

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：21602

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04053

研究課題名（和文）サブクローラ型ロボットの移動時の自律水平制御

研究課題名（英文）autonomous level control of sub-crawler robot in motion

研究代表者

成瀬 継太郎（NARUSE, Keitaro）

会津大学・コンピュータ理工学部・教授

研究者番号：10301938

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では三次元地形とサブクローラ型ロボットのモデルが既知で、ロボット正確な位置と姿勢が与えられるときに、移動において十分に安定な姿勢とそれを実現するサブクローラ角度の決定方法、およびそれを実現するコントローラの開発を行った。とくにサブクローラ型ロボットの安定な姿勢制御において満たすべき制約を（A）クローラ接地面先の最大化と（B）クローラのゼロ・モーメント・ポイント（ZMP）がサブクローラの支持多角形内に存在することの2つとした。数値実験により開発した手法の有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、従来考察が行われていなかったサブクローラ型ロボットが不連続地形を移動する際の最適なサブクローラ角度が明らかになった。この成果は直接的には姿勢制御に適用できるが、さらに経路計画に適用することによってより安定で追従しやすい経路を生成できるのでナビゲーションの総合的な性能が向上すると考えられる。さらにこの成果は災害対応ロボットだけでなく、スロープを含む作業空間で動作する移動ロボット全般に応用することが可能であり、ロボットの可用性が向上することが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, it has been developed that autonomous control methods of sub-crawler angles of a mobile robot such as it always maintains a stable pose moving on discontinuous slopes when a robot and terrain one is given, assuming a correct position and orientation of the robot is available. In particular, the following two points are considered in this project: (A) maximization of contact surface areas of crawlers, and (B) existence of the zero-moment point (ZMP) in a support polygon of the robot. The methods are verified with numerical experiments.

研究分野：ロボット工学

キーワード：サブクローラ 姿勢制御 運動学 災害対応ロボット 標準試験法

## 1. 研究開始当初の背景

サブクローラ型移動ロボットは不整地で動作する災害対応ロボットに応用されることが多く、未知の環境でロボストに動作することが求められるため遠隔操作のユースケースがほとんどであった。そのため、経路計画は操作者が行うものとし、未知の段差を乗り越えるためのサブクローラ角度の自動制御手法などが開発されていた。

一方、三次元計測技術の向上によりロボットの周囲の地形の測定が可能になり、事前の経路計画を行うことが可能になってきている。このとき三次元地形を移動するサブクローラ型ロボット特有の課題は、三次元における姿勢の安定性である。水平面を移動するロボットではロール角とピッチ角ともに0度でありヨー角(方位角)が変化するだけなので、ロボット転倒の危険性を考慮する必要はなかった。しかし三次元地形の移動では前述の三つの角度がすべて変化するため転倒しないような姿勢制御が必要になる。しかし従来の研究では未知の地形を仮定していたためロボストな姿勢制御に留まっており、最適な姿勢制御は実現されていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、三次元地形とサブクローラ型ロボットのモデルが既知で、ロボット正確な位置と姿勢が与えられるときに、移動において十分に安定な姿勢とそれを実現するサブクローラ角度の決定方法、およびそれを実現するコントローラを開発を行う。

本研究では、サブクローラ型ロボットの安定な姿勢制御において満たすべき制約を(A)クローラ接地面先の最大化と(B)クローラのゼロ・モーメント・ポイント(ZMP)がサブクローラの支持多角形内に存在することの2つとする。(A)については、傾斜が急あるいは地盤が軟弱なときは、十分な駆動力を地盤に与えるためにクローラの接地面積を最大にすることから導かれるものである。一方、地盤が強固かつ摩擦係数が大きいときは、クローラが大きな駆動力を地盤に伝えることのできるため、接地面先最大化の制約は除外することができる。このときは姿勢角の時間変化の最小化の制約を入れることによって、同じ姿勢を取り続けるという安定な姿勢(例えば天板が水平を維持)を実現することができる。(B)については、上り傾斜を移動する際に推進力の慣性力がロボットの重心にかかりロボットが転倒する危険性がある。それを防ぐためには後方のサブクローラを接地させる、あるいは推進力を小さくするという対応が考えられる。本研究ではそれをZMPがサブクローラ型ロボットの支持多角形内に存在するという制約として表現し、それを満たすサブクローラ角度とロボットの推進力を求める。

## 3. 研究の方法

本研究では、ロボットは左右のメインクローラを含む中央部、左前サブクローラ、右前サブクローラ、左後サブクローラ、右後サブクローラの5つのリンクからなるモデルとする(図1)。そして地形は傾斜が不連続に変化するものとする(図2)。本研究では階段のような段差は斜面に対して細かな凹凸が重ねられたものと解釈し、サブクローラの角度制御には影響を与えないものとする。

このモデルに対してクローラ接地面先の最大化を幾何学的に考察し、最適なクローラ角度を導出した結果をまとめたものが図2である。メインクローラ全体が斜面に含まれるときは、前後のサブクローラはメインクローラを阻害しない角度に制御する。メインクローラが斜面の傾斜が正に遷移する(谷に対応)ときは、メインクローラは端点でしか斜面に接触しないため前後のサブクローラをそれぞれの斜面に設置するようにする。一方、斜面の傾斜が負に遷移する(山に対応)ときは、接地面先を最大化すると頂上での姿勢の変化速度は大きくなる。そこで姿勢の安定性を優先するときは中央部が水平を維持するようにサブクローラを制御する。

さらに昇り傾斜の際は、図3に示さるよう重心のZMPをモデル化し、それがメインクローラの支持多角形の外側に位置するときは、まず後サブクローラを接地させ支持多角形を増大させ、それでもZMPが支持多角形に位置するときは推進力を減少させる制御を行う。

## 4. 研究成果

開発した手法に基づきロボットコントローラを開発し、ロボットシミュレータで姿勢制御の安定性を検証した。図4から図6は標準試験法連続ランプと呼ばれるコースにおいて、3つの異なる重心高さ(低:0.1m, 中:0.25m, 高:0.5m)によるロボットモデルに対して、3つの異なるサブクローラ角度制御方法による重心の軌跡(青:接地面先最大化制約, 赤:姿勢変化最小制約, 紫:参照:固定サブクローラ角)を示したものである。重心の軌跡は地形形状に近いほど安定である。谷を移動するときは3つの制御法による重心の軌跡に差はないが、山を移動するときは大きく異なる。紫の参照手法と青で示された接地面先最大化制約では山の頂上を乗り越える瞬間に重心が回転運動を行う。一方、赤の姿勢変化最小制約では重心の軌跡は低い位置に留まっている。さらにロボットの重心が高いときには紫の参照手法ではロボットは転倒するが、提案手法の青と赤では移動が実現できている。

さらに斜面に傾斜が大きいときの結果を図7に示す。これはロボットの重心位置が0.25mで

斜面の傾斜が30度するときである。このときも参照の手法ではロボットは転倒するが、提案手法で移動が実現できている。

本研究では地形がロボットの進行方向に対して左右対称のケースについて考察を行った。残された課題は、左右非対称ケースでの検証である。これらに対しては本研究で開発した手法を左右のサブローラに対して独立に適用することで解法が得られると期待できる

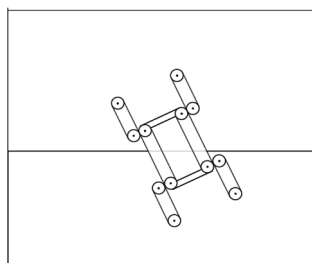


図1：サブローラ型ロボットのモデル。

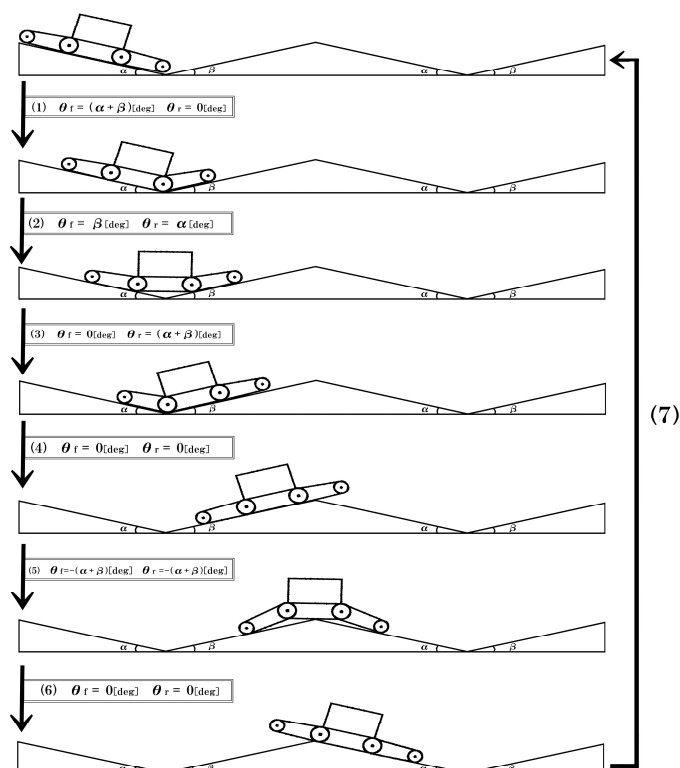


図2：地形のモデルと導出されたサブローラ角度制御ルール。

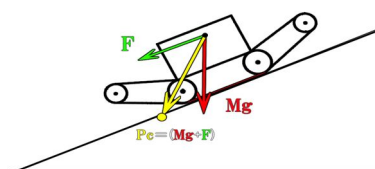


図3：傾斜地におけるサブローラ型ロボットのゼロモーメントポイント。

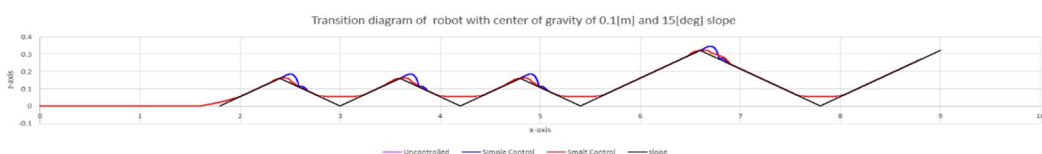


図4：標準試験方法連続ランプコース(傾斜15度)で重心高0.1mのときの3種類のサブローラ角度制御方法による重心の軌跡(青：接地面先最大化制約, 赤：姿勢変化最小制約, 紫：参照：固定サブローラ角)。

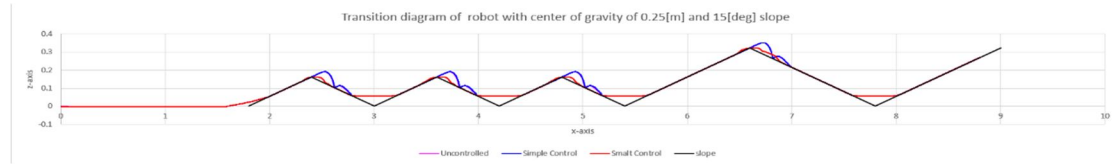


図5：標準試験方法連続ランプコース(傾斜 15 度)で重心高 0.25m のときの 3 種類のサブクローラ角度制御方法による重心の軌跡 (青：接地面先最大化制約，赤：姿勢変化最小制約，紫：参照：固定サブクローラ角).

図6：標準試験方法連続ランプコース(傾斜 15 度)で重心高 0.5m のときの 3 種類のサブクローラ角度制御方法による重心の軌跡 (青：接地面先最大化制約，赤：姿勢変化最小制約，紫：参照：固定サブクローラ角).

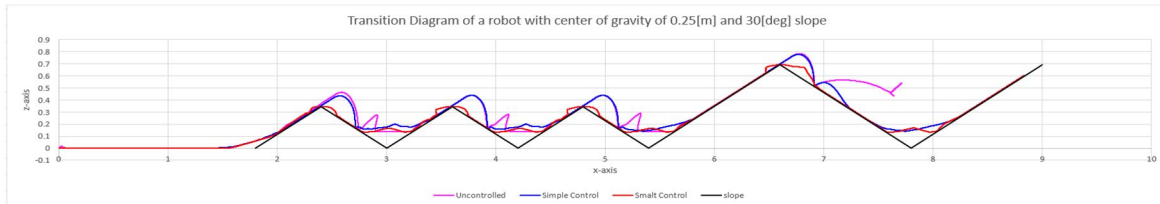


図7：傾斜 30 度の連続ランプコースで重心高 0.25m のときの 3 種類のサブクローラ角度制御方法による重心の軌跡 (青：接地面先最大化制約，赤：姿勢変化最小制約，紫：参照：固定サブクローラ角).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Hiroaki Ogawa, Keito Shishiki, Udaka A. Manawadu and Keitaro Naruse1	4. 巻 102
2. 論文標題 Large Area Inspection Using 3D Point Cloud Data in a Disaster Response Robot	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The 3rd ETLTC International Conference on Information and Communications Technology (ETLTC2021)	6. 最初と最後の頁 04010-04015
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/shsconf/202110204010	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 該当する
1. 著者名 Daichi Shima, Tomoyuki Furukawa, Ryuma Aoba, Ayato Ohashi, Kota Tsuruno and Keitaro Naruse	4. 巻 102
2. 論文標題 Team Activity of Robot Competition of Simulated Robot in World Robot Summit 2020	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The 3rd ETLTC International Conference on Information and Communications Technology (ETLTC2021)	6. 最初と最後の頁 04016-04019
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/shsconf/202110204016	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 該当する
1. 著者名 Udaka A. Manawadu, Hiroaki Ogawa, Keito Shishiki, Yuki Funayama, Hiroto Sasaki, Takuma Suzuki and Keitaro Naruse	4. 巻 102
2. 論文標題 Towards Developing a Teleoperation System for a Disaster Response Robot	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The 3rd ETLTC International Conference on Information and Communications Technology (ETLTC2021)	6. 最初と最後の頁 04005-04009
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/shsconf/202110204005	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 該当する
1. 著者名 成瀬 継太郎、河野 智也、阿部 文明、中村 啓太、矢口 勇一、小川 純	4. 巻 2018A
2. 論文標題 ロボット遠隔操作エッジネットワークと物理=情報現実空間を用いたロボットの遠隔操作システム	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 精密工学会学術講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 105 ~ 106
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11522/pscjspe.2018A.0_105	査読の有無 無
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7件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Udaka A. Manawadu, Kakeru Abe, Hiroaki Ogawa, Keitaro Naruse
2. 発表標題 A Novel Development Process of a Robust Software Module of Manipulation of a Mechanical Device Incorporating with Robot Simulator
3. 学会等名 The Twenty-Seventh International Symposium on Artificial Life and Robotics 2022 (AROB 27th 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keitaro Naruse
2. 発表標題 Fleet Robot System Connecting Multiple Platforms and Smart Building by Cyber-Physical System
3. 学会等名 The International Conference of Innovation and Engineering Technologies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 成瀬継太郎
2. 発表標題 搬送ロボットのCyber-Physical Systemと産学連携
3. 学会等名 第28回ソフトウェア工学の基礎ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古川智之, 成瀬継太郎, 阿部文明, 鈴木健太, 川端邦明, 中村啓太, 渡部有隆
2. 発表標題 経路の追従可能性を考慮した 3次元地形図における経路計画
3. 学会等名 精密工学会2021年春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 嶋大地, 成瀬継太郎, 阿部文明, 鈴木健太, 川端邦明, 中村啓太, 渡部有隆
2. 発表標題 ペジアンフィルタを用いた接触のみによる障害物推定
3. 学会等名 精密工学会2021年春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 志々木啓人, 成瀬継太郎
2. 発表標題 アクティブセンシングを用いたRGB-Dデータからの物体認識及び姿勢推定
3. 学会等名 精密工学会2021年春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keitaro Naruse
2. 発表標題 Software Driven Robot Development and Robotics Engineer Education
3. 学会等名 7th International Conference on Information and Education Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------