

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02112

研究課題名（和文）人体の筋骨格構造のテンセグリティモデルに基づく外筋型服ロボットの設計手法の構築

研究課題名（英文）Development of a design method for an external muscle-type clothing robot based on a tensegrity model of the human body's musculoskeletal structure

研究代表者

小林 洋（Kobayashi, Yo）

大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授

研究者番号：50424817

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：人間との親和性が高い装着型ロボットのハード開発のために、人体の筋骨格構造のテンセグリティモデルの開発とそれを用いた解析を行った。また、装着型ロボットを柔軟な服型とすることで、硬い金属部材では実現できなかった装着の容易さ、装着感の柔らかさが実現可能とする、人体との親和性の高い装着型ロボットの開発を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年少子高齢化といった社会的背景から、高齢者・障害者の動作・生活を支援することを目的として、装着型ロボットの開発が進められている。本研究の成果は、装着型ロボットを柔軟な服型とすることで、硬い金属部材では実現できなかった装着の容易さ、装着感の柔らかさが実現可能となり、人体との親和性の高い装着型ロボットの実現が期待される。

研究成果の概要（英文）：To develop hardware for wearable robots with high affinity with humans, we developed a tensegrity model of the musculoskeletal structure of the human body. In addition, by making the wearable robot a flexible clothing type, we developed a wearable robot with high affinity with the human body, which enables easy wearing and soft feeling of wearing that could not be realized with hard metal parts.

研究分野：ロボティクス

キーワード：服型ロボット テンセグリティ 筋骨格構造

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年少子高齢化といった社会的背景から、高齢者・障害者の動作・生活を支援することを目的として、外骨格ロボットの開発が進められている。これらのロボットでは金属部材があたかも“力を発生することができる骨と関節”を体の外側に形成することで、人間が発生する力をアシストする役割を担っている。一方で、硬い金属部材ではなく布地やゴムやワイヤなどの柔らかい要素を用いることで、装着型ロボットを服のような形態に構成する研究開発が注目されている。装着型ロボットを柔軟な服型とすることで、硬い金属部材では実現できなかった装着の容易さ、装着感の柔らかさが実現可能となり、人体との親和性の高い装着型ロボットの実現が期待されている。柔軟な装着型ロボットにおいて、人間との親和性が高いハードウェア開発を実現する方法論・設計論に関する研究は極めて重要な課題である。

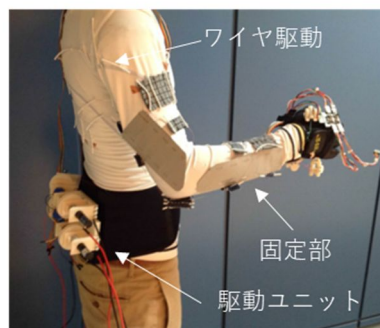


図1 服型ロボットの例

2. 研究の目的

人間との親和性が高いハード開発のためには、「人体の構造・機能がなぜ現在の形態を持っているか」ということに関する理解が欠かせない。近年、解剖学な知見の集積に伴い、人体の構造や運動における“筋膜”の役割に関する注目が集まっている。筋膜は可動せず、可動する筋の周囲に存在し、骨間を繋ぐバネのような役割をしている。また、“筋膜系ネットワーク(骨格と筋・腱・靭帯・筋膜によるネットワーク構造)”と呼ばれるように、筋膜は網目状に全身に張り巡らされており、ある場所に対する張力が筋膜を通じて、伝達・分散されていくことが定性的に知られている。筋膜の理解と並行して、人体構造を“テンセグリティ(複数のピン同士の結合からなる骨組み構造の一種であり、互いのピンが互いに直接的に接触せず、ゴムなどの一定の張力を持った要素により互いに間接的に結合されることで、安定な状態を為す構造)”として捉える説が提唱されている[1]。

本課題では、柔軟、軽量の服型ロボットの開発を目的とする。人間の筋骨格の構造を模したハードの開発を実施することで、人間との親和性が高い柔軟な服型ロボットを開発するための方法論を確立する。本研究では、人体の筋骨格構造のモデルとして「テンセグリティ」に着目し、テンセグリティモデルを規範とした解析を行う。装着した際に目標とする筋の活動を支援するロボットを開発する。具体的には、人体筋骨格のテンセグリティのモデル化、ならびに、それを参考にした装着型ロボットの開発に取り組む。

3. 研究の方法

本研究では、人間の筋骨格の構造をテンセグリティと捉え、そのモデルによる解析を実施する。さらに、それらを参考にした服型ロボットのハードウェア開発を実施する。テンセグリティモデルにより、ある関節に関与する筋、靭帯、骨群のすべての張力を総合的に解析する。また、服型ロボットのプロトタイプを作成し、それを用いた実験を実施する。

(1) 人体テンセグリティモデルの構築

テンセグリティ構造は、複数のピン同士の結合からなる骨組み構造の一種であり、互いのピンが互いに直接的に接触せず、ゴムなどの一定の張力を持った要素により互いに間接的に結合さ



図2 筋膜系ネットワークとテンセグリティ

れることで、安定な状態を為す構造である。構造の一部に負荷された外力が、局所的ではなく、構造全体へと分散されやすいという機能を持つ。テンセグリティモデルの利用により、ある関節に関与する筋、靭帯、骨群のすべての張力を総合的に解析する。

テンセグリティモデルにおいては、骨をストラット、筋（筋膜）と靭帯をケーブルと考え、各関節間の骨、筋（筋膜）、靭帯を解剖学的な配置をもとに配置することで、モデルを構築する。この際、人体構造のモデルとして公開されているものも参考にした。テンセグリティモデルを構築する対象としては、手首関節、肘関節、肩関節を対象にモデルの構築ならびに解析を実施した。

(2) プロトタイプ開発と評価

服型ロボットのプロトタイプを開発し、ハードウェアとしての有効性を検討する。まず、服型ロボットの設計仕様を決定する。この設計仕様をもとに、外筋型服ロボットのプロトタイプを開発する。対象は、すでに開発の実績がある上肢に関連する筋群とした。開発したプロトタイプを装着させた被験者の運動時の生体信号を解析することにより評価を行った。具体的には、関節の運動や筋群の筋電位信号を測定し、「支援対象となる筋の筋電位信号が小さくなっており、適切に支援されていること」、ならびに、「支援対象ではない筋群の筋電位信号が大きくならず、運動の阻害をしていないこと」等を確認した。

4. 研究成果

(1) 人体テンセグリティモデルの構築

手首関節、肘関節、肩関節を対象にモデルの構築、ならびに、解析を実施した。例として、肩関節のテンセグリティモデルの様子を図3、4に示す。得られた結果を各筋群への力の分配等の他文献の結果を調査したところ、定性的な結果の一致が確認された。

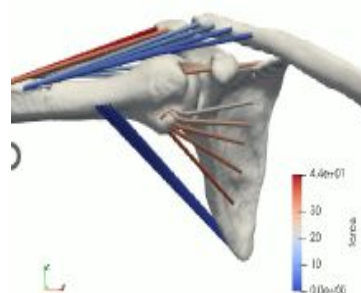


図3 テンセグリティモデルの解析の一例（肩関節）

(2) 服型ロボットのプロトタイプ開発と評価

手首関節、肘関節、股関節等の支援を対象とした服型ロボットの開発を実施した（例として、図4に肘関節支援用の服型ロボット、図5手首関節支援用の服型ロボットを示す）。これらのロボットは、腰に装着したモータの動作をローデンケーブルで支援部に伝達する仕組みとなっており、モータボックス以外は、サポーター等に使われる柔らかい素材を使って開発されたものである。これらの開発したロボットの評価実験を実施した。例えば、肘関節支援ロボットの評価試験として、肘関節ロボット装着時に対象の邪魔にならないことを、対象とする筋の筋電位信号が上昇しないことから確認した。また、手首関節支援ロボットに関しては、対象とする筋の負担を低減できることを、筋電位信号から確認した。



図4 服型ロボット
（肘関節支援用）



図5 服型ロボット
（手首関節支援用）

< 引用文献 >

[1] Michael T Turvey 1, Sérgio T Fonseca, “The medium of haptic perception: a tensegrity hypothesis”, Journal of Motor Behavior, 46(3):143-87, 2014

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yo Kobayashi, Yuya Matsumoto, Motoji Kawasaki, Akira Kato, Takeshi Ando, Masanori Nagaoka, Masakatsu G. Fujie	4. 巻 3(3)
2. 論文標題 Development of a Soft Exosuit for Suppressing Essential Tremor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics	6. 最初と最後の頁 783-790
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 Arakawa Tatsuya, Otani Tomohiro, Kobayashi Yo, Tanaka Masao	4. 巻 85
2. 論文標題 2-D forward dynamics simulation of gait adaptation to muscle weakness in elderly gait	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Gait & Posture	6. 最初と最後の頁 71~77
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.gaitpost.2021.01.011	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 Otani Tomohiro, Kobayashi Yo, Tanaka Masao	4. 巻 83
2. 論文標題 Computational study of kinematics of the anterior cruciate ligament double-bundle structure during passive knee flexion-extension	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Medical Engineering & Physics	6. 最初と最後の頁 56~63
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.medengphy.2020.07.015	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 Wataru Sumihira, Tomohiro Otani, Yo Kobayashi, Masao Tanaka	4. 巻 236(9),
2. 論文標題 Computational Modelling of Ankle-Foot Orthosis to Evaluate Spatially Asymmetric Structural Stiffness: Importance of Geometric Nonlinearity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine	6. 最初と最後の頁 1357-1364
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 Tomohiro Otani, Wataru Sumihira, Yo Kobayashi, Masao Tanaka	4. 巻 65 (10)
2. 論文標題 Topology optimization of a thin orthosis structure with geometric nonlinearity using a three-dimensional corotational triangle element formulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Structural and multidisciplinary optimization	6. 最初と最後の頁 1-12
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 無
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6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 坂之上大輝, 小林洋, 田中正夫
2. 発表標題 肘関節角の予測における複数の時系列モデルの比較評価
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第97期定時総会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 住平航, 大谷智仁, 小林洋, 田中正夫
2. 発表標題 患者個別に適切な底背屈剛性を有する短下肢装具形状のトポロジー最適設計
3. 学会等名 第32回バイオフィロンティア講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 住平航, 大谷智仁, 小林洋, 田中正夫
2. 発表標題 シューホーン型短下肢装具のトリムラインと底背屈剛性に関する有限要素解析
3. 学会等名 日本機械学会第33回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ahmad Alminnawi, Yo Kobayashi, Tomohiro Otani, Masao Tanaka
2. 発表標題 Shape Memory Alloy Actuated Ankle-Foot Orthosis for Reduction of Locomotion Force
3. 学会等名 Proceedings of 2021 World Automation Congress (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Doi, Y. Kobayashi, T.Otani, M. Tanaka
2. 発表標題 Musculoskeletal Tensegrity Model of Glenohumeral Joint for Distribution Analysis of Muscle Tension
3. 学会等名 10th Asian-Pacific Conference on Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 磯部高弥, 小林洋, 大谷智仁, 田中正夫
2. 発表標題 脊椎テンセグリティモデルによる靭帯張力バランスに関する検討
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会2019年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020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	大谷 智仁 (Otani Tomohiro) (40778990)	大阪大学・基礎工学研究科・講師 (14401)	

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	田中 正夫 (Tanaka Masao) (40163571)	大阪大学・基礎工学研究科・教授 (14401)	

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