

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26540135

研究課題名(和文)人型ロボットの身体に訊く行動遷移地図の自律的獲得

研究課題名(英文)Autonomous Acquisition of Behavior Transition Map Tought by Anthropomorphic Robot Body

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：人型ロボットの行動遷移地図、すなわちロボット自らが置かれた状況でとるべき行動の計画規範を、記号的ルール群として与えるのではなく、身体・環境・制御器の三者がなす力学系として定義された単位行動の性質と関係性に従って構築する仕組みを開発した。また、行動目的が与えられたときに、現在の状態と力学的拘束条件に基づいて適切な行動系列を自動生成するプロセスを開発した。

研究成果の概要(英文)：A method to build a behavior transition map of a humanoid robot has been presented. It is based on the relationship between unit behaviors that are defined as dynamical systems comprising the body, the environment and the controller rather than on a collection of symbolic rules designed a priori. A process to automatically generate a sequence of actions from a given objective of the robot behavior based on the current robot state and the dynamical constraint has also been developed.

研究分野：ロボティクス

キーワード：知能ロボット 二足歩行 行動遷移 運動制御 人型ロボット

1. 研究開始当初の背景

古典的な知能ロボットでは、行動様式はトップダウンに与えられる。ある状況に置かれたロボットが次にどのような行動をとれば良いのか、全て if-then ルールで書き下され実装される。人型ロボットにおいても、設計者が先見的に記号的意味(「歩行」「着座」「起き上がり」等)を付けた全身軌道群を予め用意し、それらをこれも先見的に接続することで行動遷移地図を作っている。しかし、不確かさに満ちた世界でロボットの置かれ得る全ての状況、とり得る全ての行動を設計者が記号的に記述するのは不可能である。設計者の想定しなかった状況に置かれたとき、ロボットの行動は破綻する。

応募者は、身体・環境・制御器が三位一体の力学系をなす中、制御器を連続的に変化させることで立位維持・咄嗟の踏み出し・歩行等を統一的に実現する枠組を提案してきた。これによれば、どのような状況でどのような行動に遷移できるかは、力学系の構造(拘束条件)とロボットの状態によって自然に決まる。行動遷移は、論理演算に基づく運動軌道の切り替えでなく、このような力学系の変容によって表現できると考えた。

2. 研究の目的

人型ロボットの行動遷移地図を、記号的ルールとしてトップダウンに与えるのではなく、力学系として定義された単位行動の性質と関係性に従ってボトムアップに構築する仕組を確立する。具体的には、

- ・単位行動群の配置を制御器や力学的拘束条件に基づく隣接関係に従って構造化し、
- ・行動目的が与えられたときにその構造に基づいて行動系列を自動生成し、
- ・さらに未知行動が与えられたときに既知行動群と併せて再配置する

仕組である。

知能ロボットの行動遷移は、自分の状態と状況を認識し、行動目的に照合して行動レパートリーの中から最適なものを選択する、高度な論理演算によって実装されると考えられてきた。本研究によって、論理演算よりもむしろ力学系の構造の重要性を際立たせ、知能設計のパラダイムシフトを促すことをねらいとしている。

3. 研究の方法

次の5段階の課題を経て、行動遷移地図の自己獲得システムを構築する。

課題1: 単位行動レパートリー拡張

多様な行動計画の下地として、ロボットがとり得る単位行動の種類は多いほど望ましい。現在実現されている単位行動は、立位維持、定常的足踏み、咄嗟の踏み出し、前後進歩行の4種類である。これに追加して、全方位歩行、重心上下動、跳躍等の重心移動(脚移動)を実現する。これまで開発した単位行

動と同様、重心慣性運動や足先と環境との相互作用が主な関心事項であり、運動を低次元化された状態空間で表現できる一方、これまでの行動と比較して、重心の上下動や体幹の旋回等の影響による運動方向間の力学干渉、環境からの外力が得られない浮遊期をはさむこと等が新たな問題になる。各々の行動においてロボットがとるべき振舞を相空間上の解曲線群として表現し、これまで設計した制御器を参考に、そのような解曲線群を与える制御器を設計する。

上記が進んだ段階で課題2に進み、並行して次のように動作レパートリーを拡張する。梯子昇降や壁伝い移動等の上肢支持を伴う移動行動、物体を持ち上げる、押す、引く等の上肢による操作行動を重点的に実現する。上肢の慣性運動や手先と環境との相互作用が主な関心事項となり、また安定性に関わる重心の振舞および足先と環境との相互作用も依然考慮の対象である。すなわち状態空間を低次元化しようとしても、初年度実現した運動よりも必然的に大きな次元の空間を扱うことになり、安定性等の議論が難しくなる。これも制御器設計はある程度各論的かつ発見的になるが、部分空間分割等を行う等の工夫を取り入れる。

さらには、着座や伏臥、仰臥、匍匐移動等、手足以外の身体部位で環境に接触する行動の実現を目指す。環境との接触点が増えるほど、運動表現は難易度を増す。重心と接触点とをつなぐ仮想的な肢によって、そのような行動の一般表現を試みる。

課題2: 行動間メトリック定義

課題1である程度の数の単位行動を得た後、任意の二つの単位行動の組について、それらの間の距離を定義する。それに基づいて互いの相対位置関係を決定する。力学系の構造の違いは制御器により決定されるので、結局は制御器間に距離を定義できれば良いことになる。

課題3: 複数単位行動群の構造的配置

単位行動群すなわち力学系群を、課題2で定義したお互いの間の相対位置関係に基づいて配置し、行動空間を定義する。単位行動群はその空間内で立体的な配置をとる。これが力学系として表現された行動遷移地図となる。

課題4: 行動系列の自動生成

ロボットの行動目的が目標状態として与えられたときに、現在の状態からそこに到達するための行動系列、すなわちどのようなタイミングでどのような機序で制御器を変形させていけば良いかを、課題3で構築した行動遷移地図に基づいて自動的に決定する方法を開発する。制御器変形のタイミングは力学的拘束条件、端的には環境との接触状態と相互作用力の分布によって自然に決まる。こ

のような制御器変形を許容するタイミングと具体的な変形方法に基づいて、空間内に配置された単位行動間の隣接構造をグラフ化できる。したがってグラフ探索を応用すれば、目的とする制御器の系列を得ることができる。

課題 5: 新たな行動が与えられた際の行動群再配置

発展的課題として、行動遷移地図をロボットが自律的に獲得する方法を開発する。課題 4 において与えられたロボットの目標状態に到達する行動系列が現在の行動遷移地図では見つけられない場合、あるいはどのような行動遷移地図をもってしても到達不可能な目標状態が与えられた場合に、新たな行動系列を発見したり、到達の可否を判別できるようにしたりするために、どのような単位行動を作り地図を拡大すれば良いか、ロボット自身が発見させる。

4. 研究成果

課題 1 については、初年度にまず本研究開始以前に開発していた二脚ロボットの立位維持、定常的踏み替え、非定常踏み出し、直進歩行を統一的に行う制御器をさらに拡張し、慣性系における重心の位置・速度を推定しながら[1][18][21][22][29]、左右方向歩行[20][25]、任意曲線経路に沿った歩行[23]、これらを組み合わせた平面上全方位歩行[2][15]と、跳躍[13][26]まで行うことを新たに可能にした。さらに重要な成果として、これらの制御器を全て移動中のロボット身体座標に対して再実装した。これまで第三者の視点からロボットを観測していたのに対し、ロボット自身の視点から環境や自分の状態を観測し、身体の操り方を決定することが可能になった。

2 年度には、段状路面の昇降歩行や飛び石状の足場歩行[3][5][11][12]、手摺りや壁面との 3 次元接触を伴う運動[8][9][27]、重心の大きな上下動を伴う運動[7][19][24][28]が可能になった。さらに、未知物体操作のための脚腕協調運動と、狹隘空間を通過するための匍匐運動の生成にも取り組んだ。これらは期間中に発表に至れなかったが、物体操作については、物体の機械的拘束が未知であってもそれを動的に予測・修正するアルゴリズムの開発を継続中である。匍匐運動については、計算方法の大枠は出来たものの、運動の失敗確率が無視できない程度にあるため、運動の成否条件を明確にする必要がある。

課題 2 について、初年度に開発が進んだ単一制御器のパラメータ連続変化による立位制御、全方位歩行制御のシームレスな遂行にターゲットを絞り、制御器のパラメータ空間と力学的拘束条件に基づくパラメータの許容部分空間を定義した。当初の期待通り、パラメータがそのまま行動間メトリックとし

て適当であると分かった。開発した制御器は全てお互いに連続遷移可能な形で定式化され、運動種類につき一つのパラメータで遷移可能である。各パラメータの物理的な意味や役割は明確であるので、力学的拘束条件を同空間の部分領域として表現することは比較的容易であった。

ある運動/行動が遂行可能か否かは、環境側の制約(具体的には足の踏み出しが可能な領域の分布や腕部により全身支持できる環境内ハンドルの存在)が一つの鍵になり、単位行動間の相対関係にもこれが介在することが分かった。

課題 3 についても同様に、環境側の制約条件によって配置が変わる/配置を変えるべきであるという知見が得られた。複数単位行動群の構造配置は、パラメータ空間においてほぼ直接的に行うことができた。ただし、単位行動における安定領域、複数行動により定義される安定領域と、ある行動対の遷移を許容する領域(行動遷移可能領域)とは、別に定義すべきだということが分かった。さらに、その定義方法も分かった。

課題 4 については、上記の行動遷移可能領域の必要性が分かった時点で最終年度後半に入っており、残念ながら完成には至らなかった。しかし、安定領域において近似的に行動遷移可能性を判定する方法を開発し、それに基づいて単位行動群をグラフ化する方法を示した[4]。時系列的には、開発した判定方法が近似的なものに留まっていることが分かったので、行動遷移可能領域の必要性に思い至ったという順番である。いずれにしても、これに基づいて、人が適当に与えたロボットの長期的行動目的からグラフ探索によって行動系列(より具体的に言えば制御器変容系列)を生成することが可能になった。これが本研究課題における最大の成果である。

課題 5 には期間内に着手できなかった。

上記のように、当初計画していた内容の幾つかが未消化に終わった。一方で、前述の通り、本研究課題においては環境情報が重要な意味を持つことが分かった。そこで、当初計画時に設定していなかった次の三つの重要な課題に取り組み、期間中にある程度の成果を出すことができた。

一つ目は、人が日常的に生活している程度の複雑さを持った環境内における、自律的移動経路の探索である。Rapidly-exploring Random Tree Connection によって得られた経路を、後処理によって準最適解に漸近させる方法を開発した。経路探索と最適化を同時に行う RRT* と呼ばれる方法に比べて、厳密な最適性を諦める代わりに、10 倍以上高速に結果を求められることが特長である。また得られる経路は、同一の幾何学的位相を持つものの中では最適なものとなる。これは、環境と身体制御とを効率的に結び付け、行動創発を促進する布石となる。

二つ目は、ロボットの視野情報から環境の

探索と経路誘導を同時に効率的に行うアルゴリズムの開発[10]である。現在の視野内で計測可能な領域と不可能な領域との境界に、作業目的地からの推定距離に応じて探索価値を定義し、それを動的に更新することで、これが可能になった。経路誘導には、原理的に停留点の生じない人口ポテンシャル場を仮想的に設ける効率の良いアルゴリズムを実装した。

三つ目は、空間中に設けられた参照経路に口バストに追従する制御方法の開発[16][17]である。外乱による摂動が大きい状況、あるいはロボットの現在状態と空間に対して設定された参照経路が大きく乖離している状況では、従来の、例えば工場のロボットに使用されている方法は全く利用できないことが分かった。経路上に仮想的な慣性を持つ点を置き、それとロボットとを力学的に相互作用させる拡大力学系を用いることが有効であった。

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 1 件)

- [1] Ken Masuya and Tomomichi Sugihara, Dead reckoning for biped robots that suffers less from foot contact condition based on anchoring pivot estimation, *Advanced Robotics*, Open access in online, Vol. 29, Issue 12, pp.785-799, Mar., 2015.

[学会発表](計 28 件)

- [2] 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ウム, 磯部温泉, 5C2, pp.275-280, 2017. 3.16.
- [3] 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ウム, 磯部温泉, 3B2, pp.177-182, 2017. 3.16.
- [4] 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, 札幌コンベンションセンター, 2016.12.15.
- [5] 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口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, 札幌コンベンションセンター, 2016.12.15.
- [6] 杉原知道, 兼田大史, 村井伸行, 人の運動計測からの運動制御器同定, 計測自動

制御学会ライフエンジニアリング部門シンポジウム 2016 (第 31 回生体・生理工学シンポジウム), 1A3-1, 大阪国際交流センター, 2016.11. 3.

- [7] Robson Kenji Sato, Tomomichi 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, 山形大学小白川キャンパス, 2016. 9. 9.
- [8] 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, 山形大学小白川キャンパス, 2016. 9. 9.
- [9] 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, 山形大学小白川キャンパス, 2016. 9. 9.
- [10] 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, 山形大学小白川キャンパス, 2016. 9. 7.
- [11] 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, パシフィコ横浜, 2A1-12b5, 2016. 6.10.
- [12] 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ィクス・メカトロニクス講演会 2016, パシフィコ横浜, 2A1-12b4, 2016. 6.10.
- [13] Hiroshi Atsuta and Tomomichi Sugihara, Dynamics Morphing between Standing and Repetitive Hopping of Biped Robots, 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.5704-5709, Seattle, May 29th, 2015.
- [14] Tomomichi 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, Washington State Convention Center, Seattle, WS, USA, 2015. 5.26.
- [15] 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, 東京電機大学千住キャンパス, 2I2-05, 2015. 9. 4.
- [16] 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, 東京電機大学千住キャンパス, 1D1-08, 2015. 9. 3.
- [17] 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, 東京電機大学千住キャンパス, 1D1-07, 2015. 9. 3.
- [18] Ken Masuya and Tomomichi Sugihara, Dead Reckoning of a Biped Robot on Various Terrain by Kalman Filter Adaptive to Ground Reaction Force, 2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.1075-1080, Madrid, Nov. 20th, 2014.
- [19] Ken'ya Tanaka and Tomomichi Sugihara, Dynamically Consistent Motion Design of a Humanoid Robot Even at the Limit of Kinematics, 2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.1007-1012, Madrid, Nov. 20th, 2014.
- [20] Hiroshi Atsuta and Tomomichi Sugihara, Sideward Locomotion Control of Biped Robots Based on Dynamics Morphing, 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.959-964, Chicago, Sep. 15th, 2014.
- [21] 舩屋賢, 杉原知道, 反トルク平衡に基づく人型ロボットの三次元的重心運動推定, 第 20 回ロボティクスシンポジウム, 軽井沢プリンスホテルウエスト, 2C3, pp.190-195, 2015. 3.15.
- [22] 舩屋賢, 杉原知道, 運動学的情報と反力情報・ZMP を統合した人型ロボットの重心運動推定, 第 32 回日本ロボット学会学術講演会, 九州産業大学, 2B1-01, 2014. 9. 5.
- [23] 野崎晴基, 杉原知道, 局所運動情報のみを用いた二脚ロボットの曲線追従歩行制御, 第 32 回日本ロボット学会学術講演会, 九州産業大学, 1B3-03, 2014. 9. 4.
- [24] 田中健也, 杉原知道, NURBS を用いた人型ロボットの力学的制約を満たすキーフレーム補間動作設計, 第 32 回日本ロボット学会学術講演会, 九州産業大学, 1B3-02, 2014. 9. 4.
- [25] 熱田洋史, 杉原知道, 外力と指令値の急変更に対応する二脚ロボットの左右歩行制御, 第 32 回日本ロボット学会学術講演会, 九州産業大学, 1B3-01, 2014. 9. 4.
- [26] 熱田洋史, 杉原知道, 二脚ロボット

の静立状態と連続跳躍を遷移する力学変容, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 富山市総合体育館, 3P1-F07, 2014. 5. 28.

- [27] 石黒康裕, 杉原知道, 人型ロボットの手足支持を用いたダイナミックな3次元移動, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 富山市総合体育館, 3P1-E06, 2014. 5. 28.
- [28] 野崎晴基, 杉原知道, 滑らかな曲線経路に沿った二脚ロボットの任意速度歩行制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 富山市総合体育館, 3P1-D07, 2014. 5. 28.
- [29] 舩屋賢, 杉原知道, 反力情報への観測誤差モデル適応による二脚ロボットの位置推定カルマンフィルタ, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 富山市総合体育館, 3A1-D06, 2014. 5. 28.

〔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・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