

博士論文概要

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

Yusuke Sugahara

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 1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。しかしながら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。真のバリアフリーの実現につながるブレークスルーには、インフラの整備によりバリアを取り除くのではなく、この世に無数にあるバリアを乗り越えるための手段である機械を各自が身につけて歩く、「バリアフリーの工学的方法論としての移動ロボット」という方法が有効であると筆者らは考える。すなわち、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ことができるはずである。

また、人間共存型ロボットに関しても、これに究極的に望まれる移動機構は2足歩行型であると多くが認めているにもかかわらず、未だ2足歩行はこういったロボットの移動機構として一般的ではない。この理由は2足歩行が本質的に不安定な現象であることだけでなく、独立した移動機構モジュールとして扱っていくことがある。2足歩行型の汎用移動台車を提供することができれば、2足歩行型は人間共存型ロボットの移動機構として実用的になりうると考える。

そこで本研究では、人間と同様の移動機構である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、脚と腰部のみで構成され人間が搭乗できる2足歩行ロボットを開発し、その評価実験を行うことにより、上記の2つの技術目標の実現可能性を機構と制御法の両面から調査することを研究の目的とした。そして、実際に脚と腰部のみで構成された2足歩行ロボットを複数体試作し、人間を搭乗させての歩行実験により評価を行った。

本論文は、以下に示す7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、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 (Waseda Leg - No. 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た。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た。バッテリーやDCサーボドライバ、3軸姿勢角センサは骨盤上部に搭載され、制御用コンピュータは骨盤後部に搭載された。足部は足底に床反力取得用6軸力覚センサを備えた。各部の設計には軽量化が施されており、重量は57kgとなった。歩行制御法は本学で過去に開発された、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た。この手法は任意の足先軌道による歩行動作に対し、FFT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、歩行周期 0.96 s/step, 歩幅 200 mm/step の平面内歩行や 2 歩で 90 deg の高速方向転換などに成功し、基本的な歩行能力に関してはその有効性を確認した。一方で、重量物積載歩行能力に関しては、積載歩行時の安定性とアクチュエータの出力の 2 つの点において十分な性能を持つとは確認できず、今後の改善を必要とする結果となった。

第 3 章では、実際に人間を搭乗させて 2 足動歩行を行う事が可能なロボット WL-16 (Waseda Leg - No. 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た。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したもので、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た。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 の軽量化に成功した。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 FFT 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た。仮想コンプライアンス制御は、6 軸力覚センサにより足部にかかる力とモーメントを測定し、このデータよりバネ・ダンパ系の運動方程式に基づいて算出した操作量を足部の目標軌道に足し合わせながら制御を行うもので、各アクチュエータは位置制御のみを行いながらも足部は仮想的に力制御されるものである。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、また史上初となる人間搭乗 2 足動歩行に成功し、その有効性を確認した。

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た。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、主として鉛直方向の荷重を負担する機構である。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たものである。開発した自重支持トルク低減機構を WL-16 の改良機 WL-16R (Waseda

Leg - No. 16 Refined) に装着して評価を行ったところ、各モータ電流の減少、消費電力の減少、積載可能重量の増加などが確認された。また、80 kg の重量物積載歩行や体重 94 kg の成人男性を搭乗させての歩行に成功し、この機構の有効性を確認した。

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た。仮想コンプライアンス制御に関しては、第 3 章では全歩行周期を通じて一定値としていた各コンプライアンス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た。姿勢補償制御に関しては、ロボットの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た。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、仮想コンプライアンス制御を用いた場合では高周波振動の抑制が確認でき、また姿勢補償制御によりロボット腰部姿勢角のオフセット量が低減できていることが確認できた。またこれらを用い、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た。

第 6 章では、本研究で提案する 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た。WL-15, WL-16, WL-16R の脚機構に一貫して用いてきたスチュワート・プラットフォームは、脚機構としてさまざまな長所がある反面、可動範囲が比較的狭いという決定的な短所を持つことが知られている。これが通常の平面内歩行に関しては問題にならないことは第 3 章で触れたとおりだが、平面内歩行に比して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。この問題に対し、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た。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天板を新たに設計した。開発した手法を WL-16R の改良機 WL-16RII (Waseda Leg - No. 16 Refined II) を用いた実験により評価したところ、最大で蹴上高さ 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蹴上高さ 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た。

以上のように、第 2 章と第 3 章で述べた試作機により人間を搭乗させての 2 足歩行が可能であることを世界で初めて実証し、またその積載可能重量、未知の不整路面における安定性、階段昇降能力という 3 種類の性能に関しそれぞれ第 4 章, 第 5 章, 第 6 章に述べた手法により強化が可能であることを示した。

第 7 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、人間搭乗型 2 足歩行ロボットの将来性と、2 足歩行型の車いすや汎用移動台車の実用化という目標の実現可能性について言及した。

研 究 業 績

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				
○	Walking Up and Down Stairs Carrying a Human by a Biped Locomotor with Parallel Mechanism	2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems	2005 年 8 月	菅原雄介, 太田章博 橋本健二, 砂塚裕之 川瀬正幹, 田中智明 林憲玉, 高西淳夫
○	Walking Control Method of Biped Locomotors on Inclined Plane	2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation	2005 年 4 月	菅原雄介, 御厨裕 橋本健二, 細島拓也 砂塚裕之, 川瀬正幹 林憲玉, 高西淳夫
○	Support Torque Reduction Mechanism for Biped Locomotor with Parallel Mechanism	2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems	2004 年 10 月	菅原雄介, 御厨裕 細島拓也, 砂塚裕之 川瀬正幹, 橋本健二 林憲玉, 高西淳夫
○	WL-15: Prototype of a Multi-purpose Biped Locomotor with Parallel Mechanism	15th CISM-IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control (ROMANSY2004)	2004 年 6 月	菅原雄介 圓戸辰郎 細島拓也 御厨裕 林憲玉 高西淳夫
○	Realization of Dynamic Human-Carrying Walking by a Biped Locomotor	2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation	2004 年 4 月	菅原雄介, 細島拓也 御厨裕, 砂塚裕之 林憲玉, 高西淳夫
○	脚機構にパラレルメカニズムを用いた汎用2足ロコモータの開発 (第1報, 試作機 WL-15 の設計・開発)	日本機械学会論文集, 第70巻, 第691号, C編	2004 年 3 月	菅原雄介 圓戸辰郎 細島拓也 御厨裕 林憲玉 高西淳夫
○	Realization of Stable Dynamic Walking by a Parallel Bipedal Locomotor on Uneven Terrain Using a Virtual Compliance Control	2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems	2003 年 10 月	菅原雄介 細島拓也 御厨裕 林憲玉 高西淳夫
○	Control and Experiments of a Multi-purpose Bipedal Locomotor with Parallel Mechanism	2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation	2003 年 9 月	菅原雄介 圓戸辰郎 林憲玉 高西淳夫

研 究 業 績

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 の 続 き ○	Design of a Battery-powered Multi-purpose Bipedal Locomotor with Parallel Mechanism	2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems	2002 年 10 月	<u>菅原雄介</u> 圓戸辰郎 林憲玉 高西淳夫
	Development of Foot System of Biped Walking Robot Capable of Maintaining Four-point Contact	2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems	2005 年 8 月	橋本健二, 細島拓也 <u>菅原雄介</u> , 御厨裕 砂塚裕之, 川瀬正幹 林憲玉, 高西淳夫
	Realization by Biped Leg-wheeled Robot of Biped Walking and Wheel-driven Locomotion	2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation	2005 年 4 月	橋本健二, 細島拓也 <u>菅原雄介</u> , 御厨裕 砂塚裕之, 川瀬正幹 林憲玉, 高西淳夫
	ほか 11 件 (内 7 件 投稿 中)			
2. 講演	将来の‘ものづくり戦士’が熱く語る 僕らはヒューマノイドロボット(2足歩行ロボット)実用化へ向け研究・努力を惜しまない! 脚部にパラレルリンク機構を用いた2足ロボモータの開発(第7報:人間搭乗階段昇降の実現)	第2回eものづくりカンファレンス in 中部 2005	2005 年 10 月	<u>菅原雄介</u>
	福岡市ロボット開発・実証実験特区における2足歩行ロボットの公道歩行実験について	日本ロボット学会第23回学術講演会予稿集	2005 年 9 月	<u>菅原雄介</u> , 太田章博 橋本健二, 砂塚裕之 田中智明, 川瀬正幹 林憲玉, 高西淳夫
	脚部にパラレルリンク機構を用いた2足ロボモータの開発(第6報:姿勢補償制御を用いた傾斜路面歩行)	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2005	2005 年 6 月	<u>菅原雄介</u> , 橋本健二 砂塚裕之, 川瀬正幹 太田章博, 田中智明 林憲玉, 高西淳夫
	脚部にパラレルリンク機構を用いた2足ロボモータの開発(第5報:自重支持トルク低減機構による可搬重量の増加と消費エネルギーの低減)	日本ロボット学会第22回学術講演会予稿集	2004 年 9 月	<u>菅原雄介</u> , 御厨裕 細島拓也, 砂塚裕之 川瀬正幹, 橋本健二 林憲玉, 高西淳夫
			2004 年 9 月	<u>菅原雄介</u> , 川瀬正幹 御厨裕, 細島拓也 砂塚裕之, 橋本健二 林憲玉, 高西淳夫

研 究 業 績

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	汎用 2 足 ロコモータ の 人 間 搭 乗 歩 行 の 実 現 ヒト の 搬 送 を 目 指 し た 2 足 移 動 モ ジ ュ ー ル の 開 発 脚 部 に パ ラ レ ル リ ン ク 機 構 を 用 い た 2 足 ロ コ モ ー タ の 開 発 (第 4 報 : 高 可 搬 重 量 化 ・ 広 可 動 範 囲 化 を 図 っ た 新 型 ハ ー ド ウ ェ ア) 脚 部 に パ ラ レ ル リ ン ク 機 構 を 用 い た 2 足 ロ コ モ ー タ の 開 発 (第 3 報 : 仮 想 コ ン プ ラ イ ア ン ス 制 御 を 用 い た 不 整 地 歩 行) 他 10 件	第 9 回 ロ ボ テ ィ ク ス ・ シ ン ポ ジ ア 予 稿 集 日 本 機 械 学 会 第 3 回 福 祉 工 学 シ ン ポ ジ ウ ム 講 演 論 文 集 日 本 ロ ボ ッ ト 学 会 第 21 回 学 術 講 演 会 予 稿 集 日 本 ロ ボ ッ ト 学 会 第 21 回 学 術 講 演 会 予 稿 集	2004 年 3 月 2003 年 11 月 2003 年 9 月 2003 年 9 月	菅 原 雄 介 細 畠 拓 也 御 厨 裕 砂 塚 裕 之 林 憲 玉 高 西 淳 夫 菅 原 雄 介 圓 戸 辰 郎 細 畠 拓 也 御 厨 裕 林 憲 玉 高 西 淳 夫 菅 原 雄 介 細 畠 拓 也 御 厨 裕 砂 塚 裕 之 林 憲 玉 高 西 淳 夫 菅 原 雄 介 細 畠 拓 也 御 厨 裕 砂 塚 裕 之 林 憲 玉 高 西 淳 夫
3. 著 書	搭 乗 型 歩 行 ロ ボ ッ ト の メ カ ニ ズ ム と 制 御 (Vol. 01, No. 03, Part. 02, Contents 5 : 分 担 執 筆)	パ ー ト ナ ー ロ ボ ッ ト 資 料 集 成 , 株 式 会 社 エヌ ・ ティ ー ・ エ ス .	2005 年 12 月	比 留 川 博 久 他 41 名 (申 請 者 は 第 32 著 者)
4. そ の 他 特 許	歩 行 パ タ ー ン 作 成 装 置 、 2 足 歩 行 ロ ボ ッ ト 装 置 、 歩 行 パ タ ー ン 作 成 方 法 、 2 足 歩 行 ロ ボ ッ ト 装 置 の 制 御 方 法 、 プ ロ グ ラ ム お よ び 記 録 媒 体 他 8 件 出 願 済	特 願 2005-267720		