

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：30118

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560269

研究課題名(和文) 二足歩行ロボットの視空間環境統合制御

研究課題名(英文) Motion control with integration to visual environmental information for biped walking robot

研究代表者

小田 尚樹 (ODA, NAOKI)

千歳科学技術大学・総合光科学部・教授

研究者番号：70305960

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、二足歩行ロボットのモーション制御と視空間環境情報を統合した制御系の開発を目的とするものである。従来、歩行運動の安定化制御はロボットの力センサや内界センサで制御し、搭載したカメラ画像から得られる周囲の環境情報は運動計画に利用することが一般的であるのに対して、本研究の成果によりカメラ画像から認識した環境情報を主体的に用いた安定化制御およびバランス制御を可能とした。これにより周囲環境の状態と積極的に関係づけた歩行制御が可能となり、歩行運動の信頼性向上に貢献する成果である。

研究成果の概要(英文)：This research aims to develop a motion control technique with integrating to visual environmental information for biped walking robot. In conventional approach, the dynamic balance of the biped robot is mainly controlled by using force and internal sensors, and the vision-based information recognized from camera image is used for motion and gait planning. On the other hand, this approach enables that the dynamic balance and stabilization of the walking motion are controlled principally from visual information. The proposed approach can realize active control with relating to the environments, and contributes to the enhancements of the control reliability and performance of walking motion.

研究分野：ロボットのモーションコントロール, ロボットビジョン

キーワード：二足歩行ロボット, ゼロモーメントポイント, ロボットビジョン, 画像認識, ビジュアルフィードバック制御, 安定化制御, モーションコントロール

## 1. 研究開始当初の背景

高齢社会の更なる進行が予測される中で、ロボット機器による人間生活支援への期待は非常に大きいものである。ヒューマノイド形ロボットをはじめとした二足歩行ロボットは外観上の親和性や潜在的な移動能力が非常に高く、盛んに研究が進められている。安定歩行を実現するための代表的手法は、安定性評価にゼロモーメントポイント (ZMP) を導入し、力センサ等で観測した ZMP に基づく歩行制御系を構成することが一般的である。ZMP は足裏の圧力中心と等価であるため、足裏や足首部分に力センサや圧力センサを内蔵することで観測することができる。

しかしながら、信頼性向上の観点から課題がある。ZMP の検出は力センサの情報に依存するとともに、合わせて加速度センサやジャイロセンサなどの他の内部センサ情報にも依存した歩行制御系となり、力センサ以外の代替手段を用意することが非常に困難である。

また従来、二足歩行ロボットに搭載される視覚センサの役割は環境認識が主であり、床環境の同定や障害物検知に基づき、歩容生成や運動計画に重要な役割を果たしてきたが、ロボット応答の安定化やバランス制御に主体的に利用される状況には至っていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、二足歩行ロボットの視空間環境情報と運動制御情報を統合した制御手法を開発することで、歩行制御系の信頼性の向上を目指すものである。従来、歩行運動の安定化制御はロボットの力センサや内部センサで制御し、搭載したカメラ画像から得られる環境情報は運動計画に利用することが一般的な構成である。本研究では、カメラ画像から認識した環境情報を主体的に用いた安定化制御およびバランス制御の実現を可能とすることで、周囲環境の状態と積極的に関係づけた歩行制御を実現し、歩行運動制御の信頼性向上を目的とするものである。

視空間環境情報を効果的に利用することで、加速度センサ、ジャイロスコープ、力センサといった従来センサ情報に依存しない制御系の構成を検討し、視空間上の環境情報が即時的にロボットの運動応答に寄与するようロボットのダイナミクスと視空間環境情報とを統合する。これによる不整地対応などの応用制御について合わせて検討を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験機器の整備

本研究の実験装置として、独自に開発してきた全 12 自由度二足ロボットを利用する(図 1)。足首以下の足部について 6 軸力センサを内蔵するとともに視空間のオプティカルフロー検出に適度な剛性の柔軟性を有する足部となるよう設計・製作を行う。更新した

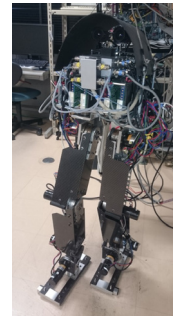


図 1 本研究で使用した二足歩行ロボット

ロボットの足首部のバネーマスモデルについて同定試験を行い、床反力および ZMP の推定のための基本検証を実施する。

### (2) 画像処理系の開発

画像処理系に関しては、物体認識および視空間全域においてオプティカルフローを高速リアルタイムに算出できる処理系を整備する。オプティカルフローの検出処理については、高速・高精度の検出を要するため、並列計算処理を取り入れた処理系を開発して導入する。

### (3) 統合制御系の構成

二足歩行ロボットのバランス平衡状態 (安定性) を動的画像情報から特徴抽出するために、ロボットのダイナミクス、特に安定性に寄与する足平と接地面上に作用する床反モーメントと視空間画像面の運動関係を理論検討する。

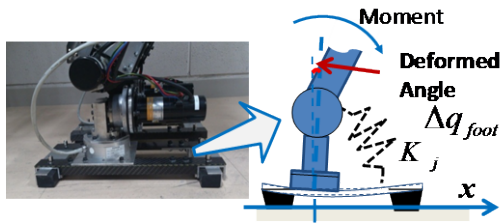
二足歩行ロボットの重心軌道、及び遊脚軌道の加速度次元までのモーション制御系を基本構成とし、歩行パターンは倒立振り子モデルからリアルタイムに生成する処理系を採用する。安定性やバランス制御に寄与する重心の制御系と視空間環境情報を統合した歩行モーション制御系を構築し、実験的に制御性能を検証する。さらに不整地対応に向けた検討を実施する。

## 4. 研究成果

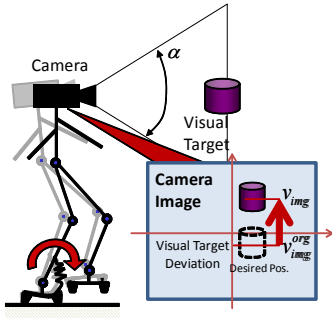
### (1) ZMP の評価

二足ロボットの代表的安定指標である ZMP を視野画像から推定する方法を示し、従来手法における足部に内蔵する力センサで検出される ZMP と、提案手法による画像情報ベースの ZMP の推定精度に関する比較検証を行った。

図 2 に ZMP をロボットに搭載した画像情報から推定する基本原理を示している。図 2 (a) に示すとおり、ロボットの足平部はビーム状のフレーム構造となっており、これは足平回りの床反モーメントに応じて微小な構造的な変形を生じる構造となっている。そのために生じるロボットの上体角度の変化により、画像中の物体位置も変化することとなる。図 2 (b) に示すように、足平が変形していないとした理想的な位置からの物体位置



(a) 足部の構造



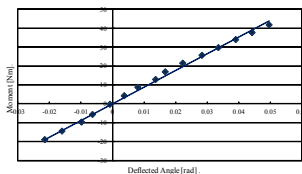
(b) 画像情報との関係

図2 視覚情報を介したモーメント推定

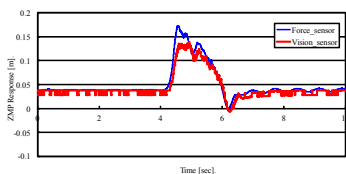
変位を画像処理により検出し、合わせて同定した剛性係数から床反モーメントを推定することができる。図3(a)の結果は、足平の変形角度とモーメント（力センサから観測）の関係を測定したものであり、今回製作した足部において実用的な範囲内ではほぼ線形の関係にあることを確認した。

上下運動の加速度が十分小さい場合には、得られたモーメントからZMPの推定を行うことが可能である。その検証結果の一例を図3(b)に示している。力センサから算出したZMPと比較して、十分な精度で推定できることを確認した。

従来の力センサでのZMP検出が足平まわりのローカルな力センシングを行っているのに対して、本研究における視覚情報を介した環境中の物体位置を活用するアプローチは、環境を巻き込んだグローバルな系の中で力センシングを実現していることを意味している。

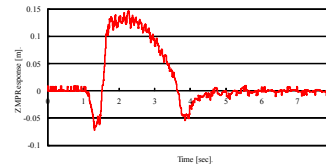


(a) 足平の変形角度とモーメントの関係

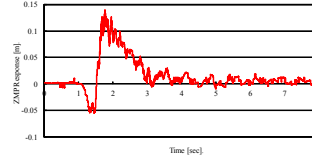


(b) カセンサによるZMPとの比較

図3 ZMP推定値の評価実験



(a) 等価反力フィードバックのみ



(b) オプティカルフローによる提案手法

図4 ZMP安定化制御の実験結果

## (2) ZMPの安定化制御

視覚情報から推定された床反モーメントを、重心位置における等価的な反力に換算して重心加速度運動にフィードバックすることで（等価反力フィードバック）、足平の柔軟要素に起因する振動挙動などの不安定性を回避することができる。これは、遊脚が接地する際にコンプライアントに着地する効果をも高めることができる。

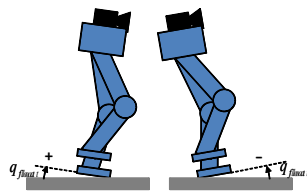
さらに、視野画像中の物体位置とZMPを関係づけることで、画像中に見える物体位置からZMPを推定できることを示した。本アプローチは、画像中において物体位置の理想的な位置を算出できることにもなるため、重心まわりの回転運動を利用して、理想位置に近く効果につながるようなロボットの上体回転モーメントを生成する視覚フィードバック制御手法を提案した。

この提案手法の中では、加えてZMPの微小変位と物体の画像上での変位、すなわちオプティカルフローとの理論的な関係を導出することで、ZMPの変動を抑制する効果を有する、オプティカルフローをフィードバックした制御方法へと展開することができた。

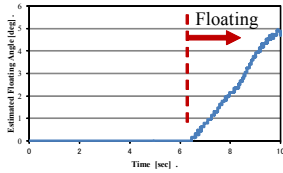
図4はその効果を確認した実験結果であり、外乱入力からZMPが目標値へ回復するまでの応答波形を示している。図4(a)は等価反力フィードバックのみの場合であり、回復が遅い。それに対して、オプティカルフローを活用した提案手法の図4(b)では速やかに、かつ安定的に回復する応答が得られている。

## (3) 足平の浮き角度の推定

従来のZMPベースの歩行制御は、基本的に足裏が浮かないように制御されることと等価であり、結果的に保守的な歩行動作になる。すなわち、ZMPは足裏と床面が安定に接地している範囲では力センサで効果的にセンシングできるが、足裏エッジ回りで転倒動作を開始した後は、ZMPはエッジにとどまり指標としての意味が低下する。そのため、内界センサを主体とした場合には、力センサに加えて加速度センサ、ジャイロ스코プを組み合



(a) 浮き角度の定義



(b) 後方から押した場合の推定結果

図5 浮き角度の推定

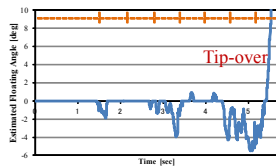
わせてロボットの絶対的な状態量を得る必要があり、センサ信号処理の複雑化をも招く。

そのような状況に鑑み、視空間情報を有効に活用することで、足裏の一部が浮いた状態までを含めてロボットの安定状態を評価する方法を検討した。先に述べたとおり、視野画像中の物体位置とZMPを関係づけできることを示しているが、これによりZMPが安定となるための物体位置の許容範囲を定義することができる。その際、視野画像中の許容範囲を逸脱して物体が見えている場合には、足裏が浮き始めている状態と推定することができる。どれだけ範囲外にあるかによって、図5(a)によって定義した支持脚の浮き角度として算出可能であることを示すことができた。

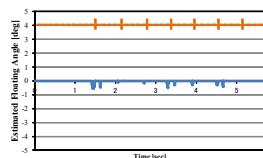
図5(b)は、ロボットを後方から押して、徐々に力を大きくした場合の浮き角度の推定値である。浮き始めるとともに推定値が増加する様子が確認できる。

#### (4) 足平の接地状態の評価

視覚情報を活用した等価反力フィードバックは、振動的挙動を抑制する役割のほかに、コンプライアント（柔軟的）に着地する効果をも高めることができることを先に述べた。



(a) カセンサベース



(b) 本研究アプローチ

図6 歩行動作時の浮き角度の推移

実際にはこの役割は足部の力センサを利用して実現することも可能である。そこで力センサを利用した場合と本研究のアプローチに基づく提案手法を利用した場合の相違を検証するために、歩行時における足平の接地状態を評価した。

力センサで検出される足平回りのモーメントはZMPがつま先側へ移動していく過程までは増加し、エッジにZMPが到達した以降からはエッジ回りの回転動作に至り、かかと側が浮いた状態を引き起こす。しかし、浮き始めた以降については、モーメント変化は小さくなるため、力センサベースで上体姿勢を修正する方法では、コンプライアントに着地する効果が低下する可能性がある。

それに対して、本研究の特徴である視野環境中の物体位置を基に床反力を推定する方法においては、浮き始めた状況においてもそれに応じて画像中の物体位置の変位が生じ、浮いた角度分に応じた仮想的なモーメントが上乘せされる。すなわち、浮きはじめての状況が生じたとしても、なお継続的に重心位置が修正され、足平の接地状態を維持する効果が期待される。

前節で示した浮き角度を指標として、歩行時の足平の接地状態を比較した結果の一例を図6に示している。力センサベース(a)では一旦接地状態が不安定になると回復が困難であるのに対して、視覚情報を活用した方法(b)においては安定性の高い接地状態が得られることを確認した。

#### (5) 不整地への着地対応

図7に示すような歩行中に未知の段差等に乗上げる場合などに対応するために、視空間環境情報を活用した制御方法の提案を行った。その中では、着地脚を柔軟に接地させるためにインピーダンス制御を導入し、脚平の着地と同時に視野環境中で認識された物体位置を活用することで、脚平の床面への接地角度を着地毎に推定できることを示した。さらに着地後の視空間上の物体位置の変位を利用して安定的に接地状態を維持するための制御手法を提案し、それらの有効性を実機による実験検証によって確認した。

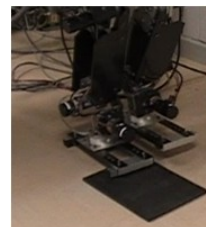


図7 未知の段差への着地対応

### 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 8 件)

- (1) N. Oda, K. Kushida, M. Yamazaki, Recovery Control by using Visually Estimated Foot Sole Floating Angle for Biped Walking Robot, Proc. of IEEE Int. Conf. on Mechatronics, pp.398-403, 2015, 査読有  
DOI: 10.1109/ICMECH.2015.7084009
- (2) 山崎美奈, 小田尚樹, 二足歩行ロボットにおけるビジョンベースの環境情報に基づく着地脚の接地角度推定, 電気学会論文誌 D, Vol. 135 No. 3 pp.220-226, 2015, 査読有  
DOI: 10.1541/ieejias.135.220
- (3) Mina Yamazaki, N. Oda, Foot Adaptation to Obstacle with Vision-based Landing Angle Estimation for Biped Robot, Proc. of IEEE Int. Conf. of Industrial Electronics Society, pp.5254-5259, 2014, 査読有  
DOI: 10.1109/IECON.2014.7049301
- (4) Naoki Oda, Kazushi Kushida, Mina Yamazaki, Vision-based Control Evaluation with Estimating Foot Sole Floating Angle for Biped Walking Robot, Proc. of The 13th International Workshop on Advanced Motion Control, pp.344-349, 2014, 査読有  
DOI: 10.1109/AMC.2014.6823306
- (5) Naoki Oda, Kazushi Kushida, Vision-based Compliant Control with Landing Adaptation to Obstacle for Biped Walking Robot, Proc. of IEEE Int. Conf. of Industrial Electronics Society, pp.5906-5911, 2013, 査読有  
DOI: 10.1109/IECON.2013.6700103
- (6) Naoki Oda, Junichi Yoneda, Experimental Evaluation of Vision-based ZMP Detection for Biped Walking Robot, Proc. of IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics, pp.1-6, 2013, 査読有  
DOI: 10.1109/ISIE.2013.6563841
- (7) Naoki Oda, Junichi Yoneda, Visual Feedback Control Based on Optical Flow Vector Field for Biped Walking Robot, Proc. of IEEE Int. Conf. on Mechatronics, pp.635-640, 2013, 査読有  
DOI: 10.1109/ICMECH.2013.6519116
- (8) Naoki Oda, Osamu Yanada, Motion Controller Design of Biped Robot for Human-like Walking with Stretched Knee, Proc. of the 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp.5434-5439, 2012, 査読有  
DOI: 10.1109/IECON.2012.6389523

[学会発表] (計 9 件)

- (1) M. Yamazaki, N. Oda, Vision-based Walking Motion Control with Lateral

Reaction Force Feedback for Biped Robot, 1st IEEE Int. Workshop on Sensing, Actuation and Motion Control, TT1-2-5, 2015年3月10日, 名古屋工大

- (2) 山崎美奈, 小田尚樹, 視野画像中の物体位置を利用した二足歩行ロボットの不整地対応に関する検討, 平成26年精密工学会北海道支部学術講演会, C-P37, 2014年8月30日, 札幌市立大学
- (3) 山崎美奈, 小田尚樹, 二足歩行ロボットの視覚情報を用いた接地角推定のスロープ環境における検証, 平成26年電気学会産業応用部門大会 YPC, Y-68, 2014年8月26日, 東京電機大学
- (4) 山崎美奈, 小田尚樹, ビジョンによる接地角度の推定に基づく二足歩行ロボットの段差対応, 電気学会産業計測制御/メカトロニクス制御合同研究会, IIC-14-022/MEC-14-010, 2014年3月10日, 芝浦工業大学
- (5) 小田尚樹, 榎田一志, 山崎美奈, 画像センシングに基づく環境情報を利用した二足歩行ロボットのコンプライアンス制御, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-13-161, 2013年9月3日, 東京電機大学
- (6) 榎田一志, 小田尚樹, 二足歩行ロボットのオプティカルフローを利用した ZMP 変動抑制効果の検証, 平成25年電気学会産業応用部門大会 YPC, Y-77, 2013年8月28日, 山口大学
- (7) 米田淳一, 小田尚樹, 二足歩行ロボットの視覚情報に基づく ZMP 推定手法の実験的評価, 電気学会産業計測制御/メカトロニクス制御合同研究会, IIC-13-131, 2013年3月8日, 千葉大学
- (8) 佐藤佑生, 小田尚樹, 二足歩行ロボットのビジョンベースの安定化制御による段差対応の一検討, 電気学会産業計測制御/メカトロニクス制御合同研究会, IIC-13-132, 2013年3月8日, 千葉大学
- (9) 小田尚樹, ビジョン技術による人間支援型ロボットのモーション制御, 電気学会産業応用部門大会シンポジウム講演, 2-S10-1, 2012年8月23日, 千葉工業大学

[その他]

ホームページ

<http://odalab.spub.chitose.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小田 尚樹 (ODA NAOKI)

千歳科学技術大学・総合光科学部・教授  
研究者番号: 70305960

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし