

平成 30 年 6 月 20 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：2016～2017

課題番号：16H06723

研究課題名(和文) 筋骨一体型柔軟ハンド系と筋触覚接触状態推定に基づくヒューマノイドの環境掌握移動

研究課題名(英文) Humanoid locomotion by grasping the environment based on muscle-bone integrated flexible hand-arm system and contact estimation using muscle haptics

研究代表者

浅野 悠紀 (Asano, Yuki)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教

研究者番号：40783080

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ヒューマノイドが環境に掴まり自身の体を支えながら移動を行う環境掌握移動の実現を目的とする。そのためには環境を把持しヒューマノイドの自重を保持可能なハンドが必要なため、人体の前腕ハンド構造に学び前腕とハンドを独立ではなく一体としてとらえた人体模倣前腕ハンド構造を開発した。五指ハンドは、切削ばね関節を用いて環境接触に適した構成とし、前腕は筋骨一体設計による二筋モジュールを用いることで、小型さと駆動性能を兼ね備えた構成とした。これらを筋骨格ヒューマノイド健悟郎へ搭載しぶら下がり運動を実現することで開発した腱駆動前腕ハンド系が環境把持を伴うヒューマノイドの全身運動に有効であることを示した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research was to achieve humanoid locomotion by retaining its balance using its hands to grasp the environment. To achieve the purpose, a hand-arm system which can grasp the environment strongly and hold its weight is required. We got inspiration from human hand-arm structure and developed human-mimetic hand-arm system whose design was made as not independent but integrated structure. Five-fingered hand is composed of flexible machining spring joints and suitable for environmental contact. Forearm is composed of compact muscle actuator modules based on muscle-bone integrated structure and equipped with both compact and high actuation performance. By achieving dangling motion of musculoskeletal humanoid Kengoro which is equipped with the developed hand-arm structure, we confirm that the developed structure is effective for humanoid motion with involving environment grasp.

研究分野：知能機械システム

キーワード：筋骨格ヒューマノイド 腱駆動 人体模倣 五指ハンド 橈骨尺骨構造 筋骨一体構造 環境掌握 筋張力制御

1. 研究開始当初の背景

人間の手は、足部とともに主要な環境接触部位である。人間の行動における環境利用に着目すると、寝た状態から起き上がる時に体を支えるために環境を把持すること、壁のよじ登り、壁を利用したつたい歩きなど、動作の流れの中で全身を支えるために積極的に手を使う例は多い。しかし、これまでのヒューマノイドハンドは物体マニピュレーションを主眼に置くものが多かったため、繊細で脆弱な構造であることが多く、環境接触における構造破壊や過負荷によるアクチュエータの熱損などが問題となっている。またヒューマノイドの全身行動生成においては、ハンドの構造的脆弱性や全身制御における姿勢生成を困難にすることから、環境とハンドの接触を避ける手法が行われてきており、環境接触可能なハンドの構成法や環境接触を伴う状況でのヒューマノイドの動作生成手法について、まだ明らかとなっていない部分が多い。壁のつたい歩きや起き上がりなど、人間目線では環境を利用する方が動作を容易に行える場合も多いが、反対に現在のヒューマノイド制御の枠組みにおいては難しい問題であり、知見の蓄積がまだまだありません。

2. 研究の目的

本研究では、ヒューマノイドが「環境に掴まり」自身の体を支えながら移動を行う環境掌握移動の実現に着目する。環境掌握移動が可能なヒューマノイドの構成法及び動作実現法を示すことで、これまでヒューマノイド研究で検討されてこなかった運動領域を研究視野に入れ、ヒューマノイドの活動領域の拡大並びに人間のように環境との相互作用の中で学習成長可能なロボットへと発展・展開していく基礎技術の確立を、本研究の目的とする。

3. 研究の方法

人体構造に学んだ腱駆動前腕・ハンド系の設計開発を行う。人間の前腕・ハンド系を参考とし、前腕とハンドを独立ではなく一体として考え、前腕にハンドを駆動する筋を集積する前腕ハンド一体型の腱駆動構造とする。腱駆動構造とすることで、筋(ワイヤ)が直列弾性要素として柔軟要素の役割を果たし、かつ、筋張力制御によって、耐衝撃性能が向上する。

また、ヒューマノイドハンドの多自由度化を妨げ、脆弱な構造としている主な原因は、前腕手首部に 6 軸力センサを搭載する典型

的なヒューマノイド手首構造であると考えられる。このために、ハンドと前腕リンクを別駆動系として独立に設計する必要があり、ハンドのスペース的制約より十分な出力を備えたアクチュエータを搭載することができない。この点、申請者が培ってきた腱駆動ヒューマノイドの要素設計技術、筋張力に基づく身体制御の知見を利用し、人間のように前腕・ハンド系を一体としてとらえた腱駆動構造を構成する。そうすることで、筋張力より手首関節のトルクを求め 6 軸力センサを搭載することなくとも従来と遜色のないセンサ情報の取得しつつ、アクチュエータを前腕部に集約しハンド部には多自由度化のための構造と力センサを十分に搭載することが可能となり、コンパクトでかつ「環境に掴まれる」だけの握力を備えた前腕・ハンド系の構築が可能となると考えた。

4. 研究成果

(1) 環境に掴まれる腱駆動五指ハンド

ハンドは、環境接触時の耐衝撃性・柔軟性と強力把持に耐える構造的強度を兼ね備える必要があった。ハンドの耐衝撃性を下げる要因として、通常の手における指関節の軸部分に細く弱い構造材を用いていることが考えられたため、この解決手法として、切削金属によるバネ関節を用い、耐衝撃性の向上させることとした。この切削バネを指関節部に用いて、五指ハンドを開発した(図1)。指関節を金属バネ関節とするため、拮抗筋が無くとも筋を緩めると初期の姿勢への復元力が働く構造となる。また、切削バネを指と

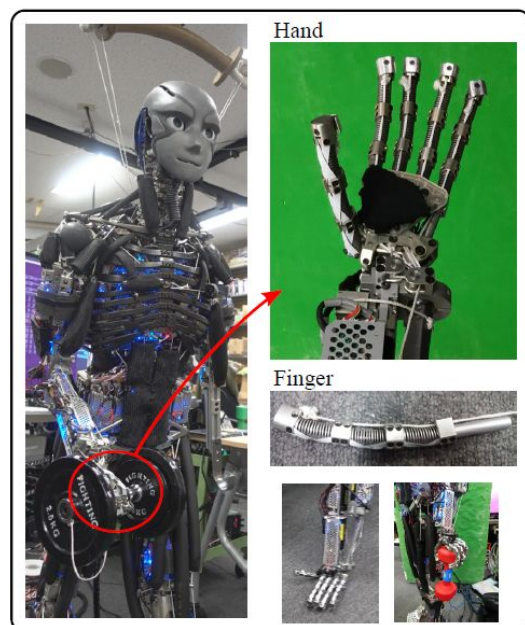


図1 開発した腱駆動五指ハンド [6]

して機能させるために、靱帯を模した金属プレートを取り付け、屈曲方向を制限する異方性を与えた。また、指先及び付け根部分に力センサを搭載することによって、物体把持時の把持力制御が可能となっており、円筒や長方形といった様々な物体形状や、柔軟物や剛体など様々な物体硬さに適応する把持戦略の構築を行った。

(2) 筋骨一体設計による腱駆動前腕

ハンド部での多自由度を実現するために前腕部にハンド及び手首を駆動するアクチュエータを搭載する必要があった。この時、モータやセンサなど要素単品を単純に配置していくと、狭い設計空間とハードウェア性能のトレードオフとなり、多くの駆動筋を搭載することが困難であった。そこで、骨格と筋アクチュエータを一体的に設計する筋骨一体小型筋モジュールを開発し、これを用いて前腕を構成した(図2)。これによって、コンパクトながらも人体と同じ橈骨尺骨構造を有し、ハンドと手首を駆動する8筋を搭載する前腕を構成することが出来た。具体的には、筋(モータ、モータドライバ)とセンサ系(張力、温度)から構成される従来型一筋モジュールにさらに骨格機能を追加し、密な配置可能なアクチュエータモジュールとした。アクチュエータには、前腕部に特化した小型モータを用い、駆動筋数を一筋から二筋へと増加させた。また、減速比を高くすることで把持力(発揮張力)を重視する構成とした。

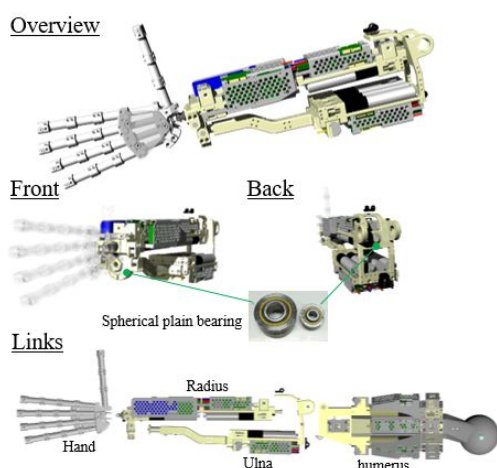


図2 筋骨一体設計に基づく人体模倣前腕 [5]

(3) 環境へのぶら下がり運動の実現

開発した前腕ハンド系を人体模倣筋骨格ヒューマノイド腱悟郎へと搭載し、環境へのぶら下がり実験を行った。電動クレーンに取り付けた把持部を腱悟郎に把持させ、クレー

ンを上昇させることでぶら下がり運動を実現した(図3)。57kgある腱悟郎の全身重量を支えられる把持性能を確認した。これにより、人体構造に学ぶヒューマノイド構造設計法の有用性を確認し、開発した腱駆動前腕ハンド系が環境把持を伴うヒューマノイドの全身運動に有効であることを示した。

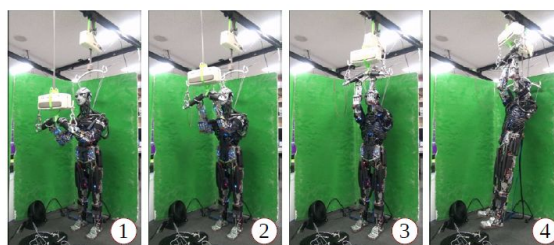


図3 人体模倣筋骨格ヒューマノイド腱悟郎によるぶら下がり運動 [6]

(4) 環境掌握移動に向けた身体制御系の構築

上記のハードウェア開発と性能評価を行い、環境掌握移動に取り組んだところ、環境認識と身体制御を結びつける行動認識制御系の構築が必要であることが分かった。具体的には、実機モデル誤差や拮抗筋の影響による身体負荷の軽減や、そのような状況においても対象へのリーチングを可能とする学習型身体制御法の構築、視覚によって対象物を認識する視覚認識系の構築、環境接触に対する柔軟身体制御法の構築などが必要となったためこれらを進めた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

[1] Kento Kawaharazuka, Shogo Makino, Masaya Kawamura, Yuki Asano, Kei Okada, Masayuki Inaba:
Online Learning of Joint-Muscle Mapping Using Vision in Tendon-Driven Musculoskeletal Humanoids,
IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.3, No.2, pp.772-779, 2018. (査読有)

[2] Yuki Asano, Kei Okada, Masayuki Inaba:
Design principles of a human mimetic humanoid: Humanoid platform to study human intelligence and internal body system,
Science Robotics, Vol.2, No.13, eaaq0899, 2017. (査読有)

[3] Kento Kawaharazuka, Shogo Makino, Masaya Kawamura, Yuki Asano, Kei Okada, Masayuki Inaba:
Antagonist Inhibition Control in Redundant Tendon-driven Structures Based on Human Reciprocal Innervation for Wide Range Limb Motion of Musculoskeletal Humanoids,
IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.2, No.4, pp.2119-2126, 2017. (査読有)

〔学会発表〕(計 13 件)

[4] 河原塚健人, 牧野将吾, 川村将矢, 藤井綺香, 浅野悠紀, 岡田慧, 稲葉雅幸:
筋骨格ヒューマノイドにおける身体組織の柔軟性による筋経路変化を考慮した逐次的自己身体像の獲得,
in 第23回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.306-312, 2018

[5] Kento Kawaharazuka, Shogo Makino, Masaya Kawamura, Yuki Asano, Yohei Kakiuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba:
Human Mimetic Forearm Design with Radioulnar Joint Using Miniature Bone-Muscle Modules and Its Applications,
in Proceedings of The 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.4956-4962, 2017.

[6] Shogo Makino, Kento Kawaharazuka, Masaya Kawamura, Yuki Asano, Kei Okada, Masayuki Inaba:
High-Power, Flexible, Robust Hand: Development of Musculoskeletal Hand Using Machined Springs and Realization of Self-Weight Supporting Motion with Humanoid,
in Proceedings of The 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1187-1192, 2017.

[7] 河原塚健人, 牧野将吾, 川村将矢, 浅野悠紀, 岡田慧, 稲葉雅幸:
筋骨格ヒューマノイドにおける視覚を利用した関節-筋空間マップの逐次的再学習,
in 第35回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2L1-01, 2017.

[8] 牧野将吾, 河原塚健人, 川村将矢, 浅野悠紀, 岡田慧, 稲葉雅幸:
筋骨格ヒューマノイドのための切削ばねによる柔軟関節を備えた五指ハンドの開発と自己身体負荷保持動作の実現,
in 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'17 講演論文集, 2P1-B08, 2017.

[9] 河原塚健人, 牧野将吾, 川村将矢,

浅野悠紀, 岡田慧, 稲葉雅幸:
骨構造一体小型筋モジュールにより構成された橈骨尺骨構造を有する前腕部の設計,
in 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'17 講演論文集, 1A1-011, 2017.

[10] Yuki Asano, Toyotaka Kozuki, Soichi Ookubo, Masaya Kawamura, Shinsuke Nakashima, Takeshi Katayama, Iori Yanokura, Toshinori Hirose, Kento Kawaharazuka, Shogo Makino, Youhei Kakiuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba:
Human Mimetic Musculoskeletal Humanoid Kengoro toward Real World Physically Interactive Actions,
in Proceedings of the 2016 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2016), pp.876-883, 2016.

[11] Masaya Kawamura, Soichi Ookubo, Yuki Asano, Toyotaka Kozuki, Kei Okada, Masayuki Inaba:
A Joint-Space Controller Based on Redundant Muscle Tension for Multiple DOF Joints in Musculoskeletal Humanoids,
in Proceedings of the 2016 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2016), pp.814-819, 2016.

[12] Yuki Asano, Shinsuke Nakashima, Toyotaka Kozuki, Soichi Ookubo, Iori Yanokura, Youhei Kakiuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba:
Human Mimetic Foot Structure with Multi-DOFs and Multi-sensors for Musculoskeletal Humanoid Kengoro,
in Proceedings of The 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2419-2424, 2016.

〔その他〕
ホームページ
<http://www.jsk.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者
浅野悠紀 (YUKI ASANO)
東京大学大学院・情報理工学系研究科・助教
研究者番号: 40783080