

令和 3 年 4 月 30 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03193

研究課題名(和文) 無重力環境や老化による筋機能低下の原因解明と予防装置の開発

研究課題名(英文) Elucidation of the causes of muscle weakness due to weightlessness and aging and development of preventive equipment

研究代表者

辻内 伸好 (Tsujiuchi, Nobutaka)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：60257798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：骨格筋は骨格筋量を維持するだけで骨萎縮の予防法となるのみならず、加齢性筋肉減弱症(サルコペニア)など様々な生体機能の退行性変化の予防が期待できる。そこで、申請者らの開発したウェアラブル計測装置を用いて低重力模擬環境下で高精度な歩行実験を実施した。さらに実験結果と人体筋骨格モデルを用いたシミュレーションを比較することで、廃用性筋萎縮の要因となる仮説を検証し、ヒラメ筋など下肢の抗重力筋の筋活動度が向上可能な自走式トレッドミルを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した、地面反力を計測するフォースプレートを搭載し推進力をフィードバックすることによる負荷制御機能を有する、効果的な歩行・走行トレーニングが可能な「負荷制御型トレッドミル」および簡易に身体運動計測が可能な「ウェアラブルセンサ」を、フィットネスジムに普及することによって、サルコペニアなどの原因となる下肢抗重力筋の減弱を防止できる。さらにウェアラブルセンサに基づく運動解析結果を併用した効果的なトレーニングによって、実寿命に限りなく近い健康寿命の維持に貢献することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：Skeletal muscle can prevent bone atrophy simply by maintaining skeletal muscle mass. Furthermore, it can be expected to prevent degenerative changes in various biological functions such as age-related muscle weakness (sarcopenia). Using a wearable gait analysis system, we examined the activity of the lower limb antigravity muscles in closer detail from the perspective of biomedical engineering and kinematics. From the information gathered in these examinations, we develop a “load-controlled treadmill” that can apply effective stimulation and stress to lower limb antigravity muscles, such as the soleus, by making the user proactively move the ankles in order to move the walking surface. It was clarified that the use of a load-controlled treadmill was able to provide effective stimulation to the antigravity muscles of the lower limbs.

研究分野：機械力学・制御工学

キーワード：運動制御 トレッドミル 慣性センサ バイオメカニクス 微小重力 宇宙医学

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高齢社会を迎えた我が国において、加齢性筋肉減弱症（サルコペニア）や骨粗しょう症などの運動器障害によるロコモティブシンドロームの予防と改善が喫緊の課題となっている。QOL（quality of life）の低下を伴わない健康寿命の延伸を実現させるためには、これらの身体諸機能の低下が起こる原因解明と対処策の構築が必須の命題である。しかし未知の領域が多く、その解明を劇的に進捗させるためには新しいストラテジーが必要である。興味深いことに、上述した身体諸機能の低下は宇宙環境滞在などの微小重力環境下で助長される。つまり、微小重力環境暴露によってロコモティブシンドロームの進展過程が増幅されて観察される。骨格筋は「動作」を発現するだけでなく、骨に張力を与えて、骨形成の刺激因子となるため、骨格筋量を維持するだけで骨萎縮の予防法となる。さらに、単に骨格筋萎縮の予防だけでなく、例えば加齢性筋肉減弱症（サルコペニア）など様々な生体機能の退行性変化の予防法につながることを期待できる。そこで、①低重力下での運動を模擬可能な NASA の ARGOS と著者らの開発したウェアラブル計測装置を用いた低重力下の高精度な歩行実験を実施し、②その実験結果と人体筋骨格モデルを用いたシミュレーションを比較することで、廃用性筋萎縮の原因を明らかにするとともに、③抗重力筋であるヒラメ筋など足関節底屈筋を自分の意思で動かすことが可能な自走式トレッドミルを開発する。その結果を基に、④サルコペニアの予防装置を開発する。

2. 研究の目的

NASA/JSC の所有する微小重力模擬装置 ARGOS を用いた共同実験を進め、これらの共同実験から得られる情報を入力とし、Hill タイプの全身の筋骨格シミュレーションによる逆運動解析を実施して、様々な低重力下での歩行形態と下肢骨格筋の発揮筋力の関係を運動計測によって明らかにする。これらの解析結果を、「骨格筋萎縮シミュレーションモデル」に適用し、低重力下の歩容を再現することで、廃用性筋萎縮の原因を明らかにし、予防と回復に有効な評価指標を確立する。また、無重力下や長期期間の臥床後や老人は、爪先着地歩行となる場合が多い。リハビリには体重を支える抗重力筋に有効な刺激や負荷を与えるため、踵着地の必要があるが、電動式トレッドミルは爪先着地になり易く、リハビリ効果は小さい。そこで、自分の能力に適合した歩容で蹴り力の回復を目指すため、抗重力筋であるヒラメ筋など足関節底屈筋を積極的に動かし、自分の意思で歩行面を動かすことが可能な「自走式トレッドミル」を試作し、筋の活動度を評価する。これらの結果を基に、宇宙船内で利用可能な予防のための運動機器や地上帰還時のリハビリ装置、および加齢性筋肉減弱症(サルコペニア)の予防装置を開発する。

3. 研究の方法

「NASA Johnson Space Center の有する ARGOS」と「ウェアラブルな歩行解析システム」を併用し、さまざまな低重力下での歩行形態を模擬した実験を実施して、生体医工学的・運動学的視点からの現象解明として、下肢の各関節に生じる生体力学的データの特異値分解に基づく定量的な歩行評価指標と表面筋電位を用いて、低重力下における下腿骨格筋の活動状態と機能発揮状況をより詳細に検討する。その知見に基づき、体重を支える抗重力筋に有効な刺激や負荷を与え、自分の能力に適合した歩容で蹴り力の回復を目指すため、抗重力筋であるヒラメ筋など足関節底屈筋を積極的に動かし、自分の意思で歩行面を動かすことが可能な負荷制御型の自走式トレッドミルを試作し、その知見に基づき、サルコペニアの予防装置を開発する。

4. 研究成果

(1) NASA ARGOS を用いた低重力下の歩行解析実験装置などを NASA JSC に送付し渡米したが、NASA 本部から契約上の問題点を指摘され、本実験は実施できず予備実験を行った。装置の通信状態など実験環境に関する確認は完了した。NASA eIRB 委員会にて、実験が承認されたが、契約上のハードルが高いため ARGOS を使用した実験を断念した。ARGOS と同機能を有する上下・前後方向に制御可能なアクティブ体重免荷装置（図 1）を自主開発することとし、試作機を開発した。試作機の動特性を検証し、体重免荷制御が可能であることが確認された。

(2) 筋骨格モデルによる重力の抗重力筋に与える影響の評価

低重力環境模擬試験として、体重免荷トレッドミル (ALTER-G) を利用した歩行解析を実施し、体重免荷率による歩行形態の変化について定量的な考察を行い、低重力環境下の歩行の特徴と下肢抗重力筋の活性度に与える影響につき知見を得た。ALTER-G を用いた下半身免荷実験結果に

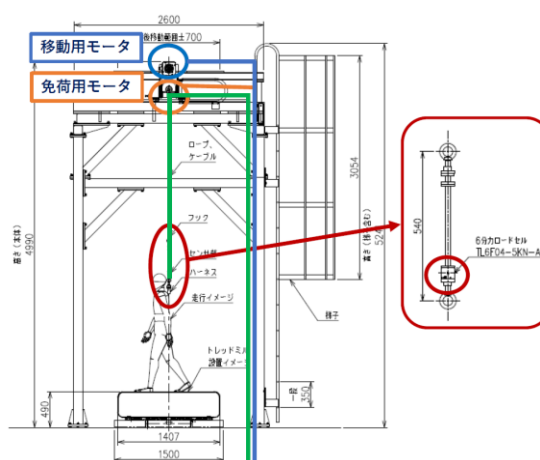


図1. アクティブ体重免荷装置

対して、筋骨格モデル SIMM を用いて、重力負荷と下肢主要筋の活動量を評価した。実験と解析結果の比較によって、サルコペニア予防に対する足関節の自分の意思による底背屈運動の有効性に対する仮説を実証した。

(3) 自走式トレッドミルの開発

歩行路面の駆動摩擦をモータによって補償し、内蔵した床反力計が計測した踏力に比例する抵抗力を負荷することで「自走」を模擬可能なトレッドミルを開発した(図2)。左右分離型トレッドミルとトレッド面が分離していない「自走式トレッドミル(以下負荷制御型トレッドミルと呼ぶ)」を開発し、両者の歩行感覚の相違と下肢抗重力筋に与える影響を比較した結果、トレッド面が1面の負荷制御型トレッドミルを用いて下肢抗重力筋に与える影響を評価することとした。ヒトが床面上を自走する際の感覚と違和感のない駆動制御アルゴリズム(速度ベース型フォースプレート出力フィードバック制御、図3)を開発し、ヒトの歩行実験を実施した。本装置による下肢筋肉、特に抗重力筋であるヒラメ筋に対する効果(図4)を、歩行周期に対する様々な負荷パターンを用いて評価し、疲労度の少ない負荷パターンを検討した。負荷制御型トレッドミルは下肢抗重力筋の活性度を向上できることが明らかとなり、本研究で開発された駆動制御アルゴリズムを搭載した負荷制御型トレッドミルは2020年度末までに大学、研究所、病院などに8台納入された。

(4) サルコペニアの予防装置の開発

上記(2)、(3)の研究成果に基づき、下肢背面の主筋(ヒラメ筋、腓腹筋)を積極的に動作させるモータ駆動のベルト式リハビリ装置の設計に着手し、機構設計に対するシミュレーションを行い、基本構造を決定した。今後、自主的研究にてGAITSOLUTION(パシフィックサプライ製)を改造することで試作を開始する予定である。



図2. 負荷制御型トレッドミル

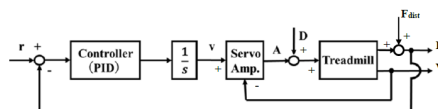


図3. 提案負荷制御システム

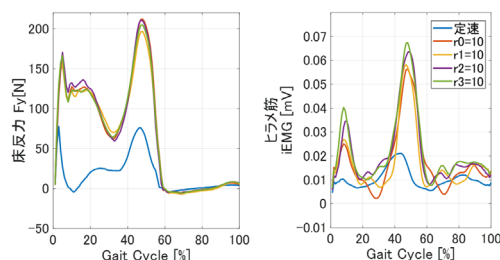


図4. 負荷制御による反力・筋活動増加

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 北野敬祐, 伊藤彰人, 辻内伸好	4. 巻 54
2. 論文標題 慣性センサを用いた前腕および手指運動計測システムの開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 設計工学	6. 最初と最後の頁 231-244
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14953/jjsde.2018.2815	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 H.Oshima, S.Aoi, T.Funato, N.Tsujiuchi, and K.Tsuchiya	4. 巻 13
2. 論文標題 Variant and Invariant Spatiotemporal Structures in Kinematic Coordination to Regulate Speed During Walking and Running	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Computational Neuroscience	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fncom.2019.00063]	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 K.Kitano, A.Ito, and N.Tsujiuchi	4. 巻 -
2. 論文標題 Hand Motion Measurement using Inertial Sensor System and Accurate Improvement by Extended Kalman Filter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society	6. 最初と最後の頁 6405-6408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 西山智士, 辻内伸好, 伊藤彰人, 足立渡, 瀧澤俊昭, 禰占哲郎	4. 巻 59
2. 論文標題 装着型運動計測装置を用いた痙性不全麻痺歩行特性の定量評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 同志社大学ハリス理化学研究報告	6. 最初と最後の頁 13, 24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 L.Lamassoure, K.Araki, A.Ito, K.Kamibayashi, Y.Ohira, and N.Tsujiuchi	4. 巻 1
2. 論文標題 Estimation of Gait Characteristics during Walking in Lower Gravity Environment Using a Wearable Device	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 39th Annual Meeting of the International Society for Gravitational Physiology (ISGP)	6. 最初と最後の頁 1, 3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/conf.fphys.2018.26.00024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K.Kitano, A.Ito, and N.Tsujiuchi	4. 巻 1
2. 論文標題 Modeling of Hand and Forearm Link using Inertial Sensors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (1840.pdf)	6. 最初と最後の頁 1, 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A.Ito, N.Tsujiuchi, K.Horio, and K.Kitano	4. 巻 1
2. 論文標題 Estimation of Hand Position and Posture using Inertial Sensors and its Application to Robot Teaching System	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (robio18-320.pdf)	6. 最初と最後の頁 1795, 1980
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 大平充宣, 上林清孝, 辻内伸好	4. 巻 9
2. 論文標題 NASA Johnson Space Center における宇宙飛行士のトレーニング機器	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 同志社大学スポーツ健康科学	6. 最初と最後の頁 49, 50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 伊藤彰人, 辻内伸好	4. 巻 120
2. 論文標題 連載講座センサ技術の最新の動向第16回慣性センサによる人体運動計測	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電気評論2017.6	6. 最初と最後の頁 55, 61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計26件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 L.Lamassoure, K.Kitano, K.Araki, A.Ito, K.Kamibayashi, Y.Ohira, and N.Tsujiuchi
2. 発表標題 Study of Human Gait Characteristics under Different Low-Gravity Conditions
3. 学会等名 40th Annual Meeting of International Society for Gravitational Physiology (ISGP) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安田和磨, 伊藤彰人, 辻内伸好, 堀尾健児
2. 発表標題 ロボット教示システムのための慣性センサによる人の腕動作推定とロボットアームへの適用
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2019講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 仲道泰洋, 辻内伸好, 伊藤彰人, 廣瀬圭, 園部元康
2. 発表標題 微小な並進加速度を伴う立位における慣性センサを用いた 動作計測に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2019講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣瀬圭, 近藤亜希子, 仲道泰洋, 伊藤彰人, 辻内伸好
2. 発表標題 ウェアラブルセンサシステムを用いた関節トルク推定における誤差解析に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2019講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒木啓輔, 辻内伸好, 伊藤彰人, 大平充宣, 上林清孝, 吉見恭平
2. 発表標題 反重力トレッドミルを用いた荷重免除による歩行運動の変化
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会講演論文集,
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北野敬祐, 伊藤彰人, 辻内伸好
2. 発表標題 拡張カルマンフィルタを用いた慣性センサによる手指運動計測
3. 学会等名 LIFE2019講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣瀬圭, 近藤亜希子, 辻内伸好, 伊藤彰人
2. 発表標題 ウェアラブルセンサを用いた負荷制御型トレッドミルの運動力学解析に関する研究
3. 学会等名 LIFE2019講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤亜希子, 廣瀬圭, 辻内伸好, 伊藤彰人
2. 発表標題 ウェアラブルセンサを用いた負荷制御型トレッドミルの運動計測に関する研究
3. 学会等名 LIFE2019講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大内陽, 辻内伸好, 伊藤彰人, 廣瀬圭
2. 発表標題 シングルベルト・スプリットベルトの負荷制御型トレッドミルを用いた歩行への影響評価
3. 学会等名 日本機械学会シンポジウム：スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2019講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣瀬圭, 近藤亜希子, 辻内伸好, 伊藤彰人
2. 発表標題 ウェアラブルセンサを用いた負荷制御型トレッドミルにおける運動解析に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会シンポジウム：スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2019講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y.Uuchi, and N.Tsujiuchi
2. 発表標題 Evaluation of the Influence on Walking using Load-controlled Treadmill
3. 学会等名 DoshishaWeek2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤彰人, 辻内伸好, 大内陽, 廣瀬圭
2. 発表標題 負荷制御型トレッドミルによる歩行解析
3. 学会等名 第65回日本宇宙航空環境医学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 植田慎也, 伊藤彰人, 辻内伸好, 北野敬祐
2. 発表標題 慣性センサを用いた上体運動計測モデルの構築
3. 学会等名 日本機械学会第16回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤彰人, 辻内伸好, 堀尾健児, 北野敬祐
2. 発表標題 慣性センサを用いたリアルタイム運動計測システムの構築とロボット教示システムへの適用
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K.Araki, N.Tsujiuchi, A.Ito, Y.Ohira, and K.Kamibayashi
2. 発表標題 Analysis of Gait Characteristics with Various Levels of Weight Bearing Using Wearable Motion Measurement Device
3. 学会等名 40th International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 荒木啓輔, 辻内伸好, 伊藤彰人, 大平充宣, 上林清孝
2. 発表標題 反重力トレッドミルを用いた微小重力環境下の歩行特性解析
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本文弥, 辻内伸好, 伊藤彰人, 北野敬祐, 廣瀬圭
2. 発表標題 走行路面に目標負荷を掛けた負荷制御型トレッドミルを用いた歩容解析
3. 学会等名 LIFE2018 日本機械学会福祉工学シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北野敬祐, 伊藤彰人, 辻内伸好
2. 発表標題 慣性センサを用いた前腕および手指リンクのモデル化および補正法の提案
3. 学会等名 LIFE2018 日本機械学会福祉工学シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 廣瀬圭, 近藤亜希子, 仲道泰洋, 伊藤彰人, 辻内伸好
2. 発表標題 ウェアラブルセンサシステムを用いた歩行速度・位置推定に関する研究
3. 学会等名 LIFE2018 日本機械学会福祉工学シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤彰人
2. 発表標題 慣性センサによる人の運動計測と医療・福祉分野への応用
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第19回秋季技術交流フォーラム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 笹川壮太, 廣瀬圭, 近藤亜希子, 仲道泰洋, 伊藤彰人, 辻内伸好
2. 発表標題 ウェアラブルセンサシステムを用いた関節トルク推定の歩行解析への適用に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤彰人
2. 発表標題 慣性センサを用いた運動計測とその応用
3. 学会等名 第373回振動談話会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 辻内伸好
2. 発表標題 慣性センサを用いた運動計測とその応用
3. 学会等名 LIFE2017 日本機械学会福祉工学シンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 北野敬祐, 伊藤彰人, 辻内伸好, 和木田茂, 天川良太
2. 発表標題 慣性センサを用いた手指運動計測システムの開発
3. 学会等名 日本機械学会第30回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 辻内伸好
2. 発表標題 宇宙環境への人体の適応と健康寿命の増進を目指して 機械工学からの挑戦
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第93期第2回第4専門部会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西山智士, 辻内伸好, 伊藤彰人, 足立渡, 瀧澤俊昭, 禰占哲郎
2. 発表標題 装着型計測装置を用いた片麻痺歩行特性の定量評価
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2017
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	大平 充宣 (Ohira Masayoshi) (50185378)	同志社大学・研究開発推進機構・客員教授(嘱託研究員) (34310)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	伊藤 彰人 (Ito Akihito) (60516946)	同志社大学・理工学部・教授 (34310)	
研究分担者	上林 清孝 (Kamibayashi Kiyotaka) (70415363)	同志社大学・スポーツ健康科学部・准教授 (34310)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関