

平成 22 年 5 月 20 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20760170

研究課題名（和文）二脚ロボットの移動能力拡大のための連続・離散統合制御

研究課題名（英文）Continuous-discrete control for Mobility Enhancement of Bipedal Robot

研究代表者

杉原 知道（SUGIHARA TOMOMICHI）

九州大学・高等研究院・特別准教授

研究者番号：70422409

研究成果の概要（和文）：二脚ロボットの基盤的制御理論構築を目的とし、不連続な足の踏み替えと連続的な力の操作とを統合する大域的安定な制御を提案した。不変な支持状態における立位安定化性能の最大化、立位安定化器が作る平衡安定系から非平衡安定系（自励振動系）への連続遷移、自励振動系から抽出した位相・空間情報に基づく支持状態変形等を議論した。当初考えていたように連続力学系の断面から帰納的に安定構造を見出すのではなく、演繹的に連続的運動制御から不連続な支持状態変形へと繋げることができた。

研究成果の概要（英文）：This study aimed at building a fundamental biped control theory. The goal was to unify continuous reaction force manipulation and discontinuous stepping control into a globally stable control. Maximization of the stabilization performance under an invariant standing condition, continual morphing from a regulator to an oscillator, self-consistent deformation of the supporting region by stepping in accordance with the phase-spatial information, etc., were discussed. We could deduce the discontinuous deformation of the supporting region from the continuous motion control, which was beyond our plan to induce the stable dynamics from aspects of the continuous motion.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：ロボティクス

1. 研究開始当初の背景

段差や不整地を頑健に踏破する二脚ロボット実現を目指す上で、根幹となる運動制御理論の未成熟さが深刻な困難であった。脚ロボ

ットは、外力の力点よりも質量重心が上方にあるため、倒立振り子と同じ不安定なシステムだが、足の踏み替えを巧みにを行い、力点を不連続に跳躍させることが可能である。すなわ

ち、連続的な系としては本質的に不安定だが、不連続性を用いて動的安定にできるという興味深い性質を持つ。連続的な力操作による安定化と、不連続な力点跳躍による安定化を融合した制御は十分な形で開発されていない。この問題に対し研究代表者は、従来別個に論じられてきた足の踏み替えと力の操作を、仮想力点という同一の指標に基づいて統合する制御を提案していた。この成果から、仮想力点と実際の力点が一致する瞬間で運動の断面を切り取っていくと、安定な離散的力学構造が現れるのではないかという仮説に至った。

2. 研究の目的

上記の仮説に基づいて、次の三点を目標とした。

- (1) 上記仮説を検証し、離散安定な力学構造が現れる理論的背景を明らかにする。
- (2) そのような安定な力学構造が発現する力学的条件を明らかにする。
- (3) その条件に基づいた大域的安定な連続・離散統合制御系を設計・開発する。

3. 研究の方法

当初は、研究代表者が提案していた仮想力点の操作による制御がもたらす歩行運動の断面をとり、Poincare 写像を同定することによって、帰納的にその安定な力学構造を解析するつもりでいた。しかし研究開始より前に、議論の土台となる力学モデルおよび仮想力点操作法の設定に改善点が見つかり、力学系の性質を可視化することが可能になった。これに基づいて、可視化された空間を元に力学系の持つ性質をより精密に議論することから開始した。

以降は、次のような流れで理論展開を進めた。

- (1) 最も基本的な立位運動の相空間の可視化と力学構造の解析
- (2) 本課題の元となった仮想力点操作法の再解釈と制御性能の定量的評価方法の議論
- (3) 制御性能を理論的に最大化する制御器設計の議論
- (4) 立位運動の安定化限界をもたらす条件と不連続な踏み出し制御の統一的議論
- (5) 踏み出し制御の矛盾を解消する力学構造の発見、立位運動から足踏み運動への変形の議論

以上は、可視化可能な低次元空間での運動を元とした理論展開であって、これだけでは大自由度を有する現実のロボットの運動との乖離が懸念された。そこで、低次元空間から実ロボットの運動を表現する大次元空間へ、さらに外乱が存在する実環境へと還元する

ために必要と考えられる、次の技術開発を並行して進めた。

- (1) 特異点近傍であっても極めて安定に求解を行える逆運動学解法
- (2) 逆運動学によって求めた各関節の目標運動を、重力や摩擦を補償し高精度に再現するためのロボストモータ制御
- (3) ロボットの運動を安定かつ高精度に相空間へと写像するための、姿勢推定法
- (4) 地面との衝突後すぐに安定な接地へと移行できる足先機構

4. 研究成果

本課題の遂行においては、研究の初期段階から元々の計画と異なる方向性が見えた。具体的には次のような成果を得た。

- (1) 不変な支持状態における立位安定化制御器の安定化性能評価の指標提案と、その指標に基づき安定化性能が最大化された立位安定化制御器を設計する方法の提案（図1参照）

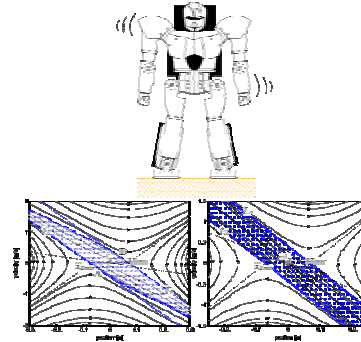


図1

- (2) 上記の立位安定化制御器を以てしても安定化できない運動の限界条件の明確化、およびそれに基づく不連続な支持状態の要不要の判別方法の提案
- (3) 上記判別に基づく不連続な支持状態変形のための踏み出し戦略の提案（以上、図2参照）

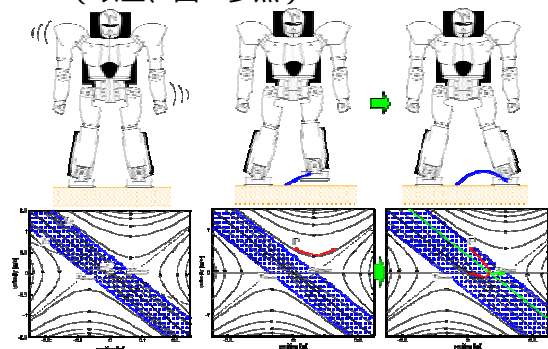


図2

- (4) 立位安定化器が作る平衡安定な力学系から、最大化された安定化性能を維持したまま非平衡安定な力学系（自励振動系）へ連続的遷移する非線形制御の提案（図

3 参照)

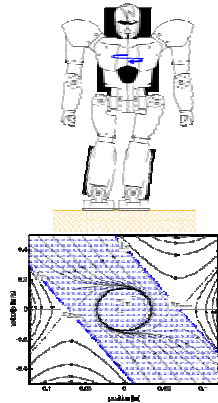


図 3

- (5) 上記の制御によって作られる自励振動系において、位相情報と空間情報を抽出するための新たな指標の提案、およびそれに基づく自己無撞着な足踏み制御、離散的な支持状態の変形方法の提案 (図 4)

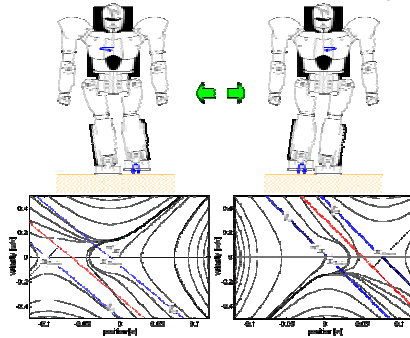


図 4

当初思い描いていたように、連続的な力学系の断面から帰納的に安定構造を見出すのではなく、不連続な支持状態変形を演繹的に連続的な運動制御へと取り込むことができた。これは予想を超えた成果であった。

また、実際の二脚ロボットにおいて支持状態の変形という不連続な現象を許容するための対地適応性の高い足先機構 (図 5) の設計開発や、巨視的に表現されたロボット重心の運動を関節運動に分解し関節モータをロボバストに制御する方法等を開発した。提案する理論を机上の理論に留めず、ハードウェアの側面から身体制御を議論できたと考える。



図 5

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)

杉原知道, 目標値整形による簡単かつ安全な積分補償を導入したモータ制御, 日本ロボット学会誌, 査読有, Vol.27, No.8, pp.910-916, 2009.

Tomomichi Sugihara and Yoshihiko Nakamura, Boundary Condition Relaxation Method for Stepwise Pedipulation Planning of Biped Robots, IEEE Transaction on Robotics, 査読有, Vol.25, No.3, pp.658-669, 2009.

杉原知道, 中村仁彦, ミクロ・マクロ衝突モデルの融合によるリンク系順動力学接触力計算の数値的悪条件緩和, 日本ロボット学会誌, 査読有, Vol.26, No.7, pp.767-777, 2008.

〔学会発表〕(計 11 件)

西俊哉, 杉原知道, ランダムツリーの間伐・平滑化による複雑環境内での人型ロボットの運動計画, 第 15 回ロボティクスシンポジウム, 査読有, pp.397-402, 吉野山, 2010. 3.16.

Tomomichi Sugihara, Solvability-unconcerned Inverse Kinematics based on Levenberg-Marquardt Method, 2009 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 査読有, pp.555-560, Paris, Dec, 9th, 2009.

Tomomichi Sugihara, Dynamics Morphing from Regulator to Oscillator on Bipedal Control, 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 査読有, pp.2940-2945, St.Louis, Oct, 13th, 2009.

Hidehito Kobayashi and Tomomichi Sugihara, Self-consistent Automatic Navigation of COM and Feet for Realtime Humanoid Robot Steering, 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 査読有, pp.3525-3530, St.Louis, Oct, 13th, 2009.

杉原知道, ZMP 自励振動に自己無撞着同期する二足昇降制御, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, 横浜国立大学, 2P1-07, 2009. 9.16.

杉原知道, Levenberg-Marquardt 法による可解性を問わない逆運動学, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会,

横浜国立大学, 2K1-03, 2009. 9.16.
杉原知道, 二脚制御における立位安定化から周期的揺動への力学変容, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 福岡国際会議場, 2P1-C04, 2009. 5.26.

小林英仁, 杉原知道, ヒューマノイドロボット操縦のための体幹・両足遷移計画法, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 福岡国際会議場, 2A1-D19, 2009. 5.26.

Tomomichi Sugihara, Standing Stabilizability and Stepping Maneuver in Planar Bipedalism based on the Best COM-ZMP Regulator, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 査読有, pp.1966-1971, Kobe, May, 15th, 2009.

杉原知道, 最良重心-ZMP レギュレータに基づく二脚運動の立位可安定性と踏み出し, 第 14 回ロボティクスシンポジウム, 査読有, pp.435-440, 登別温泉, 2009. 3.17.

杉原知道, 目標値整形による組込 PD 制御器のための簡易ロバストサーボ, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会, 神戸大学, 3C1-05, 2008. 9.11.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究代表者

杉原 知道 (SUGIHARA TOMOMICHI)
九州大学・高等研究機構・特別准教授
研究者番号 : 7 0 4 2 2 4 0 9

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし