

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26730135

研究課題名(和文) 軟弱地面モデルに基づくヒューマノイドロボットの歩行制御

研究課題名(英文) Walking control of humanoid robots based on a loose soil model

研究代表者

小水内 俊介 (Komizunai, Shunsuke)

北海道大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：40708004

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、二足歩行ロボットが砂のような軟弱地面上で転倒することなく歩行を継続するための歩行安定化技術の開発を自指す。軟弱地面の動的変形挙動を表すモデルを構築し、軟弱地面歩行シミュレーションを可能とした。反復的なシミュレーションと実験から、軟弱地面歩行における安定性指標を複数見出した。小型ヒューマノイドロボットを用いた砂上歩行実験において、開発した歩行安定化制御システムにより数十歩におよぶ歩行を転倒することなく完了した。

研究成果の概要(英文)：An objective of this research is to develop a walking stabilization technology to keep walking on loose soil like sand without falling for bipedal robots. A physics model describing dynamic deformation behavior of loose soil is constructed and enables walking simulation on loose soil. From repeated simulations and experiments, several stability indices in walking on loose soil are founded. In walking experiment on sand using a small humanoid robot, developed walking stabilization control system completes several tens of steps walking without falling.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ヒューマノイドロボット 軟弱地面 二足歩行 歩行制御

1. 研究開始当初の背景

近年、ロボットが人間の替わりとして屋外作業を実施する機会が増えてきた。現在の屋外作業用のロボットは、車輪式や履帯式の移動台車に作業用アームを設置した形態のものが主で、一定の成果を収めている。しかし、依然人間にしか行けない場所やできない作業が多く、ロボットによる屋外作業を実用レベルで実現するためには、ロボット技術に更なるブレークスルーが求められる。

車輪式や履帯式の移動ロボットは大きな占有面積（地面に対する機体の投影面積）によって高い安定性を発揮する。一方、小さな占有面積で人間と同様の作業能力が期待できるロボットとして、二脚のヒューマノイドロボットが挙げられる。ヒューマノイドロボットの研究は、“移動”という点に限ってもかなり高度なデモンストレーションを見ることができるようになった。移動性能の向上に後押しされて、商業施設や病院など屋内におけるヒューマノイドロボットの利用が実現されつつある。

従来、ヒューマノイドロボットは過酷な労働環境において人間の代替となることが期待されてきた。土木、建設、災害救助などの現場では、砂や土などの路面状況が想定される。また、昨今では月面探査へのヒューマノイドロボットの利用も議論されている。しかし、これまでの研究では、ヒューマノイドロボットの運用は固い床の上に限定されてきた。屋外での作業を実現するためには軟弱地面における歩行能力が不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、二足歩行ロボットが砂のような軟弱地面上で転倒することなく歩行を継続するための歩行安定化技術を開発する。これまでの二足歩行技術は、変形しない固い床の上で十分な反力・摩擦力が得られることを前提としており、軟弱地面において二足歩行を継続することは困難であった。本研究で開発する歩行安定化技術は、軟弱地面における沈下量や接地圧の動的な変化をモデル化し、足の接地状態を推定しながら機体の姿勢を復元するような歩行を実現する。

3. 研究の方法

二足歩行ロボットの軟弱地面歩行を実現するために、実機実験を重ねるだけでなく、軟弱地面における運動を模擬できる動力学シミュレータを開発した。再現性と安全性を備えた反復的な数値実験と実機実験において、主に三つの開発要素：“軟弱地面の動的変形挙動を表す力学モデル”、“軟弱地面における歩行の安定性指標”および“安定化制御戦略”を設定した。以下、各要素について詳述する。

(1) 軟弱地面の動的変形挙動を表す力学モデル

軟弱地面を非線形特性のあるばね-ダンパ系としてモデル化することで、動的な力学的挙動を表現できる数理モデルの構築を試みた。ばね、ダンパおよび塑性要素の要素数や配置、線形/非線形特性が異なるいくつかのモデルを検討した。モデルパラメータを同定するため、想定機体の一つ（等身大ヒューマノイドロボット）自体とその足を模擬した载荷試験装置（図1,2）とによって衝撃载荷試験を行った。足あるいは試験平板にはマーカを取り付け、光学式モーションキャプチャシステムによりその沈下挙動を記録した。

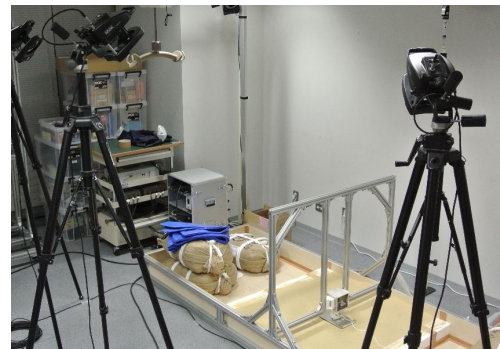


図1 衝撃载荷試験システム

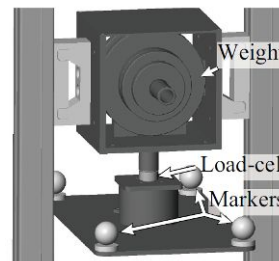


図2 試験平板

(2) 軟弱地面における歩行の安定性指標

当初、足の沈下量や滑り量、接地圧分布などを計測または推定することで安定性指標を見出そうと試みた。これらの情報は結果の考察には有益であったが、標準的な機体搭載センサの情報と同様に転倒リスクの判断には遅い傾向にあった。そこで、各種センサ情報や制御アルゴリズムの計算途中の値、誤差情報の変化率や累積値など様々な観点から転倒の兆候を表す指標を見出した。

(3) 軟弱地面における歩行安定化制御戦略

歩行制御は、基本となる歩行動作を生成する機能と、(2)で見出した安定性指標に基づいて基本動作を変更・修正する機能とから成る。なにを安定性指標や転倒リスクとするかで変更・修正すべき動作は異なる。そこで、複数の安定性指標に対応する複数の動作変更・修正手法を提案し複合的に実装した。また、提案手法との親和性から、歩行動作生成は従来技術を活用し“次の一步の動作を変更可能な歩行動作生成手法”と“機体重心を動

かすことでバランスをとる安定化制御”を採用した。転倒を常態とする反復的な実験を安全かつ効率的に行うため、まずは小型ヒューマノイドロボットを用いて砂上における歩行実験を行った(図3)。

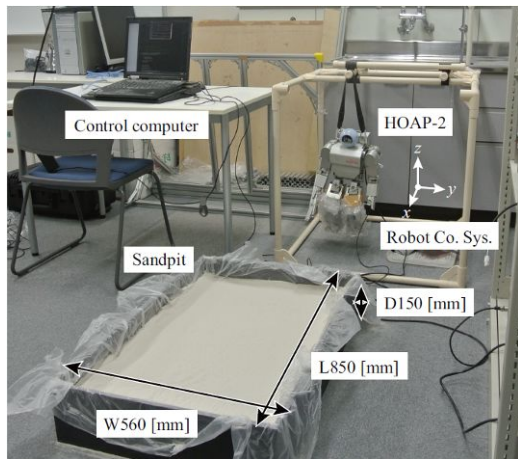


図3 砂上歩行実験システム

4. 研究成果

(1) 軟弱地面の動的変形挙動を表す力学モデル

衝撃载荷試験により、足の衝撃的な着地から全体重が載る片足支持期までの沈下量の過渡応答を得た。この実験データに対して力学モデル(非線形ばねとダンパを並列接続したフォートモデル)の出力の追従性が最大になるように、モデルパラメータを設計変数として最適化計算を行うことで、所望の地盤特性値を得た(図4はその一例)。このモデルをこれまで開発してきた軟弱地面歩行シミュレータに導入し、制御戦略の構築に活用した。衝撃载荷試験からパラメータ同定までの流れを確立したことで、異なる地盤材料でのシミュレーションも再現しやすくなる。

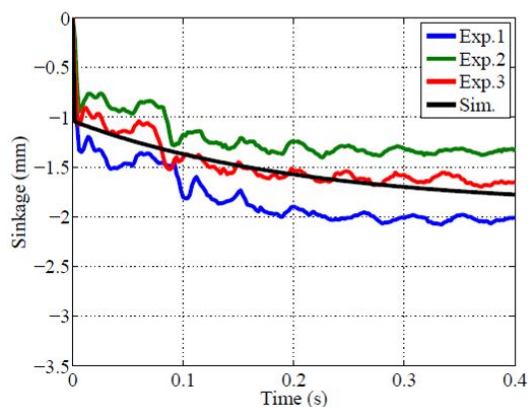
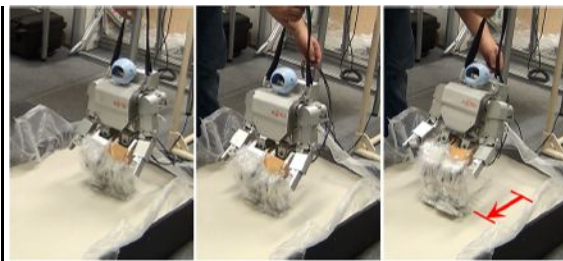
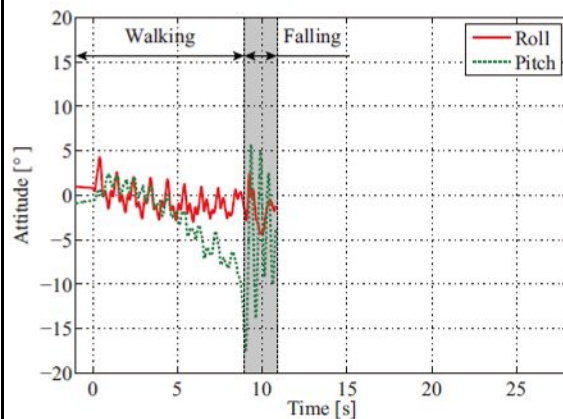


図4 動的沈下モデルと実測の沈下挙動

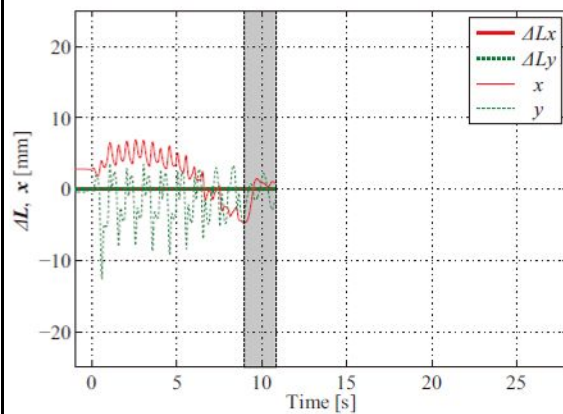
- (2) 軟弱地面における歩行の安定性指標
 - (3) 軟弱地面における歩行安定化制御戦略
- 従来制御による砂上歩行実験(図5)を通して転倒の兆候をあらわす指標を見出した。



(a) Snapshot



(b) Attitude angle



(c) Landing position modification and CoM trajectory

図5 従来制御による砂上歩行実験

従来の安定化制御における重心位置修正量の変化はその代表であり、それに応じて遊脚の踏み出し量を調節することで足の着地位置を変更し、機体姿勢を復元する歩行安定化戦略を構築した。これは単純な比例計算ではなく、転倒の兆候の履歴を考慮して調節量を決定することで、一步程度の短期間だけでなく長期的に安定な歩行が可能となる。

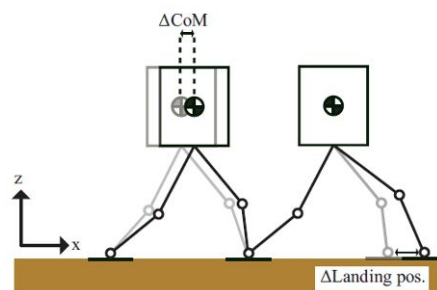
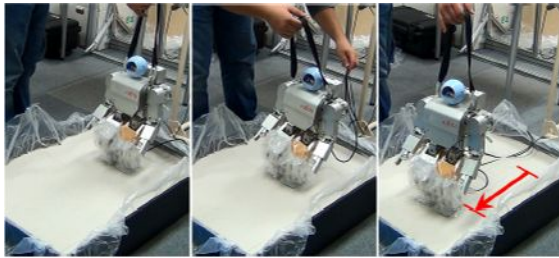
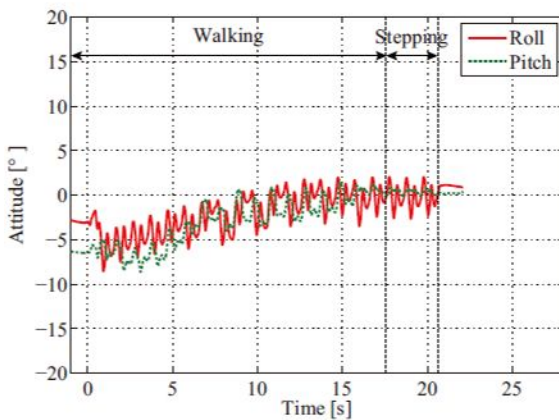


図6 重心移動に応じた着地位置変更

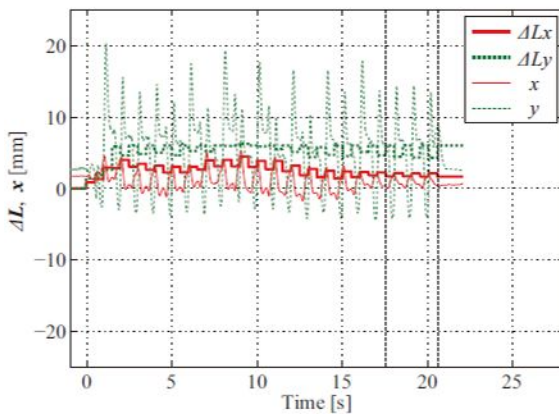
図7に示すように、実機実験において数十歩におよぶ歩行を転倒することなく完了し、その過程では転倒の兆候に応じて足の着地位置が変化することで機体の進行が不規則に変化する適応的な挙動を示した。また、運動状態が大きく変化する歩行開始や停止も安定に達成しており、構築した制御系が歩行全体にわたり効果的であることが示された。さらに、図8に示すように同手法は固い地面でも破綻することなく有効であった。



(a) Snapshot



(b) Attitude angle

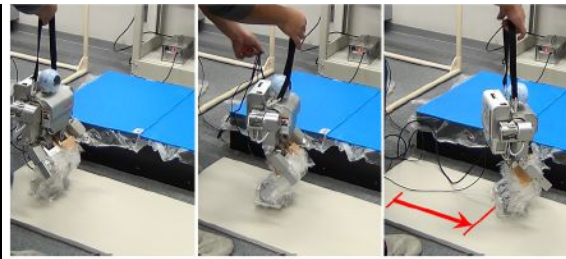


(c) Landing position modification and CoM trajectory

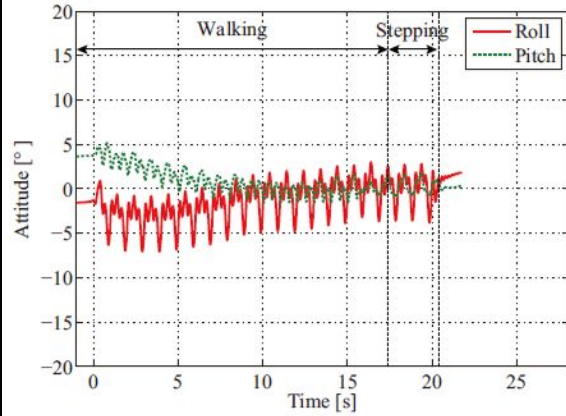
図7 提案手法による砂上歩行実験

旋回時には内側に転倒する傾向があったことから、接地圧中心の偏差の累積値を指標として閾値を超えたときに2歩分の逆旋回を挿入することで傾斜の復元を図った。これにより、図9に示すように90 [°]の旋回歩行を転倒することなく達成した。

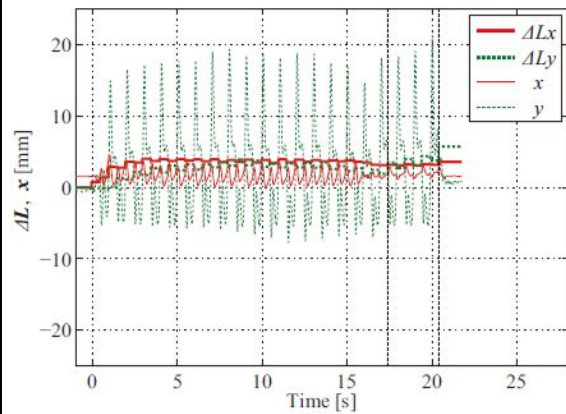
本研究で開発した歩行安定化技術により、歩行の開始や停止、直進や旋回が長期間安定



(a) Snapshot



(b) Attitude angle



(c) Landing position modification and CoM trajectory

図8 提案手法による剛体板上歩行実験

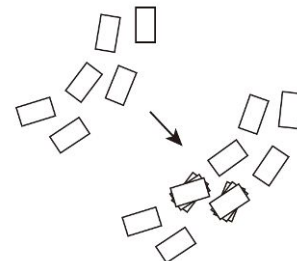
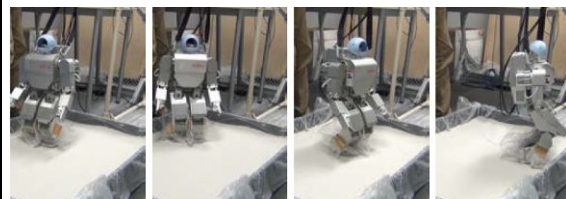


図9 逆旋回の挿入による砂上旋回歩行実験

して継続できることを実験的に示し、本研究の目的を達成した。

今後は、異なる機体サイズや地盤材料に対して普遍的に適用可能な軟弱地面モデルおよび歩行安定化技術の拡張、未知の地盤材料における制御パラメータの自律的獲得など、よりフィールド実験を志向した技術を実現する。

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)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

小水内俊介, 小貫督仁, 吳孟鴻, 辻田哲平, 近野敦, 軟弱地面における二脚ロボットの歩行安定化制御, 日本ロボット学会誌, 査読有, (掲載予定).

〔学会発表〕(計 3 件)

齊藤直矢, 小貫督仁, 小水内俊介, 辻田哲平, 近野敦, 二足歩行ヒューマノイドロボットの軟弱地面上旋回歩行, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, ビッグパレットふくしま(福島), 2017.5.10 13, 1A1-P11.

小貫督仁, 小水内俊介, 辻田哲平, 近野敦, 着地位置制御によるヒューマノイドロボットの軟弱地面上姿勢安定化, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, パシフィコ横浜(神奈川), 2016.6.8 11, 2A1-12a7.

小貫督仁, 小水内俊介, 近野敦, ヒューマノイドロボットの不整地歩行のための軟弱地面動的沈下モデル, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 富山市総合体育館(富山), 2014.5.25 29, 3A1-C07.

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 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 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
<http://scc.ist.hokudai.ac.jp/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小水内 俊介 (KOMIZUNAI, Shunsuke)
北海道大学・大学院情報科学研究科・助教
研究者番号: 40708004

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()