

博士論文審査報告書

論文題目

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

Study on Biped Walking Robot
Adaptable to Various Road Profiles

申請者

姜	賢珍
Hyunjin	KANG

生命理工学専攻 バイオ・ロボティクス研究

2013年 2月

近年、多くの機関や企業でロボットに関する研究が盛んに行われている。その中でも脚式移動ロボットは移動面との接触状態が離散的な環境においても移動でき、固有な移動環境以外の想定していない環境においても適応的に移動することが可能である。特に2足歩行は、ロボットの進行軸方向の長さが短いため狭い場所での小回りが可能であり、自由度に対して占有面積が小さいという特徴から、狭い人間の住環境での運用に適していると考えられる。人間の住環境には平坦な路面だけでなく不整路面も存在している。しかし不整路面といっても、脚接地面に変形を伴わない剛体路面以外に、砂地や草地、雪道といった加重により脚接地面が変形する軟弱路面も多く存在する。

そこで本研究では、2足歩行ロボットの実用化につながる基礎研究として、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に、路面の力学的特性に基づいたモデル化とその制御法について明らかにすることを目的としている。具体的には、実環境に存在する様々な路面を調査し、工学的観点からモデル化することで、路面を分類している。そして、路面パラメータを取得可能な路面性状測定装置を開発している。剛体の不整路面における歩行に関しては路面検知可能なセンサ式足部機構と路面適応制御を開発し、提案手法を2足歩行ロボットに実装して歩行実験を通して評価している。軟弱路面における歩行に関しては路面のモデル化に基づいた歩行安定化制御を開発し、2足歩行ロボットに実装して行った歩行実験により評価している。

本論文は、以下に示す8章から構成されている。各章の要約を示す。

第1章では、序論として本研究の研究背景と目的、その意義と関連研究の動向について述べている。

第2章では、多様な路面の工学的モデルがないことから路面のモデル化について述べている。まず、土木工学、地盤工学などの路面に関する他分野での文献調査と共に実環境に存在する多様な路面について調査している。調査した路面を各々の特性に応じて「凹凸度」、「軟弱度」、「低摩擦度」の3つの軸で分類している。また、路面の変形を、路面の弾性と粘性によるものにとらえ、ばね・ダンパと滑りを考慮する摩擦要素を用いてモデリングし、並進変形だけでなく回転変形も考慮した6次元のモデルを提案している。特にRoll, Pitch軸周りの回転変形は、上下方向の並進変形を表現するばね・ダンパモデルを4つ並列に配置し、それぞれの変形量の差により表現している。

第3章では、第2章において述べた路面モデルのパラメータを同定可能な路面性状測定装置の開発および評価実験と考察を述べている。路面性状測定装置は路面に対し、6自由度の構成で、先端部には足部型力センサと6軸力覚センサを搭載している。足部型力センサは足底部を左右前後方向に4つに分割し、上下方向の並進変形とRoll, Pitch軸周りの回転変形が計測可能である。路面に対して力と速度を制御しつつ加重し、連続的な変形量を計測することで路面モデルの粘弾性パラメータが同定可能である。開発した路面性状

測定装置を用いて評価実験を行い，計測されたパラメータ値と考案した路面モデルの有効性を確認している．

第4章では，未知の凹凸路面に適応可能な不整路面適応制御の開発，およびその評価実験と考察について述べている．理論コンプライアンス中心移動量と実測コンプライアンス中心移動量を比較し，路面を検知する着地軌道修正制御と，姿勢角速度に応じてロボットの姿勢を修正する姿勢補償制御を開発している．提案手法を，2足ヒューマノイド・ロボット **WABIAN-2R** (**Waseda Bipedal Humanoid - No.2 Refined**) に実装し評価したところ，屋内で 20[mm] の段差を高さ方向に踏む歩行や，傾斜 5[deg] の屋外での歩行に成功している．

第5章では剛体の不整路面における適応歩行のための4点型路面検知足部機構の開発とそれを用いた不整路面適応制御の開発，およびこの評価実験と考察を述べている．ロボット足部の足底4隅の接地点に厚みを持たせることで，うねり路面に適応可能な構造としている．足底4隅は路面を検出する接触式センサも持ち，接地部の押し込み量を測定することで，路面との距離が測定できる．また，4つのセンサのうち3点を選択し，支持多角形を確保する．そして路面検知センサの値に応じてロボット足部が路面に倣うように着地軌道を修正する制御系を開発し，2足ヒューマノイド・ロボット **WABIAN-2R** に装着して，歩行実験を行っており，厚さ 20[mm] の擬似不整路面での歩行に成功している．さらに，最大の凹凸 15[mm] と傾斜 7[deg] が混在する屋外での歩行にも成功し，その有効性を確認している．

第6章では，第5章において述べた4点型路面検知足部機構の欠点を補う3点型路面検知足部機構の開発，およびこの評価実験と考察を述べている．4点型路面検知足部機構では，安定余裕が小さく歩行安定性が悪いという問題点があった．そのため3点型の足部機構にすることで，支持多角形は小さくなるが安定余裕を大きく取ることが可能な構造にしている．着地軌道の修正方法は4点型路面検知足部機構と同様であるが，路面に倣う際に滑落することを防ぐため，足部姿勢を修正する際の回転中心を足底中心点から路面との接地点に変更することで滑落防止を図っている．また，路面検知センサに関しても軸の硬度や耐摩耗性を向上させている．開発した足部機構と制御法を2足ヒューマノイド・ロボット **WABIAN-2R** に実装し評価実験を行い，5～20[mm] の段差が混在する擬似不整路面，および傾斜 7[deg] の擬似斜面での安定した歩行を実現し，歩行成功率の向上を確認している．

第7章では，脚接地面が変形する軟弱路面に適応可能な制御の開発，およびこの評価実験と考察を述べている．軟弱路面を歩行中は **ZMP** (**Zero Moment Point**) を制御することが難しいため，重心位置を安定化する制御法を開発している．具体的には，軟弱路面を一様なばね要素として仮定することで足部の6軸力覚センサの測定値から路面の変形量が推定できるため，片脚支持期には足関節でトルクを発生し，重心位置を安定化する．さらに，両脚支持期には各足の床反力を目標床反力に収束させるように脚長を修正し，重心位置

を安定化している．開発した制御法を2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R に実装し，高さ 50[mm]の極めて柔らかいウレタンスポンジ（密度： $22\pm 2[\text{kg}/\text{m}^3]$ ）上で歩行実験を行っている．なお，路面性状計測装置で路面パラメータを同定し，ウレタンスポンジのばね定数を 60[N/m]に設定している．歩行実験の結果，ウレタンスポンジ上での足踏み動作と前進歩行に成功し，提案手法の有効性を確認している．

最後に，第8章では，結論として以上の研究成果を総括している．また今後の展望として，路面モデルの確立と軟弱路面における歩行に対する問題点，2足歩行ロボットに実装されている制御の統合について言及している．

以上要するに，本論文では，まず2足歩行ロボットの実用化につながる基礎研究として，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に，力学的特性に基づいた路面のモデル化とそれぞれの路面に応じた制御法を開発することを目的としている．その成果として，住環境に存在する多様な路面をばね・ダンパ系でモデル化し，路面を分類している．そして，路面パラメータが取得可能な路面性状測定装置を開発している．また，剛体の不整路面における歩行に関しては路面検知可能なセンサ式足部機構と路面適応制御を開発し，提案手法を2足歩行ロボットに実装し，歩行実験を通して評価している．一方，軟弱路面における歩行に関しては路面のモデル化に基づいた歩行安定化制御を開発し，2足歩行ロボットに実装して行った歩行実験より軟弱路面における歩行に成功し，その有効性を確認している．最後に本論文において述べられている歩行制御法を実装することで，2足歩行ロボットに多様な性状の路面を歩行する能力を付加することが可能であることを主として報告している．

本研究の成果は，多様な路面性状に対する2足歩行ロボットの実用化に向けた基盤技術になるものである．この技術により，剛体路面のみならず軟弱路面など人間の様々な生活環境において移動が可能なロボットを提供することができ，人間共存型ロボットの実現に繋がるものである．本研究の成果は，ロボット工学，機械工学のみならず土木工学，地盤工学など幅広い工学分野の発展に大きく貢献するものであり，本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める．

2013年2月

(主査)	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	高西淳夫
	早稲田大学教授	博士（工学）（早稲田大学）	藤江正克
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	梅津光生
		医学博士（東京女子医科大学）	
	早稲田大学教授	博士（工学）（早稲田大学）	藤本浩志
	早稲田大学客員教授	博士（工学）（早稲田大学）	林憲玉