

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 3 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760245

研究課題名（和文）受動性に基づく二足歩行ロボットのバランス・歩行制御

研究課題名（英文） Balance and walking control of a biped robot based on passivity

研究代表者

小澤 隆太 (OZAWA RYUTA)

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号：40368006

研究成果の概要（和文）：

従来のほとんどすべての 2 足歩行ロボットの制御系では、正確な取得が難しい力センサ情報やロボットの動力学モデルが必要とされる。本研究では、ロボットの重心・幾何学情報と姿勢角センサのみから、重心位置および上体の姿勢を直接フィードバックして安定化する新しい制御方法を開発した。この制御系の安定性を理論的に示し、シミュレーションおよび実験により安定なバランス制御と準静的な歩行を実現した。

研究成果の概要（英文）：

Conventional methods for controlling a biped have required force sensors on foot and precise dynamical model of a biped. In contrast, we have developed a new passivity-based balance controller for bipeds using only the information about the center of mass and configuration. We have theoretically proved that the controller can stabilize the balance of bipeds and have experimentally validated the controller.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：ロボティクス

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：二足歩行ロボット、バランス制御、歩行制御

1. 研究開始当初の背景

1970 年代後半から日米を中心に多くの二足歩行の研究が行われている。その中心的課題はバランスと歩行の安定化であり、そのためには重心位置を制御する必要がある。現在までに開発された殆ど全ての制御系は、軌道計画に基づく固い関節各制御系を用いて制御する。このために、零モーメント点 (ZMP) といわれる足裏の圧力中心点の軌道が足の接地面から構成される支持多角形内に収まるように軌道の計画を行う。その後、人間型ロボットを単純化した倒立振り子モデルによる近似から得られた動力学モデルを用いて

複雑な最適化問題を解き、目標の重心軌道を求める。その後、この重心位置から最適化問題で関節角を求め、その追従制御を行う。この方法は慣性力の影響を考慮するために ZMP から重心位置を求めているが、この計算にロボットの完全な動力学モデルを用いると不良設定問題となる。そのため、前述の倒立振り子による近似モデルを用いる必要がある。

そのため、モデル化誤差を必ず含むが、フィードバックループは関節角で閉じているので、この影響を完全に消すことができない。よって、環境の変動やモデル化誤差に対応す

るため、その制御方法は保守的になったり、複雑な軌道修正アルゴリズムが必要になったりした。

2. 研究の目的

本研究の目的は、二足歩行ロボットのバランスと歩行の制御問題を本質的に解決するために、ロボットのバランスを安定化するために必要な重心位置や状態の姿勢、遊脚の姿勢といった制御量を直接フィードバックし、制御する方法を開発することにある。

このためには、従来の軌道計画に基づくバランス・歩行制御とは根本的に異なる制御方法が必要となる。特に、二足歩行ロボットは、足裏が地面との摩擦力の範囲で接触可能な片側拘束となっており、この接触力は直接的に制御できない。そこで、このような拘束などがある場合にもうまく動作することが知られている受動性に基づく制御系に基づいたバランス制御系の開発を行い、この制御系を拡張することで準静的に安定な歩行を実現することにある。

この開発が実現することで次の大きな三つの問題を解決することを目指す。一つは、目標関節角を求めるための複雑な運動計画を簡略化することである。このような運動計画は、精度を上げるためには複雑なモデルが必要であり、計算時間も多くなる。安定化したい制御量に関してフィードバックループが閉じていないため、制御がフィードフォワード的になる。少ない量を直接フィードバックすることができれば、このような問題が解決することができる。また、軌道計画のモデル化誤差などがなくなり、力センサのノイズ等の影響も軽減できるので、より安定なバランス制御が実現できると考えられる。

次に、地面の勾配・軟らかさなどの環境変化に対するロバスト性を向上させることである。従来の軌道計画に基づく方法では、地面の傾きをあらかじめモデル化しないと目標関節角と実際の関節の関係が大きくなり、バランスを保つことが難しくなる。また、従来の方法では、力センサから推定した ZMP の値で地面のロバスト性を向上させる手段がよく取られるが、地面が柔らかかったり、不整地であったりする場合、力センサの値が不正確になる可能性もある。しかしながら、直接重心や姿勢を制御できれば、このような誤差に対しても安定化することができる。

第3にロボットの設計要求の低減化により設計コストが削減できるなどの効果が期待される。特に、本質的には ZMP を用いず制御をおこなうことを目指すので、力センサが必要なくなったり、ロボットのモデリングにかかる時間も軽減できたりすると考えられる。

3. 研究の方法

二足歩行ロボットのバランス制御（重心位置を足裏内に留める）・踏み変え制御（留まる領域を変更する）・歩行制御（連続的な踏み変え制御）のための制御系の構築と安定性について検証を理論・シミュレーション・実機を用いて行う。

まず従来の制御系と根本的な構造が違うため、まったく新しい方法を考案する必要がある。そこで、この理論的な問題を解析し、制御系を設計していく。また、これらの制御系の検証には、矢状面での片脚での立脚運動の限定的な状況から開始し、その後、両脚立ち、空間での運動など拘束条件を緩和していくことで、実行しやすくする。

制御系の構築方法としては、最初に片脚でのバランス制御系を構築する。その後、拘束条件の一般化、自発的（次の踏み変え位置が計画できる場合）・他動的（次の踏み変え位置が計画できない場合）な踏み変え運動を行うために、バランスを保ちながらも踏み変えが可能な制御系の構築を行う。この制御法を動的な方法に拡張することで動歩行を実現する。各制御系の有効性はシミュレーションと二足歩行ロボットによる実機実験により検証していく。

4. 研究成果

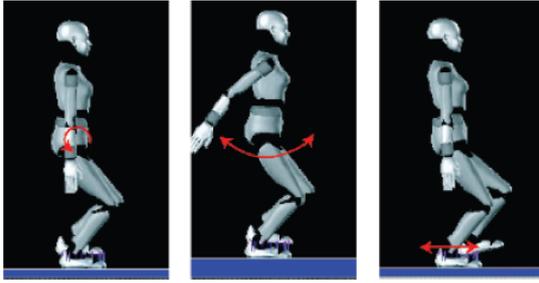
受動性に基づく制御方法により二足歩行ロボットのバランスを制御する方法とその際に必要な上体の姿勢推定法に関する研究を行った。

二足歩行ロボットは足の設置部分に駆動力を持たないため、本質的に劣駆動機構となる。そのため、この劣駆動性に対する対処方法が必要となる。そこで、制御系の設計を2段階に分け、劣駆動系であっても安定にバランス制御を実現できる方法を提案した。

まず、最初の段階では、片脚立ちしている二足歩行ロボットに対して、どこにも固定されていない上体への直接的な制御入力があると仮定することで、系を完全駆動系とみなす。この仮定の下で、重心の位置、状態の姿勢および遊脚の姿勢を制御することのできる制御系を受動性に基づき設計した。

次に、この制御系を劣駆動系の制御入力に作り直すための変換方法を開発した。この変換方法は、上記の完全駆動系で生成されるはずだった制御入力と新たに作られた劣駆動系の制御入力の間で交換される機械的仕事が等価になる特殊な物理変換となっている。この変換により、もともとの制御系の役割を保存することができる。この時、足裏と地面の接地拘束をうまく利用することで、2足歩行ロボットが劣駆動系であっても受動性を満足し、システムを安定化できることを理論的に示し、シミュレーションによりその有効

性を示した（下図）。



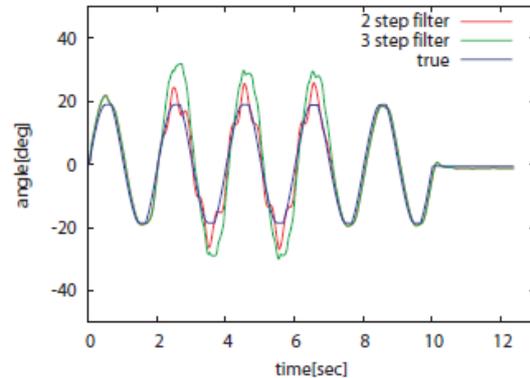
上記の方法は、片脚立ちしているときに限定されている。両脚立ちに拡張するためには、複数の拘束条件がシステムに作用する場合でも、この制御系が拡張できることを示す必要があった。そこで、両脚立ちの場合、それぞれの脚の接地面内部にある任意の点はすべての接地面が構成する凸集合内に存在することを利用し、複数の拘束条件を別の代表的な拘束点により表現し、その点でのパワー保存変換を用いることでうまくいくことを理論的に示した。また、シミュレーションにより、その有効性を確認した。特に摩擦力が保持できる限り、坂道などの上でも足裏の力センサからの入力がなくとも安定化できることが分かった。

次に、これらの制御系の拘束条件が次々に変化させるための制御則の設計をおこなった。これは、足の踏み変えには不可欠な技術であり、歩行技術の基礎となる。この方法を実現するために、二つの別々の拘束条件で設計した制御系を用意し、その間を連続的に変わるような関数を掛け合わせることでうまくいくことをシミュレーションで確認した。この方法は、拘束状態が連続的に変化することに相当する。これらの制御系を平面の2足歩行ロボットに実装し、うまくいくことを確認した。

このような2足歩行ロボットのバランスが点接触するような場合において解析を行った。この結果、点接触では、パワー保存変換がうまく働かないことを示した。また、変換の際に、エネルギー損失が生じ、効率が悪くなることをシミュレーションにより示した。

次に、この制御系を実現するときに重要となる上体の姿勢安定化する方法についての研究を行った。これは、姿勢を推定するため加速度センサ、ジャイロセンサ、磁気センサにより重力ベクトルと地磁気ベクトルを推定することでロボットの姿勢を推定する方法である。加速度センサは主に重力を推定するのに用いられるが、ロボットが並進するときに生じる加速度が重力ベクトルの推定に及ぼす影響が問題となる。そこで加速度の大きさにより、重力ベクトルの推定法を切り替える方向を提案し、その実験的検証を行った。この結果より、加速度の大きさによる切り替

えの方法は、大きな並進加速度が働く場合にフィルターのかけ方を変えることで、姿勢の推定値を改善できることを示した（下図）。



この研究課題では、提案手法が安定に動作することが確認できた一方で、現在の接地状態でバランスが大きく崩れた場合に、踏み変えによってバランスが崩れることを回避する問題については、解決されていない。近年、軌道計画に基づく方法では、キャプチャーポイントといわれる新しい概念でこのための解決方法を提案しており、これに相当する新しい方法を考える必要がある。また、現在のところ、提案手法では、準静的な歩行しか実現できておらず、これを動的な歩行にするための手法を考える必要がある。

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）

〔学会発表〕（計7件）

①発表者：笈優希、発表題目：平面二足歩行ロボットによるバランス制御の実験的検証、学会名：計測自動制御学会 SI 部門講演会、発表年月日：2012年12月20日、発表場所：福岡国際会議場（福岡県）

②発表者：小澤隆太、発表題目：Passivity-Based Symmetric Posture Control and the Effects of Mass Distribution and Internal Impedance on Balance、学会名：The 2012 IEEE Int. Conf. on humanoids、発表年月日：2012年11月30日、発表場所：大阪産業創造館（大阪府）

③発表者：林俊佑、発表題目：慣性センサを用いた姿勢推定における誤差関数の影響、学会名：計測自動制御学会 SI 部門講演会、発表年月日：2011年12月25日、発表場所：京都大学（京都府）

④発表者：石崎順也、発表題目：二足歩行ロボットのバランス制御における重心モデル

の影響、学会名：計測自動制御学会 SI 部門講演会、発表年月日：2011 年 12 月 23 日、発表場所：京都大学（京都府）

⑤発表者：小澤隆太、発表題目：平面受動歩行における上体の影響について、学会名：計測自動制御学会 SI 部門講演会、発表年月日：2011 年 12 月 23 日、発表場所：京都大学（京都府）

⑥発表者：小澤隆太、発表題目：受動性に基づく二足歩行ロボットの対称型バランス制御、学会名：日本ロボット学会学術講演会、発表年月日：2011 年 9 月 9 日、発表場所：芝浦工業大学（東京都）

⑦発表者：小澤隆太、発表題目：Passivity-Based Balance Control for a Biped Robot、学会名：Inter. Conf. on Robotics and automation、発表年月日：2011 年 5 月 10 日、発表場所：上海（中国）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ritsumeai.ac.jp/~ryuta/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小澤 隆太 (OZAWA RYUTA)

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号：40368006