

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06278

研究課題名(和文)コンプライアンスに注目した適応クローラロボットにおける対地適応性の最適化

研究課題名(英文)Optimization of Ground Adaptability in Adaptive Crawler Robot Focusing on Compliance

研究代表者

奥川 雅之 (Okugawa, Masayuki)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：50290747

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：ロボットが凹凸路面や階段をスムーズに踏破する性能である対地適応性を有するためには、多くの機構自由度を必要とし、その制御には操縦者の熟練や適切な制御則が要求される。本研究では、サブクローラを有するクローラロボットの障害物踏破シーケンスに注目することで、ロボットが障害物を走破する際のインタラクションを解明し、対地適応性にサブクローラ回転ジョイントのコンプライアンスが大きな影響を及ぼすとの仮説を示した。さらに、提案手法を実装した小型模型ロボットを用いて、サブクローラ部回転ジョイントダイナミクスのコンプライアンスの違いによって走破性が異なることを示し仮説が正しいことを立証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の制御工学的な手法では、未知の環境空間に対する制御則の導出は困難である。本研究成果は、機構の受動性と能動制御系の利点を融合した制御系設計手法を確立することとなり、非常に特色ある研究になると思われる。

本研究の成果により、リアルタイム環境適応機能を有したフィールドロボットに関する設計から評価まで一貫した研究基盤の確立に貢献するものである。コンプライアンス制御のように単純な制御則により、環境変化にロバストな制御手法を確立できれば、災害対応だけでなく、社会インフラやプラントのメンテナンスなど、種々の調査ロボットに関する自律制御の実現に貢献できるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：For the robot to have ground adaptability, which is the ability to smoothly traverse uneven roads and stairs, many mechanical degrees of freedom are required, and its control requires skill of the operator and appropriate control rules.

In this study, we focused on the obstacle traversal sequence of a crawler robot with a sub-crawler to elucidate the interaction when the robot traverses through an obstacle. We found that the compliance of the sub-crawler rotary joint had a great influence on the ground adaptability.

We showed the hypothesis that. Furthermore, using a small model robot that implements the proposed method, it was shown that the running performance differs depending on the compliance of the sub-crawler rotary joint dynamics, demonstrating that the hypothesis is correct.

研究分野：ロボット工学

キーワード：移動ロボット 不整地走破 対地適応性 環境適応 コンプライアンス ダイナミクス 標準試験法

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地震や風水害等の自然災害や社会インフラ構造物の老朽化に伴う事故が発生した現場の被害調査や人命探査等に遠隔操縦型移動ロボットは有効である。災害発生後の移動環境は、その路面状態が未知であるとともに、移動によって崩れるため、その移動環境は流動的でもある。操縦者とロボットは空間的に離れているだけでなく、狭隘や暗所空間での作業を行うためには、限定された情報を頼りに未知路面を走行し目標地点まで到達する必要があるため、ロボットの移動機構は多くの自由度を必要とし、その制御は複雑となり、ロボットの制御は操縦者のスキルに強く依存したものとなる。そこで、サブクローラを有するクローラロボット（以降、適応クローラロボットとする）に関する半自律制御問題が研究課題となっている。これまでに提案されている半自律制御手法は、できるだけ多くの周辺環境（踏破対象）情報を取得し、シーケンシャルにサブクローラの角度を制御するセンサベース制御手法[1][2]やニューラルネットワーク等ルールベース制御手法[3][4][5]を適用したものである。一方、我々は、これまでにサブクローラの回転軸に受動性を有するクローラロボット（受動適応クローラロボット）を提案し、実験やロボット競技会にて、その有効性を示すとともに、数値計算による踏破シーケンスの解明や踏破条件の導出に取り組んできた[6][7]。その他、我々と同様に受動性を利用したクローラロボットの事例もいくつか報告されている[8][9][10]。

2. 研究の目的

本研究は、受動歩行において連携研究者の大須賀ら[11]によって活発に研究が進められている「リアルタイム環境適応能力問題」（無限定環境下にて即時に自らの行動を適応させる行動能力：移動知ともいう）に注目し、適応クローラロボットにおける対地適応性を左右する要因を明らかにし、半自律制御系の最適化問題へ応用展開するための基礎となる研究を行うものである。

我々は、適応クローラロボットのサブクローラ部に対して受動性の導入を積極的に取り組んでいる。受動適応クローラロボットの踏破シーケンスを観察した結果、「最適性を満足する制御則が内在している」と考え、踏破条件の解析に取り組んできた。これまでの成果をもとに、受動性の利点を定量的に整理し、受動悪路走行に内在するフィードバック構造の存在を明らかにするとともに、優れた対地適応性を実現する制御則を提案し、より省エネルギーかつ効率よく、安定なクローラロボットの実現を目指す。ただし、本研究では、踏破可能な障害に対する問題とし、踏破可否判断に関する内容は除くものとした。

3. 研究の方法

我々は、受動適応クローラロボットが、不整地に対する良好な対地適応性により容易な操縦性を有していることを見出した。本研究は、生物に見られるリアルタイム環境適応能力に注目し、悪路走破時における当該ロボットの力学的原理（特にコンプライアンス性の影響）を解明し、障害物（路面）とロボット間におけるコンプライアンスを考慮した半自律制御設計手法を確立し、優れた対地適応性を有するクローラロボットの実現を図る。

(1) 適応クローラロボットに対する統一的なモデリング

我々は、サブクローラの回転軸に受動性を有する受動適応クローラロボットを提案し、実験やロボット競技会にて、その有効性を示すとともに、対地適応性の優劣はサブクローラダイナミクス（コンプライアンス（障害とサブクローラ部との接触における変化のしやすさ））が大きな因子であることを見出した。受動適応クローラロボットは、受動歩行と同様に、生物が有するリアルタイム環境適応能力（移動知）を有しているものと予想するとともに、その根拠は、内在するフィードバック構造を有するダイナミクスモデルにあると考えている。本研究課題では、能動適応クローラに拡張した仮説を構築し、コンプライアンス制御系の観点から検証する。コンプライアンス性に注目し、実験や物理シミュレーション結果を詳細に解析することにより、力学的な動作原理を明らかにする。

(2) 対地適応性の最適化に関する評価指標の導出

図1に示すような受動適応クローラロボットは、踏破対象の障害物に対してロボットを押し付けながら押し上げる段差踏破シーケンスである。これまでの研究成果より、受動適応クローラロボットは、リアルタイム環境適応能力に優れていることが定量的に確認されていることから、m悪路走破に適した対地適応性を満たしていることが予想される。しかし、その最適性に関する議論は十分にされていないのが現状である。

本研究では、最適指標を定義し、適応クローラロボットの対地適応性に関して定量的に評価する手法を提案する。受動適応クローラロボットは、段差高さや踏破対象（がれき上、階段、スロープ）によって、特異姿勢の回避が重要な課題となることがわかっている。申請者らは、その問題を解決するために、サブクローラ回転角度に対して可変角度拘束機構を提案している。一方、これまで提案されて

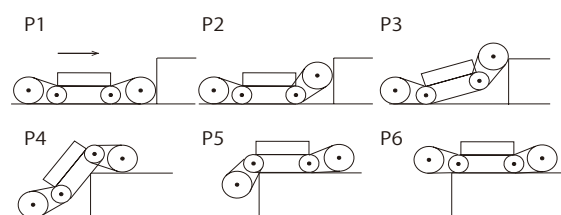


図1 踏破シーケンス（押しのぼる）

いる半自律制御系に導入されている転倒安定余裕 (NE 安定余裕) は、ロボットの転倒に関する安定性に関するものであり、走破性の最適化の必要条件ではない。そこで、悪路走破時におけるロボットの各因子と対地適応性との関係を明らかにする。そのために、走破性に関する定量的な評価指標を明らかにし、試験方法に必要なデータ解析項目の選定を試みる。候補として、NE 安定余裕、負荷電流値、姿勢角およびサブクローラ回転角の変化量、移動速度等を想定している。これらの指標をもとに障害物とロボット間におけるコンプライアンスが及ぼす対地適応性に対する影響に関する評価を試みる。

4. 研究成果

(1) 仮説の構築

ロボットが凹凸路面や階段をスムーズに踏破する性能である対地適応性を有するためには、多くの機構自由度を必要とし、その制御には操縦者の熟練や適切な制御則が要求される。本研究では、サブクローラを有するクローラロボットの障害物踏破シーケンスに注目し、サブクローラ回転ジョイントのコンプライアンスが対地適応性に大きな影響を与えていることを見出した。また、サブクローラを有するクローラロボットにおいて、生物が有する優れたリアルタイム環境適応能力(移動知)を発現させる要因として、サブクローラ回転ジョイントのダイナミクスにあるとの考えに至った。具体的な研究成果として、サブクローラを有する移動ロボットの不整地走破時における力学的な動作原理を詳細に考察することにより、クローラロボットの対地適応性に影響を与える因子を明確にするとともに、走行路面の障害物とロボット間のインタラクションに関して、図2に示すような3つのモーメント(自重モーメント M_g 、推進モーメント M_v 、サブクローラ回転モーメント M_c) に帰着され、「障害とロボットとの間に生じるモーメントの関係からサブクローラ回転ジョイントのコンプライアンス性が対地適応性に大きく寄与する」との仮説を示した。

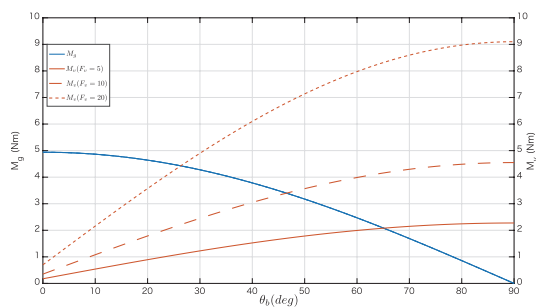
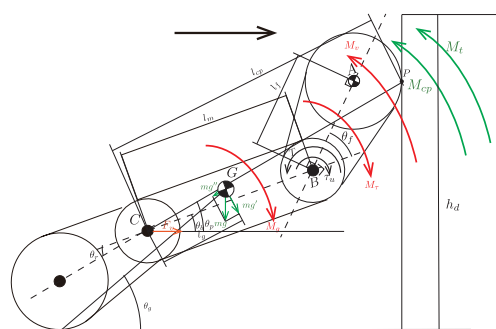


図2 障害物とロボット間に生じるモーメント 図3 ロボットの姿勢に対する自重モーメントと推進モーメントの関係

図3に、ロボット本体姿勢角および推進力により変化する自重モーメントと推進モーメントの関係を示す。ロボット本体の回転方向は、自重モーメントと推進モーメントとの関係によって決まる。推進力の増加に伴い、自重モーメントよりも推進モーメントが上回る場合、モーメントのバランスが崩れ、ロボットに上向きの力が働きロボットが持ち上がる。

重要な点は、本体姿勢角の増加に伴い、自重モーメントが減少するとともに、推進モーメントが増加するため、ロボットは上向きに回転しやすくなることである。したがって、本体姿勢角が大きい領域では、ロボットを持ち上げるために必要な推進力は少なくとも良いことがわかる。しかし、本体姿勢角を極度に大きくすると、転倒安定性が劣化する。一方で、自重モーメントにより障害壁面を水平に押す力は本体姿勢角が45度の時、最大値を取り、上向きにモーメントが働きやすいことを示した。このことより、本体姿勢角が45度になるようサブクローラ角度を制御することができれば、最も効率よく上向きのモーメントを得られることを意味している。

一方で、サブクローラ回転軸に柔らかさがある場合、その復元力によりロボットの姿勢に応じて、障害との力やモーメントの釣り合いが成立(力を「いなす」)するようサブクローラの回転角が適切に変化することで、障害物との相互作用を制御できる。つまり、サブクローラ回転軸の柔らかさは、障害走破時のロボット本体姿勢角に影響を与えることを意味している。

(2) 検証実験

仮説に対して、サブクローラ部回転ジョイントの回転運動に関するコンプライアンス制御系設計手法を確立するとともに、実際に小型模型ロボットに対して、サブクローラ部回転ジョイントダイナミクスのコンプライアンス(固有振動数)を調整可能な規範モデルを用いて制御系を設計し、小型模型ロボットに実装した。仮説を検証するために、実験条件として、5つの異なるコンプライアンスを有するサブクローラ回転ジョイントダイナミクスのパターンを用意した。パターン1が最も小さいコンプライアンスであり、順番にコンプライアンスを減少させた。これら

のパターンに対して、サブローラの回転軸コンプライアンスを固有振動数として定義し、それぞれの固有振動数に対してフィードバックゲインを設計した。図4に検証実験で使用した小型模型ロボットの外観と障害踏破実験の様子を示す。



図4 検証実験に使用した小型模型ロボット（左：外観，右：実験の様子）

図5に各実験パターンにおけるロボットの重心に関する移動軌跡を示す。また、実験パターンごとに、障害壁面にロボットの前方サブローラが接触した際に障害壁面を水平に押す力を圧力センサで測定した結果を図6に示す。

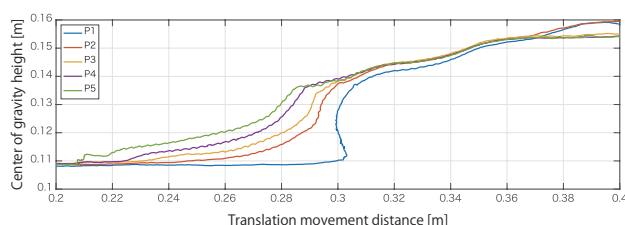


図5 各実験パターンにおける段差踏破時のロボット本体重心座標軌跡

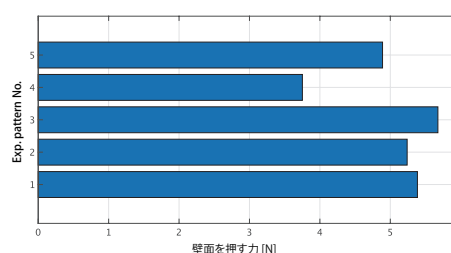


図6 各実験パターンに対するにおけるロボットが障害壁面を押す力

コンプライアンスが小さい場合（パターン4や5）では、その姿勢角から、図3で示したように自重モーメントは大きい、壁面押し付け力が小さい。自重モーメントより推進モーメントが大きくなれば障害走破を行えないため比較的大きな推進力が必要となる。その結果、推進力に起因する壁面を押す力が増加する。また、コンプライアンスが大きい場合（パターン1や2）では、壁面接触時の障害接触高さが低いために自重モーメントによる壁面押し付け力が小さくなる。コンプライアンスが大きい場合と同様に比較的大きな推進力を必要とするため、壁面押し付け力が増加する。パターン3は壁面を押す力は最も大きな値であった。このことは、図3で示したように自重モーメントと推進モーメントの影響に関する仮説で説明することができる。パターン3の姿勢は、他のパターンと比較して、自重モーメントによる効果が大きい姿勢であるため、短時間でロボット本体が持ち上げることが可能となり、微小な推進力増加でより大きな上向きモーメントを得ながら障害を走破していると言える。

以上より、障害壁面を押す力が本体姿勢角と回転軸コンプライアンスの関係により変化することを利用し、ロボットが障害接触時に生じる障害壁面接触力を測定することにより、サブローラ部回転ジョイントダイナミクスコンプライアンスの違いによって異なることを示すことで仮説を検証することができた。

(3) 得られた成果のまとめ

本研究では、サブローラを有するクローラ型移動ロボットの機構ダイナミクスとキネマティクスを考慮した「押し登る」障害走破シーケンスに対して、ロボットと障害との相互作用に注目することで、その走破原理を説明するとともに、「障害とロボットとの間に生じるモーメントの関係からサブローラ回転ジョイントのコンプライアンス性が対地適応性に大きく寄与する」という仮説を立てた。実際に、検証用に作成した模型ロボットを用いて、サブローラ回転ジョイントのコンプライアンスを変更し、単純段差踏破実験を行った。得られた実験結果をもとに仮説の検証を行った。

「押し登る」障害走破シーケンスのポイントは、ロボットが障害接触する際の姿勢角度であることが仮説を通してわかった。また、その姿勢角度は、サブローラ回転ジョイントのコンプライアンス（柔軟性）が大きく影響することを実験結果から示した。サブローラ回転ジョイントの柔軟性により、障害との接触点を高くすることができ、その結果、障害壁面との接触力を増加させ、ロボット本体が持ち上がりやすくなるとともに、本体姿勢（重心）を低い状態に保つ効果があることから、少ない推進エネルギーかつ十分な転倒安定余裕を維持したまま、スムーズな重心移動を可能にすることがわかった。サブローラ回転ジョイントに適切なコンプライアンスを持たせることにより、障害の位置や高さ情報などの環境情報を得ることなく、サブローラ角度が制御され、ロボット本体姿勢角が決定されることから、複雑で高度な制御システムを導入す

ることなく、優れた対地適応性を容易に発現できるとともに、障害走破性能の向上に大きく寄与する可能性を示した。今後は、サブクローラ回転ジョイント駆動系に対して可変コンプライアンス制御系を実装することにより、種々の走破／踏破環境に対するリアルタイム環境適応能力の発現を目指す。

参考文献

- [1] E. Rohmer, et al., Integration of a Sub-Crawler's Autonomous Control in Quince Highly Mobile Rescue Robot, Proceedings of the IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp. 78-83, 2010.
- [2] K. Nagatani, et al., Semi-autonomous Traversal on Uneven Terrain for a Tracked Vehicle using Autonomous Control of Active Flippers, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2667-2672, 2008.
- [3] K. Zimmermann, et al., Adaptive Traversability of Unknown Complex Terrain with Obstacles for Mobile Robots, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 5177-5182, 2014.
- [4] M. Pecka, et al., Autonomous Flipper Control with Safety Constraints, Proceedings of the 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2889-2894, 2016.
- [5] Y. Yuan, et al., Configuration-Space Flipper Planning for Rescue Robots, Proceedings of the 17th IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, pp. 37-42, 2019.
- [6] Suzuki, S., Hasegawa, S. and Okugawa, M., Remote Control System of Disaster Response Robot with Passive Sub-crawlers Considering Falling Down Avoidance, ROBOMECH Journal, Vol.1, Issue 1, 20, 2014.
- [7] 浅井, 鈴木, 奥川, 受動適応クローラロボットのサブクローラ角度における段差踏破性能, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集(SI2015), pp. 750-755, 2015.
- [8] C. Cho, et al., Uneven Terrain Negotiable Mobile Platform with Passively Adaptive double tracks and its application to rescue missions, Advanced Robotics, Vol. 19, No. 4, pp. 459-475, 2005.
- [9] Kang, S., et al., Robhaz-Rescue: Rough-Terrain Negotiable Teleoperated Mobile Robot for Rescue Mission, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 105-110, 2010.
- [10] 平澤, 木村, 受動クローラによる階段昇降機構の開発 (回転角度制限の解析と試作機の性能限界), 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 834, 15-00357, 2016.
- [11] 大須賀, 移動知理解への力学的接近, 計測と制御, Vol. 44, No. 9, pp. 640-645, 2005.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 H. Miura, A. Watanabe, M. Okugawa, S. Kurahashi, M. Kurisu, and T. Miura	4. 巻 30
2. 論文標題 Field Experiment Report for Verification of Abandoned Lignite Mines by Robotic Exploration System	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1004-1013
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.20965/jrm.2018.p1004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 渡邊彩夏, 奥川雅之
2. 発表標題 クローラ型移動ロボットの段差踏破シーケンスに注目した対地適応性の解明
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊彩夏, 奥川雅之
2. 発表標題 クローラ型移動ロボットの半自律制御を目指したサブクローラ回転軸コンプライアンスに関する考察
3. 学会等名 第62回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ayaka WATANABE, Masayuki OKUGAWA and Akihiro WAKAYAMA
2. 発表標題 A Study of Ground Adaptability for Active Adaptive Crawler Robot
3. 学会等名 The 14th International Conference on Motion and Vibration Control (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroyasu MIURA, Ryota SUZUKI, Yuri SANNO, Ayaka WATANABE, Yoshimitsu KOBAYASHI and Masayuki OKUGAWA
2. 発表標題 Adaptive Speed Control of Wheeled Mobile Robot on Uncertain Road Condition
3. 学会等名 The 14th International Conference on Motion and Vibration Control (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊彩夏, 奥川雅之
2. 発表標題 クローラ型移動ロボットのサブクローラ回転角コンプライアンスと対地適応性に関する考察
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊彩夏, 奥川雅之
2. 発表標題 対地適応クローラロボットの不整地走破時におけるサブクローラ回転軸コンプライアンスに関する考察
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹村秀太, 奥川雅之, 清水優
2. 発表標題 ロボットシミュレータによる標準性能試験法に関する考察
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊彩夏, 奥川雅之
2. 発表標題 サブローラを有するクローラロボットの対地適応性に関する考察
3. 学会等名 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹村秀太, 渡邊彩夏, 奥川雅之
2. 発表標題 ロボットシミュレータによる標準性能試験の実現 -ロボットモデルの作成方法について-
3. 学会等名 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2017)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	衣笠 哲也 (Kinugasa Tetsuya) (20321474)	岡山理科大学・工学部・教授 (35302)	
研究分担者	大金 一二 (Ogane Katsuji) (70255230)	新潟工科大学・工学部・准教授 (33108)	
研究分担者	木村 哲也 (Kimura Tetsuya) (70273802)	長岡技術科学大学・技術経営研究科・准教授 (13102)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	大坪 義一 (Ohtsubo Yoshikazu) (90257973)	近畿大学・理工学部・准教授 (34419)	
連携 研究者	大須賀 公一 (Osuka Koichi) (50191937)	大阪大学・工学研究科・教授 (14401)	