

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820086

研究課題名(和文)人間の運動制御器のデータベース化とそれに基づく運動戦略設計のための基礎研究

研究課題名(英文)Basic Study for Human Motion Controller Database and Motion Strategy Design

研究代表者

山本 江(Yamamoto, Ko)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：20641880

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文):人間が力学的拘束の下で複雑な運動をどのように実現しているかを解明することを目指し、運動を要素に分割し、運動要素を実現するコントローラをデータ単位とするデータベースを構築するための基礎研究を行った。人間の持つ運動コントローラをモデル化し、力学的拘束の下でそのコントローラを適用できる範囲を数学的に導くことで安定性を保ったまま複数の運動を遷移させる枠組みを構築した。また、ヒューマノイドロボットを用いて実験検証を行い、ロボットがバランスを維持した状態で複数の運動を連続的に遷移できること、未知の外乱に対しても行動を自律的に選択して転倒を防ぐことができることを示した。

研究成果の概要(英文):To investigate how human realizes complicated motions under the physical constraint, we carried out basic research for constructing a motion controller database. We modeled human motion controller as a nonlinear controller, derived mathematical representation for the allowable range of motion under the physical constraint, and developed a framework for stable motion transitions. The proposed framework was validated by experiments using a humanoid robot platform. In the experiments, we realized a sequential motion transition with maintaining balance, and a falling avoidance control by autonomously switching motions against unknown disturbances.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：神経筋骨格モデル 非線形制御

### 1. 研究開始当初の背景

人間の運動をモデル化・解析する技術はスポーツ工学、福祉工学、CG アニメーション、ロボット工学など幅広い応用先を持ち、重要な技術である。これまでに、人間の筋骨格モデルに基づく力学解析が行われてきた。さらに、人間の持つ神経振動子 (Central Pattern Generator, CPG) を筋骨格系と統合し、二足歩行などを再現する神経筋骨格モデルも提案されている。これらの解析では、複雑な運動が与えられた場合、それを単純な運動単位に分割する。各運動パターンは、状態空間上で「軌道」を描き、神経筋骨格モデルではこの軌道がリミットサイクルとなるような CPG 制御器が設計される (図 1)。

一方、複数の運動パターンから運動を再構築するには運動の遷移状態をどう制御するかが課題となる。特に、二足歩行システムでは力学的拘束条件を考慮して制御を行う必要がある。力学的拘束条件のうち、転倒判定に用いられる指標に Zero Moment Point (ZMP) に関する条件がある。我々の先行研究では、ヒューマノイドのバランス制御において ZMP に関する拘束条件を満たす状態集合を定式化した。この集合は、制御工学の分野で「最大 CPI 集合」[Gilbert1991] と呼ばれ、状態空間内の凸多角形集合として定義される。最大 CPI 集合を CPG 制御器に適用すると、図 1 のようにリミットサイクル周辺を囲むドーナツ型の集合になると考えられる。運動の状態が最大 CPI 集合の外側に出た場合は運動の継続が難しく、場合によっては転倒につながる。従来は線形システムにおいて提案されていた最大 CPI 集合を CPG 制御器へと拡張することで、以下が期待できる。

- (1) 力学的拘束条件を満足しつつ CPG 制御器を適用できる状態集合が計算できる。
- (2) 図 1 のように、2 つの運動の最大 CPI 集合が共通部分を持つ場合、その共通部分において CPG 制御器を切り替えることで、力学的拘束条件を満足する運動遷移が可能となる。これを基盤として、CPG 制御器をデータ単位とするデータベースを作成することができる。
- (3) 2 つの運動の最大 CPI 集合が共通部分を持たない場合、実際には運動を遷移させることが出来ない。その場合、最大 CPI 集合を拡大し、共通部分を持つように運動のパラメータを求める「逆問題」を解く。これは、運動遷移にはどのような「コツ」やトレーニングが必要か、といったことに応用できる。

### 2. 研究の目的

「CPG 制御器データベースの構築とそれに基づく運動遷移戦略の設計」のための基礎研究として以下の 3 つに取り組む。

- (1) 従来研究において、最大 CPI 集合は「少自由度」な「線形システム」において定式化された。本研究では、神経筋骨格モデルへ最大 CPI 集合を拡張するため、「多自由度シ

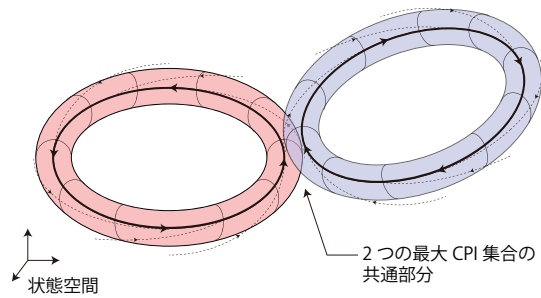


図 1 CPG により生成される状態空間上のリミットサイクルとその最大 CPI 集合。2 つの運動の最大 CPI 集合が共通部分を持つ場合、力学的拘束条件を満たすような遷移動作が実現可能

ステム」や「非線形システム」において最大 CPI 集合を計算する方法を開発する。

- (2) 運動遷移を可能にするためのパラメータが最大 CPI 集合の逆問題を解くことにより算出可能であることを明らかにする。
- (3) 最大 CPI 集合の妥当性を示すには、シミュレーションだけでなく、実世界での検証が重要である。そこで、最大 CPI 集合に基づいた運動遷移が現実に可能なことを、ヒューマノイドロボットを用いた実験により明らかにする。

### 3. 研究の方法

- (1) CPG をはじめとした非線形リミットサイクル型制御器において最大 CPI 集合を近似的に計算する方法を開発し、その妥当性を示す。また、計算量を低減するために、簡略化モデルにおいて計算した最大 CPI 集合を複雑な全身モデルに変換する方法も併せて開発する。
- (2) 最大 CPI 集合の逆問題を解くことで、転倒防止といった運動制御戦略を設計するアルゴリズムを開発する。
- (3) ヒューマノイドロボットを用いた実験により、最大 CPI 集合に基づいた運動制御戦略設計の妥当性を検証する。

### 4. 研究成果

- (1) 最大 CPI 集合に基づく運動遷移制御  
まず、CPG 歩行モデルにおいて図 1 のような最大 CPI 集合とそれに基づいた運動遷移の仕組みが内在しているかどうかについて、基礎的な検討を行った。図 2(a) のような CPG 歩行モデルをシミュレーションすると図 2 右のようなリミットサイクル軌道が得られる。このとき、軌道上の適当な点で歩行モデルの進行方向を強制的に変えることで図 2(a) のように運動を遷移させることができる。このとき、転倒せずに(すなわち力学的拘束条件を満たす)運動遷移を行えるかどうかをチェックした。この解析の

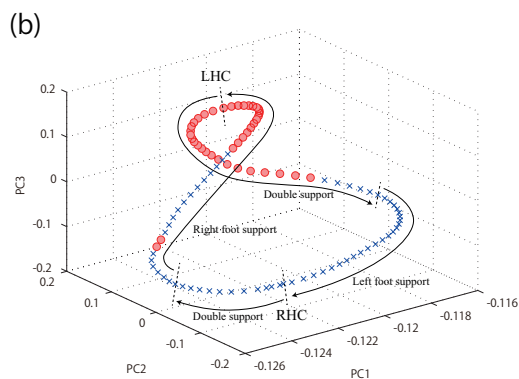
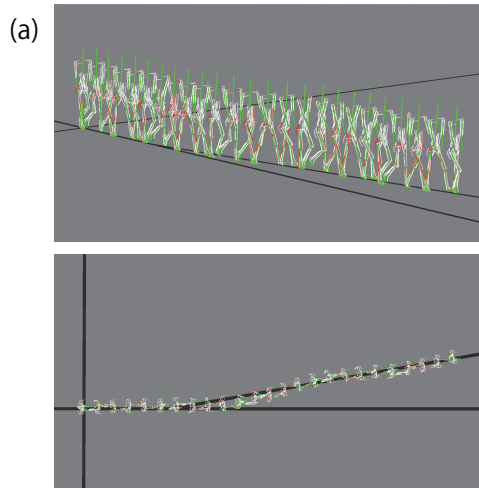


図2 CPG 歩行モデルにおける進行方向切換制御と切り替え可能領域の検討

結果、図 2(b) のグラフで、青色の × 記号で示した点では転倒し、赤色の ○ 記号では転倒せずに運動遷移可能であることが分かった。この赤丸で示した遷移可能領域が、図 1 に示した最大 CPI 集合同士の交差領域であると考察される。

次に、体全体の重心と ZMP に着目した簡単化モデルにおいて非線形リミットサイクル型制御器の最大 CPI 集合を近似計算するアルゴリズム及びソフトウェアを開発した。実際に最大 CPI 集合を計算した様子を図 3 に示す。図中、黒線がリミットサイクルの軌跡、緑で示した領域が最大 CPI 集合を表す。研究開始当初の予想通り、リミットサイクルを囲むドーナツ型の集合が形成されていることが分かる。

また、得られた最大 CPI 集合に基づき「直立状態から周期歩行」、「周期歩行から停止動作」といった基本的な運動遷移をシミュレーションによって実現した。最大 CPI 集合に基づいてコントローラを切り替えることにより、ZMP の拘束条件を満たしつつ運動遷移を行うことが可能になる。例えば、図 4 は運動遷移アルゴリズムをヒューマノイドに適用して直立状態から周期的な歩行への遷移動作を実現したシミュレーションである。図の下段は状態空間上における重心

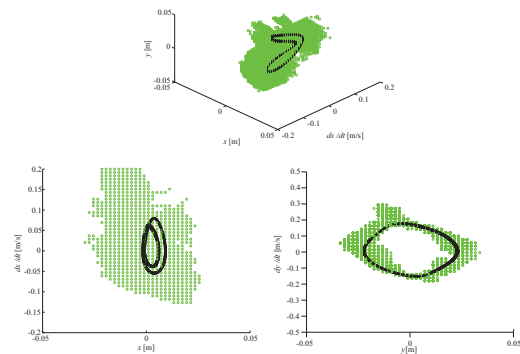


図3 開発したアルゴリズムによって計算された最大 CPI 集合

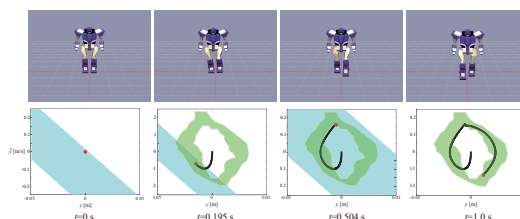


図4 リミットサイクル型コントローラの最大 CPI 集合に基づく運動遷移制御（直立状態から周期歩行への遷移）

の軌跡と最大 CPI 集合を示している。事前に「直立状態から 1 歩踏み出す」運動を準備し、その最大 CPI 集合（図中、水色の領域）を計算しておく。これとリミットサイクルの最大 CPI 集合（図中、緑色の領域）が交差したところで制御器をリミットサイクルに切り替えることで運動遷移を実現できる。

## (2) 最大 CPI 集合の逆問題としての運動戦略設計

ヒューマノイドの未知の外乱に対する転倒防止制御を対象として、最大 CPI 集合の逆問題を解くことにより、転倒を防ぐのに最適な歩幅を決定するアルゴリズムを開発した。図 5 にその概要を示す。ここでは、歩幅 10cm の踏み出し動作について最大 CPI 集合が図 5 中央のグラフの青色の領域のように計算されている。直立静止状態では重心はグラフ中央の原点に位置するが、大きな外乱が加わった場合、重心は + 記号で示した位置までずれる。この場合、重心は青色の領域に含まれないため、そのままでは転倒を防ぐことができない。最大 CPI 集合は歩幅によって大きさが変化する、すなわち歩幅をパラメータの 1 つとして含むため、最大 CPI 集合が + 記号を含むように歩幅を決定する。このアルゴリズムにより、必要な歩幅が 17cm に決定され、結果、グラフの赤色の領域で示される最大 CPI 集合が計算された。このようにして、最大 CPI 集合に

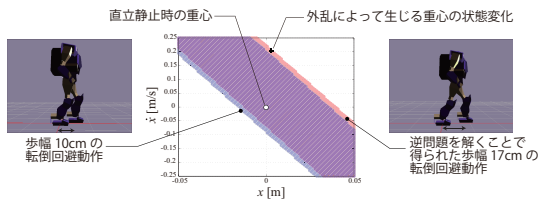


図 5 最大 CPI 集合の逆問題による歩幅の最適計算

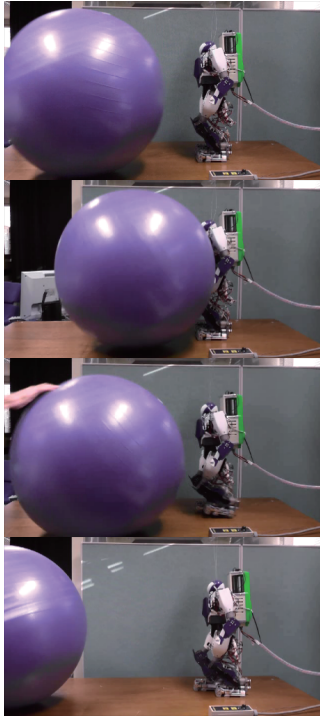


図 6 ヒューマノイドロボットによる実験検証

関する逆問題を解くことにより、歩幅等の運動パラメータを設計可能であることが示唆された。

- (3) ヒューマノイドロボットによる実験検証  
 本研究で開発した最大 CPI 集合に基づく運動遷移制御をヒューマノイドロボットを用いた実験により検証した。図 6 に実験の様子を示す。ヒューマノイドが直立状態を保っているところに、ゴムボールを衝突させる。このとき、直立状態を保ったままバランスを保てるか、あるいは踏み出しによって転倒を防止するかを最大 CPI 集合に基づいて判断し、後者の場合は運動を切り替える。また、実験では最大 CPI 集合の計算に用いた簡易化モデルと実際のロボットのダイナミクスの誤差を測定し、計算精度を高めた。図 6 に示した例では、外乱が大きいため踏み出し動作が自動的に生成され、転倒を防ぐことができている。
- (4) 簡易化モデルと詳細モデルとの間の制御器の変換による最大 CPI 集合の計算  
 重心と ZMP に着目した簡易化モデルにおける最大 CPI 集合の計算方法は確立したが、それをそのまま全身の詳細モデルに適

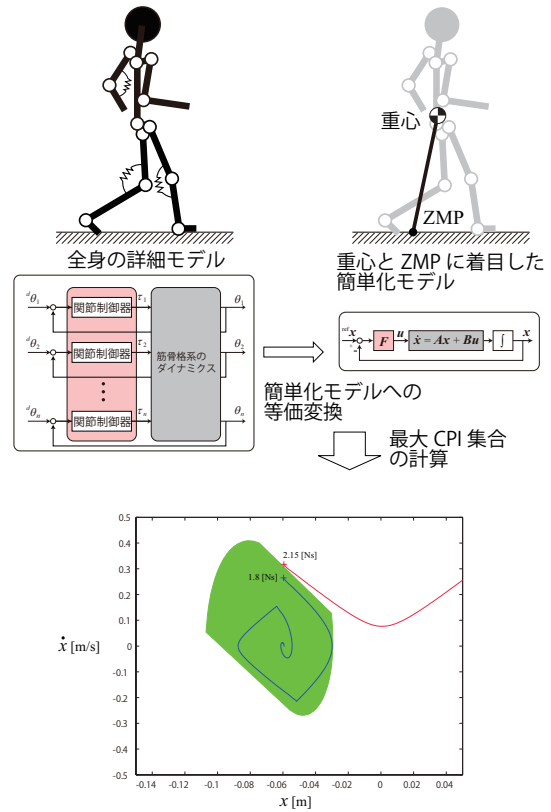


図 7 全身の詳細モデルから簡易化モデルへの制御器等価変換による最大 CPI 集合の計算

用すると計算量が膨大になることが問題であった。そこで、詳細モデルにおいて最大 CPI 集合を直接計算するのではなく、詳細モデルにおける制御器を簡易化モデルに等価変換することで、簡易化モデルにおける最大 CPI 集合の計算方法を利用することを考えた。

図 7 左に示すように、CPG は全身の詳細モデルにおいて各関節の制御器として与えられる。このような関節毎の制御器を、左側で示した簡易化モデルの制御器に等価変換することを考える。本研究では基礎研究として、関節に次式で示すような線形な制御器が適用されている場合を対象として、変換アルゴリズムを開発した。

$$\tau = -K \Delta\theta$$

ここで、 $\tau$  は関節トルク、 $\Delta\theta$  は関節角度ベクトルであり、 $K$  は制御ゲインである。 $K$  を簡易化モデルの制御ゲインに変換することで最大 CPI 集合を計算できる。この方法により、図 7 下に示すような緑色の領域が最大 CPI 集合として計算できた。今後、この方法を CPG へ拡張することにより、計算量の爆発的増加を防ぐことが期待できる。

< 引用文献 >

- (1) E. G. Gilbert and K. T. Tan, "Linear systems with state and control constraints: the theory and application of maximal output ad-



missible sets," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 36, no. 9, pp. 1008-1020, 1991.

## 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 3件)

[1] 山本江、志鷹拓哉、ヒューマノイドのリミットサイクル型コントローラにおける最大出力許容集合と運動遷移制御(印刷中) 日本ロボット学会誌、査読有、Vol. 34、No. 5、2016

[2] K. Yamamoto, "Control Strategy Switching for Humanoid Robots Based on Maximal Output Admissible Set" Robotics and Autonomous Systems, 査読有, Vol. 81, 2016, pp. 17-32.

DOI: 10.1016/j.robot.2016.03.010

[3] 山本江、2足歩行ロボットの軌道追従制御における最大出力許容集合と転倒回避制御への応用、日本ロボット学会誌、査読有、Vol. 32、No. 7、pp. 633-642、2014

DOI: 10.7210/jrsj.32.633

[学会発表](計 14件)

[1] K. Yamamoto, "Falling Detection for Humanoid Robot based on MOA Set with Macroscopic Feedback Gain," in Proceedings of the 14th World Congress in Mechanism and Machine Science, 査読有, 2015.

[2] K. Yamamoto and T. Shitaka, "Maximal Output Admissible Set for Limit Cycle Controller of Humanoid Robot," in Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 査読有, pp. 5690-5697, 2015.

[3] K. Yamamoto, "Identification of Macroscopic Feedback Gain in Position-controlled Humanoid Robot and its Application to Falling Detection," in Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 査読有, pp. 487-492, 2014.

[4] K. Yamamoto, "Falling Prevention of Humanoid Robots by Switching Standing Balance and Hopping Motion Based on MOA Set," in Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 査読有, pp. 2523-2528, September, 2014.

[5] K. Yamamoto, H. Iioka and G. Obinata, "Control of Walking Direction on the CPG-Based Neuro-Musculo-Skeletal Walking Model," in Proceedings of SICE Annual Conference, 査読有, pp.419-424, 2013.

[6] 山本江, "冗長ロボットの零空間を利用した粘弾性の分配制御," 第33回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2015.

[7] 山本江, "重心粘弾性行列と Capture Point の拘束に対する MOA 集合に基づくヒューマノ

イドの転倒判定," 第33回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2015.

[8] 山本江, "ヒューマノイドロボットの重心インピーダンス行列," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2015.

[9] 山本江, 志鷹拓哉, "ヒューマノイドのための運動コントローラデータベース," 第32回日本ロボット学会学術講演会, 2014.

[10] 志鷹拓哉, 山本江, "ヒューマノイドのリミットサイクル型コントローラにおける最大出力許容集合と運動遷移制御への応用," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2014.

[11] 佐々木亮輔, 山本江, "ヒューマノイドロボットの運動計測と同期による安定性の向上," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2014.

[12] 山本江, "跳躍を含んだヒューマノイドロボットのコントローラ・スイッチング制御," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2014.

[13] 山本江, "二足歩行ロボットの目標軌道修正と着地位置制御による最大出力許容集合の変形," 第31回日本ロボット学会学術講演会, 2013.

[14] 山本江, "二足歩行ロボットの軌道追従制御における最大出力許容集合と転倒回避制御への応用," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2013.

[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]

ホームページ等

<http://www.nml.t.u-tokyo.ac.jp/member/yamamoto/research-j.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 江 (YAMAMOTO, Ko)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号: 20641880

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし