

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870819

研究課題名(和文)多様な路面性状に対する2足歩行ロボットの適応歩行に関する研究

研究課題名(英文)Study on Biped Walking Robot Adaptable to Various Road Profiles

研究代表者

姜 賢珍 (KANG, HYUN-JIN)

早稲田大学・理工学術院・招聘研究員

研究者番号：70625235

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：多様な路面性状に対する2足歩行ロボットの適応歩行を実現するため、実環境化に存在する様々な路面の特性を調査し、剛体路面および軟弱路面など路面が再現できるように路面の特徴パラメータを決め、モデル化を行った。

バネとダンパを用いてX、Y、Z軸とRoll、Pitch、Yaw回転軸の3次元路面立体モデルを構築して、これらのパラメータを測定する路面性状測定装置を開発した。路面のモデルを用いて、路面の変形に応じて足首角を修正する手法で凹凸の硬い路面だけではなく、35mmのスポンジでの歩行に成功し、また床半力を調節する手法で密度 $22 \pm 2 \text{ kg/m}^3$ の極めて柔らかい50mmのスポンジでの歩行に成功した。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of realization of biped walking robot adaptable to various road profiles, we investigated the characteristics of various roads in real environment and modeled them formulating reproducible road profile parameters of hard or soft road, etc. Using spring and damper, we materialized three-dimensional road models that have axes of X, Y, Z and rotation axes of Roll, Pitch, Yaw and developed road profile measuring equipment in order to measure the parameters.

We realized walking on 35[mm] sponge as well as walking on uneven hard road surface with a new method of modifying foot joint angle according to road deformation of the road models. Finally, we succeeded in walking on 50[mm] sponge which is very soft and has density  $22 \pm 2 \text{ [kg/m}^3]$  as using the method of controlling the ground reaction force.

研究分野：ロボット工学

キーワード：軟弱路面 不整地路面 2足歩行 路面モデル 路面性状 路面性状測定装置 適応歩行 ヒューマノイドロボット

## 1. 研究開始当初の背景

(1) これまでロボットは様々な産業分野において活躍してきた一方、限られた場所で与えられた単純なタスクを行うことにとどまらなかった。

今後ロボットは人間との共同作業や人命救助など多様な分野での活躍も期待されている。

特に人間と同様な移動形態をとることから環境による制約が少ない2足歩行は人間の生活環境で活躍するロボットとして非常に有効であると考えられる。そのために、2足歩行ロボットは国内の(株)本田技研工業の「ASIMO」をはじめ、(独)産業技術総合研究所の「HRP」シリーズ、ドイツ・ミュンヘン工科大学の「JOHNNIE」、韓国・KAISTの「KHR」シリーズなど、国内外問わず多くの企業や研究機関において研究が進められており、実環境におけるモビリティなど様々な分野での活躍が期待されている。

それに満たせるためには、2足歩行ロボットが実環境化において安定した歩行が実現可能であることが必要である。

近年、ロボットの2足歩行技術は飛躍的に向上しているが、現時点ではまだ実用的な技術が確立されているとはいえない。

(2) 人間の生活空間である住環境には平坦路面だけでなく不整地路面も存在しているが、広瀬[1]は不整地を「凹凸型不整地」、「脆弱型不整地」、「狭隘型不整地」、「立体型不整地」の4つに分類できるとしている。人間の住環境には脚接地面に変形を伴わない剛体路面だけでなく、「脆弱型不整地」のような路面形状が変形する軟弱路面も多く存在する。

砂地や草地、雪道のような軟弱路面上を移動する研究としては、様々な移動機構で検討がなされている。例えば、単純なクローラ機構では軟弱路面との間に滑りを生じるため、脚とクローラのハイブリッド機構を用いたロボットが開発されている。また、多脚ロボットでは、軟弱路面での制御アルゴリズムや接地面認識センサが提案されている。2足歩行ロボットに関しては、その先行研究例は少なく、小水内ら[2]がロボットの動作シミュレーションのための接地力学解析を行っている程度である。

従来、2足歩行ロボットはZMP (Zero Moment Point) という路面上において2足歩行ロボットの各部の重力および慣性力によるモーメントがゼロになる点を制御対象として歩行安定化を目指す例が多い。

しかし、軟弱路面では反力を発生させようとしても、脚接地面が変形してしまうため、ZMPを制御し歩行を安定化することは困難であると予想される。

また、路面のパラメータを制御として利用できる工学的な路面のモデルが定義されていない。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では多様な路面が持っている特性を大きく弾性・粘性・塑性の3項目で表わす路面モデル化を行い、それらのパラメータを測定可能な路面測定装置を開発する。そこから得られたパラメータを2足ヒューマノイド・ロボットに実装することで軟弱路面での歩行が可能になると期待される[3][4]。また、砂地などの脚接地面が変形する路面において人間の歩行運動を計測し、モデル化したひとの歩行戦略をロボットに実装することで、2足歩行ロボットの軟弱路面における歩行実現を目指す。

まず、制御に利用可能な工学的な路面のモデルがないことに着目し、最初は路面のモデル化を行うことから始める。従来提案したモデルは特性によって弾性・粘性・塑性で分類し、3次元で表していたが、それらのパラメータを再現するのが混乱であったため、第一歩として除荷後に形状が元に戻り、硬さが一般的な平坦な軟弱路面を対象とし、路面のパラメータを合成ばね定数を  $k$  とした。しかし、それは測定する路面組織の分布や、局所荷重による変形の違いに関して模擬が不十分のため、砂地路面などにおけるモデル検証を行い、最初検討した摩擦・滑りおよび塑性変形を模擬したモデルも再現し、工学的な路面モデルを確立する。また、それらのパラメータが再現できるように開発した路面測定装置の改良を行い、弾性のばね定数  $k$  と粘性の定数  $c$ 、摩擦の定数  $\mu$  が取得できるようにする。現在合成ばね定数  $k$  しか制御に利用していないが、上記の3つのパラメータをすべて利用した制御手法をロボットに実装し、軟弱路面における適応歩行を実現する。その上で、脚接地面に変形を伴う路面においてひとの歩行運動を計測し、その解析結果からひとの歩行戦略をモデル化し、それをロボットに実装する。それらを統合し、実装したロボットの歩行実験を通して、モデル化の妥当性および新制御方法の有効性を検証する。

(2) 本研究は、従来の関連研究に比べ、以下の意味で独創的である。

一点目には、軟弱路面における2足歩行ロボットの歩行に関しては、先行研究の例は少ないという点より独創的である。多くの2足歩行ロボットの研究は変形しない剛体路面における歩行に限っている。我らが開発してきたWABIAN-2R(WAseda BIpedal humANoid No.2 Refined)も例外ではなく、剛体路面における安定した歩行に集中してきた。その結果、最大の高さ 15[mm]と傾斜 8[deg]が混在する屋外路面での歩行に成功したなど歩行能力を高めた。これから変形しやすい軟弱路面における歩行にも成功すると歩行能力がさらに高性能になると期待される。

二点目には、制御に利用できる工学的な路面のモデルがない点から二度目の独創的が考えられる。土木分野では路面を分類する方

法は様々であるが、それを工学に利用するには大きな問題がある。路面の特性を活かした制御を開発するためには路面の特徴パラメータが必要だが、まだ工学で使えるモデルがない。そこで、実環境下に存在する剛体路面および軟弱路面の全路面が再現できる路面のモデル化を行う。それぞれの細かい部分は排除し、すべての路面が持っている共通的な特性である弾性・粘性・塑性で分類・モデル化を行う。路面の工学的モデルに関する理論が確立されるとこれからの2足歩行ロボットの研究に貴重な参考になると期待される。なお、軟弱路面におけるひとの歩行運動を定量的に解明し、2足ヒューマノイド・ロボットを利用するという点で独創的である。軟弱路面におけるひとの歩行運動を模擬するという事は、運動性能を人に近づけられる可能性を秘めているため、人間の住環境での応用の幅がより広くなり、結果的に人間のパートナーとしてのロボットを実現する際にも、本研究のアプローチは重要になると考える。

### 3. 研究の方法

(1) 従来に考案した路面のモデルは圧縮弾性やせん断弾性といった足底組織の機械的特性を模擬した合成ばねであった。しかし、これは足底全体での着地を想定したもので、測定する路面の組織の分布や、局所荷重による変形の仕方の違いに関して模擬が不十分のため、砂地路面などにおけるモデル検証を行い、摩擦・滑りおよび塑性変形を模擬したモデルも含めるように再検討していく。

(2) これまで歩行に関して接地面積の大きい足部でしか行われていないため、軟弱路面では接地面積が小さいことから足部形状が原因で不安定となるのではないかと思われ、路面測定装置の足部を付け替えて、路面特性の検証を行う。従来開発した路面性状測定装置は将来的に WABIAN-2R に装着し、歩行を実現できるように WABIAN-2R の足部と同等の可動域と運動性能を持ち、センサ部の位置と速度を計測できるように制作した。また、Roll, Pitch 各回転軸を計測するため足底を4分割し、各々力センサを付着した。しかし、これは路面のモデルが確立できていないことに従って、まだz軸方向の力しか計測できない問題があった。そこで再検討した路面のモデルを基に回転軸周りまで測定可能にするため、改良する必要がある。また、摩擦項に関しては考慮していないため、そちらも改良していかなければならない。

(3) 軟弱路面での人間の歩行動作をモーションキャプチャシステムと床反力計で計測する(図1)。その際、直線運動だけでなく旋回運動や障害物回避など様々な動作について計測を行う。軟弱路面としては、スポンジなどの屋内にあるものから砂地などの屋外にあるものを予定している。



図1. 人間の歩行運動の計測

(4) 現状の制御では脚接地面における路面の変形に応じて変形した足首の姿勢角を修正する方法で変形量の少ない高さ 35[mm]のスポンジでの歩行に成功した。しかし、この制御ではそれ以上の高さの路面や変形量の大きい路面では重心を補償しきれない問題があった。変形量の大きい目標路面における歩行時の転倒について検証を行った結果、矢状面方向の姿勢の崩れに制御が対応しきれないことや遊脚時の路面とのクリアランス不足による路面との引っかかることが分かった。そこで極座標式遊脚軌道修正制御との統合で姿勢の崩れを、パターンジェネレータ上で足先軌道を改良しかつ足上げ高さの増加させたパターンの作成で、クリアランスの不足を解決する。

また、解析した軟弱路面におけるひとの歩行運動のモデルを2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R に実装する。この際に、モデル化したものがロボットに実装できないという問題が起こることを防ぐため、モデル化に関しては細心の注意を払い研究を進める。

(5) まず、従来に開発した軟弱路面における適応制御を2足歩行ロボットに実装し、評価実験を行う。そして、ひとの歩行戦略のモデルを実装した2足歩行ロボットを用いて評価実験を行う。各制御の有効性を確認した上で、二つの制御を統合し、検証実験を行う。歩行が実現されなかった場合、ロボットの挙動とひとの歩行の解析結果を比較し、ひとの歩行運動のモデルに修正を加える。軟弱路面における歩行が実現されたら、ロボットを屋外に持って行って実際の多様な路面における歩行実験を行い、考案した路面のモデルと開発した路面適応制御の有効性を確認する。

### 4. 研究成果

(1) まずは実環境下に存在する多様な路面に対して様々な路面の特性を再検討した。制御によく利用される特性である弾性と粘性

の特性に、一度変形してしまうと元に戻らないのを表現する塑性を含め、大きく3つの特徴で分類し、もう一度モデル化を行った。

一般に、物質の粘弾性を扱うレオロジー分野では、粘弾性を複数持つ力学モデルとしてばねとダンパがよく用いられる。そこで、ばねとダンパを組み合わせたモデルを構築した。圧縮力とその量および速度を分かると各係数が計算可能だと考え、ばねとダンパを並列に配置したモデルに、ダンパをもう一層重ねることによって再現できるようにした。X, Y, Z 軸と Roll, Pitch, Yaw 回転軸に対しても考慮し、最終的に3次元の路面立体モデルを構築した(図2)。

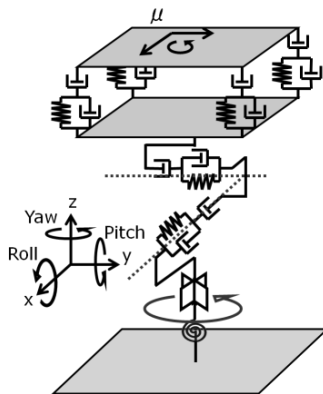


図2. 路面の3次元モデル

また、再検討した路面の力学モデルの検証や軟弱路面における適応歩行制御に導入する際に必要であるパラメータの測定をするために、路面性状測定装置を開発した(図3)。2足歩行ロボットの足部にある6軸力覚センサを中心にX, Y 軸方向に各々2等分し、計4つのセンサを装着した。ロボットが歩行する際に、足が受ける力を基に目標耐荷重を800[N]と設定した。Z 軸方向に力が加える時、回転モーメントを防ぐため、リニアブッシュとガイドラインをつけた。足型センサにA/D変換回路基盤を付着しデータを転送する際、ノイズの影響を小さくした。路面性状測定装置は全長800[mm] x 580[mm] x 720[mm]、重量200[kg]である。

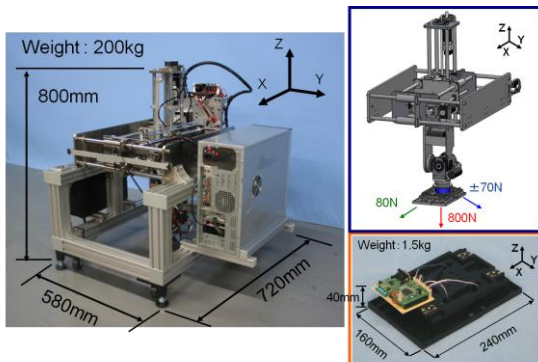


図3. 路面性状測定装置

(2) 従来開発した脚接地面における路面の変形に応じて変形した足首の姿勢角を修正する制御手法を用いて、高さ35[mm]、密度 $22 \pm 2$ [kg/m<sup>3</sup>]のウレタンスポンジでの歩行に成功したが、この制御では35[mm]以上の高さの路面や変形量の大きい路面で重心を補償しきれない問題があった。

そこで、軟弱路面における人の歩行運動について計測・分析を行った。モーションキャプチャシステムと床反力計を用いてスポンジや人工芝など確保しやすい軟弱路面上における直線運動の他、旋回運動や障害物回避など様々な動作の計測を行った。軟弱路面で歩く際に体がどんな姿勢をするのか、また脚は路面に対してどう適応するのかなど人の動作を分析した人の歩行戦略と路面のモデルを用いた新たな制御手法を開発し、検証実験を行い、有効性を確認した結果、高さ100[mm]、密度 $150 \pm 30$ [kg/m<sup>3</sup>]のやや柔らかいウレタンスポンジ上での歩行に成功した。

また、路面のモデルを用いて凹凸のある個体路面での歩行にも成功し、考案した路面のモデルの有効性を確認した。

最後に、軟弱路面における人の歩行戦略とモデルを用いて、路面の変形に応じて変形した足首の姿勢角を修正する方法に床反力を調節する新たな制御手法を統合し、さらに高さ50[mm]、密度 $22 \pm 2$ [kg/m<sup>3</sup>]の極めて柔らかく厚いウレタンスポンジにおける安定した適応歩行に成功した(図4)。

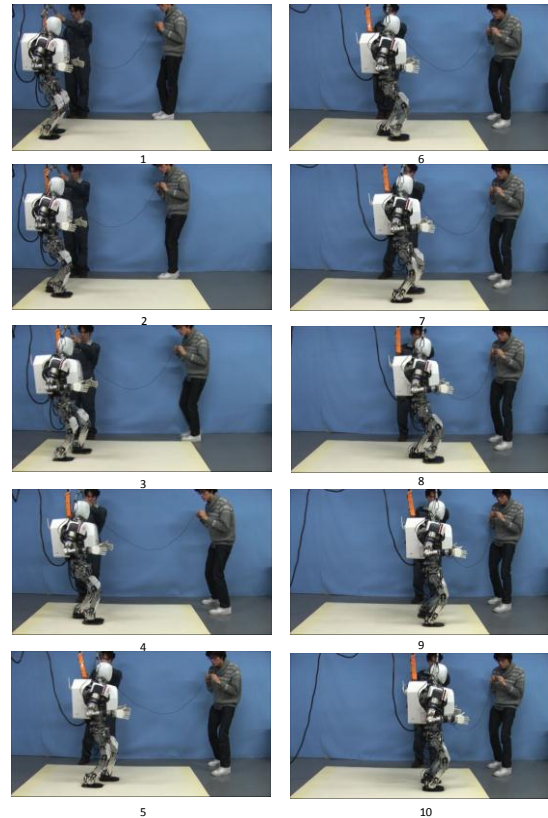


図4. 高さ50[mm]、密度 $22 \pm 2$ [kg/m<sup>3</sup>]のスポンジでの適応歩行

今までに開発してきた軟弱路面における安定した制御法および路面のモデル、路面性状測定装置などの研究成果をまとめ、これから国内・外学会への論文投稿また、発表を行う予定である。また、本研究のオリジナルティや希少価値を高めることと共にロボットの歩行研究に貢献するよう、積極的に成果を広報する。

<引用文献>

- [1] 広瀬茂男, “屋外で活躍する移動ロボットの機構設計,” 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 7, pp. 904-908, 2000.
- [2] 小水内 俊介, “2脚ロボットの軟弱地面における接地力学解析,” 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2D1-4, 2010.
- [3] 姜賢珍他, “2足歩行ロボットの軟弱路面での歩行実現に向けた基礎的研究,” 日本ロボット学会学術講演会予稿集, No. 2D2-1, 2010.
- [4] 姜賢珍他, “人体運動シミュレータとしての2足ヒューマノイドロボットの開発(第15報:歩行解析に基づく軟弱路面歩行安定化制御と軟弱路面での歩行実現),” 日本ロボット学会学術講演会予稿集, No. 4K1-5, 2012.

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 0 件)

[学会発表] (計 1 件)

- ① Kenji Hashimoto, Hyun-jin KANG et al., "Terrain-Adaptive Biped Walking Control Using Three-point Contact Foot Mechanism Detectable Ground Surface," Proceedings of 2014 XX CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practical of Robots and Manipulators (ROMANSY 2014), pp. 255-263, Moscow, Russia, June 24, 2014.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

姜 賢珍 (KANG, Hyun-jin)

早稲田大学理工学術院・招聘研究員

研究者番号: 70625235