

令和 6 年 4 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K21297

研究課題名（和文）開放型関節と靭帯の柔らかな拘束に基づく筋骨格ヒューマノイドの学習型環境適応行動

研究課題名（英文）Adaptation Behavior of Musculoskeletal Humanoids with Open Joints and Soft Ligament Constraints

研究代表者

河原塚 健人（Kawaharazuka, Kento）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任助教

研究者番号：90964677

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：人間と同様に柔軟で適応的な身体を構成するため、人間らしい開放型関節と靭帯を持つ筋骨格ヒューマノイドを開発した。関節の低摩擦性を担保する関節液内包機能、柔軟かつ衝撃に強い靭帯拘束、人間らしい3次元的な構造をもつ筋腱複合体と面状筋構造を開発し、それらにおける関節受容器実装とモデル予測制御まで行った。加えて、人間らしい筋と靭帯の配置の合理性検証、人間らしい筋配置の実ロボット実装に向けた筋配置設計最適化にまで成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間の柔軟で適応的な身体構造の理解は、現在のロボットに足りない柔軟性・適応性・冗長性を大きく変革する鍵となり得る。本研究では人間に特徴的な、衝撃に強く柔らかな構造を提供する開放型関節と靭帯拘束、筋腱複合体に着目し、それらを実際のロボット上に実装する手法の開発に成功している。今後人間社会に実際に導入されるロボットはより人間に近く親近感があり、人間と同じような柔らかさと適応性を持つべきであり、本研究はそんな社会の実現への一歩であると考えている。

研究成果の概要（英文）：To construct a flexible and adaptive body similar to humans, we developed a musculoskeletal humanoid with human-like open joints and ligaments. We ensured low-friction joint performance through joint fluid encapsulation, developed flexible and shock-resistant ligament constraints, and realized muscle-tendon complex and planar muscles with human-like three-dimensional structures. Additionally, we implemented joint proprioceptors and model predictive control in these structures. Furthermore, we successfully verified the rationality of human-like muscle and ligament placement and optimized muscle placement design towards real robot implementation of human-like muscle configuration.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：筋骨格 ヒューマノイド 開放型関節 靭帯拘束 柔軟素材

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

現在のロボットは一般的に、ベアリングやギアにより構成された関節を通してリンク同士が結合した、軸駆動型と呼ばれる構造を持つ。これは、産業用ロボットを始めとした多様なロボットに適用されてきた信頼性のある身体構造と言える。一方で、今後のロボットの活動範囲を考えると、産業における整備された環境だけでなく、災害現場や人間の生活空間、介護現場等へ導入可能なロボットが求められている。これまでのロボット構成は身体の柔軟性に欠け、耐衝撃性が低く、環境の複雑性や変化に適応した行動が難しい。そこで本研究では、人間の開放型関節-靭帯に見る、骨同士の柔らかな拘束に着目した。開放型関節ゆえに骨(リンク)同士は完全に拘束されておらず、環境に馴染むことができる。ベアリングやギアを使わず骨同士が面で接触するため耐衝撃性に優れ、軽量であると同時に、軸駆動型ロボットと異なり関節に特異点を持たない。また、靭帯拘束は開放型関節の脱臼を防止すると同時に、柔軟な可動域制限と、弾性による可動域限界における衝撃緩和効果を持つ。前述の利点の一方で、未だ開放型関節や靭帯、骨間の摩擦を軽減する軟骨や関節液、関節包の構成法や制御法は明らかになっていない。

2. 研究の目的

人体模倣型筋骨格ヒューマノイドの開放型関節と靭帯による柔らかな拘束、低摩擦性を担保する関節液・関節包、身体を覆う筋肉に関する身体設計手法、それらへの冗長センサ実装と相関関係学習を活用した状態推定・制御を開発する。通常の軸駆動型ロボットに搭載されたベアリングやギアをどこまで減らし、より衝撃に強く柔らかな身体構造を構成することができるか、また、人間の身体構造の利点・欠点の構成論的理解を行う。本研究は、介護や災害現場等の複雑で柔軟な動きが求められる環境下において、人間のように適応的に動作可能な未来のヒューマノイド構築に必須の課題であり、現在のロボット身体構造に大きな革新をもたらす可能性がある。

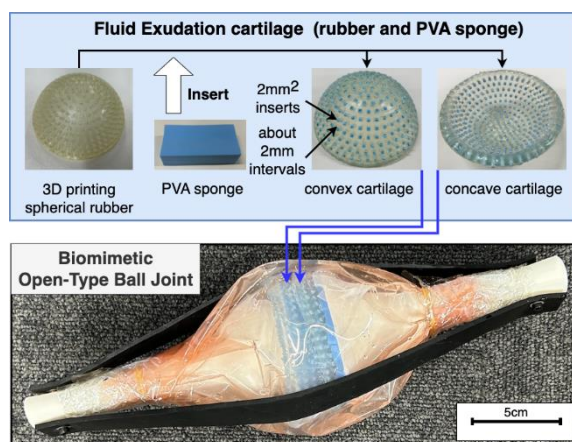
3. 研究の方法

人間に備わる開放型関節、関節包、靭帯、筋肉という全ての要素を可能な限り模倣した筋骨格身体を構築する。まず、開放型関節における骨間の潤滑作用を有する滑液と柔軟な軟骨、それを包み込む関節包を再現し、摩擦低減の効果を定量的に検証する。関節包に変形や圧力を測定するセンサを埋め込みこれを制御に活用する。次に、靭帯による柔らかな骨同士の拘束を実現する。シミュレータを活用しつつ人間と同様の靭帯配置を行い、その柔軟な拘束が人間らしい振る舞いへどう寄与するかを検証する。筋肉についても同様に人間と同様の配置がもたらす効果をモデル予測制御に基づき検証する。また、当初の予定から大きく進展し、筋肉をより人間らしい形状へと発展すべく、筋肉の収縮による膨張、面状筋や分岐筋を再現し、これを実機により検証する。その他、発展系として完全に3Dプリンタによる柔軟素材造形のみで構成された一体成型筋骨格ハンドの開発、ブラックボックス最適化を用いた筋骨格身体における筋配置の最適化、不必要な筋の削除と統合についても検証する。

4. 研究成果

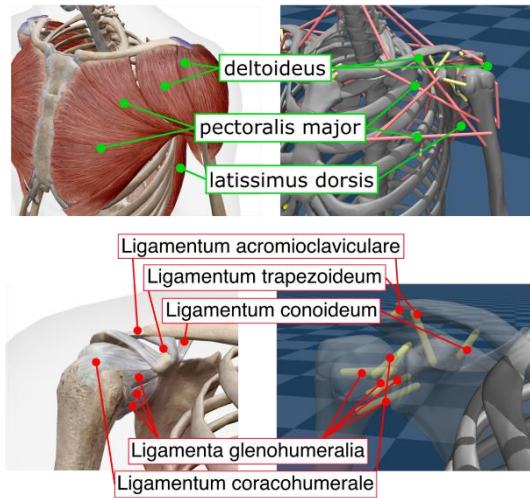
(1) 開放型球関節と液体滲出関節包

人間のような開放型球関節は衝撃に対する頑健性や特異点のない構造などの利点を有する一方で、これをロボットに搭載する際には骨同士の摩擦という大きな問題が生じる。人間の場合、骨および軟骨の連結部に生じる隙間である関節腔を囲むように関節包が存在し、関節腔に溜まった関節液が潤滑の役目を果たす。この関節液は荷重に応じて軟骨に関節液が染み出し、開放型であるにも関わらずベアリングに匹敵するほどの低摩擦が実現可能である。この機能を実際にロボット上を実現するために、3Dプリンタによる柔軟軟骨の造形とPVAスポンジの挿入に基づく液体滲出機構を開発した。まずはプロトタイプとして平面状シートを造形し、荷重量に応じたスポンジの変形により蓄えられていた滑液が滲出し、固相と固相の間に液相が発生すること、発生した液相が潤滑現象を引き起こし、摩擦を減少させることを定量的に確認した。また、荷重の減少に応じてゴムおよびスポンジの変形が戻ることで、滲出した液は関節包内に満ちている滑液からスポンジへと再補充される。その結果、液体滲出機能およびその潤滑機能は反復利用することができる。加えて、軟骨シートを実際に模擬骨にとりつけ、靭帯、関節液、関節包とともに開放型球関節を構成した。提案した軟骨シートが、等身大かつ曲面状に3Dプリンティングでき、開放型球関節を構成できることを確認した。



(2) 靭帯拘束とシミュレーションと制御

人間の複雑な肩複合体を題材として、人間と同様な靭帯と筋肉を有する筋骨格モデルを MuJoCo シミュレータ上に実装した。片方の肩で 20 本ずつ、計 40 本の筋肉が配置されており、肩複合体のみのシミュレーションとしては最も詳細と言える。ここで、人間同様の靭帯拘束をつけた場合とつけない場合、筋配置は同じだが、人間と同様の筋力分配を行った場合と行わない場合について、モデル予測制御を用いた肩の拳上動作によって検証を行った。結果として、人間らしい柔らかな靭帯拘束が存在することで安定した肩甲上腕リズムが生まれること、人間同様の筋力分配が筋力全体の負荷を減らすことがわかった。また、人間と同程度の可動域が確保できることがわかった。これを実際に実機として開発しており、動作確認まで完了している。



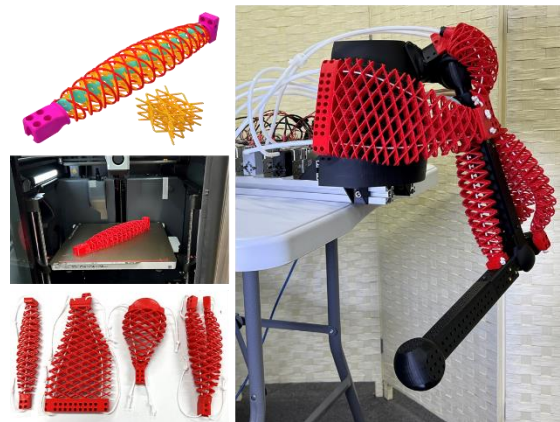
(3) 人間らしい筋腱複合体

ロボットの環境接触能力向上には、人間らしく柔らかな筋肉の構成に一定の価値がある。特に、筋腱複合体の幾何学的変形、特に筋肉の膨張が身体との環境接触時に重要な役割を果たしている可能性を考え、ワイヤの巻き取りに応じて変形し全体の形状を決定するポリプロピレンシートによる骨組みを編組スリーブで覆うことで三次元的な筋外装を実現した。ワイヤの緩み防止やモーメントアーム確保、環境接触時の内部保護、状態が見目に分かりやすいといった利点を、開発した 2 軸 3 筋ロボットにおいて確認した。



(4) 面状筋構造

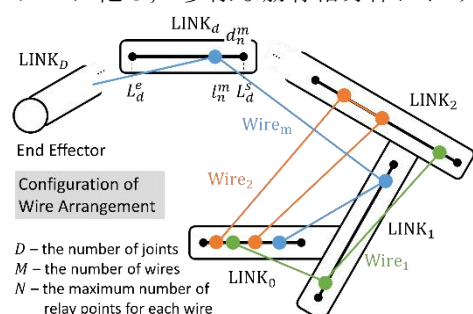
これまでの筋骨格ロボットにおいて、筋ワイヤ単体は細く線状の形状であるため、特に人間の胴体周辺に多く見られるような大胸筋・腹筋・広背筋をはじめとする平面状の筋肉や、三角筋をはじめとする関節を覆うような丸みのある形状の筋肉は構成できない。そこで、ワイヤを柔軟ラティス構造体で覆い、ワイヤに厚みや幅を持たせつつ、面状の筋肉としての利用を可能とした。柔軟ラティス構造体の内部は、枝で構成された単位パターンを直交する 3 方向へと周期的に配置して構成されている。熱可塑性ポリウレタンを材料とし、筋肉として収縮する方向への柔軟性を確保しながらも、筋肉内部においてワイヤ経路を拘束する役割を果たすことができる。また、この柔軟ラティス構造体を面状の形で使用し、ワイヤを複数通すことで、多自由度の面状筋としても活用することが可能であった。



(5) その他(一体成型ハンド、筋配置最適化)

これら研究の副産物として、多様な研究が発展した。まずは 3D プリンタにより一体成型可能な柔軟筋骨格ハンドの開発である。柔軟素材が容易に造形できるようになったことで、充填率を変えることで皮膚と骨格を一体で造形可能となった。関節部の可動域を担保するため関節に皺と穴を持たせ、造形姿勢を工夫することで実際の筋骨格ヒューマノイドのハンドとして利用可能なレベルの動作が可能となった。次に、筋配置をパラメータ化し、多様な筋骨格身体における汎用的な筋配置

のブラックボックス最適化が可能となった。手先が発揮可能な力と速度を両立可能な身体設計をパレート解として得ることが可能な多目的最適化に成功した。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 河原塚 健人	4. 巻 40
2. 論文標題 パラメトリックバイアスを含む深層予測モデル学習	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 784-789
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7210/jrsj.40.784	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20件（うち招待講演 1件/うち国際学会 8件）

1. 発表者名 H. Sato, K. Kawaharazuka, T. Makabe, K. Okada, M. Inaba
2. 発表標題 Online Estimation of Self-Body Deflection with Various Sensor Data Based on Directional Statistics (in press)
3. 学会等名 Proceedings of the 2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Kawaharazuka, A. Miki, M. Bando, T. Suzuki, Y. Ribayashi, Y. Toshimitsu, Y. Nagamatsu, K. Okada, M. Inaba
2. 発表標題 Hardware Design and Learning-Based Software Architecture of Musculoskeletal Wheeled Robot Musashi-W for Real-World Applications
3. 学会等名 Proceedings of the 2022 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ribayashi, K. Kawaharazuka, Y. Toshimitsu, D. Kusuyama, A. Miki, K. Shinjo, M. Bando, T. Suzuki, Y. Kojio, K. Okada, M. Inaba
2. 発表標題 Design of Robot Foot with Outer Edge Measurement Structure and Chair Rotation Motion by Friction Control
3. 学会等名 Proceedings of the 2022 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 K. Miyama, S. Hasegawa, K. Kawaharazuka, N. Yamaguchi, K. Okada, M. Inaba
2 . 発表標題 Design of a Five-Fingered Hand with Full-Fingered Tactile Sensors Using Conductive Filaments and Its Application to Bending after Insertion Motion
3 . 学会等名 Proceedings of the 2022 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 K. Kawaharazuka, K. Okada, M. Inaba
2 . 発表標題 Realization of Seated Walk by a Musculoskeletal Humanoid with Buttock-Contact Sensors From Human Constrained Teaching
3 . 学会等名 Proceedings of the 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 K. Kawaharazuka, K. Okada, M. Inaba
2 . 発表標題 Online Learning Feedback Control Considering Hysteresis for Musculoskeletal Structures
3 . 学会等名 Proceedings of the 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 K. Kawaharazuka, Y. Ribayashi, A. Miki, Y. Toshimitsu, T. Suzuki, K. Okada, M. Inaba
2 . 発表標題 Learning of Balance Controller Considering Changes in Body State for Musculoskeletal Humanoids
3 . 学会等名 Proceedings of the 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ribayashi, K. Kawaharazuka, Y. Toshimitsu, D. Kusuyama, A. Miki, K. Shinjo, M. Bando, T. Suzuki, Y. Kojio, K. Okada, M. Inaba
2. 発表標題 Imitation Behavior of the Outer Edge of the Foot by Humanoids Using a Simplified Contact State Representation
3. 学会等名 Proceedings of the 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 深山 和浩, 李林 嘉元, 河原塚 健人, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 骨格表皮を一体に3Dプリントしたロボットハンドの開発
3. 学会等名 第28回ロボティクスシンポジウム予稿集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三木 章寛, 板東 正祐, 永松 祐弥, 河原塚 健人, 利光 泰徳, 平岡 直樹, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 多種ロボットの扱いと高応答性を両立したハードウェア抽象化デバイス制御プラットフォーム開発
3. 学会等名 第28回ロボティクスシンポジウム予稿集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河原塚 健人, 金沢 直晃, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 低剛性ロボットの身体変化を考慮した自律的視覚サーボ学習
3. 学会等名 第23回SICEシステムインテグレーション部門講演会講演概要集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李林 嘉元, 深山 和浩, 三木 章寛, 河原塚 健人, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 ワイヤ巻取式筋腱複合体駆動によるロボット構成の基礎的検討
3. 学会等名 第23回SICEシステムインテグレーション部門講演会講演概要集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三木 章寛, 板東 正祐, 永松 祐弥, 河原塚 健人, 利光 泰徳, 平岡 直樹, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 軸駆動, 腱駆動, 台車型, 既製品を含む多様なロボットを扱うためのハードウェア抽象化デバイス制御プラットフォーム開発
3. 学会等名 第23回SICEシステムインテグレーション部門講演会講演概要集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河原塚 健人, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 一般化多感覚相関モデル学習に基づく身体図式の獲得と認識制御
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉村 駿之介, 河原塚 健人, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 3Dプリンタとサーボモジュールで製作可能なアームで体重を支持し移動する車輪型腱駆動ロボットの開発
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 深山 和浩, 河原塚 健人, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 表皮と骨格を一体で3Dプリンティングする腱駆動ソフトロボットハンドの開発
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三木 章寛, 板東 正祐, 河原塚 健人, 李林 嘉元, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 筋骨格ヒューマノイドによる動作周期の探索に基づくロープ投げ操作の実現
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李林 嘉元, 三木 章寛, 河原塚 健人, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 腱駆動ヒューマノイドによるスティック把持状態と剛性の変化を利用したドラムロール実現
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河原塚 健人, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 Parametric Biasを含む深層予測モデル学習と多様な実ロボットへの応用
3. 学会等名 第36回人工知能学会全国大会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河原塚 健人
2. 発表標題 身体図式の自律獲得機能を有する知能ロボットシステムとサイエンス開拓
3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------