

博士論文概要

論文題目

胴体接触を活用する4肢ロボットの
運動生成に関する研究

Motion Generation Utilizing Torso Contact
for a Four-limbed Robot

申請者

松澤	貴司
Takashi	MATSUZAWA

生命理工学専攻 バイオ・ロボティクス研究

2019年11月

移動ロボットは過去から多くの研究がなされている。脚、クローラ、車輪、索状、飛行、水中など、その移動様式は多岐にわたり、対象とする環境での作業の実行や環境認識など、様々な用途に使用されてきた。その中でも脚ロボットは一般的に次の特徴を有する。(i)クローラや車輪など、他の移動様式に比べて支持領域が小さい。(ii)階段や段差など、不連続な路面に対応しやすい。特に、等身大かつ4肢で構成される脚ロボットは人間と共通する点が多いことから、人間の作業を代替する用途への適用が期待されてきた。2015年に米国で開催された **DARPA Robotics Challenge finals** という災害対応ロボット競技会では、等身大多肢型ロボットが多数参加していた。

このように等身大脚ロボットは災害現場などへの適用が期待される一方で、実地での実用化は十分になされていないというのが現状である。技術的な側面における課題として、脚ロボットの歩行運動における転倒リスクの回避の難しさが挙げられる。災害現場に見られる瓦礫路面などの不安定な足場を脚ロボットが移動する場合、路面の変形のように歩行運動中に発生する外乱への対応が必要になる。従来の歩行運動における安定化制御に関しては、ロボットの体幹位置や足首トルクを調整する手法が提案されてきた。しかしながら、ロボットの性能には上限があるため、外乱に対して転倒のリスクを完全になくすことは困難である。また、転倒時に発生する衝撃に耐えられるように脚ロボットの構造を設計する手法や、ロボットの重心が低くなるように脚ロボットを設計する手法が提案されている。しかし、ロボットが転倒した際には復帰動作に時間を費やす必要があるため移動速度の面で不利である。このような点から、歩行における転倒リスク回避に関しては未だ技術的な課題が多い。

上記の点を踏まえ、本研究では胴体の接触を伴う脚ロボットの歩行運動に着目する。この運動は足先だけでなく胴体も接地させて前進するという点で従来の歩行運動とは異なり、胴体を5足目として扱うことから歩行運動を拡張したものとしてとらえることができる。胴体が接地した姿勢、すなわち歩行運動における転倒姿勢に近い状態を前提として移動するため、転倒のリスクを回避できるという特徴を有する。さらに、3足と胴体のみでも移動できるため、3足を除く別の脚を作業に用いることや、1足が故障などで移動に利用できない場合への対応が可能となる。このように、等身大多肢型ロボットの歩行運動において胴体の接触を許容した転倒のリスクを回避可能な歩行運動を実現できれば、従来の脚ロボットの実用性の向上に資することができると思われる。

以上の点から、本研究では等身大4肢ロボットの実環境での運用につながる基礎研究として胴体接触を活用する運動生成を提案し、これに基づく胴体接触機構と運動生成法を開発することで瓦礫路面や脚長以上の段差に対して脚ロボットの移動性能を向上させることを目的とする。具体的には、瓦礫路面のように変形を伴う路面や脚長を越える高さの段差に対して接地が可能な胴体接触機構や、胴

体の接触を活用する腹ばい運動生成法や段差乗り越え運動生成法を開発し、等身大4肢ロボット WAREC-1 (WAseda REsCuer - No.1) およびそのプロトタイプ機を用いて評価実験を行うことで、本研究で定義する脚ロボットの移動性能、すなわち(i)目標地点への到達性、(ii)移動時の安定性、(iii)移動に用いる脚本数の変化への対応という3つの観点から提案手法の有効性を確認する。

本論文は、以下に示す5章から構成されている。各章の要約を示す。

第1章では先行研究について述べた。本研究の目的と意義について述べ、多肢ロボットの先行例や、胴体接触を活用するロボットの関連研究について記述した。

第2章では、胴体接触を活用する運動の提案と胴体接触機構の開発に関して、その運動の歩容と胴体接触機構の要求事項、設計手法と評価実験、考察について述べた。胴体接触を活用する運動はロボットの足先に加えて胴体も接地させることで転倒姿勢に近い低重心な姿勢で移動できるため、移動中の転倒リスク低減が可能である。腹ばい運動は足先と胴体を交互に接地させる2ステップの歩容とし、段差乗り越え運動は胴体接触の活用により4ステップまたは5ステップの歩容とした。胴体接触機構に関しては不整路面への接地や滑動量の低減を可能にするため、胴体の接地面に円筒状のスパイクを複数搭載する機構とした。スパイクの長さや配置に関しては、不整路面の規格として用いられるランダムステップおよび傾斜45度の階段に対して転倒せずに接地し、滑動量を低減できるように定めた。開発した胴体接触機構を4肢ロボット WAREC-1 に搭載して行った実験の結果、瓦礫路面上での胴体接地時の滑動量は腹ばい運動1回あたりの移動距離の5%に相当する10 mm程度に低減された。また、階段や段差乗り越えに関しては胴体接地時に転倒や滑動なく移動することに成功した。これらの結果から、胴体接触を活用する運動と胴体接触機構の有効性を確認した。

第3章では胴体接触を活用する腹ばい運動生成に関して、センサフィードバックに基づく足先軌道修正制御、評価関数に基づく腹ばい運動と段差乗り越え運動の足先軌道生成法の開発、評価実験、考察について述べた。第2章で述べた腹ばい運動で瓦礫路面を移動する際に移動の妨げとなる足先と路面との干渉を回避するため、4肢ロボットの足先に搭載した6軸力覚センサと胴体に搭載した姿勢角センサに基づいて足先軌道を修正するものである。評価関数に基づく腹ばい運動および段差乗り越え運動では、ロボットの立脚時の安定性と1歩容あたりの移動距離に関する評価関数に基づいて足先軌道を決定する。提案手法をプロトタイプ機および WAREC-1 に適用して評価したところ、動力学シミュレータにおいて作成した瓦礫路面における腹ばい運動の踏破率が17%向上した。また、評価関数に基づく腹ばい運動により事前に足先軌道を定める場合に比べて移動速度が向上すること、1足が移動に使用できない場合にも残りの3足と胴体を用いた腹ばい運動が生成できることを確認した。さらに、WAREC-1 を用いて高さ600 mm

の段差乗り越えの実現に成功した。以上の評価実験から、瓦礫路面やロボットの脚長未満の段差が存在する環境において提案手法の有効性を確認した。

第4章では胴体接触を活用する段差乗り越え運動生成に関して、運動の方略と運動生成法の開発、および評価実験と考察について述べた。第3章で述べた腹ばい運動生成では、胴体と足先を共に接地した腹ばい姿勢において足先可動域に収まる程度の高さの瓦礫路面、ならびに腹ばい姿勢から胴体を鉛直上方向に移動した4足立ち姿勢において胴体姿勢を変更することなく乗り越えられる程度の高さの段差を対象とした運動生成を提案した。しかし、さらに高い段差、すなわち脚長を超えるような高さの段差に対しては移動が困難であったことから、本章ではまず胴体接触を活用した段差乗り越え運動のための方略を提案した。具体的には、ロボットの重心投影点を段差上に移動させ、胴体を段差上に接地した点を中心として段差上に倒れ込むという方略とし、低重心な姿勢で段差を乗り越えられる運動としている。運動生成には逐次二次計画法を使用し、ロボットと外界環境との干渉および関節可動域、足先位置などの拘束条件のもとで関節角速度とロボットの安定性に関する項を含む評価関数を最小化することにより各ステップの運動を生成している。提案手法を4肢ロボット WAREC-1 に適用して評価したところ、脚長を超える高さ 865 mm の段差乗り越えに成功し、その有効性を確認している。

第5章では結論として上記の研究成果を総括した。まず胴体接触を活用する運動生成として第3章で述べた腹ばい運動生成と第4章で述べた段差乗り越え運動生成に関する総合的な考察を行い、それぞれの手法の特徴と統合の可能性について論じた。次いで、本論文により得られた成果を総括し、結論および胴体接触を活用する運動生成に関する今後の展望について述べた。

以上要するに、本論文は等身大4肢ロボットの実用化につながる基礎研究として胴体接触を活用する運動生成を提案し、これに基づいて実際に開発した胴体接触機構および腹ばい運動、段差乗り越え運動生成法を等身大4肢ロボットに適用して実験にて評価することにより、瓦礫路面や脚長を超える高さの段差に対して低重心な姿勢での移動が可能であることを実証している。本論文にて述べられた手法により、本研究で定義する脚ロボットの移動性能の向上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、等身大4肢ロボットの実環境での運用に向けた基盤技術になるものである。この技術により、災害現場における瓦礫が積み重なった路面や脚長を超える高さの段差などの不整路面において移動時の転倒リスクを低減したロボットの提供が可能となる。また、4肢ロボットだけでなく多脚ロボットの実用化にもつながるものであり、行動範囲を拡大するものと期待される。よって、ロボット工学、機械工学といった工学分野の発展に貢献するものであると考える。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 松澤貴司 印

(2020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）
a. 論文 ○	Crawling and foot trajectory modification control for legged robot on uneven terrain	International Journal of Mechatronics and Automation	掲載決定	<u>Takashi Matsuzawa</u> , Ayanori Koizumi, Kenji Hashimoto, Xiao Sun, Shinya Hamamoto, Tomotaka Teramachi, Nobuaki Sakai, Shunsuke Kimura and Atsuo Takanishi
○	Moving Onto High Steps for a Four-Limbed Robot with Torso Contact	Proceedings of the 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 6324–6331.	2019年 11月	<u>Takashi Matsuzawa</u> , Takanobu Matsubara, Keisuke Namura, Xiao Sun, Asaki Imai, Masahiro Okawara, Shunsuke Kimura, Kengo Kumagai, Koki Yamaguchi, Hiroshi Naito, Takehiro Sato, Kota Terae, Masatsugu Murakami, Shunya Yoshida, Atsuo Takanishi
	Disaster Response Robot's Autonomous Manipulation of Valves in Disaster Sites Based on Visual Analyses of RGBD Images	Proceedings of the 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 4790–4797.	2019年 11月	Keishi Nishikawa, Asaki Imai, Kazuya Miyakawa, Takuya Kanda, <u>Takashi Matsuzawa</u> , Kenji Hashimoto, Atsuo Takanishi, Hiroyuki Ogata and Jun Ohya
	WAREC-1 - A Four-Limbed Robot with Advanced Locomotion and Manipulation Capabilities	Disaster Robotics, Springer, pp. 327–397.	2019年 1月	K. Hashimoto, <u>T. Matsuzawa</u> , X. Sun, T. Fujiwara, X. Wang, Y. Konishi, N. Sato, T. Endo, F. Matsuno, N. Kubota, Y. Toda, N. Takesue, K. Wada, T. Mouri, H. Kawasaki, A. Namiki, Y. Liu, A. Takanishi and S. Tadokoro

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）
	Automatic Detection of Valves with Disaster Response Robot on Basis of Depth Camera Information	DICTA 2018 : Digital Image Computing: Techniques and Applications, 2018.	2018 年 12 月	K. Nishikawa, J. Ohya, H. Ogata, K. Hashimoto, <u>T. Matsuzawa</u> and A. Takanishi
	Error Compensation System with Proximity Sensors for Vertical Ladder Climbing of the Robot "WAREC-1"	2018 IEEE-RAS 18th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp. 40-46, 2018.	2018 年 11 月	X. Sun, S. Hayashi, K. Hashimoto, <u>T. Matsuzawa</u> , Y. Yoshida, N. Sakai, A. Imai, M. Okawara, K. Kumagai, T. Matsubara, K. Yamaguchi and A. Takanishi
○	End-effector with a Hook and Two Fingers for the Locomotion and Simple Work of a Four-limbed Robot	2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 2727-2732, 2018.	2018 年 10 月	<u>T. Matsuzawa</u> , A. Imai, K. Hashimoto, T. Teramachi, X. Sun, S. Kimura, N. Sakai, Y. Yoshida, K. Kumagai, T. Matsubara, K. Yamaguchi, and A. Takanishi
○	Body Mechanism with Linear Spikes for Slippage Reduction of Four-limbed Robot Crawling on Uneven Terrain	22nd CISM IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control, pp. 280-287, 2018.	2018 年 6 月	<u>T. Matsuzawa</u> , T. Matsubara, K. Hashimoto, T. Teramachi, X. Sun, S. Kimura, N. Sakai, Y. Yoshida, A. Imai, K. Kumagai, K. Yamaguchi, K. Namura and A. Takanishi
○	Crawling Gait Generation Method for Four-Limbed Robot Based on Normalized Energy Stability Margin	International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR), pp. 223-229, 2017.	2017 年 10 月	<u>T. Matsuzawa</u> , K. Hashimoto, X. Sun, T. Teramachi, S. Kimura, N. Sakai, Y. Yoshida, A. Imai, K. Kumagai, T. Matsubara, K. Yamaguchi, W. Tan and A. Takanishi
	その他 11 件			

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）
c. 講演				
○	極限環境下で作業可能な災害対応ロボットの開発（第34報：4肢ロボットの足先姿勢を考慮した着地可能領域決定法および安定性に基づく腹ばい運動の全方向移動実験）	第25回ロボティクスシンポジウム	掲載決定	松澤貴司, 名村圭祐, 孫瀟, 内藤博, 佐藤丈弘, 寺江航汰, 村上将嗣, 吉田駿也, 伊藤明, 近藤貴久, 高西淳夫, 橋本健二
○	極限環境下で作業可能な災害対応ロボットの開発（第33報：胴体接触を活用する4肢ロボットの安定性と肢の可動域に基づく全方向腹ばい運動生成法）	Proceedings of The Second International Jc-IFToMM Symposium in conjunction with The Twenty-fifth Jc-IFToMM Symposium on Theory of Machines and Mechanisms pp. 39-46.	2019年10月	松澤貴司, 孫瀟, 内藤博, 名村圭祐, 佐藤丈弘, 寺江航汰, 村上将嗣, 吉田駿也, 伊藤明, 近藤貴久, 高西淳夫, 橋本健二
	災害対応ロボットにおけるRGB-Dカメラ情報を用いたスイッチの位置・姿勢の推定	第18回情報科学技術フォーラム	2019年9月	神田琢也, 大谷淳, 小方博之, 橋本健二, 内藤博, 松澤貴司, 高西淳夫
	災害対応ロボットWAREC-1による自律的な階段昇段のための画像処理技術の検討	第18回情報科学技術フォーラム	2019年9月	宮川和也, 大谷淳, 小方博之, 松澤貴司, 橋本健二, 高西淳夫
	その他 35件			
e. その他特許	移動ロボット及びそのほふく移動方法	特願 2016-168790	2016年8月	高西淳夫, 橋本健二, 小泉文紀, 濱元伸也, 酒井伸明, 松澤貴司, 小野敬之
講演	脚ロボットの実装とROS	「ImPACT タフ・ロボティクス・チャレンジにおけるROS活用」講演会	2019年3月	松澤貴司, 橋本健二