

博士論文審査報告書

論文題目

人間搭乗型2足歩行ロボット
に関する研究

Study on Biped Walking Vehicle

申請者

氏名

菅原 雄介

専攻・研究指導
(課程内のみ)

生命理工学専攻 バイオ・ロボティクス研究

2006年 3月

近年バリアフリーの考え方が普及し、車いすを使用する歩行障害者や高齢者の行動範囲は大きく広がってきている。しかしエレベータやスロープが完備された施設を一步出れば町中にはあちこちに段差があり、その施設までの移動も施設からの移動も健常者の助けを乞わざるを得ないのが現状である。健常者と同様の移動機構である2足歩行型で同等の運動能力を持つ車いすを提供することができれば、歩行障害者や高齢者の行動範囲を飛躍的に拡大するものと期待できる。

本研究では、人間と同様の移動様式である2足歩行型の車いすや汎用移動台車の開発につながる基礎研究として、人間を搭乗させて歩行できる2足歩行ロボットについて、その機構と制御方式を提案し、これに基づき実際に試作した人間搭乗型2足歩行ロボットを評価することによりその有効性を実証することを目的としている。具体的には、体重60 kg程度の成人を搭乗させての水平・平坦路面での歩行、および階段昇降を可能とする、重量60 kg程度の人間搭乗型2足歩行ロボットを機構および制御法の両面から開発し、試作した複数体のロボットを用い人間を搭乗させての歩行実験により評価を行っている。

本論文は、以下に示す7章からなる。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、脚と腰部のみで構成され、小型・軽量で電池により自立歩行が可能な2足歩行ロボットの先行試作機WL-15の開発について、その機械モデルと歩行制御法、評価実験と考察を述べている。WL-15は2本のスチュワート・プラットフォーム型パラレルメカニズムの脚と腰部で構成されており、脚機構は片足につき6本の直動アクチュエータと上下の受動ジョイントを備えている。各部の設計には軽量化が施されており、重量は57 kgとなっている。歩行制御法は本学で開発された、ZMP安定判別規範に基づく2足ヒューマノイド・ロボットの2足歩行制御法をもとに開発している。この手法は任意の足先軌道による歩行動作に対し、フーリエ変換によるモーメント補償軌道算出アルゴリズムを用いて腰部のモーメント補償軌道を算出し、それらの軌道を設定歩行パターンとして歩行ロボットをプログラム制御するものとなっている。開発したWL-15と歩行制御法を用いてその歩行能力を評価したところ、基本的な歩行能力に関してはその有効性を確認している。一方で、重量物積載歩行能力に関しては十分な性能を持つとは確認できず、後の改善を必要とする結果となっている。

第3章では、実際に人間を搭乗させて2足歩行を行う事が可能なロボットWL-16の開発について、その機械モデルと仮想コンプライアンス制御の導入、またこれらを用いて行った評価実験と考察を述べている。WL-16は体重50 kg程度の人間を搭乗させて歩行できること、および多少の凹凸がある路

面においても安定に歩行できることを開発要件として開発されており，基本的な自由度配置は WL-15 のものを踏襲し，広可動範囲化，高可搬重量化を目指してバックラッシの少なく推力とストロークの大きい直動アクチュエータと，同じくバックラッシが少なく小型・軽量な上下の受動ジョイントを新たに設計している．また特に骨盤上部には人間が搭乗するためのシートを備え，その大きさは WL-15 とほぼ同じであるが約 10 kg の軽量化に成功している．また歩行制御法に関しては，WL-15 で用いた ZMP 安定判別規範に基づくフーリエ変換によるモーメント補償軌道算出法により生成された歩行パターンを用いたプログラム制御に加え，重量物積載歩行時の構造部材のたわみや路面の凹凸などのモデル誤差を原因として生じる着地衝撃の吸収と振動の抑制を目的として，脚の動作に仮想コンプライアンス制御を導入している．開発した WL-16 と歩行制御法を用いて性能を評価したところ，歩幅 300 mm での歩行や微小な凹凸のある路面での安定歩行，50 kg の重量物を積載しての歩行，また世界初となる人間搭乗 2 足動歩行に成功し，その有効性を確認している．

第 4 章では，積載可能重量の増加と消費電力の低減を目的として開発した自重支持トルク低減機構について，予備実験とその基本設計，構造と動作原理およびこれを用いて行った評価実験と考察を述べている．自重支持トルク低減機構は脚機構の内側に各直動アクチュエータと並列に組み込まれる機構である．構造は反力の異なる 2 本のロック機能付きガスプリングを直列に配し，脚機構にかかる荷重の異なる立脚・遊脚の 2 つの相に応じてバネの効果を切替えることにより，立脚時には各アクチュエータの必要推力を軽減させ，遊脚時にはその必要推力を増大させないことを狙っている．開発した自重支持トルク低減機構を WL-16 の改良機 WL-16R に装着して評価を行ったところ，各モータ電流と消費電力の減少，積載可能重量の増加を確認し，また体重 94 kg の成人男性を搭乗させての歩行に成功し，有効性を確認している．

第 5 章では，第 3 章において述べた仮想コンプライアンス制御の改良と姿勢補償制御の開発，およびこの評価実験と考察を述べている．仮想コンプライアンス制御に関しては，各係数を足部の位置に応じて変化させることでより安定な挙動を実現することを図っている．姿勢補償制御に関しては，腰部に搭載された姿勢角センサの検出量と，足部 6 軸力角センサにより測定される ZMP 偏差を用い，低ゲインのフィードバック制御を行うことで未知の傾斜路面における安定歩行の実現を図っている．これらの制御法を WL-16R を用いた実験により評価したところ，緩やかに傾斜の変化する未知の傾斜路面における安定歩行に成功し，開発した手法の有効性を確認している．

第 6 章では，本研究が提案する 2 足歩行型の車いすや汎用移動台車にもっとも重要となる階段昇降性能の開発について，手法の提案と機械モデルの改良，評価実験と考察を述べている．脚機構に用いてきたスチュワート・プラットフォームは，さまざまな長所がある反面，可動範囲が狭いという短所を持つことが知られており，広い可動範囲を必要とする階段昇降においては不

利となる。これに対し、足先位置に応じた腰旋回角軌道と設定 ZMP 軌道の変更を行うことにより、各リンクの可動範囲内で階段昇降が可能となることをシミュレーションにより確認している。またこの手法を用いて作成した歩行パターンの出力のために、下部受動ジョイントと足底板を新たに設計している。WL-16R の改良機 WL-16RII を用いた実験により評価したところ、最大でけあげ 250 mm の階段昇降と、体重 60 kg の成人男性が搭乗した状態でのけあげ 200 mm の階段昇降に成功し、開発した手法の有効性を確認している。

最後に、第 7 章では結論として以上の研究成果を総括し、また今後の展望として、人間搭乗型 2 足歩行ロボットの将来性について言及している。

以上要するに、本論文は、人間を搭乗させて歩行できる 2 足歩行ロボットについて、その機構と制御方式を提案し、これに基づき実際に試作した人間搭乗型 2 足歩行ロボットを評価することによりその有効性を実証することを研究の目的とし、その成果として、実際に人間を搭乗させての 2 足動歩行が可能であることを世界で初めて実証したことを報告している。また体重 60 kg 程度の人間が搭乗した状態での 2 足動歩行と階段昇降が可能であり、また簡便なバネ要素を用いた自重支持トルク低減機構を開発しこれを用いてロボット本体の重量を超える体重 94 kg の人間まで搭乗できる 2 足歩行ロボットを開発し、本論文において述べたような手法によりこれが実現可能であることを報告している。

本研究の成果は、2 足歩行型車いすの開発と実用化につながる基盤技術となるものであり、また本研究が 2 足歩行ロボットによる人間を搭乗させての歩行に世界で初めて成功したものである。この技術により、歩行が困難な高齢者や歩行障害者に健常者と同様の移動能力を提供するとともに、歩行障害者や高齢者の行動範囲を飛躍的に拡大でき、真のバリアフリーの実現を目指すことができる。これは超高齢社会を迎える我が国において高齢者・障害者の高質な生活を支え、また高齢者や身体障害者に共に社会を支える重要な一員としての活躍を支援するための重要な技術といえる。よって、ロボット工学、機械工学のみならず人間工学、福祉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。

2006 年 3 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