

平成 30 年 4 月 13 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02762

研究課題名(和文)包摂型力学系による二脚ロボットの複雑環境内自在移動制御

研究課題名(英文)Locomotion Control of a Biped Robot in Complex Environment Built Upon  
Subsumption Dynamical System

研究代表者

杉原 知道 (Sugihara, Tomomichi)

大阪大学・工学研究科 准教授

研究者番号：70422409

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：環境情報を逐次取り込みながらロボットの移動すべき方向を即座に決定する上位誘導制御器、地形と転倒防止条件に基づいて足着地位置を即座に決定する制御器、脚・重心を協調させる下位制御器から成る包摂型二脚ロボット制御系を開発した。下位層は上位層から介入を受けながらも間断なく時間発展し、全体として一貫した力学系を構成するため、ロボットの状態や環境の変化を全て数ミリ秒程度の周期でフィードバックすることが可能になった。

研究成果の概要(英文)：A biped locomotion controller based on the subsumption architecture was developed. It comprises (1) an orientation controller that decides the forward direction in accordance with the terrain information acquired in real-time, (2) a foot navigator that decides the landing point based on the ground profile and fall-prevention condition, and (3) the whole-body controller that coordinates the motions of feet and the center of mass. The overall system consisting of the controller, the robot and the environment forms a coherent dynamical system, the lower layers of which continuously evolve over time under interventions of the upper layers. It enables the robot to feedback the dynamic state of both the robot and the environment at the rate of the order of milliseconds.

研究分野：ロボティクス

キーワード：知能ロボティクス 二足歩行 包摂アーキテクチャ 運動制御 力学系

### 1. 研究開始当初の背景

二脚ロボットは、段差や配管等の障害物が偏在するような、車輪型ロボットでは走破できない複雑環境でのモビリティとして潜在的な需要がある。研究の歴史は50年を超え、技術水準は向上したが、未だ基盤となる制御理論が確立されておらず、実用段階にはない。

二脚ロボットは、関節モータで発生する力を(接触点を介して)環境に作用させ、その反作用として受ける外力(反力)の逆伝播によって初めて運動できる。発生する反力は接触点の分布(支持領域)に従って制限されるため、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を踏まえた上で、支持状態を能動的に遷移させながら不確かさや変化に富む環境の中で目標地点に誘導する、難易度の高い制御が求められる。

現在の典型的な二脚ロボット移動制御系は、障害物を回避し目標地点に到る経路計画、経路に沿った支持状態遷移計画、反力の制限の下で支持状態遷移を補間する軌道計画、目標軌道への追従制御を直列的に接続した枠組に従って設計される。上述のようにロボットの運動原理は複雑であり、たとえば大きな外力により摂動を受けたとき、転倒回避のための踏み出し、すなわち支持状態の変更が求められるなど、下流での処理が上流の処理に影響を及ぼす。しかし、経路計画は大規模な幾何学計算を伴い数秒～数分を要する重い処理であり、頻繁には行えない。軌道計画は近年高速化されてきたが、それでも数十～数百ミリ秒かかる。このためこの枠組は即応性を持たず、ロボットになるべく計画経路・軌道から逸脱しないよう保守的で緩慢な運動をさせざるを得ない。

即応的な移動ロボット制御の枠組として、全ての処理を並列的に行いながら高次の処理が低次の処理に適宜介入していく包摂アーキテクチャが有望である。ただし具体的に用意すべき個々の処理モジュールやそれらの接続関係は、ロボットの形態に合わせて各論的に考えなければならない。二脚ロボット制御にこの枠組を適用した例はまだない。

応募者はこれまでに、動的に変化する目標地点をロバストに追跡する支持状態遷移制御器と、立位維持や咄嗟の踏み出し、歩行等の様々な運動を詳細な目標軌道に頼らず統一的に実現する脚・重心協調制御器を開発してきた。前者は離散力学系、後者は連続力学系としての性質を持ち、どちらも実装は漸化式で表現されるため、実世界情報を中断なく処理する包摂アーキテクチャと親和性が高い。ただしこれらはいずれも、地形の凹凸や障害物の存在を考慮してはいなかった。

### 2. 研究の目的

上記を踏まえ本研究計画では、経路・軌道計画を制御の起点とするの枠組ではなく、環境情報に基づいてロボットの移動すべき

方向をリアルタイムに決定する仮想流れ場形成器と、前述の支持状態遷移制御器、脚・重心協調制御器から成る包摂型力学系による二脚ロボット制御系を開発し、ロボットの状態や環境の変化を全て数ミリ秒程度の周期でフィードバック可能にする。下位の処理は上位の処理から介入を受けながらも中断なく時間発展し、全体として一貫した力学系を構成し、ロボットの振舞を創出する。たとえばドアの開閉や目標地点の変更には、足場が崩れた等の局所的な地形変化には、障害物にぶつかりロボットが摂動を受けた場合はそれぞれ即座に応答し、ロボットをロバストに目標地点まで到達させることが可能になる。

### 3. 研究の方法

まず(1)力学系モジュールの設計、すなわち構成要素となる仮想流れ場形成器、支持状態遷移制御器、脚・重心協調制御器の各々の設計を並行して進める。

#### 仮想流れ場形成器

環境情報と目標地点が与えられたとき、障害物を回避しながら目標地点に至るためにロボットが進むべき方向ベクトルをリアルタイムに与える、仮想流れ場形成器を開発する。環境全体が分からず現在地から目標地点が視認できない場合であっても、中間目標地点を可視領域と遮蔽領域との境界に自動設定し、また逐次追加される環境情報に基づいてこれを更新する。

このモジュールにおいては、形成される流れ場が渾み点、すなわち局所停留点を持たないことを保証することが重要である。環境情報が全て得られているという条件の下で、ラプラス方程式を応用した人工ポテンシャル法を実装する。

#### 支持状態遷移制御器

障害物が散在し凹凸のある地形において、両足の干渉や交差が起こらないことを保証しながら、与えられた目標方向ベクトルを追跡するよう支持状態を遷移させる制御器を設計する。これは、ロボットの両足配置を状態量とする離散力学系を構成する問題である。

応募者はこれまでに、移動中に与えられた経路がどのように変更されてもロバストにそれを追跡する、二脚ロボットの両足・体幹同時誘導を開発した。ロボットをある曲線に沿って誘導したいとき、両足と体幹が正立状態における相対位置関係を保ちながら移動したときの軌跡(仮想レール)を考える。実際にはロボットは軸足と反対の足のみを踏み替えられるので、足の届く範囲で踏み出し距離が最大となる仮想レール上の配置を選択し、支持状態を遷移させる。これを逐次的に行えば遷移列が自動的に得られる。

この方法を、障害物や地面の凹凸によって足配置に制約が課され、かつ曲線経路ではなく局所的な目標移動方向のみ与えられる状

況に拡張する。流れ場と地形情報に基づいて流線を見出し、上記の方法を適用する。

#### 脚・重心協調制御器

与えられた目標方向ベクトルと目標支持状態遷移に基づき、脚と重心を協調させ全身運動を創出する制御器を設計する。これが最下層の連続力学系を構成する。

応募者は、地面から受ける反力の中心と重心との巨視的な関係に基づき、立位制御、定期的足踏み、咄嗟の踏み出し、前後進歩行等を、制御器の連続変形によって統一的に実現する方法を開発した。複雑な反力の操りを要求する二脚運動を、詳細な軌道計画に頼らずに実現できるので、外乱に対し柔軟に振る舞えることが特長である。これを拡張し、路面へのなじみ制御や地形に応じた遊脚制御を組み合わせることで、段差や凹凸路面上の移動を可能にする。

上記～を結合し、包摂構造を持つ力学系を設計する。まずとを階層化し、(2)動的提示された目標方向への移動制御を実現する。最初は平坦で障害物の無い環境を仮定し、目標移動方向を任意のタイミングでどのように切り替えても、転倒せず運動を継続できることを目指す。その後、障害物等により足の着地位置に制約が課された場合を仮定して、同様の制御を実現する。さらに(1)と階層化することで、環境情報からロボット自身が進むべき方向を見出し、全身の振舞を実時間で決定しながら目標地点に向かっていく、(3)環境内自律移動を達成する。

#### 4. 研究成果

仮想流れ場形成器については、障害物により視野が制限される環境に置かれたロボットが、現在の可視領域内に流れ場を形成し、それに従って移動しながら、可視領域と流れ場を動的に更新していくアルゴリズムを開発した。これにより、未知環境内の探索と経路計画を高効率に同時遂行することが可能になった。

支持状態遷移制御器について、開けた環境において両脚と体幹を矛盾なく目標地点へと運ぶための誘導則を離散制御器として設計し、目標地点が動的に変更されてもロバーストに追跡できる方法を本研究開始前に開発済みであった。これを地形情報、すなわち着地点候補の凹凸や傾斜を自動的に反映するよう拡張した。2年目の段階では地形は面切片の集合として与えられているものと仮定し、凹凸によって制約された足配置可能な領域を自動的に検出し、さらに傾斜に合わせて適応的に足の着地姿勢を修正する方法を開発した。

について、当初は比較的開けた環境において重心を誘導する制御器を開発し、これを拡張して足場に制約のある環境に適用することを考えていた。しかし研究を進める過程で、重心の誘導を主とする制御器と足着位置誘導を主とする制御器では設計方針を变

えるべきであることが分かった。このため、前者を重心誘導型制御器、後者を足着位置誘導型制御器と位置付け、個別に開発した。また、両者をシームレスに切り替えることも可能になった。

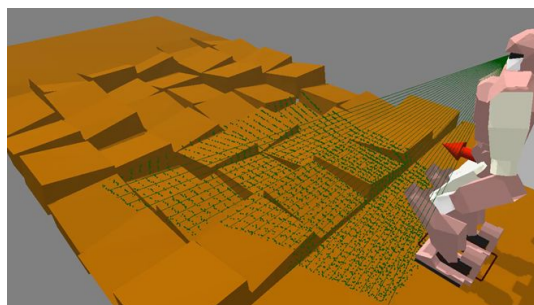
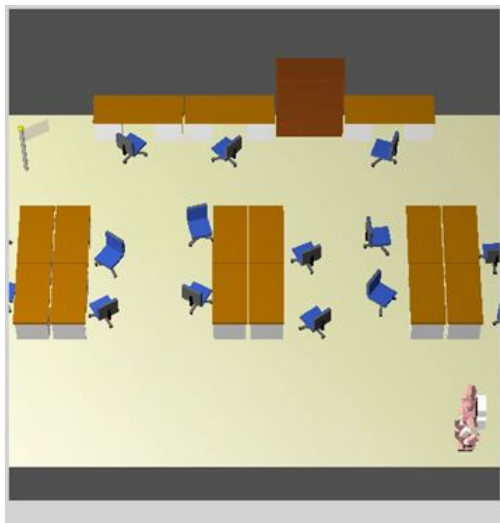
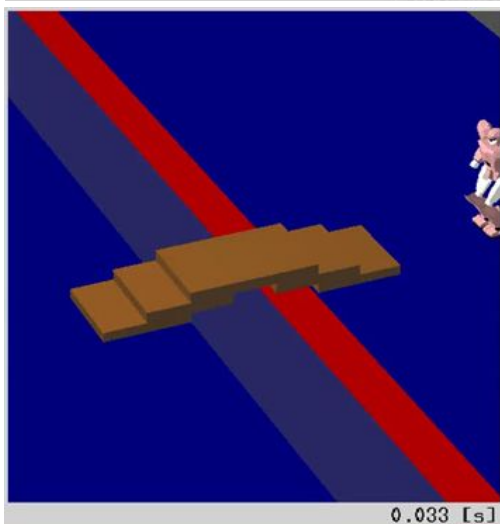
重心誘導型制御器は、開けた環境での全方位歩行のロバースト性を更に向上した。

新たに開発した足着位置誘導型制御器は、従来の方法と比較して計算が軽量で、フィードバック量の計測・推定に対する要求精度も低減され、かつ目標地点の動的な変更に対し十分なロバースト性を有していた。上記の支持状態遷移制御器は離散制御器として実装され、また任意のタイミングにおける目標地点の変更を許容していたため、これらの二者は生来的に親和性が高く、統合に特段の困難はなかった。

最後に、視覚処理による環境計測と地形地図自動生成システムを開発し、それを用いたロボット誘導技術の開発、誘導技術と足着位置誘導型制御器との統合を行った。環境計測は、取得された深度画像からエレベーションマップ(2.5次元地図)をオンライン逐次推定する方法を開発し、ロボットの移動に問題ない程度の精度で地形を復元できることを確認した。逐次計算によるため高速かつ要求メモリが比較的小さいこと、共分散に基づいて推定された地形の局所的信頼性を同時に評価できる点に特長がある。足着位置誘導型制御器においては、仮想流れ場形成器と支持状態遷移制御器を組み合わせるよりも、上記の地図の局所的信頼性に基づいて支持状態遷移を直接決定する方法が有効であると分かり、これを開発した。足を着地可能な領域、ロボットの現在の状態に対し転倒せずに動作維持できる足着位置候補の集合領域、運動学的に足先が到達可能な領域の三者の共通領域の中で、指定された目標位置に最も効率的に接近できる足配置を決定するものである。エレベーションマップの構造を活用することで、三つの条件を満たす足配置をサブミリ秒で見出すことが可能になった。さらに足着位置誘導型制御器をそのまま接続することで、即応的な二脚ロボット誘導システムを構成できた。操縦者により目標位置が急変更されても、また外界から摂動を受けても、数十ミリ秒オーダーで応答し動作継続させるシステムが構築された。

開発したシステムの性能を評価する具体例として、初年度には、操縦者がロボットのおかれた環境・状況を認識し、上記の二つの制御器を切り替えて、飛び石のように足場が著しく制限される環境や段差の多い環境内でロボットを移動させることに成功した。2年目には、5度程度の傾斜を持つ階段地形を設定し、それを挟んでロボットの10歩強度前方に目標地点を設定したとき、ロボットは自律的に地形を踏破し目標地点に到達できた。また階段状地形上を歩行している途中に目標地点を後方に急変更したとき、ロボッ

トは転倒せず即座にそれに応答できた。また最終年度には、シミュレーション上で OpenGL の深度マップを用いてレンジセンサを模擬し、地形の幾何形状モデルをレンダリングすることでセンサ計測値に相当するデータを得、実際の製品仕様に照らして計測誤差を（実際よりも大きめに）乱数的に混入させた上で、起伏の激しい不整地上をロボットに踏破させることに成功した。



## 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 5 件)

[1] T. Sugihara and K. Yamane, Reduced-Order Models, Humanoid Robotics: A Reference, Springer, 2017. DOI:10.1007/978-94-007-7194-9\_56-1

[2] T. Sugihara, Contact Dynamics, Humanoid Robotics: A Reference, Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-94-007-7194-9\_5-1

[3] T. Sugihara and Y. Fujimoto, Dynamics Analysis: Equations of Motion, Humanoid Robotics: A Reference, Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-94-007-7194-9\_3-1

[4] T. Sugihara, Historical Perspective and Scope, Humanoid Robotics: A Reference, Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-94-007-7194-9\_1-1

[5] K. Masuya and T. Sugihara, COM motion estimation of a biped robot based on kinodynamics and torque equilibrium, Advanced Robotics, pp. 691-703, 2016. DOI: 10.1080/01691864.2016.1150201

〔学会発表〕(計 25 件)

[1] R. K. Sato and T. Sugihara, Walking Control for Feasibility at Limit of Kinematics Based on Virtual Leader-Follower, 2017 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.718-723, 2017.

[2] H. Atsuta and T. Sugihara, 2D Omnidirectional Navigation of a Biped Robot Based on an Egocentric Orbit Following, 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.5257-5262, 2017.

[3] T. Sugihara and T. Yamamoto, Foot-guided Agile Control of a Biped Robot through ZMP Manipulation, 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.4546-4551, 2017.

[4] H. Atsuta, H. Nozaki and T. Sugihara, Smooth-Path-Tracking Control of a Biped Robot at Variable Speed Based on Dynamics Morphing, 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation,

pp.4116-4121, 2017.

[5] 山本孝信, 杉原知道, Capture Regionに基づく二脚ロボットの踏み出し位置修正による転倒防止, 第18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, 3B6-05, 2017.

[6] 山本孝信, 杉原知道, 法線情報を持つ地形マップを用いた二脚ロボットの即時誘導, 第35回日本ロボット学会学術講演会, 3L2-02, 2017.

[7] R. Sato and T. Sugihara, Walking Control for Feasibility at Limit of Kinematics Based on Virtual Leader-Follower, 第35回日本ロボット学会学術講演会, 3L1-05, 2017.

[8] 熱田洋史, 野崎晴基, 杉原知道, 力学変容に基づく二脚ロボットの平面全方位歩行制御, 第22回ロボティクスシンポジア, 5C2, pp.275-280, 2017.

[9] 山本孝信, 杉原知道, 離散・連続制御の併用による二脚ロボットの半自律的凹凸地面上誘導, 第22回ロボティクスシンポジア, 3B2, pp.177-182, 2017.

[10] 熱田洋史, 杉原知道, 力学変容系における制御器の隣接関係に基づく二脚ロボットの自動動作遷移, 第17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, 1C3-4, 2016.

[11] 山本孝信, 杉原知道, 即応的離散・連続制御の併用による二脚ロボットのロバスト誘導システム, 第17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, 1C3-3, 2016.

[12] R. K. Sato and T. Sugihara, Responsive Biped Control Based on COM-ZMP that is Available Even at the Limit of Kinematics, 第34回日本ロボット学会学術講演会, 3X3-04, 2016.

[13] 田中健也, 杉原知道, NURBSによる人型ロボットのインタラクティブ動作設計 II: 環境との3次元接触を伴う動作の高速設計, 第34回日本ロボット学会学術講演会, 3Y1-08, 2016.

[14] 田中健也, 杉原知道, NURBSによる人型ロボットのインタラクティブ動作設計 I: NURBSの構造を用いたZMP制約を満たす高速軌道修正, 第34回日本ロボット学会学術講演会, 3Y1-07, 2016.

[15] 山本南, 杉原知道, 停留点を生じないポテンシャル場の動的計算による移動ロボットの効率的未知環境内探索と誘導, 第34回日本ロボット学会学術講演会, 1C1-05, 2016.

[16] 杉原知道, 着地時の立位安定性を保証する二脚ロボットの運足誘導型制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 2A1-12b5, 2016.

[17] 野崎晴基, 杉原知道, 地形に合わせた二脚ロボットのための重心誘導型制御と運足誘導型制御の遷移, 日本機械学会ロボテ

イクス・メカトロニクス講演会 2016, 2A1-12b4, 2016.

[18] K. Masuya and T. Sugihara, COM Motion Estimation of a Humanoid Robot Based on a Fusion of Dynamics and Kinematics Information, 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3975-3980, 2015.

[19] H. Atsuta and T. Sugihara, Dynamics Morphing between Standing and Repetitive Hopping of Biped Robots, 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.5704-5709, 2015.

[20] 熱田洋史, 野崎晴基, 杉原知道, 移動座標系に基づいた二脚ロボットの前後・左右・旋回歩行制御, 第33回日本ロボット学会学術講演会, 2I2-05, 2015.

[21] 土壁創一, 杉原知道, 接触状態変化に対し低感度な重心-ZMPモデルに基づく二脚ロボット制御, 第33回日本ロボット学会学術講演会, 2I2-06, 2015.

[22] 舩屋賢, 杉原知道, MARG センサの動特性を補償した三次元姿勢推定のための非線形相補フィルタ, 第33回日本ロボット学会学術講演会, 1K2-05, 2015.

[23] 杉原知道, 仮想 Leader-Follower モデルに基づくロバスト経路追従制御, 第33回日本ロボット学会学術講演会, 1D1-08, 2015.

[24] 杉原知道, 運動状態からの時間情報再構成によるロバスト到達運動制御, 第33回日本ロボット学会学術講演会, 1D1-07, 2015.

[25] T. Sugihara, Dynamics Morphing to Combine Stand-still and Maneuvering Control on a Humanoid Robot, Workshop on Dynamic Locomotion and Balancing of Humanoids: State of the Art and Challenges, a full-day workshop at 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉原知道 (SUGIHARA, Tomomichi)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 70422409

(2) 研究分担者

なし

(3)連携研究者  
なし

(4)研究協力者  
なし