

## 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

千歳科学技術大学 ○山崎美奈, 小田尚樹

本稿では二足歩行ロボットにおいて、カメラ画像中の物体位置を利用した不整地への接地角度推定および接地制御に関する実験的な検討を行う。実機実験により、未知の段差に対する足平の接地角度推定の検証結果を示すとともに、さらに接地時におけるラテラル面の運動の安定化を目指すため、ラテラル面の床反モーメントを反力推定オブザーバで推定可能か検証する。

### 1. 概要

二足歩行ロボットは人と同じ移動形態であるため、様々な地形に対して柔軟に対応できると考えられる。著者らは過去に、段差に対応した歩行を可能にするため、未知の段差を踏んだ際の足平接地角度を視覚情報から推定し、さらに足部の力センサに依存しない安定的な接地制御系を提案している<sup>(1)</sup>。しかしながら、本手法はラテラル面の運動を考慮していないため安定性に課題が残る。そこで本稿では、視野画像中の物体位置を利用した足平の接地角推定の方法および検証結果を示すとともに、さらに横方向のZMPと関係するラテラル面の床反モーメントの推定を力センサレスで行う。

足平まわりのモーメントは力センサによって検出することができるが、足首ロール軸モータの反力トルクからラテラル面のモーメント推定が可能であると考えられる。本研究は力センサに依存しない歩行安定化を一つの目標としており、ラテラル面のモーメント推定も力センサを使用せずに行えるかを検証する。実際に力センサによる床反モーメントとモータの反力トルクは実機実験にて比較検証する。

### 2. 接地角推定に基づく安定化制御

本研究で使用するロボットは足平部に構造的な柔軟性が付与されているため、モーメントに応じた変形が生じる。この変形量を視野画像中の物体位置から算出することで、サジタル面の床反モーメントを推定し<sup>(2)</sup>、重心に対する等価的な反力フィードバックを行っている<sup>(3)</sup>。このとき、目標物体の初期位置を支持脚を切り替える毎に更新することで水平ではない床にも対応することができ、足平の接地性向上が期待できる。

まず足平を柔らかく接地させるため、遊脚足首に仮想インピーダンス制御を導入する。Fig.1にロボットが段差を踏んだ際の様子を示す。インピーダンス制御に必要な力信号は足首ピッチ軸モータの反力推定オブザーバから推定された反力を利用する。推定した反力は速度微分時にノイズが発生してしまうため、ノイズを除去するローパスフィルタを用いる。最終的に推定反力  $\hat{F}_{ankle}^{reac}$  は(1)式で表すことができる。 $K_m$ はトルク定数、 $F_c$ はクローン摩擦、 $G$ は重力項、 $J$ は軸慣性、 $g_{est}$ はカットオフ周波数である。

$$\hat{F}_{ankle}^{reac} = \frac{g_{est}}{s + g_{est}} \left\{ (K_m I_a^{ref} - F_c - G) + g_{est} J \dot{q}_{ankle} \right\} - g_{est} J \dot{q}_{ankle} \dots\dots\dots(1)$$

次に、段差に対応した歩行のために、視野画像を用いた支持脚の接地角推定を行い、接地角を利用したロボットの歩行安定化制御を構成する。仮想インピーダンス制御によって足平が地形に対して十分に柔軟に接地可能とすると、支持脚足平の接地角度は次のようにして求められる。床水平時におけるカメラ画像上の目標物体の初期位置を  $(u_{img}^{flat}, v_{img}^{flat})$ 、現在位置を  $(u_{img}, v_{img})$  で表す。また、垂直方向におけるカメラの視野角、カメラ画像上の画素数、ロボットの姿勢角、カメラの内部姿勢角はそれぞれ  $\alpha$ ,  $h_{img}$ ,  $q_{robot}$ ,  $q_{cam}$  で表す。接地角度  $q_{pitch}$  はFig.1の関係から以下の式で求められる。

$$\Delta v_{img} = v_{img}^{flat} - v_{img} \dots\dots\dots(2)$$

$$q_{robot} = \frac{\alpha}{h_{img}} \Delta v_{img} \dots\dots\dots(3)$$

$$q_{pitch} = q_{robot} - q_{cam} \dots\dots\dots(4)$$

求めた接地角度からロボットの歩行軌道と姿勢の回転を修正することで、段差に対応した歩行が可能となる。さらに接地時点の物体位置を利用して足平のピッチ軸まわりの変形角度を得ることで、接地性を維持するための反力フィードバックも行っている。

### 3. ラテラル面のモーメント推定

上述の方法では、サジタル面の運動に関する接地安定

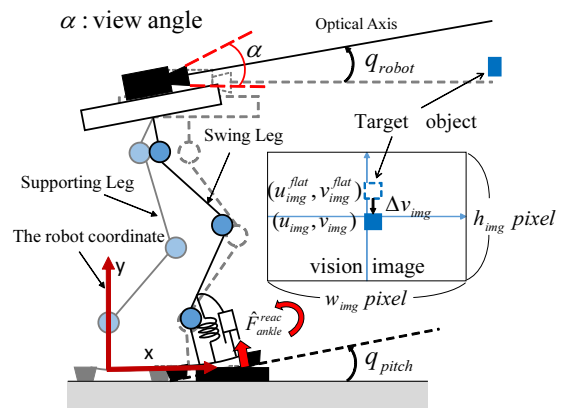


Fig. 1. ロボットが段差を踏んだ場合

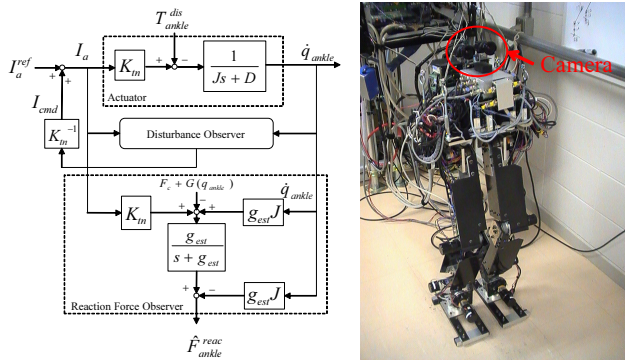


Fig. 2. 反力推定オブザーバ Fig. 3. 二足歩行ロボット

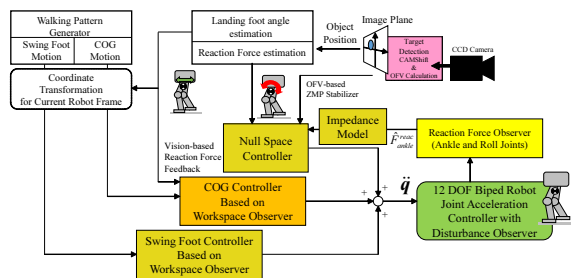
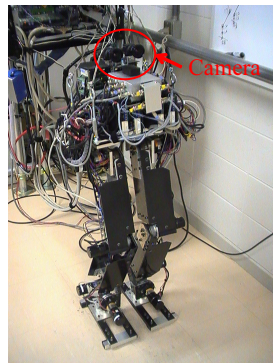


Fig. 4. 制御ブロック図

化効果は期待できるが、ラテラル面の接地安定化については全く考慮されていない。そこで今後ラテラル面へと拡張するために横方向のZMPと直接関係する足平まわりのモーメント推定を試みる。

モーメントの推定は一般的に力センサを用いることで可能であるが、著者らは今まで力センサに頼らない歩行の安定化制御に取り組んできた。そこで今回は Fig.2 に示す反力推定オブザーバから足平のロール角に対応するモータ軸の反力を推定し、力センサの値と比較検証する。

#### 4. 実験結果

足首ロール軸モータのトルクから横方向のモーメントが求められることを確かめるために、モータの反力トルクと力センサによるラテラル面の床反モーメントを比較する実験を行う。今回実験で使用するロボットを Fig.3 に、制御ブロック図を Fig.4 に示す。ロボット上部にはステレオカメラを設置しており、今回はステレオカメラの左側のみを使用する。

今回の実験では左右に異なる厚み(右 10mm, 左 5mm)の障害物を置いてその上を歩幅 0.06m で歩行させた。このとき推定した接地角の推移を Fig.5 に示す。支持脚が右脚時を R, 左脚時を L とする。また、歩行中における横方向のモーメントを力センサと足首ロール軸モータの反力トルクから推定したグラフを Fig.6 に示す。

Fig.5 から、障害物を踏んだ際の左右それぞれの接地角は、左脚支持期と右脚支持期でほぼ一定に推移していることがわかる。また Fig.6 から、力センサによるロール

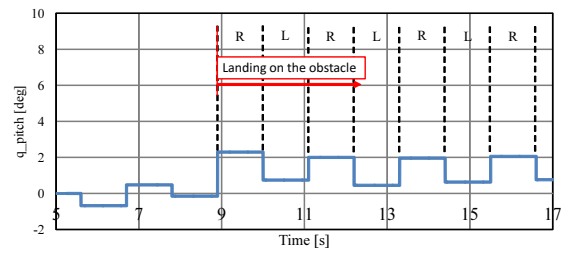
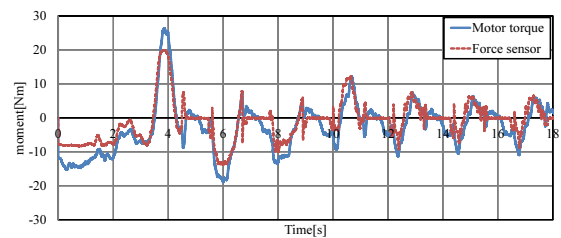
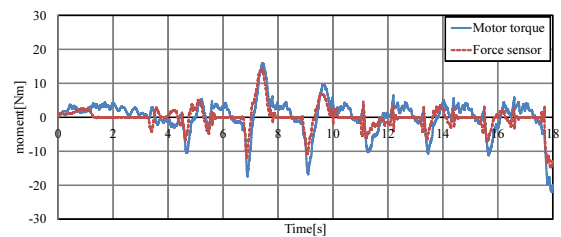


Fig. 5. 推定接地角の推移



(a) 左脚



(b) 右脚

Fig. 6. モーメントの推定

軸まわりのモーメントと足首部モータの反力トルクの値がほぼ同様に推移していることがわかる。従って、足平部におけるラテラル面のモーメントは足首ロール軸モータの反力トルクから推定可能であることが検証できた。

#### 5. 結論

本稿ではラテラル面における足平まわりのモーメントを足首ロール軸モータの反力トルクから推定可能であるかを検証した。実機実験によって、反力推定オブザーバによるモーメントの推定値は、力センサの値とおおよそ一致することが確認できた。今後は推定されたモーメントを利用して横方向の安定化を行うことが課題である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費(課題番号: 24560269)の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- (1) 山崎, 小田, "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", 2014 年 3 月 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, 2014
- (2) N. Oda, J. Yoneda, "Experimental Evaluation of Vision-based ZMP Detection for Biped Walking Robot", IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics (ISIE2013), pp.1-6, 2013
- (3) N. Oda, J. Yoneda, "Visual Feedback Control Based on Optical Flow Vector Field for Biped Walking Robot", IEEE Int. Conf. on Mechatronics (ICM2013), pp.635-640, 2013