

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	負荷の小さい 5 回立ち上がりテストによる高齢者の身体虚弱判定方法に関する研究 (Research of Methods for Identifying Physical Frailty in Elderly People by Low-Physical-Strain Five Times Sit-to-Stand Test)
氏 名 (Name)	布川 拓海
<p>加齢に伴い、運動器（筋肉、靱帯、腱など）が衰え、特に下肢の運動機能が低下することで生活の質（QOL）が低下する。下肢筋力や骨密度の減少は、歩行や立ち座り時のバランス機能の悪化を招き、転倒や骨折リスクが高まるとされている。このような運動器機能のさらなる低下は要介護状態に陥る主要因である。さらに、運動機能や認知機能の低下が進行する状態は「フレイル」と呼ばれ、要介護の前段階とされる。フレイルが進行すると運動や外出が減り、機能低下が加速するが、早期に治療を始めれば運動機能の維持や向上が期待できる。そのため、フレイルの早期発見が高齢者の健康増進にとって重要である。また、フレイルは下肢筋力が大きく低下するため、下肢筋力の様々な評価方法がこれまでに提案されている。</p> <p>高齢者の下肢筋力を評価する方法として広く用いられる 5 回立ち上がりテスト（FTSTS）は、椅子からの立ち上がり動作を 5 回繰り返し、その所要時間で下肢機能の低下を評価する。このテストは簡便で安価なため臨床現場で活用されている一方、最大努力速度での実施が求められるため、高齢者には転倒リスクが高まり、過剰な負荷により下肢関節を損傷する可能性があるという課題がある。そのため、安全性の観点から、最大努力を伴わない、被験者が自身のペースで実施する身体的負担が少ない動作でのテスト方法が求められている。また、複数人を同時に計測しにくい点や、補助者の身体的負担も臨床現場では問題となっており、負担を軽減するために自動測定への導入が望まれている。さらに、FTSTS テストでは「上肢を使用せずに椅子から 5 回連続して立ち上がれない」ことをフレイルの診断基準としているが、こうした被験者に対しても定量的に評価できる方法が望ましい。</p> <p>FTSTS テストの自動計測方法として、床反力計を用いた床反力変数（時間要素、床反力値要素、床反力増加率要素など）の計測が提案されている。これらの変数は下肢筋力と相関があり、起立・歩行能力や反応性と強い関連性を示すことが報告されている。また、転倒経験や転倒不安、起居移動動作に制限がある被験者では不良な床反力変数が示され、フレイルの判別において有用であると考えられる。しかし、先行研究の多くは最大努力速度で実施されており、身体的負荷の小さい動作、すなわち被験者自身のペースでの実施は一般的ではない。さらに、フレイルを対象とした先行研究は我々の知る限り報告されていない。そこで本研究では、身体的負荷の小さい動作を用いて FTSTS テストを実施した。得られた床反力データからフレイルを判別する方法を提案し、その有用性を検証した。しかし、床反力計は高価であり、機器が大型であるため持ち運びには適していないため、高齢者施設や訪問介護での実用化には課題が残されている。</p> <p>FTSTS テストの自動測定方法の一つとして、モーションセンサを用いた身体加速度解析が挙げられる。モーションセンサは安価で持ち運びが容易なため、臨床現場での広範な使用が期待される。加速度から算出された立ち上がり動作の指標と床反力およびモーションキャプチャの指標との相関性が報告されている。また、モーションセンサによる高齢者の立ち上がり動作の加速度測定で重心位置の動きと</p>	

の関連性が示されている。これにより、加速度を用いた方法が **FTSTS** テストの自動計測に有用であると考えられる。しかし、先行研究は最大努力速度での実施が多く、被験者自身のペースでの身体的負荷の小さい動作についての報告は我々の知る限り無い。このような動作で自動計測が可能な加速度解析システムの有用性が実証されれば、安全性の高い下肢運動機能の新たな評価方法となる可能性がある。そこで本研究では、身体的負荷の小さい動作を用いた **FTSTS** テストでのフレイル判定方法を提案した。無線通信可能なウェアラブル加速度センサで立ち座り動作を自動計測するシステムを構築し、高齢者を対象に臨床実験を実施した。**J-CHS** 基準に基づき、被験者の加速度データからフレイル判定を行い、提案方法の有用性を検証した。

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	負荷の小さい 5 回立ち上がりテストによる高齢者の身体虚弱判定方法の研究 (Research of methods for identifying physical frailty in elderly people by Low-Physical-Strain Five Times Sit-to-Stand Test)
氏 名 (Name)	NUNOKAWA Takumi
<p>With aging, the musculoskeletal system (muscles, ligaments, tendons, etc.) weakens, especially in the lower limbs, leading to a decline in quality of life (QOL). The decrease in lower limb strength and bone density contributes to worsened balance during activities like walking and standing, increasing the risk of falls and fractures. Further declines in musculoskeletal function are a primary cause of needing care. The progression of physical and cognitive decline, known as "frailty," is considered a pre-care stage. When frailty advances, physical activity and outings decrease, accelerating functional decline; however, early intervention may help maintain or improve motor function. Thus, early detection of frailty is crucial for promoting elderly health, and many methods to evaluate lower limb strength have been proposed.</p> <p>The Five Times Sit-to-Stand Test (FTSTS) is widely used to assess lower limb strength in the elderly by evaluating the time taken to stand up from a chair five times, reflecting lower limb function. This test is simple and cost-effective for clinical settings; however, performing it at maximum effort increases the risk of falls and may overstrain and damage lower limb joints. Therefore, a test allowing patients to perform at their own pace with less physical burden is necessary for safety. Additionally, challenges in measuring multiple individuals simultaneously and the physical burden on caregivers highlight the need for automated measurement systems. Moreover, FTSTS includes a frailty criterion, defined as the inability to stand from a chair five times consecutively without using the upper limbs, making it beneficial to have a quantitative evaluation method for such individuals.</p> <p>One automated FTSTS measurement approach uses a force plate to capture variables such as time elements, force values, and force increase rate, which are known to correlate with lower limb strength and show strong relationships with abilities like standing, walking, and response time. Poor force plate results are often observed in patients with a history of falls, fear of falling, or limitations in mobility, indicating its usefulness in detecting frailty. However, most studies focus on maximum-effort movement, and gentle, self-paced actions remain uncommon. Also, no previous studies have been reported specifically for frailty, as far as we know. Therefore, this study implemented FTSTS using gentle movements and proposed a frailty detection method based on the obtained force plate data. Although effective, the high cost and large size of force plates make them unsuitable for elderly care facilities and home visits, posing challenges for practical application.</p> <p>A promising method for FTSTS automatic measurement is motion sensor-based body acceleration analysis. Motion sensors are affordable, portable, and easy to use, making them suitable for widespread clinical use. Studies have shown correlations between acceleration-derived sit-to-stand</p>	

indices and indices from force plates and motion capture. Additionally, research has indicated a link between sensor-measured acceleration in elderly sit-to-stand movements and center of gravity movement, supporting the effectiveness of an acceleration-based method for FTSTS automatic measurement. However, most studies involve maximum-effort tests, and we found no reports on gentle, self-paced measurements. If proven effective, such an acceleration analysis system could provide a safer, new assessment for lower limb function. Consequently, this study proposed a frailty detection method using self-paced, low-burden FTSTS movements. We developed a system that uses a wearable motion sensor with wireless communication to measure sit-to-stand actions, conducted clinical trials on elderly subjects, and evaluated frailty based on Japanese Cardiovascular Health Study (J-CHS) criteria using acceleration data, demonstrating the usefulness of the proposed method.

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	布川 拓海
審 査 委 員	主 査： 森田 実
	副 査： 小河原 加久治
	副 査： 藤井 文武
	副 査： 古賀 毅
	副 査： 中原 佐
論 文 題 目	負荷の小さい 5 回立ち上がりテストによる高齢者の身体虚弱判定方法に関する研究(Research on Methods for Identifying Physical Frailty in Elderly People by Low-Physical-Strain Five Times Sit-to-Stand Test)

【論文審査の結果及び最終試験の結果】

高齢者における身体虚弱（フレイル）の進行は、運動や外出の減少を引き起こし、それに伴う身体機能の低下を加速させる。しかし、早期にフレイルを発見し適切な治療を行えば、運動機能の維持や向上が期待できる。そのため、フレイルの早期発見と簡便かつ負担の少ない評価方法の開発は、高齢者の健康増進において極めて重要な課題である。フレイルと下肢筋力には高い関連性が報告されており、下肢筋力評価の方法として、5 回立ち上がりテスト（FTSTS）が広く用いられている。このテストは簡便で安価であるものの、最大努力速度での実施が求められるため、高齢者には転倒リスクや下肢関節の負担が課題となる。そのため、安全性が高く被験者自身のペースで実施可能な評価方法が求められている。また、複数人同時測定や、補助者の負担も問題となっており、自動測定の導入が望まれている。本研究では、高齢者のフレイルを評価するために、床反力計および頭部に装着可能な三軸加速度計を活用した、5 回立ち上がりテスト（FTSTS テスト）による身体負荷の小さい判定方法を提案し、その有用性を実証した。第 1 章ではフレイルと FTSTS テストについて説明している。第 2 章では床反力計を用いた方法を提案し、高齢患者 21 名に対して実施し検証した。J-CHS 基準によるフレイル診断を正解として、得られた床反力データからフレイルの判別を行い、ROC 曲線を用いてその有用性を検証した。さらに、他の運動能力テストとの相関についても検証を行った。第 3 章では安価な三軸加速度計を頭部に装着した評価法を提案し、高齢患者 49 名に対して実施し検証した。無線通信可能なウェアラブル加速度計を用いて自動計測システムの開発を行い、得られた加速度データから 2 章と同様に ROC 曲線を用いて J-CHS 基準による診断を正解としてフレイル判別を行い、有用性を検証した。また、ほかの運動機能テストとの相関も調査した。特に、三軸加速度計を用いた方法は、簡便で持ち運びが容易であり、従来の床反力計を用いた手法と比較してコストや設置の手間を大幅に削減できるという利点がある。本論文の提案手法は、従来のフレイル評価方法と比較し

て高齢者にとって負担が少なく、簡便かつ実用的なアプローチを提供するものであり、地域医療や介護現場での活用が期待される。

なお、本審査申請時の論文題目は、「負荷の小さい 5 回立ち上がりテストによる高齢者の身体虚弱判定方法の研究 (Research of methods for identifying physical frailty in elderly people by Low-Physical-Strain Five Times Sit-to-Stand Test)」であったが、本審査会での意見を受けて、「負荷の小さい 5 回立ち上がりテストによる高齢者の身体虚弱判定方法に関する研究 (Research on Methods for Identifying Physical Frailty in Elderly People by Low-Physical-Strain Five Times Sit-to-Stand Test)」に修正された。

公聴会における主な質問内容は、加速度と床反力の関連について、頭部加速度を使用したデバイスに関する先行研究との比較について、フレイル判定指標の選定方法に関してなどについてであった。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、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。

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 2 編 参考論文 計 2 編)

- 1) Takumi Nunokawa, Zhongwei Jiang, Minoru Morita, Keiko Doi, Tsunahiko Hirano, Kazuto Matsunaga, A novel method of frailty identification for elderly people by Sit-to-Stand 5 test, International Journal of Engineering Innovation and Management, Volume13, Issue 2, Page 22-27, 2023
- 2) Takumi Nunokawa and Zhongwei Jiang, Minoru Morita, Hiroki Kinoshita, Takeru Mishima, Keiko Doi, Tsunahiko Hirano, Kazuto Matsunaga, Evaluation of lower limb muscle function by SS-5 test using a floor reaction force meter, International Conference on Innovative Application Research and Education 2021, Page 21-22, 2021