用することで、直線距離測定が困難な環境においても 6MWD を正確に推定し、個々の歩容変化を捉えることで詳細な歩行状態を可視化する方法について述べる。

第 6 章では、論文全体のまとめと今後の展望について述べる。

（和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度）  
（about 800 words）

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Gait Pattern Analysis and Lower Limb Muscle Weakness Evaluation Using Wearable 6MWT System (ウェアラブル 6 分間歩行テストシステムを用いた歩行パターン解析と下肢筋虚弱評価)
氏 名 (Name)	ZHANG YUNJIN / 張 芸金
<p>Improving the quality of life (QOL) and extending healthy life expectancy among older adults have become important issues in today's aging society. Age-related decline in muscle function (sarcopenia) and musculoskeletal disorders can lead to reduced ability to perform daily activities and an increased risk of falls, which significantly impair QOL. To maintain the health of the elderly, early detection and appropriate intervention of these problems are essential.</p> <p>Clinically, handgrip strength (HS) and walking speed (WS) are commonly used indicators of physical function and are included in both the Japanese version of the Cardiovascular Health Study (J-CHS) and the Asian Working Group for Sarcopenia (AWGS) criteria to assess frailty and sarcopenia. Walking is not merely a means of mobility but a fundamental and vital activity essential for maintaining musculoskeletal and cardiovascular health. Studies reported that walking plays a crucial role in preventing muscle function decline and musculoskeletal disorders, making walking ability a key factor in knowing the health status of older people.</p> <p>However, the J-CHS criteria consist of five items (n=5): two physical indicators (HS and WS) and three questionnaire-based items (unintentional weight loss, self-reported exhaustion, and reduced physical activity) to assess frail (n≥3), pre-frail (n=1~2), or non-frail (n=0) individuals. Since these criteria heavily rely on questionnaire responses, they represent a semi-objective evaluation method and may not accurately identify physical frailty due to muscle decline. Furthermore, they lack numerical indicators to quantify the severity of muscle weakness. Additionally, the walking speed cutoff value of 1m/s (5m walk test) is used, and the assessments of exhaustion and physical activity that depend on personal subjective perception reveal a lack of objective methods.</p> <p>On the other hand, the 6-minute walking test (6MWT) is widely used clinically to assess exercise capacity in patients with chronic respiratory and cardiac diseases. The 6-minute walking distance (6MWD) is an important indicator for evaluating a patient's exercise endurance and its impact on daily life. Studies reported that a 6MWD below 400m is associated with limitations in daily walking. Patients with chronic respiratory or cardiac diseases are prone to becoming frail, especially those with chronic obstructive pulmonary disease (COPD), which is known to have a high prevalence of frailty. This study focuses on the effectiveness of the 6MWT for assessing exercise endurance, and aims to objectively and early detect physical frailty by measuring and analyzing 6MWT data. The goal is to support early intervention, prevent the progression of frailty, and promote the extension of healthy life expectancy.</p> <p>Moreover, there is a pressing problem with the lack of objective numerical indicators to quantify the severity of the condition in both the J-CHS criteria for assessment of frailty and the AWGS criteria for evaluation of sarcopenia. Without such indicators, it is difficult to accurately assess the effectiveness of interventions or monitor disease progression. Assuming that a new indicator can be developed to quantitatively assess walking-related muscle function decline and improvement after intervention using data from the 6MWT, it could help optimize personalized medical care and rehabilitation programs.</p> <p>Additionally, current methods of measuring stride length are limited to calculating averages over fixed distances, making it difficult to capture individual gait changes or visualize detailed walking patterns. The ability to accurately estimate 6MWD even in environments where straight-line distance measurement is not possible, and to provide more detailed gait analysis data, could contribute to the development and evaluation of personalized walking guidance programs for the elderly by healthcare professionals.</p> <p>This study focuses on evaluating exercise endurance in older adults and aims to develop a wearable device that enables easy implementation of the 6MWT. The device uses an accelerometer to collect walking data and calculates detailed gait parameters such as step length, cadence, walking speed, and distance. Comparing the diagnostic results with the J-CHS criteria, this study aims to</p>	

establish a method for assessing physical frailty due to lower limb muscle function decline. Furthermore, a new index called the Walking Muscle Strength (WMS) index is introduced and compared with the J-CHS criteria-based assessment of frailty and the AWGS criteria-based assessment of sarcopenia to verify its validity and utility in visualising disease severity and intervention outcomes. Additionally, an algorithm is developed to calculate stride length, walking speed, and the angle range of lower leg motion at each stride based on walking data and a method is proposed to visualise the results of gait analysis without relying on a fixed straight line course. The results of this study are expected to contribute to the early detection of frailty and sarcopenia, and to support appropriate interventions to improve QOL and extend healthy life expectancy in the elderly.

This paper consists of six chapters.

Chapter 1 introduces the background and purpose of this study.

In Chapter 2, to solve the limitation of traditional 6MWT manual recording and the problem of assessing exercise capacity using mainly the 6MWD and average walking speed, a wearable device was developed. This device automatically collects data in various environmental conditions. To more effectively obtain detailed gait data, such as step length and step cadence, the optimal location of the wearable sensors was determined, and algorithms were developed to accurately calculate the gait parameters.

In Chapter 3, to address the issue that the subjective metrics included in the J-CHS criteria for assessing frailty prevent an objective assessment of physical frailty, various gait-related indicators during the 6MWT, such as walking speed, stride length, and cadence, were extracted. Based on the correlation analysis between these indicators and the items of the J-CHS criteria, a new frailty assessment method using 6MWT gait data was proposed. The effectiveness of the proposed method was verified through comparison with diagnostic results in clinical evaluation according to the J-CHS criteria.

In Chapter 4, to address the lack of indicators for quantitatively assessing the walking-related muscle weakness and the effectiveness of interventions in the elderly, the relationship between 6MWT data and 6-minute walk energy expenditure (6MWEE) was investigated. Based on this analysis, a new WMS index was proposed, and its effectiveness was examined by comparisons with diagnostic results based on the J-CHS and AWGS criteria. Additionally, the usefulness of the WMS index was demonstrated from the perspective of quantitatively visualizing disease progression and improvements achieved through rehabilitation.

In Chapter 5, to accurately calculate lower leg swing angles and stride distances from 6MWT data, with the aim of providing objective gait analysis data to help physical and occupational therapists promote safe and efficient walking, an algorithm was developed. This approach addresses the limitations of traditional stride distance measurements, which calculate average stride length by dividing a known distance by the stride counts, but this method is problematic when the walking distance is unknown. By applying the proposed algorithm, the 6MWD can be accurately estimated even in environments where distance measurement is difficult, and detailed gait characteristics can be visualised by capturing individual gait changes.

Chapter 6 summarizes the conclusions and future perspectives of this study.

## 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	張 芸金 (ZHANG YUNJIN)
審 査 委 員	主 査：森田 実
	副 査：大木 順司
	副 査：藤井 文武
	副 査：古賀 毅
	副 査：蔣 飛
論 文 題 目	Gait Pattern Analysis and Lower Limb Muscle Weakness Evaluation Using Wearable 6MWT System (ウェアラブル6分間歩行テストシステムを用いた歩行パターン解析と下肢筋虚弱評価)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>高齢化社会において、高齢者の QOL 向上と健康寿命の延伸は重要な課題である。加齢に伴う筋機能の低下（サルコペニア）や筋骨格系障害は、日常生活の質を大きく損なう要因となるため、これらの状態を早期に発見し、適切に介入する仕組みの構築が求められている。現行の J-CHS や AWGS に基づくフレイルやサルコペニアの診断は、病態の程度を数値で示す客観的な指標が不足しており、筋力低下の程度を定量的に把握するには不十分である。本研究では、6 分間歩行テスト（6MWT）に着目し、歩行データを用いた身体的フレイルの客観的評価を可能とするウェアラブルデバイスを開発した。加速度センサにより歩幅、歩調、歩行速度、下腿角度などの歩容データを自動取得し、J-CHS 基準との比較を通じて、下腿筋機能低下の定量的評価法を確立した。また、6MWT と個人の身体的特性から推定される歩行エネルギー消費量を基に新しい指標 WMS (Walking Muscle Strength) 指数を提案し、AWGS 基準との一致性を検証した。これにより、病態の進行度や介入効果の可視化が可能となり、フレイルやサルコペニアの早期発見と予防的介入に資する成果が得られた。加えて従来の直線距離依存の歩行測定法に代わり、環境を問わず 6 分歩行距離を推定可能とするアルゴリズムを構築し、個別歩容の変化を可視化する方法を提案した。開発したシステムは、医療専門職による個別最適化された運動指導や在宅評価、リハビリ支援への応用が期待される。</p> <p>公聴会における主な質問内容としては、提案した評価方法の特徴および新規性、センサノイズへの対策、測定対象者の特性とその構成割合、計測手法の将来性、フレイル診断の根拠、ならびに身体的フレイルに着目した理由などが挙げられた。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。</p> <p>以上より本研究は独創性、信頼性、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。</p>	

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 5 編)

- (1) Yunjin Zhang, Minoru Morita, Tsunahiko Hirano, Keiko Doi, Xin Han, Kazuto Matsunaga, and Zhongwei Jiang, A Novel Method for Identifying Frailty and Quantifying Muscle Strength Using the Six-Minute Walking Test, *sensors*, Vol.24, No.14, 4489, 2024
- (2) Yunjin Zhang, Minoru Morita, Lurui Wang, Keiko Doi, Tsunahiko Hirano, Kazuto Matsunaga, and Zhongwei Jiang, Wearable 6MWT Measuring System for Clinical Application, *International Journal of Engineering Innovation and Management*, Vol.14, No.2, Page 7-14, 2024
- (3) Yunjin Zhang, Zhongwei Jiang, Keiko Doi, Tsunahiko Hirano, Kazuto Matsunaga, Development of a novel 6MWT measuring system and evaluation method for lower limb function, *International Conference on Innovative Application Research and Education (ICIARE2021)*, Page 55-56, 2021
- (4) Yunjin Zhang, Zhongwei Jiang, Tsunahiko Hirano, Keiko Doi, Minoru Morita, Kazuto Matsunaga, Assessment of Physical Activity Ability by 6-Minute Walk Test, *International Conference on Innovative Application Research and Education (ICIARE2023)*, RS 2-2, 2023
- (5) 張 芸金,江 鐘偉,森田 実,土居 恵子,平野 綱彦,松永 和人, 6 分間歩行テストによるフレイル判別方法の開発, 日本機械学会 2022 年度年次大会, No.22-1, 2022