

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：33903
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：20K04369
研究課題名（和文）可変コンプライアンスによる適応クローラロボットのリアルタイム環境適応能力発現

研究課題名（英文）Real-Time Environment Adaptability of Adaptive Arawler Robot with Variable 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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、能動型対地適応クローラロボットのサブクローラ回転ジョイント部に対して可変コンプライアンス制御系の実装を提案し、種々の路面環境に対するサブクローラ回転ジョイント部コンプライアンスの影響を実験により考察した。提案手法により、障害の位置や高さなどの外部環境情報を得ることなく、路面変化に応じてサブクローラ角度が適宜制御されることから、未知の環境（路面状況）変化に対してリアルタイムに適応が可能であるとともに、ロボットの姿勢情報をもとに、サブクローラ回転ジョイントのコンプライアンスを随時変更することにより障害走破性能を補償できる可能性を示唆することができた。

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、ロボットと障害物との相互作用に注目し、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として非常に特色ある研究である。

本研究の成果は、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、災害現場のような非限定環境下での変化に対する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）：In this study, we proposed the implementation of a variable compliance control system for the sub-crawler rotary joint of an active ground adaptive crawler robot and examined the effects of the compliance of the sub-crawler rotary joint on various road surface environments through experiments. With the proposed method, the sub-crawler angle is appropriately controlled in response to changes in the road surface without obtaining external environment information such as the position and height of obstacles, enabling real-time adaptation to unknown variations in the environment (road surface conditions). In addition, it was possible to suggest the possibility of the obstacle running performance compensation by changing the compliance of the sub-crawler rotary joint at any time based on only the posture information of the robot.

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

屋外での調査や点検作業では、作業者の安全性確保を目的として、ロボット技術の活用が望まれている。特に、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。しかし、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、その走行路面は流動的でもある。また、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遠隔制御では、走行空間や路面の情報は限定的なものとなる。高い不整地走破性を有しているサブクローラを複数有するクローラ型移動ロボットにより未知で不確かな凹凸路面を走破させる場合、その遠隔操作は、オペレータの高度な操縦技術と経験に強く依存したものとなる。そこで、操縦支援システムとして、対地適応クローラロボット(サブクローラを有するクローラロボット)に関する半自律制御問題が研究課題となっている。それらの多くは、踏破対象の段差高さに応じて、サブクローラ回転角を制御することによって、ロボットの重心位置を変更するために、外部センサにより踏破対象の寸法(特に段差高さ)や形状を測定し、その情報をもとに逐次サブクローラ角度に関する目標回転角度を算出する方法が主流である[1]~[5]。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]。

我々は、能動型対地適応クローラロボットに対してサブクローラ関節ジョイント駆動部に対してコンプライアンス制御系を実装することにより、ロボットが「動く」ことによって生じる「ロボット」と「障害物(環境)」との相互作用によって走行路面の形状や剛性変化に対する適応能力が発現することを確認している。障害物との接触を外乱と捉えたコンプライアンス制御系の導入は、踏破空間情報を必要としない機構のダイナミクス特性を利用した制御手法であり、自然かつ効率的なサブクローラ制御を実現するとともに、進行方向と推進力の指令を与えるだけのシンプルな操作による路面への適応性(スムーズな対地適応性)に優れた移動ロボットの実現を可能にするものと考えられる。

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[8]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、サブクローラ関節ジョイント部に対するコンプライアンス制御系設計手法を確立し、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。

コンプライアンス制御系の設計手法は、サブクローラの拘束角度を制約条件とし、ロボットに働くモーメントと仮想ねじれ剛性によってフィードバックゲインを導出する行う手法を提案した。また、種々の走破/踏破環境に適したサブクローラ回転ジョイントのコンプライアンス性については議論がされていないため、本研究では、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の実装を目指し、種々の走破/踏破環境に対するサブクローラ関節ジョイント部に対するコンプライアンスの影響を考察することとした。

3. 研究の方法

(1) 仮想ねじり剛性を導入したコンプライアンス制御系設計

図1は、対地適応クローラロボットが踏破対象の障害物に対してロボットを押し付けながら障害物を踏破する押しのみ障害走破シーケンスを示す。我々は、押しのみシーケンスにおける対地適応性の優劣はサブクローラダイナミクスの「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。これまでに、ロボットが走行する際に発生する推進力とロボットと障害物間に生じるモーメントとの関係から、押しのみ障害走破シーケンスの走破原理を明らかにした。本研究課題では、押しのみ障害走破シーケンスにおいて、ロボット本体が持ち上がる瞬間のサブクローラ拘束角度とコンプライアンスとの関係について、サブクローラ回転ジョイント部に仮想的なねじり剛性の考えを導入することにより、サブクローラ回転ジョイントのコンプライアンス制御系設計における制約条件を定義することとした。設定した拘束角度に対して提案手法による制御系を模型ロボットに実装し、検証を行なうこととした。サブクローラ拘束角度を制約条件とすることで、任意にサブクロー

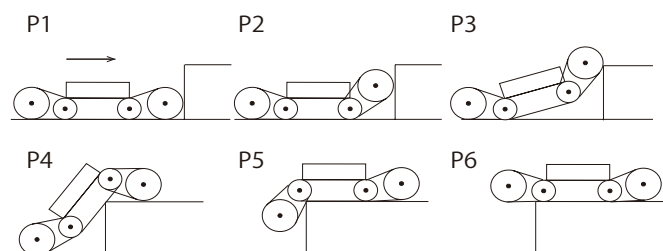


図1 押しのみ踏破シーケンス

ーラ回転ジョイントのコンプライアンスを可変できることを示す。

(2) 種々の走破／踏破環境に対するコンプライアンスの影響に関する考察

種々の路面特性を模擬するために種々の素材で障害ブロックを製作した。用意した障害ブロックは、木材、ゴムスポンジ、低反発ウレタン、スチロールビーズ、アルミナボールなどで製作した。各障害ブロックを設置した実験フィールドに対し、提案手法を実装した模型ロボットにより走破実験を行った。障害の形状や材質の違いに対して、サブクローラ回転ジョイントコンプライアンスの影響を考察する。各障害ブロックは、実際の災害現場の路面特性(復元力及び変形量)を模擬したものとなっている。

4. 研究成果

(1) コンプライアンス制御系の検証

提案するコンプライアンス制御系の設計手法に関する妥当性を検証するために、図3に示す小型模型ロボットである Mini Scott を用いて実験を行った。Mini Scott は前後に2本ずつのサブクローラを有するクローラロボットであり、諸寸法は、全長 360mm, 幅 255mm, 前方／後方サブクローラ長さ 251 mm, メインクローラプーリー間距離 112mm, サブクローラ先端プーリー径 70mm, メインクローラプーリー径 50mm, ロボット質量 3.1kg である。各設定拘束角度に対して決定されたフィードバックを用いてコンプライアンス制御系を実装し、移動速度を 5cm/sec, 制御周期を約 30msec として実験を行った。



図3 小型模型ロボット : Mini Scott

サブクローラ回転ジョイント部にコンプライアンス制御系を実装した Mini Scott を壁面に接触させ、本体が持ち上がる瞬間のサブクローラ角度を計測した結果を図4に示す。横軸は設定拘束角度、縦軸は実験値である。実験は3回行った。サブクローラ角度の実験値は、概ね設定した拘束角度に近い値を得ることができた。差異の要因としては、サブクローラが壁面に接触後、クローラベルトによる伝達力により本体を持ち上げる方向に力が働くため、設定した拘束角度に到達する前に、本体が持ち上がってしまい、全体的に拘束角度が減少したものと考えられる。以上より、本論文で示した仮説および制御系設計手法の妥当性を確認することができた。

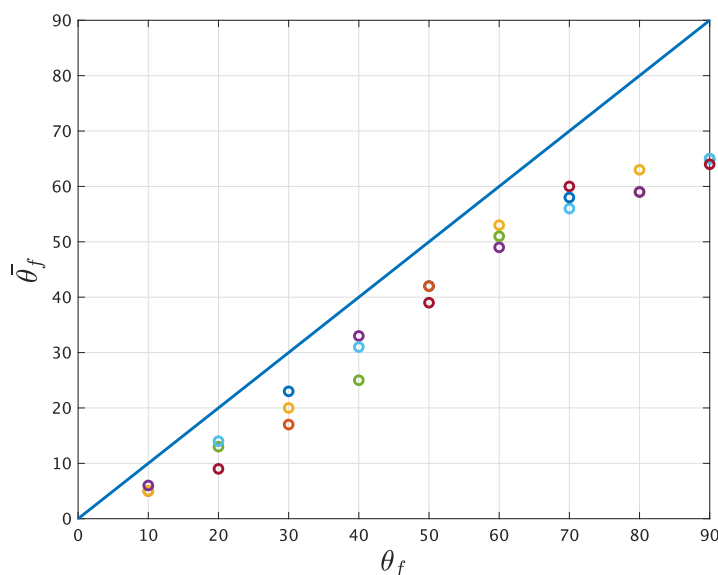


図4 サブクローラ拘束角度に関する実験結果

(2) 検証実験

各障害ブロックに対して、サブローラの回転ジョイントコンプライアンスの影響を確認するため、検証用模型ロボット Mini Scott を用いて図 5 に示すような NIST/ASTM 標準試験法にもとづいたパレット上に各障害ブロックを設置した実験フィールドを用いて、障害走破実験を行った。

移動速度の設定とサブローラ回転ジョイントのコンプライアンス制御系を実装するとともに、サブローラ角度や角速度、移動速度に関して各モーターから出力されるエンコーダ情報を用いている。本体姿勢角の計測は CH Robotics 社製の IMU UM7 を使用している。モーションキャプチャーシステムにて走破時のロボットの重心位置の移動軌跡を計測した。図 5 に木材で製作した障害ブロックを走破している様子（設定拘束角度 40 度、木材 2 段）を示す。

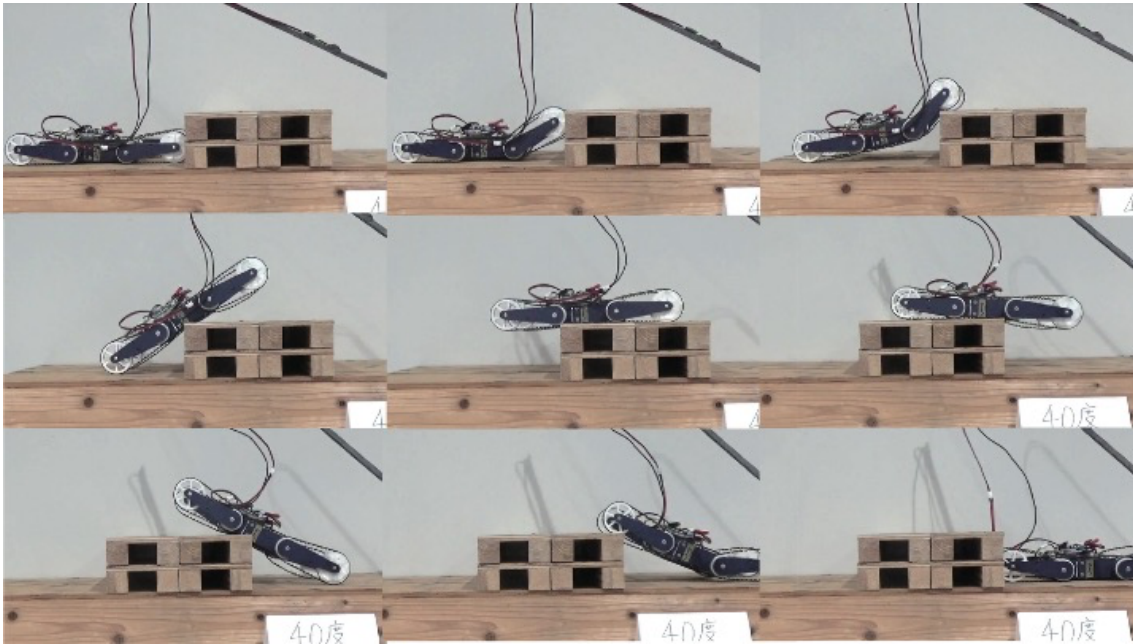


図 5 障害走破実験の様子
(障害ブロック：木材，2 段，設定拘束角度 40 度)

実験結果より、障害の高さ変化に対して、提案手法により適応が可能であることが確認された。しかし、障害物高さが高い場合、本体重心位置が、障害高さを超えたあと、コンプライアンスが小さい場合は、サブローラが障害上面から離れてしまうため、水平方向（ヨー方向）の回転が生じ、直進走行性が劣化する要因となることが確認された。

障害ブロックの材料特性の違いによる影響に関しては、木材とゴムスポンジでは、走破時の姿勢変化にほぼ差異はなく、低反発ウレタンフォーム、アルミナボール、ナイロンビーズは、ともに、柔らかい素材であるため、木材に比べ、障害ブロックの変形が大きく、走破時の姿勢に大きな差異が生じた。また、サブローラの拘束角度に左右差が大きく生じ、ヨー方向のずれが大きく生じる結果となった。

以上の結果より、障害ブロックの特性に応じて、サブローラの拘束角度は変化し、障害走破時の姿勢を適切に変化させながら走破することが可能であることを確認した。一方で、障害（路面）の変形に差が生じる場合は、姿勢安定性や直進走行性に影響を与えることから、ロボットの姿勢に応じてサブローラ回転ジョイントのコンプライアンスの変更が有効であることが推察される。

ロボットと障害物とのインタラクションに注目し、能動型対地適応クローラロボットの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、障害の位置や高さなどの環境情報を必要としないだけでなく、複雑で高度な制御システムを導入することなく、ロボットの内部情報のみでサブローラ角度が適宜制御されることから、未知の環境（路面状況）変化に対してリアルタイムに優れた対地適応性（環境適応能力）を発現することが可能であるとともに、ロボットの姿勢情報をもとに、サブローラ回転ジョイントのコンプライアンスを変更することにより障害走破性能を補償できる可能性を示唆することができた。

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] S. Suzuki, S. Hasegawa and M. Okugawa, 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] 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 1件）

1. 著者名 渡邊彩夏, 三浦洋靖, 奥川雅之, 畑中錦也	4. 巻 38
2. 論文標題 火災救助活動におけるロボット技術活用を想定したシナリオ検証	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 651-656
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.38.651	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 三橋知典, 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押し登りシーケンスにおける障害物とのインタラクション
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2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三橋知典, 渡邊彩夏, 長谷川大也, 奥川雅之
2. 発表標題 サブサブクローラを有するクローラロボットにおける踏破環境とのインタラクション
3. 学会等名 第21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 2020年

1. 発表者名 A. Watanabe, M. Okugawa, K. Oogane, T. Kimura, T. Kinugasa, and Y. Ohtsubo
2. 発表標題 Effect of Compliance on Ground Adaptability of Crawler Mobile Robots with Sub-Crawlers
3. 学会等名 The 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三橋知典, 金島智樹, 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におけるサブクローラ回転ジョイントのコンプライアンス制御系設計
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2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三橋知典, 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におけるサブクローラ回転ジョイントのコンプライアンス制御
3. 学会等名 第23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 2022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	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)	
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	衣笠 哲也 (Kinugasa Tetsuya) (20321474)	岡山理科大学・工学部・教授 (35302)	

6. 研究組織（つづき）

	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	大坪 義一 (Ohtsubo Y0shikazu) (90257973)	近畿大学・理工学部・准教授 (34419)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関