

令和 3 年 5 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03310

研究課題名（和文）階層型力学変容系による人型ロボット全身運動表現と制御

研究課題名（英文）Whole-body Motion Representation of a Humanoid Robot as a Hierarchical Dynamical System and Control of it

研究代表者

杉原 知道 (Sugihara, Tomomichi)

大阪大学・工学研究科・招へい准教授

研究者番号：70422409

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：力学系としてみた人型ロボットの構造を、重心のなす低次元力学系（上位力学系）と四肢のなす力学系（下位力学系）によって階層的に表現し、それがさらに連続的に変容することで多様な全身動作を統合的に記述・創出する枠組の確立、およびそれに基づく制御器開発を行った。力学系階層化が可能な数理的背景の考察、下位力学変容系の開発、上位・下位力学系を効果的に結合する制御アーキテクチャの考案、実験用ロボット開発を具体的課題として進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大自由度な人型ロボットの状態空間を身体力学の階層性に基づいて構造化することで、力学変容の利点を生かした全身制御器設計に明解な道筋を与えることに、本研究の学術的意義がある。ロボットの動作レパートリーを加算的に開発する従来方法とは逆の、既存動作と新規動作の共通項に基づき制御器を汎化することでレパートリーを増加するアプローチを可能にする。本研究により、人以上の運動能力を持つ人型ロボットの登場が現実味を帯びる。被災地の復旧等へのロボット応用が切実に望まれる今、その社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：We developed a framework to describe the whole-body motion based on a continually morphing hierarchical dynamical system in which the upper system for the reduced-order dynamics of the center of mass and the lower system for the extremities are combined, and also a control system of a humanoid robot based on the framework. Missions included a discussion of the mathematical background that enables the hierarchical representation, design of the lower dynamical systems, design of a control architecture that effectively combines the upper and lower systems, and development of a humanoid robot platform.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ロボティクス 運動制御 力学系 人型ロボット 運動知能

1. 研究開始当初の背景

人型ロボットは、将来的に使用者の「もう一つの身体」として、一般家庭やオフィスでの日常作業、多品種少量生産現場での作業、危険地域での作業等に应用されると期待される。しかし現実のロボットの運動能力は、安定性や即応性の点で人のそれに未だ遠く及ばない。

人型ロボットは、接触点を介してモータで発生する駆動力を外界に作用させ、その反作用として受ける力(反力)の逆伝播によって運動する。反力は接触点の配置(支持領域)から決まる制約の範囲内でしか発生しないため、ロボットは常に転倒の危険にさらされる。さらに、支持領域は運動に伴って不連続に変形する。このような複雑な原理の上で、数十個もの関節を操り所望の振舞をとらせる高度な制御が要求される。

現在の人型ロボットのほとんどは、諸々の制約を満たす理想的な運動軌道を予め計画し、それにモータを追従させる方法で制御されている。多様な動作は、多数用意した計画軌道を適宜切り替えることで実現する。しかし本来、軌道計画はロボットが遭遇する事象が全て既知でなければできない。変化に富む実世界で予想外の事象が発生した際、計画軌道はむしろ運動を束縛し、安定性を損ねる原因になる。また、あらゆる状態から始まる軌道群を予め用意するのは不可能であり、動作を切り替える際にはその都度特別なプロセスが必要となる。これは即応性を著しく低下させる。運動能力向上のためには、制御のパラダイムから変革しなければならない。

そのような中で申請者は、複数軌道の接続ではなく、軌道を創出する力学系自体の変容によって異種動作を統合する枠組(力学変容)を提案している。これは力学系をなす状態空間全体でロボットの振舞を記述するため、本質的に高い安定性を有し、また任意の状態からのシームレスな動作遷移を可能にする。人型ロボットの全身運動の核にある、重力と反力との巨視的關係が形成する低次元力学系に着目すると、例えば立位維持は不変な支持領域上での漸近安定化、足踏みは安定自励振動と支持領域変形の同期、咄嗟の踏み出しは随意的局所不安定化による支持領域の拡大とそれぞれ解釈できる。力学変容に基づいて、これらの動作を同一の状態空間で齟齬なく実現する制御器を開発し、さらに全方位歩行、跳躍、不整地上移動等へと拡張してきた。

上記の成果は、力学変容という枠組の有効性を重心運動の次元で示した。これらにおいて、全身の振舞は所望の重心位置と接触点配置から代数的に決定していた。しかし、外界の変化にシなやかに応答し物体を操作する等の動作の技量は、重心運動とは別の次元で記述されるべきものである。この枠組を完成し多様な全身動作を実現するためには、重心と支持領域変形に加え四肢動作の技量までも埋め込んだ高次元力学変容系を如何に記述すれば良いのか?という大きな問いに答える必要がある。

2. 研究の目的

重心のなす低次元力学系を上位力学系、四肢のなす力学系を下位力学系とそれぞれ位置付けた階層型力学変容系により人型ロボットの多様な全身動作を統合的に記述し、それを実現する制御器を開発することを、本研究の目的とする。上位力学系によってロボットの大局的な振舞を規定した上で、それと整合する脚の振り出しや腕による物体操作等、身体部分の修飾的な振舞を下位力学系によって表現する。各々を比較的低次元の力学系で表すことで、制御器設計の見通しを良くする。

3. 研究の方法

上に掲げた階層型力学変容系が構成可能な数学的背景を議論する。その上で、具体的な個々のロボット動作を力学変容系として表現し、それを実現する制御器を設計する。次の課題1~4を並行して進める。

課題1: 力学系階層化の数理考察

重心運動は四肢・体幹運動の合成であるが、これらの影響は、重心と反力の巨視的關係がなす低次元力学系には陽に表れない。このことに基づいて、重心運動の零空間を各肢の状態空間に分割し、それぞれに所望の運動特性を埋め込むことで力学系を階層化する。

各肢と体幹の運動は力学的に結合し、肢運動の反動が体幹に及ぶ。しかし、体幹運動は肢運動よりも遅いモードから成るため、近似的に緩やかな外乱と見なせる。これにより比較的低次元の四肢力学系を独立に設計できる。モード時定数の違いは、摂動の補償においても良い効果を持つ。すなわち外界との衝突による速い摂動は主に下位力学系によって吸収されるため、系全体の安定性がより向上すると期待される。

以上のことを数学的に確認し、力学系および制御器設計の指針とする。

課題2: 下位力学変容系の開発

この段階では重心の拘束・変動の影響を考慮せず、四肢の役割のうち特に重要な(i)到達動作、(ii)経路追従動作、(iii)物体操作を含む外界とのインタラクション、(iv)角運動量補償の4種類を取り上げ、これらを力学系により表現する。到達動作については、既に申請者らにおいて開発し実績のある非線形人工ポテンシャル関数の動的拡張を用いる。経路追従動作も、経路上に慣性を持ち牽引力を発生する仮想物体を配置し、それと身体との相互作用により安定に行う方法を開発中である。物体操作については、対象物についての幾何的・力学的な事前知識が不足している、ないし不正確である場合にも適用可能な適応インピーダンス制御を開発中である。角運動量補償は、下位力学系に含まれる体幹運動の干渉項を補償するための制御であり、(i)~(iii)でない(すなわち肢において作業しない)場合にはこれが働くものとする。

以上を上肢動作において実現した後に、下肢動作制御に取り組む。例えば歩行中の脚の振舞には、上記(i)~(iv)の性質が全て含まれる。状態の時間発展と連動して力学系を変容させる高度な制御を実現する。

課題3：上位・下位力学系の結合

課題2で開発した四肢動作制御器を、本研究課題開始前までに開発した立位維持・歩行・踏み出し・跳躍動作に逐次結合していく。階層化によって、例えば立位から歩行への遷移に伴い自然な腕の振りが創出され、また指令を与えればそこからスムーズに腕を伸ばし立ち止まりながら物体操作を開始する、等のシナリオを実現する。動作拡張の過程で新たな下位力学系を設計する必要が生じたら、その都度課題2にフィードバックする。

課題4：実験用人型ロボット開発

提案する全身運動制御器を検証するための、全高1m程度の実験用人型ロボットを開発する。これまでに開発してきた小型ロボットを原型とし、可動範囲や出力、逆駆動性を大幅に改良する。完成後は、課題3で確認した動作を適宜試験する。

4. 研究成果

課題1については、人型ロボットの運動方程式に基づき、重心運動の零空間を各肢の状態空間に分割するための数学的背景を考察した。重心運動を厳密に肢運動と分離することが可能であることが分かったが、実装上は近似的に分離し摂動分を実時間補償する方が有利である可能性があることも分かった。また、上位力学系の制御に関してロボットの機動性、特に大きな摂動を受けた際の適応的振舞を促進する制御器設計の議論を行った。具体的には、立位制御、歩行、跳躍、走行をシームレスに行えるようにし、さらに現在の運動状態に基づいてそれらを適応的に切り替える機構を考案した。

課題2については、(i)到達動作と(iii)物体操作を含む外界とのインタラクションに特に大きな成果があった。到達動作は、応用を予定していた非線形人工ポテンシャル関数の動的拡張でなく、モデル予測制御の応用による時変フィードバック制御器を開発し、より簡便に実現できるようになった。また物体操作を含む外界とのインタラクション制御について、未知物体との相互作用した際に生じる力の情報を用い、安定性を保証しかつ対象物の運動特性を適応的に取得する制御器を開発した。これらに加え、ロボットの接地期・浮遊期をシームレスに扱う上位力学系設計(重心制御)理論が進展したことに合わせて、下肢運動制御器の開発も進めた。動作種類の拡大により多様化した各足の接地・非接地遷移パターンを、力学系表現の観点から整理し実装することができた。

課題3について、上位力学系は仮想的な低次元力学系として表現される。従来は単純に逆運動学や逆動力学を用いて、これを四肢運動を伴う全身力学系に拡大写像する方法がとられていたが、低次元力学系には身体の運動学的制約が課されないため、両者の乖離を防ぐ慎重な運動設計が必要だった。これを、後者も独立な力学系として表現し、両者を仮想的に相互作用させることで自然と乖離による破綻が防がれる制御アーキテクチャを開発した。その他、構築された力学系と外界認識・誘導機能を組み合わせる未知環境内を自律移動できる人型ロボットシステムを開発した。

課題4については、本研究開始前までに試作していた幾つかの機構を起点とし、新たな人型ロボットの右肩部および上腕部、腰部、下腿部の設計と試作を進めた。また、人の手の運動特性を再現する手部機構の設計と、それに能動関節・受動関節をどのように配置するかを議論・考察した。さらに、提案する制御アーキテクチャの実現に必須となるモータドライバの小型化に取り組んだ。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yamamoto T., Sugihara T.	4. 巻 35
2. 論文標題 Responsive navigation of a biped robot that takes into account terrain, foot-reachability and capturability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 516 ~ 530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2021.1896382	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto T., Sugihara T.	4. 巻 34
2. 論文標題 Foot-guided control of a biped robot through ZMP manipulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1472 ~ 1489
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2020.1827031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto Ko, Kamioka Takumi, Sugihara Tomomichi	4. 巻 34
2. 論文標題 Survey on model-based biped motion control for humanoid robots	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1353 ~ 1369
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2020.1837670	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 Sugihara Tomomichi, Morisawa Mitsuharu	4. 巻 34
2. 論文標題 A survey: dynamics of humanoid robots	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1338 ~ 1352
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2020.1778524	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sugihara Tomomichi	4. 巻 34
2. 論文標題 Toward Understanding of Human Motion from Motor Control of Humanoid Robots	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Spinal Surgery	6. 最初と最後の頁 243 ~ 249
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2531/spinal surg.34.243	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 -

1. 著者名 杉原知道	4. 巻 36
2. 論文標題 運動知能---運動から迫る実世界に開かれた知能	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 609-615
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 -

〔学会発表〕 計26件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Tianyi Zou and Tomomichi Sugihara
2. 発表標題 Toward on-line fitting of a human skeleton-marker model for accurate motion tracking
3. 学会等名 The 8th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tianyi Zou and Tomomichi Sugihara
2. 発表標題 Fast identification of a human skeleton-marker model for motion capture system using stochastic gradient descent method
3. 学会等名 The 8th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Miharu Kojima and Tomomichi Sugihara
2. 発表標題 Identification of a Step-and-Brake Controller of a Human Based on COM-ZMP Model and Terminal Capturability Condition
3. 学会等名 The 8th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobuyuki Murai and Tomomichi Sugihara
2. 発表標題 Identification of COM Control Behavior of a Human in Stance as a Dynamical System
3. 学会等名 The 8th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hidenori Tani, Ryo Nozawa and Tomomichi Sugihara
2. 発表標題 Identification of a Human Hand Kinematics by Measuring and Merging of Nail-Based Finger Motions
3. 学会等名 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 山本孝信, 杉原知道
2. 発表標題 運足誘導型二脚ロボット制御の可捕性条件緩和による計算安定化
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今西健太, 山本孝信, 杉原知道
2. 発表標題 ZMPの3次元的操作による二脚ロボットの歩行・跳躍統一制御
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉原知道, カロン ステファン
2. 発表標題 ZMPの3次元的操作による可捕性規範凹凸地面上二脚運動制御
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉原知道, 小島美晴, 山本孝信
2. 発表標題 非対称倒立振りモードの可捕性に基づく着地点誘導型二脚運動制御
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jingqiu Zuo, Takanobu Yamamoto, Tomomichi Sugihara
2. 発表標題 SLAM-SEAN for Higher Autonomy of Mobile Robots in Unknown Environment
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2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野澤峻, 杉原知道
2. 発表標題 作業性を考慮した運動分類に基づく人型指機構の駆動系設計
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2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomomichi Sugihara, Kenta Imanishi, Takanobu Yamamoto and Stephane Caron
2. 発表標題 3D biped locomotion control including seamless transition between walking and running via 3D ZMP manipulation
3. 学会等名 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本孝信, 杉原知道
2. 発表標題 積層変調アーキテクチャに基づく二脚ロボットの SEAN 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2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本孝信, 杉原知道
2. 発表標題 ZMP自励振動と遊脚振子運動の連動による二脚ロボットの全方位移動制御
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷英紀, 野澤峻, 杉原知道
2. 発表標題 人の運動特性を再現するロボットハンド機構の試作と評価
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2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 影山将也, 杉原知道
2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いた可動する零自由度機構の運動計算
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2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤匡裕, 杉原知道
2. 発表標題 柔軟さと高精度位置決めを両立するロボットアームの可変損失補償制御
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2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴江卓也, 杉原知道
2. 発表標題 抗/従重力の自然な遷移と足首の回内・回外が可能な人型ロボットの複合下腿機構
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2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenta Imanishi
2. 発表標題 Autonomous Biped Stepping Control Based on the LIPM Potential
3. 学会等名 2018 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本孝信
2. 発表標題 Nステップ可捕性を保証する二脚ロボットのリアルタイム運足制御
3. 学会等名 第24回ロボティクスシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今西健太
2. 発表標題 LIPMポテンシャルに基づく二足ロボットの自律的足運動制御
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 山本孝信
2. 発表標題 外界や目的地の変動に低感度な二脚ロボットの移動経路計画
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 谷英紀
2. 発表標題 運動計測による全指爪位置を基準とした人の手の関節配置同定
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 山本孝信
2. 発表標題 地形・運動学的制約・Capturabilityを考慮した二脚ロボットの即時的着地位置決定
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2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomomichi Sugihara
2. 発表標題 Humanoid Robotics toward Intelligence that is Open to the Real World
3. 学会等名 2018 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉原知道
2. 発表標題 運動知能---運動から迫る実世界に開かれた知能
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

〔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
---------	---------