

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K19802

研究課題名（和文）確率的状態遷移を含むハイブリッド制御による人型ロボットの統一的制御理論の構築

研究課題名（英文）Unified Control Theory of Humanoid Robot by Hybrid Control including Probabilistic State Transition

研究代表者

山本 江（Yamamoto, Ko）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号：20641880

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000 円

研究成果の概要（和文）：人型ロボットの単純化モデルにおいて、足の踏みかえ・遊脚の着地位置の変化を考慮した制御とその安定化可能領域の計算、遊脚の着地時に生じる衝撃力を確率的に考慮したモデル予測制御の数学的枠組みを研究し、そのアルゴリズムを開発した。また、これらの単純化モデルにおける制御則を全身の関節レベルの制御則へ変換する粘弾性最適化アルゴリズムを開発した。動力学シミュレーションおよび油圧駆動型ヒューマノイドロボットを用いて実験検証を行い、膝を伸展させた姿勢での二足歩行、歩行中に未知の外乱が加わった場合のバランス制御、傾斜角度が変化する路面上でのバランス制御を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

足の踏みかえに伴い構造が離散的に変化する人型ロボットの力学的な特徴を扱うことができる単純化モデルの制御方法、および単純化モデルと詳細全身モデルの間の変換方法を示した。数学・力学に関する理論的枠組みを構築しただけでなく、それらを実験的に検証し、実際のロボットシステムで安定な二足歩行、バランス制御を実現した。これらの成果は、人型ロボットが実環境で安定に歩行するための基盤技術につながる。

研究成果の概要（英文）：In this research, mathematical frameworks and algorithms for a simplified model of a humanoid robot were developed, including the control design and stabilizable region analysis explicitly considering discontinuous state transitions during walking, and the model predictive control considering the probability of landing impact forces. Moreover, the transformation method from the simplified model to the detailed whole-body dynamics was also proposed. These frameworks and algorithms were validated through dynamics simulations and experiments. In a hydrostatically-driven humanoid robot, stable biped walking motions with a knee-stretched posture, and stable balancing control against unknown disturbances or on an inclining ground.

研究分野：ヒューマノイドロボット

キーワード：二足歩行制御 ハイブリッド制御

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

人型ロボット、二足歩行制御の研究は古くから行われているが、ヒトと同程度に安定でロバストな二足歩行制御は未だに実現できておらず、現在でも挑戦的課題である。二足歩行が制御工学的に難しい理由として、以下の点が挙げられる。

- 人型ロボットは拘束システムである。足と路面の間の接触力に関して拘束条件が存在する。接触力の拘束条件には、床反力の中心点である Zero Moment Point (ZMP) が足裏の領域内に存在するという拘束と、摩擦力に関する拘束が存在する。これらは、路面と足がどのように接しているかという接触状態に依存する。
- 人型ロボットはハイブリッドシステムである。足の踏みかえによって接触状態が不連続に切り替わる。さらに、上記の拘束条件自体が足の接触状態によって不連続に変化する非常に複雑なシステムである。
- 接触状態は路面の凹凸形状・物性値のような外的要因によって決まるため、正確に接触状態を計測または予測することは困難であり、その情報には不確かさを含む。

研究代表者は、人型ロボットの拘束システムとしての側面に注目して研究を進めてきた。過去の研究では、ある決められた接触状態における安定化制御において、その拘束条件を満たす安定化可能領域を計算する理論を構築してきた。この手法の課題は、事前に接触状態を限定している点であり、運動中に接触状態(足の着地位置やタイミング)を変化させることはできない。転倒を防ぐことや路面の凹凸に適応するためには、運動中にリアルタイムに接触状態を変化させる必要がある。この点から、接触状態の変化も制御入力に含む新しい理論の構築が必要であり、そのためには人型ロボットのハイブリッドシステムとしての側面に注目することが有効である。

### 2. 研究の目的

ハイブリッドシステムに関する研究が進んできたが、人型ロボットへ応用する試みはほとんどなされていない。さらに、足の接触状態の不確かさを扱うためには、確率的な状態遷移を考える必要がある。状態遷移が確率的に生じるものは確率的ハイブリッドシステムと呼ばれる。そこで、本研究では人型ロボットを確率的ハイブリッドシステムとして捉え、その安定性・制御器設計を統一的に扱う理論を構築することに挑戦する。

### 3. 研究の方法

二足歩行の確率的ハイブリッド制御理論について、人型ロボットの動力学シミュレーションと実機実験によって検証する。

- (1) 人型ロボットの力学は大自由度を有するため、そのままでは扱いが難しい。そこで、単純化モデルを用いて二足歩行の確率的ハイブリッド制御理論を構築する。従来研究の多くは、単純化モデルとしてロボットの重心と ZMP から成る重心・ZMP モデルを採用してきた。これに足の接触状態を加え、さらにその状態遷移を確率的に扱う。単純化モデルのみによる比較的簡単なシミュレーションを行い、理論の検証を行う。
- (2) 構築した制御理論を単純化モデルから大自由度の全身制御へと拡張する。これには研究代表者が従来研究で提案している単純化モデルから全身モデルへの制御器のマッピング方法を拡張して適用する。全身運動制御は、動力学シミュレーションによって検証を行う。
- (3) 実際の人型ロボットを用いた実験検証を行う。実験用ロボットとしては、油圧駆動型の人型ロボットを使用する。

### 4. 研究成果

(1) 人型ロボットの重心・ZMP モデルにおいて、図 1 のように足の踏みかえ・遊脚の着地位置の変化を考慮した制御とその安定化可能領域を計算する数学的枠組みを提案した(業績 4,8)。さらに、遊脚の着地時に生じる衝撃力の大きさを確率的に考慮したモデル予測制御を提案した(業績 3)。これにより、足の踏みかえ・遊脚の着地に伴う状態遷移を確率的に扱うことが可能となった。また、これまでの人型ロボットの単純化モデルによる関連研究をサーベイ論文としてまとめ、学術の体系化を行った(業績 1)。

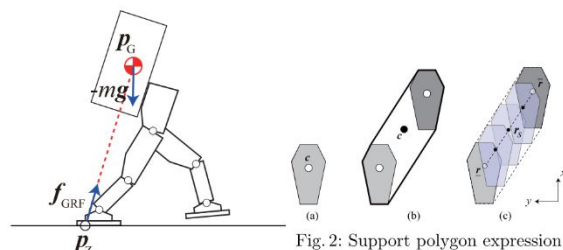


Fig. 1: LIP model of a biped humanoid robot

Fig. 2: Support polygon expression

図 1: 人型ロボットの重心・ZMP モデルにおける状態遷移の考慮

- (2) 重心・ZMP モデルにおける制御則について、足の踏みかえ・遊脚の着地に伴う状態遷移を考

慮しながら制御則を全身の関節レベルの制御則へ変換する粘弾性最適化アルゴリズムを開発した(業績 11,15)。従来の方では、変換において静力学的な関係のみを考えていたが、今回開発したアルゴリズムは動力学的な関係式に基づいており、その影響を適切に補償することができる。また、人型ロボットの二足歩行でよく問題となる膝伸展角度の特異点の問題について、特異点にロバストな計算を可能にし、人間と同様に膝を進展させながら歩行する制御を実現した(業績 13)。開発したアルゴリズムは動力学シミュレーションで検証し、制御則が想定しない外乱や路面の凹凸に対しても安定な歩行が実現できることを示した(図 2, 業績 2)。

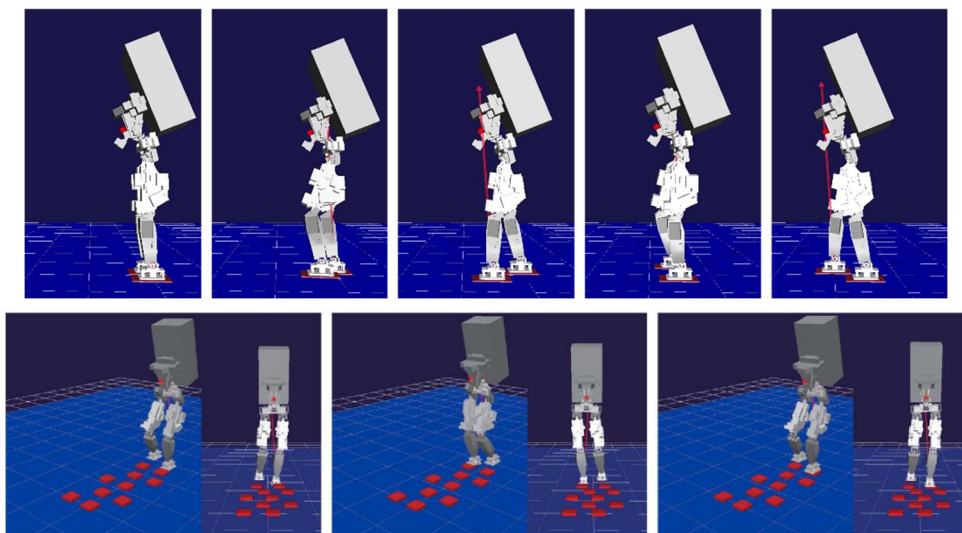


図 2：動力学シミュレーションによる検証

(3) 人型ロボット Hydra (180cm, 74kg, 14 自由度)を用いて、(1)、(2)で開発した制御アルゴリズムを実験的に検証した(図 3)。Hydra は全ての関節を電気静油圧アクチュエータで制御することで高いバックドライバビリティと力制御性を実現しており、人型ロボットの力制御の実験検証に適している。Hydra による実験検証では、膝を伸展させた姿勢での二足歩行、歩行中に未知の外乱が加わった場合のバランス制御、傾斜角度が変化する路面上でのバランス制御を実現した(業績 2,13)。

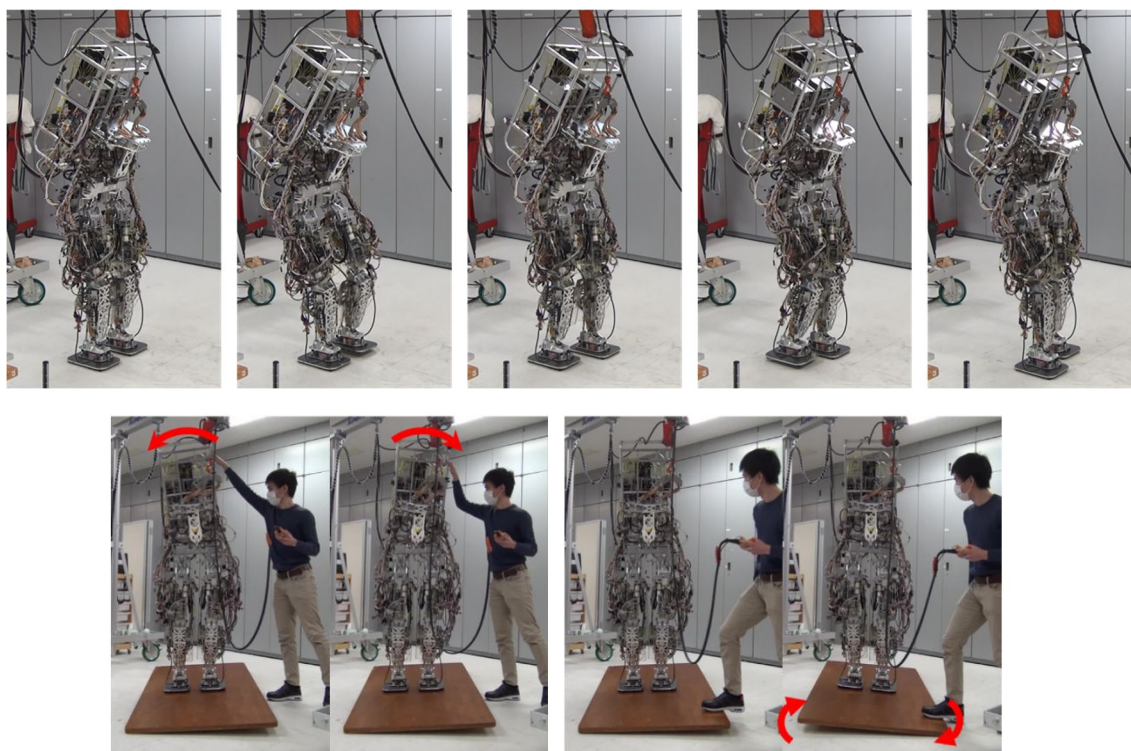


図 3：人型ロボットによる実験検証

【研究業績】

1. Yamamoto, K., Kamioka, T., & Sugihara, T. (2020). Survey on model-based biped

- motion control for humanoid robots. *Advanced Robotics*, 34(21-22), 1353-1369.
2. Murotani, K., Yamamoto, K., Ishigaki, T., & Nakamura, Y. (2020). Comparative study of force control methods for bipedal walking using a force-sensitive hydraulic humanoid. *Advanced Robotics*, 34(21-22), 1455-1471.
  3. 酒見祐一, 山本江, & 中村仁彦. (2020). 機会制約付きモデル予測制御による外乱を考慮したヒューマノイドの制御. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会.
  4. Yamamoto, K., Yanase, R., & Nakamura, Y. (2020). Maximal Output Admissible Set of Foot Position Control in Humanoid Walking. *Proceedings of the 23rd CISM IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control (ROMANSY)*, 43-51.
  5. 大石健人, 山本江, 今城雄太郎, 駒形光夫, & 中村仁彦. (2020). 電気静油圧駆動ロボットアームの粘弾性動的最適化制御. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会.
  6. 今城雄太郎, 駒形光夫, 大石健人, 山本江, & 中村仁彦. (2020). 静油圧駆動型マニピュレータ Hydracer のシステムの構築. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会.
  7. 石垣泰暉, 山本江, & 中村仁彦. (2020). リーマン多様体上のコンプライアンス分配最適化によるロボットの制御. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会.
  8. 柳瀬諒, 山本江, & 中村仁彦. (2020). 人型ロボットの二足歩行における着地位置制御を考慮した MOA 集合. 第 25 回ロボティクスシンポジウム.
  9. Guan, K., Yamamoto, K., & Nakamura, Y. (2019). Virtual-mass-ellipsoid Inverted Pendulum Model and Its Applications to 3D Bipedal Locomotion on Uneven Terrains. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 1401-1406.
  10. Guan, K., Yamamoto, K., & Nakamura, Y. (2019). Push Recovery by Angular Momentum Control during 3D Bipedal Walking Based on Virtual-mass-ellipsoid Inverted Pendulum Model. *Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 128-133.
  11. Yamamoto, K., & Nakamura, Y. (2019). Compliance Optimization Considering Dynamics for Whole-body Control of a Humanoid. *Proceedings of 2019 International Symposium on Robotics Research*.
  12. Yamamoto, K. (2019). Time-variant feedback controller based on capture point and maximal output admissible set of a humanoid. *Advanced Robotics*, 33(18), 944-955.
  13. Murotani, K., Yamamoto, K., Ko, T., & Nakamura, Y. (2019). Resolved Viscoelasticity Control Considering Singularity for Knee-stretched Walking of a Humanoid. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 250-255.
  14. 室谷和哉, 山本江, & 中村仁彦. (2019). 静油圧駆動ヒューマノイド Hydra の加速度分解制御による柔軟な全身協調運動. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会.
  15. 山本江, 室谷和哉, & 中村仁彦. (2019). 人型ロボットの動力学を考慮した粘弾性分解制御. ロボティクスシンポジウム.
  16. Yamamoto, K., Ko, T., Murotani, K., & Nakamura, Y. (2018). Experimental Validation of Resolved Viscoelasticity Control on Hydrostatically Driven Humanoid Hydra. *Proceedings of International Symposium on Experimental Robotics*.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 Tianyi Ko, Kazuya Murotani, Ko Yamamoto, and Yoshihiko Nakamura	4. 巻 掲載予定
2. 論文標題 Whole-body Compliant Motion by Sensor Integration of an EHA-driven Humanoid Hydra	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Humanoid Robotics	6. 最初と最後の頁 掲載予定
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S021984362150002X	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 Kazuya Murotani, Ko Yamamoto, Taiki Ishigaki and Yoshihiko Nakamura	4. 巻 34
2. 論文標題 Comparative Study of Force Control Methods for Bipedal Walking using a Force-sensitive Hydraulic Humanoid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1455-1471
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2020.1835533	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 Ko Yamamoto	4. 巻 33
2. 論文標題 Time-variant Feedback Controller based on Capture Point and the Maximal Output Admissible Set of a Humanoid	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 944-955
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2019.1633403	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14件（うち招待講演 0件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Ko Yamamoto, Ryo Yanase and Yoshihiko Nakamura
2. 発表標題 Maximal Output Admissible Set of Foot Position Control in Humanoid Walking
3. 学会等名 The 23rd CISM IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control (ROMANSY) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ko Yamamoto and Yoshihiko Nakamura
2. 発表標題 Compliance Optimization Considering Dynamics for Whole-body Control of a Humanoid
3. 学会等名 International Symposium on Robotics Research (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuya Murotani, Ko Yamamoto, Tianyi Ko and Yoshihiko Nakamura
2. 発表標題 Resolved Viscoelasticity Control Considering Singularity for Knee-stretched Walking of a Humanoid
3. 学会等名 IEEE International Conference on Robotics and Automation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳瀬諒, 山本江, 中村仁彦
2. 発表標題 人型ロボットの二足歩行における着地位置制御を考慮した MOA集合
3. 学会等名 ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本江, 石垣泰暉, 中村仁彦
2. 発表標題 ヒューマノイドの動力学を考慮した全身コンプライアンス最適化によるバランス制御の実験検証
3. 学会等名 第37回ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石垣泰暉, 山本江, 中村仁彦
2. 発表標題 リーマン多様体上のコンプライアンス分配最適化によるロボットの制御 (発表予定)
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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 酒見祐一, 山本江, 中村仁彦
2. 発表標題 機会制約付きモデル予測制御による外乱を考慮したヒューマノイドの制御 (発表予定) (発表予定)
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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大石健人, 山本江, 今城雄太郎, 駒形光夫, 中村仁彦
2. 発表標題 電気静油圧駆動ロボットアームの粘弾性動的最適化制御 (発表予定)
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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tianyi Ko, Ko Yamamoto, Kazuya Murotani, and Yoshihiko Nakamura
2. 発表標題 Compliant Biped Locomotion of Hydra, an Electro-Hyrostatically Driven Humanoid
3. 学会等名 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ko Yamamoto, Tianyi Ko, Kazuya Murotani, and Yoshihiko Nakamura
2. 発表標題 Experimental Validation of Resolved Viscoelasticity Control on Hydrostatically Driven Humanoid Hydra
3. 学会等名 International Symposium on Experimental Robotics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuya Murotani, Ko Yamamoto, Tianyi Ko and Yoshihiko Nakamura
2. 発表標題 Resolved Viscoelasticity Control Considering Singularity for Knee-stretched Walking of a Humanoid
3. 学会等名 IEEE International Conference on Robotics and Automation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本江, 室谷和哉, 中村仁彦
2. 発表標題 人型ロボットの動力学を考慮した粘弾性分解制御
3. 学会等名 ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 康天毅, 山本江, 室谷和哉, 中村仁彦
2. 発表標題 静油圧駆動ヒューマノイドHydraの粘弾性分解制御による全身柔軟運動の実現
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 室谷和哉, 康天毅, 山本江, 中村仁彦
2. 発表標題 全身トルク制御とZMP外乱オブザーバによる高精度ZMP制御
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会, 2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京大学 山本 江 <a href="http://www.ynl.t.u-tokyo.ac.jp/member/yamamoto/index-j.html">http://www.ynl.t.u-tokyo.ac.jp/member/yamamoto/index-j.html</a>
--

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