

# 博士論文概要

## 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

2012年 11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.特に,車輪式やクローラ式,脚式あるいはそれらを組み合わせたハイブリッド式など,様々な移動様式のロボットに関する研究や開発が活発に行われている.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.脚式といえは4足や6足などの動物のような多足ロボットが多いが,それに比べて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,2足歩行ロボットの多様な路面性状に対する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た.具体的には,実環境に存在する様々な路面を調査し,工学的観点からばね・ダンパ系でモデル化することで,路面を分類した.そして,路面パラメータを同定するために必要な路面を押し込む際の変位や速度,力などのデータを取得可能な路面性状測定装置を開発した.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て歩行実験を通して評価した.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た.

本論文は,以下に示す8章から構成されている.

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た.

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た.まず,土木工学,河川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を行った.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つの軸で分類した.また,路面の変形を,路面の弾性と粘性によるものととらえ,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次元のモデル化を行った.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することにした.

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た.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た．足部型力センサは2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R (Waseda Bipedal Humanoid - No.2 Refined) の足部と同サイズで，足底部を左右前後方向に4つに分割し，各々のばねの変形を光学センサで検出する光学式力センサを持ち，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同定が可能である．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のモデルの有効性を確認した．

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た．開発した不整路面適応制御は，着地軌道修正制御と姿勢補償制御からなる．着地軌道修正制御は歩行パターンから得られる理論コンプライアンス中心移動量と足部の力センサのデータから算出される実測コンプライアンス中心移動量を比較することにより路面形状を検知するものである．姿勢補償制御は，瞬間的な姿勢の崩れに対応するために，姿勢角速度も用いた PD 制御からなり，ロボット自身の振動によって発生する角速度を不要に検出しないように移動平均フィルタを通しノイズを抑制する方法も採用している．この制御法を，2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R に実装し評価したところ，実験室内において 20[mm]の段差を高さ方向に踏む歩行や，傾斜 5[deg]の屋外環境での歩行に成功した．しかし，段差や傾斜が混在するような路面においては，安定領域を大きく確保できず，歩行安定性が悪いという課題があり，ハードウェアの面からも工夫が必要であった．

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た．ロボットの足部が剛体平板であると，足底の中心部に突起物があるようなうねり路面に対応することが難しいが，4点型路面検知足部機構は足底4隅の接地点に厚みを持たせることで，そのようなうねり路面にも適応可能な構造である．足底4隅の接地点は路面高さを検出する接触式センサの役割も持ち，接地点の押し込み量をフォトリフレクタにより測定することで，路面との距離が測定できる．不整路面では4点すべてで接地することは原理的に不可能なため，4つのセンサのうち最初に路面を検知したセンサに応じて接地点を3点選択し，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歩行安定化制御系を開発した．開発した4点型路面検知足部機構を2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R に装着し，第4章での姿勢補償制御も併用して歩行実験を行ったところ，厚さ 20[mm]までのアクリル板を用いた擬似的な不整路面での歩行に成功した．また，最大の凹凸 15[mm]と傾斜 7[deg]が混在する屋外環境での歩行にも成功し，その有効性を確認した．しかし，着地軌道を修正する際に足底中心点周りに足部姿勢を修正していたため，接地点が不

整路面から滑落しやすく、さらに支持多角形における安定余裕が小さいため歩行成功率が低いという課題があった。

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た。4点型路面検知足部機構では、足底4隅の接地点から不整路面との接地点を3点選択していたが、設定ZMPから支持多角形の境界までの距離、すなわち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た。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、路面に倣う際に接地点が並進方向に変位を生じ不整路面から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た。また、路面検知センサで誤検知が生じることがあったため、センサ部の直動軸の材質を炭素鋼S45Cから軸受鋼SUJ2へ変更し、さらに高周波焼き入れ処理を施すことで軸の硬度や耐摩耗性を向上させた。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ったところ、5[mm]から20[mm]までの段差が混在する擬似不整地路面、および傾斜7[deg]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た。

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た。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た。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力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、重心位置を安定化することとした。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た。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]に設定した。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た。

以上のように、第2章、第3章で述べた路面のモデル化と路面性状測定装置により、路面の工学的モデルを立てた。また、第4章、第5章、第6章で述べた不整路面適応制御とセンサ式足部機構により、屋外に存在する凹凸路面で歩行できることを実証した。そして、第7章で述べた軟弱路面歩行安定化制御により、脚接地面が変形する軟弱路面での歩行に成功した。

第8章では、結論として以上の研究成果を総括した。また今後の展望として、路面のモデルの確立と軟弱路面における歩行に対する問題点と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た。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 姜 賢珍 印

(2013年2月 現在)

種 類 別	題名	発表・発行掲載誌名	発表・発行年月	連名者(申請者含む)
1. 論文				
○	Attitude Compensation Control for Biped Humanoid Robot	2009 the 12th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, pp. 677-684	2009年9月	姜賢珍 桃木新平 近藤秀樹 橋本健二 林憲玉 高西淳夫
○	Realization of Biped Walking on Uneven Terrain by New Foot Mechanism Capable of Detecting Ground Surface	2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 5167-5172	2010年5月	姜賢珍 橋本健二 近藤秀樹 服部健太郎 西川浩介 濱雄一郎 林憲玉 高西淳夫
○	Biped Walking Stabilization on Soft Ground Based on Gait Analysis	2012 IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, pp. 669-674	2012年6月	姜賢珍 橋本健二 西川浩介 Egidio Falotico 林憲玉 高西淳夫 Cecilia Laschi Paolo Dario Alain Berthoz
	Realization of Biped Walking on Soft Ground with Stabilization Control Based on Gait Analysis	2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2064-2069	2012年10月	橋本健二 姜賢珍 中村真志 Egidio Falotico 高西淳夫 Cecilia Laschi Paolo Dario Alain Berthoz
2. 講演	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8報:実環境下の安定歩行のための制御方法の統合と開発)	日本ロボット学会第26回 学術講演会予稿集, 102-01	2008年9月	姜賢珍 桃木新平 近藤秀樹 濱雄一郎 清水自由理 林憲玉 高西淳夫

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名	発表・発行掲載誌名	発表・発行年月	連名者(申請者含む)
2. 講演 の続き	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10報：幅狭な足部を用いた安定歩行のための遊脚軌道修正制御）	日本ロボット学会第27回 学術講演会予稿集, 1S3-02	2009年9月	<u>姜賢珍</u> 服部賢太郎 橋本健二 竹崎裕記 近藤秀樹 清水自由理 西川浩介 林憲玉 高西淳夫
	路面検知可能なセンサ式足部機構を用いた不整地適応歩行の実現	日本ロボット学会第27回 学術講演会予稿集, 3P1-02	2009年9月	西川浩介 服部賢太郎 橋本健二 濱雄一郎 近藤秀樹 清水自由理 竹崎裕記 <u>姜賢珍</u> 林憲玉 高西淳夫 菅敬介 加藤恵輔
	3点型路面検知足部機構を用いた2足歩行ロボットの不整地適応歩行の実現	日本ロボット学会第28回 学術講演会予稿集, 2D1-6	2010年9月	<u>姜賢珍</u> 中村真志 本橋弘光 橋本健二 西川浩介 近藤秀樹 小田中浩平 林憲玉 高西淳夫 菅敬介 加藤恵輔
	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	日本ロボット学会第28回 学術講演会予稿集, 2D2-1	2010年9月	<u>姜賢珍</u> 橋本健二 吉村勇希 近藤秀樹 林憲玉 高西淳夫

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題 名	発 表 ・ 発 行 掲 載 誌 名	発 表 ・ 発 行 年 月	連 名 者 （ 申 請 者 含 む ）
2. 講演 の続き	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）	日本ロボット学会第30回学 術講演会予稿集, 4K1-5	2012年9月	橋本健二 姜賢珍 中村真志 西川浩介 Egidio Falotico Cecilia Laschi Paolo Dario Alain Berthoz 林憲玉 高西淳夫
3. その他				