

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：12601
研究種目：若手研究
研究期間：2019～2021
課題番号：19K20372
研究課題名（和文）ヒューマノイドの構成要素解析に基づく身体構造構成法の解明と全身動作制御への応用

研究課題名（英文）Elucidation of Body Structure Configuration Method Based on Component Analysis of Humanoid and its Application to Whole Body Motion Control

研究代表者
小島 邦生 (Kojima, Kunio)
東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教

研究者番号：50839131
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではA環境との多様な接触を伴う動作を行うための関節のトルク追従性，B正確かつ高速に四肢を操作するための関節の角度・角速度追従性，Cロボットが全身で動的動作を実現するための高い駆動出力/重量比の3つの身体動作性能を達成する人型ロボットを身体構造と制御機構の構成法を確立した。またその過程でロボットの各身体構成要素の性能を定量的に全身レベルで評価することで動作性能A～Cを実現できる身体構造の解析・設計法を明らかにしたこと，その設計法に基づき身体構造を考案し動作性能A～Cを検証したこと，開発した人型ロボットを使うことでダイナミックな動作を実現する全身制御則を解明したことの3つの成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は「人と同程度の運動性能や身体動作機能を有する人型ロボットの身体構造をどのように構成すべきか」という問いに対して，ロボットの各身体構成要素の性能を定量的に全身レベルで評価しながら身体構造を構成することでこれまで実現できなかった跳躍のような動的全身動作が達成できるという解を得たという点で学術的意義がある。また，解明した身体構造の解析・設計法は人型ロボットにかかわらず他のロボットや機械の構造の解析にも適用可能であり，それらの動作性能を追求する際の足枷を探れるようになるという点で社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we established a method to construct a humanoid robot that achieves the following three physical movement performances: A. Torque tracking performance of joints for motions involving various contacts with the environment, B. Angular and angular velocity tracking performance of joints for accurate and fast limb manipulation, and C. High drive power to weight ratio for dynamic whole-body motion of the robot. We have established a method to configure the design and control mechanism. In the process, we clarified the analysis and design method of the body structure that can achieve the body motion performance A to C by quantitatively evaluating the performance of each body component of the robot at the whole body level, devised and developed the body structure based on the design method, and verified that the body motion performance A to C was achieved. We also clarified the whole-body control law that realizes dynamic motions by using the designed and developed humanoids.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：ヒューマノイド 身体構造設計 動作制御

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ヒューマノイドとは人を模して作られた人型ロボットのことである。ヒューマノイドは産業用ロボットや宇宙探査ロボットなどと異なり、人間を模した身体構造であるため、人の身体構造に適した環境において人の代わりに身体動作を伴うタスクを行うことが期待される。

実際、これまでボストン・ダイナミクスの Atlas やホンダの ASIMO などの様々なヒューマノイドロボットが開発され、それらのヒューマノイドにおいて歩行や走行などの移動動作や物体搬送や組立等の物体操作、ヒューマンロボットインタラクション、介護支援などの様々な身体動作を実現するための研究が行われている。このようにヒューマノイドは人間を模して作られたため人と同様に多く身体動作機能を有することが期待されると同時に、自立移動型機械でもあるため一つの独立完結した身体構造から構成される必要がある。

2. 研究の目的

研究背景で述べたような多くの身体動作機能を一つの身体構造に統合することは困難であるため、従来開発されてきたヒューマノイドは機能を絞っており、依然、人と同様に多くの身体動作機能を統合して一つの身体構造として統べる構成法は明らかになっていない。そこで、人と同程度の運動性能や身体動作性能を有するヒューマノイドの身体構造をどのように構成すべきかを明らかにすることを研究目的とする。具体的にはヒューマノイドの全身動作実現に向けて達成すべき身体動作性能として、

- A. 環境との多様な接触を伴う動作を行うための関節のトルク追従性
 - B. 正確かつ高速に四肢を操作するための関節の角度・角速度追従性
 - C. ロボットが全身で動的動作を実現するための高い駆動出力/重量比
- の3項目を設定しこれらの身体動作性能に対して以下の3点を解明することを研究目的とした。
- i) ロボットの各身体構成要素の性能を定量的に全身レベルで評価することで身体動作性能 A~C を実現できる身体構造の解析・設計法を明らかにする。
 - ii) i)の設計法に基づいて身体構造を考案・開発し身体動作性能 A~C を達成することを検証する。
 - iii) 設計・開発したヒューマノイドを使うことでダイナミックな動作や環境との多様な接触動作を実現する全身制御則を解明する。

3. 研究の方法

i) ロボットの各身体構成要素の定量的評価に基づく身体構造の解析・設計法の確立

従来研究では関節の駆動・減速機構、関節の回転軸配置等のロボットの各身体構成要素は設計者の経験や勘、簡易な計算に従って段階的に決定されてきた。本研究ではロボットの各身体構成要素をモデル化し、求められる身体動作性能 A~C との関係性を定式化することで異なる駆動方式や関節構造を定量的に比較・解析できるようにする

ii) 解析・設計法 i) に基づいた身体構造の開発と性能検証

i)の解析・設計法に基づいて各身体構成要素を設計した結果、求められる身体動作性能を実現できる構造として駆動機構と骨格構造を一体化した張糸外皮構造を提案する。駆動機構(ワイヤ)が骨格構造の役割を兼ねてロボットの身体構造に働く荷重を維持し、荷重を骨格構造(圧縮力)と駆動機構(ワイヤ張力)に分散することで骨格構造の質量増加を抑制することができる。

iii) 多様な接触状態を伴う動作の全身制御則の解明

設計・開発したヒューマノイドを用いて力覚センサを用いずに電流規範の全身トルク制御を行うことで歩行や跳躍などのダイナミックな動作や環境との接触動作を実現する全身制御則を解明する。従来のヒューマノイドで困難であった動作の中でも、関節の高いトルク追従性(機能 A) が達成されたことにより膝立ちや力覚センサを用いずに匍匐前進のような環境との接触動作が、高い駆動出力/重量比(機能 C) が達成されたことにより跳躍のような動的全身動作の制御則の解明を行う。

4. 研究成果

i) ロボットの各身体構成要素の定量的評価に基づく身体構造の解析・設計法の確立

ロボットの各身体構成要素をモデル化し、身体動作性能 A~C との関係性の定式化を行った(図 2)。また、加えて単関節試験機(エラー! 参照元が見つかりません。)を製作しそれらのモデル化・定式化の実験による検証を行った。本研究では求められる身体動作性能を実現できる構造として駆動機構と骨格構造を一体化した構造を提案している。これらの成果により異なる駆動方式や関節構造を定量的に比較・解析できるようになり、ワイヤ駆動機構と骨格を一体化した身体構造が優れているということを定量的に導き出した。従来のヒューマノイドの身体構造と提案する身体構造を比較し本研究で求める身体動作性能 A~C に関して提案する身体構造の優位性を示すことができた。

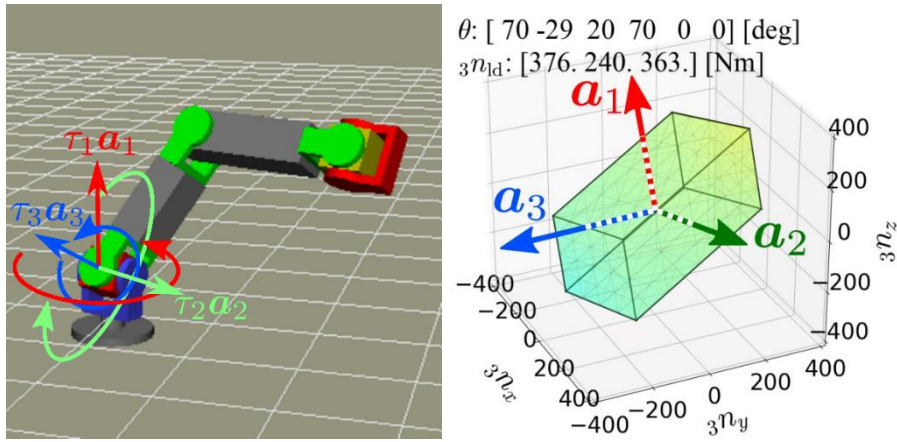


図 2 関節トルクとフレームに働くモーメントの関係性を表す図

(左図の姿勢においてロボットがアクチュエータの出力制限の元で動作する際にフレームの根本に働き得る曲げモーメントの領域を右図に示している.)

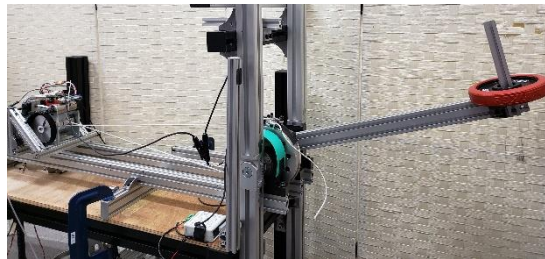


図 1 モデル化・定式化を検証するための単軸試験機

ii) 解析・設計法 i) に基づいた身体構造の開発と性能検証

ワイヤ駆動機構と骨格を一体化した身体構造を採用するロボットの脚部・体幹・腕部を開発し, i) の定式化を通じて設計理論が一般化されたため提案する身体構造をロボットの身体構造へ適用する方法が明らかになった.

本研究で提案している身体構造はワイヤ駆動により構成されるが, ワイヤ駆動はそのワイヤの伸びによりヒステリシスや非線形性が生じるため関節トルク・関節角度の追従性能 (機能 A・B) を向上しなければならない. 機能 A・B の性能を向上するために単軸試験機によるデータ取得・分析・制御則改良を行った. その結果, ロボットが着地時に受ける衝撃力を吸収でき且つ関節の制御性を損なわないための最小限の関節柔軟性を実現するためのワイヤ剛性の決定方法と関節制御則を明らかにした. さらに, ロボットのリアルタイム・バランス安定化制御下でのロボット全身の COG・ZMP の応答性を評価することで, iii) において全身動作制御を問題なく行える制御性能があることを確認した (図 3).



図 4 開発したロボット

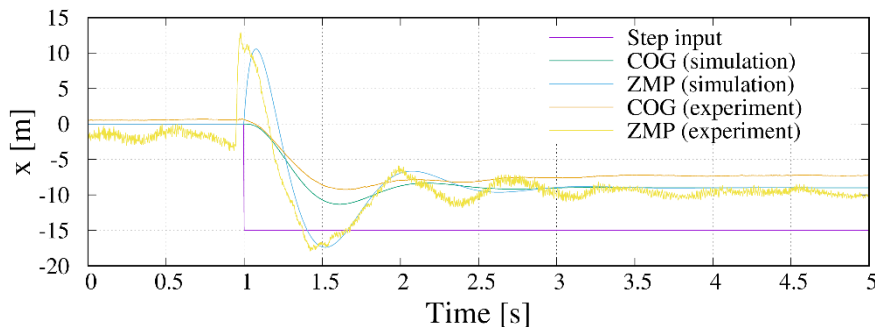


図 3 ZMP のステップ入力に対する COG の応答性 (COG の応答性を実機とシミュレーションの間で比較することで, 実機における ZMP 制御の遅れによる時定数を同定した)

iii) 多様な接触状態を伴う動作の全身制御則の解明

開発したヒューマノイドロボットを用いることで歩行・走行動作に関する全身制御則の解明に取り組んだ。段差のない平らな床平面を仮定して生成した動作軌道でも着地時衝撃を吸収することで、高さ 30mm の段差を含む不整地を歩行が実機で行えることを確認した。また、全身の鉛直方向の運動を扱える全身制御則を解明することで、跳躍のような瞬間的かつ単発的な動作だけでなく走行のような継続的にダイナミックな動作を扱えるように改良し、走行動作をシミュレータ上で実現した。さらに、実機における跳躍着地時の衝撃力を吸収するための着地待機中および着地後の重心軌道・遊脚軌道の計画・再生成法と、関節レベルと全身レベルでのトルク制御則の解明に取り組んだ。これにより実機の跳躍動作において高速に脚を制御(機能 B)しながら数十 mm 程度の着地面高さの誤差により生じる衝撃力を吸収できる(機能 A)ことが分かった。また同様の制御を歩行動作に適用し、平らな床平面を仮定した歩行制御において屋外の実環境での不整地を踏破することができた。このことから、その衝撃吸収制御は不整地での歩行動作の着地衝撃力の吸収においても多大な効果を発揮することが実証できた。これまでに跳躍動作に加えて芝生や木の根、庭石などを含む不整地の踏破を実機のロボットにおいて実現している(図 5)。以上より動的全身動作を行うことができるヒューマノイドロボットの身体構造の構築法を確立しその構造を用いることで従来のヒューマノイドロボットでは困難であった跳躍や不整地歩行動作を達成できるような全身制御則を解明するという、本研究の目的を達成することができた。



図 5 屋外環境での動作実験において木の根を踏みながらも転倒せずに歩行を続ける様子

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3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 Kojima Kunio, Kojio Yuta, Ishikawa Tatsuya, Sugai Fumihito, Kakiuchi Yohei, Okada Kei, Inaba Masayuki	4. 巻 38
2. 論文標題 Design Method for Weight Saving Based on Joint Drive Force and Frame Stiffness and Realization of Jump Motions by a Lightweight and High-Power Humanoid JAXON3-P	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 975 ~ 984
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.38.975	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 Noda Shintaro, Sugai Fumihito, Kojima Kunio, Nguyen Kim-Ngoc-Khanh, Kakiuchi Yohei, Okada Kei, Inaba Masayuki	4. 巻 17
2. 論文標題 Semi-Passive Walk and Active Walk by One Bipedal Robot: Mechanism, Control and Parameter Identification	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Humanoid Robotics	6. 最初と最後の頁 2050012 ~ 2050012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0219843620500127	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 Kojio Yuta, Omori Yuki, Kojima Kunio, Sugai Fumihito, Kakiuchi Yohei, Okada Kei, Inaba Masayuki	4. 巻 5
2. 論文標題 Footstep Modification Including Step Time and Angular Momentum Under Disturbances on Sparse Footholds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 4907 ~ 4914
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2020.3004796	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 Nguyen Kim-Ngoc-Khanh, Kojio Yuta, Noda Shintaro, Sugai Fumihito, Kojima Kunio, Kakiuchi Yohei, Okada Kei, Inaba Masayuki	4. 巻 6
2. 論文標題 Dynamic Fall Recovery Motion Generation on Biped Robot With Shell Protector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 6741 ~ 6748
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2021.3094234	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13件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Kojima Kunio
2. 発表標題 Drive-Train Design in JAXON3-P and Realization of Jump Motions: Impact Mitigation and Force Control Performance for Dynamic Motions
3. 学会等名 Proceedings of The 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fukazawa Kazuki
2. 発表標題 Online System for Dynamic Multi-contact Motion with Impact Force Based on Contact Wrench Estimation and Current-Based Torque Control
3. 学会等名 Proceedings of The 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hattori Mirai
2. 発表標題 Fast Tennis Swing Motion by Ball Trajectory Prediction and Joint Trajectory Modification in Standalone Humanoid Robot Real-time System
3. 学会等名 Proceedings of The 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小島 邦生
2. 発表標題 衝撃緩和と力応答のためのヒューマノイドJAXON3-Pの駆動系設計法と動的接触動作の実現
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 深澤 和毅
2. 発表標題 等身大ヒューマノイドにおける衝撃を伴う動的多点接触動作のための、トルク制御と接触力推定を用いた接触制御システム
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'20 講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小椎尾 侑多
2. 発表標題 足場が限られた環境における着地可能領域を考慮した即応歩容生成
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'20 講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武田博樹
2. 発表標題 等身大ヒューマノイドにおける空気ダンパ衝撃吸収外装を用いた受身動作
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'20 講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 服部未来
2. 発表標題 等身大ヒューマノイドにおける全身動作最適化に基づく脚踏み出しを含むテニスボレー動作生成
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小島邦生
2. 発表標題 A Robot Design Method for Weight Saving Aimed at Dynamic Motions: Design of Humanoid JAXON3-P and Realization of Jump Motions
3. 学会等名 Proceedings of the 2019 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小島邦生
2. 発表標題 動的全身動作を目指した軽量・大出力ヒューマノイドJAXON3-Pの設計手法と跳躍動作の実現
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shimpei Sato
2. 発表標題 Drop Prevention Control for Humanoid Robots Carrying Stacked Boxes
3. 学会等名 Proceedings of The 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nishio Takuzumi
2. 発表標題 Fixed-root Aerial Manipulator: Design, Modeling, and Control of Multilink Aerial Arm to Adhere Foot Module to Ceilings using Rotor Thrust
3. 学会等名 Proceedings of The 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kunio Kojima
2. 発表標題 Drive-trains design and low-level joint control of JAXON series
3. 学会等名 IROS 2021 Workshop: Application perspectives (招待講演)
4. 発表年 2021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
---------	---------