

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：13601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18876

研究課題名（和文）履帯駆動系のオンオフ制御による自動操舵技術の構築

研究課題名（英文）Development of automatic steering technology for a tracked vehicle by on-off drive

研究代表者

千田 有一（Chida, Yuichi）

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：00345753

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、左右それぞれの履帯をオンとオフの2値を切り替えて駆動する方式の履帯車両の制御問題を考える。十分な制御性能を確保するためには、操作量が2値に制約される条件下での制御系設計が必要である。研究成果として、モデル予測制御と時間軸状態制御系に基づき、オン/オフ切り替えを少なくした操舵制御方法の提案、オンオフ駆動型の系にも適用可能なサーボ系設計方法の提案、進行速度変動を伴う運動制御のための時間軸状態制御系の補正方法の提案、レタス自動収穫装置を想定した適用検討、傾斜地での制御性能評価を行った。これにより、当初の研究計画で期待した以上の成果を得ることができ、目標を達成できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

左右それぞれの履帯をオンとオフの2値を切り替えて駆動する方式の履帯車両は、農業機械などの安価なシステムで多用される。そのため、それらのシステムに搭載可能な程度に簡便な制御方法を実現することは、自律走行車両の普及に必要である。一方、それらの制御方法として、特にサーボ系の設計方法の構築が必要となる。本研究では、モデル予測制御と時間軸状態制御系を併用し、期待した性能を実現する制御系設計方法の構築を目指した。その結果、サーボ系設計方法の提案を含めた幾つかの実用的な知見を見出すことができた。これにより、学術的にも社会応用の意味でも実現可能性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：In this report, a control problem for a tracked vehicle, whose left and right crawlers are individually driven by switching two control values for on and off drive, respectively, is discussed. In this report, some novel control methods are proposed, such as an approach that uses model predictive and time axis state controls to avoid frequent control input change, a servo control for an on/off drive system, a modified control for the time state axis variation, and slope control performance verification, and the application of the proposed methods on a lettuce harvester are investigated. An original study plan was necessary to achieve the above mentioned results, and we were able to achieve our goal.

研究分野：制御工学

キーワード：離散値入力 履帯車両 モデル予測制御 経路追従制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自律走行車両の自動操舵技術については、多くの実用化研究がなされている。また、農業分野においてもロボットトラクタなど、自律走行技術は実用化レベルとなっている。一方、農業用の運搬車両等、荒地の走行には履帯車両が用いられており、装置コストを低減化するために左右履帯の走行と停止の2つの状態を切り替えて方向操舵するタイプの履帯車両が広く活用されている。そのような履帯車両の自動走行制御については十分な検討がなされておらず、結果として自律走行車両も普及していない。一方、その制御技術が確立されると、比較的安価な装置での自律走行が実現できる。

2. 研究の目的

車両の自動操舵制御技術の確立は、我が国の社会インフラ技術構築に係る重要な技術となっている。4輪の自動車等ではその自動操舵について多くの研究開発がなされているが、農業用運搬車両等で用いられるクローラ(履帯車両)では、左右の駆動系をそれぞれ別々に動作させることで左右の方向操舵を行うため、自動車における方法が適用できない。特に、多くのクローラではそれぞれの履帯の状態を、駆動(オン)と停止(オフ)の2つの状態の切り替えによって操舵を行う必要がある。そのため、その制御が難しいことから、制御理論的なアプローチによる学術的な研究結果がほとんど見られない。しかしながら、農業や建設機械分野ではクローラは非常に広く活用されているため、その自動操舵制御技術の確立は社会インフラ技術の一つになり得る。そこで、本研究では、オン(駆動)とオフ(停止)の2値の駆動状態によって運動するクローラの自動操舵技術の開発を目的とする。特に、目標軌道への追従性能の良い制御アルゴリズムの開発を目指す。ただし、農業分野などへの応用を念頭に置いた場合、低コスト化が求められることから導入可能な制御用コントローラ性能は限定される。そのため、できるだけ簡単な制御アルゴリズムでの実現が望まれる。さらに、農業生産現場は、平坦地ではなく傾斜や凹凸が多い状況であるため、そのような現実的な状況に対応させる。

3. 研究の方法

クローラにおいて、左右それぞれの履帯をオン/オフ駆動させて操舵を行うためには、2値の制御入力を想定した制御系を構成する必要がある。既存の方法としては、線形制御と量子化器を組み合わせる方法が考えられるが、操作量の切り替えが頻発する結果となり、実用には適さない。そこで、モデル予測制御の考え方を導入し、頻繁な切り替えを避けるために評価関数にペナルティ関数を付加する方法を試みたところ、操作量の切り替えは激減し、実用に供するレベルでの実現が可能であることを計算機シミュレーションによって確認した[1]。一方、オン/オフ駆動による非線形モデル予測制御については、大塚らによるホバークラフトへの適用が知られている[2]。しかし、非線形モデル予測制御によれば、良好な性能を示すものの演算量が多くなってしまい、農業用装置のような安価なシステムを対象とした場合には必ずしも適さない。そのため、安価な装置に適用可能な技術として構築するため、以下の3つの研究課題の解決を試みる。

(課題1) モデル予測制御ベースのオン/オフ切り替えを少なくした操舵制御による方法論の構築と実験検証を行う。

(課題2) 制御対象の姿勢変動、圃場の勾配の影響を考慮した操舵制御方法の構築を行う。

(課題3) 傾斜地における操舵実験を実施し、自動操舵制御技術の検証を行う。

4. 研究成果

(課題1) モデル予測制御ベースのオン/オフ切り替えを少なくした操舵制御による方法論の構築と実験検証を行う。

(成果1-1) [3]

オンオフ駆動型の履帯車両を運動学モデルに基づいて制御対象として表し、モデル予測制御と時間軸状態制御系を用いたアプローチによる制御方法を提案した。その際、操作量の切り替え回数を制約条件として考慮することで、切替回数を低減しつつ、望ましい性能が得られることを実験的に検証した、構築した実験システムを図1に示す。その際、リアルタイム制御での実装を想定し、切替回数の制約条件を凸関数で表現することで、リアルタイム制御を実現した。出力

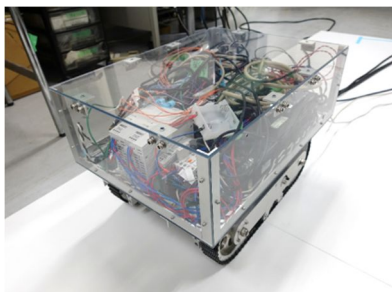


図1 履帯車両実験装置

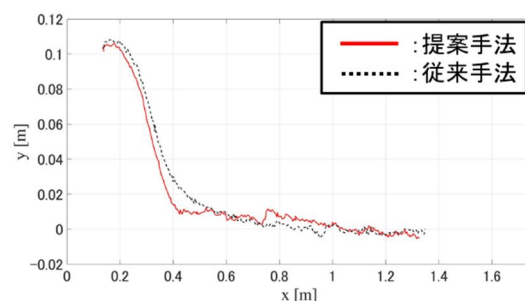


図2 追従制御実験結果

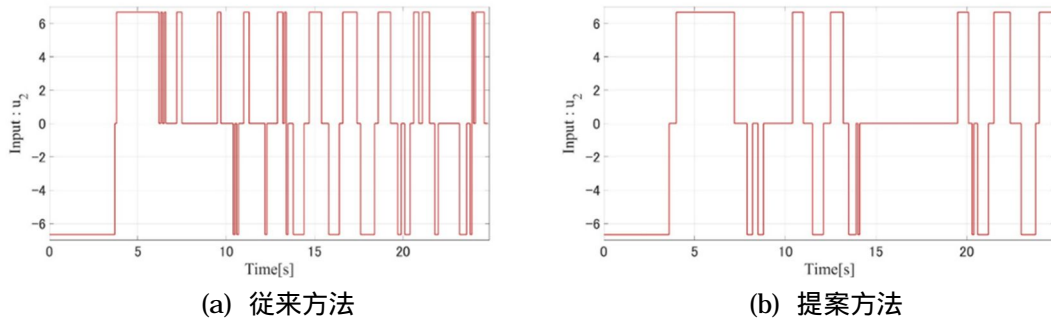


図3 追従制御時の操作量の切り替えの様子

を原点に追従させる制御実験結果を図2に示す。また、操作量の切り替えの様子を図3に示す。実験結果によれば、約25秒間の経路追従制御において、切替回数の制約なしの場合には操作量の切り替え回数が53回であったのに対し、提案方法によって切替回数制約を付加した場合には28回と低減し、約47%の切り替え回数低減化を実現できた。以上により、提案方法の有効性を確認した。

(成果1-2) [4]

オンオフ駆動型履帯車両の農業用自動収穫装置への応用を念頭におき、モデル予測制御に基づく追従制御の実現可能性について検討した。露地栽培されたレタスの自動収穫を想定した場合、履帯車両の旋回半径制約の下での経路追従制御が必要となる。一方、収穫対象物は必ずしも直線ではないため、旋回半径制約を満たしつつ自動収穫可能な最適経路を進行させることが必要となる。この問題に対し、カメラ画像に基づいて認識された収穫対象物の座標を数点先まで取得し、モデル予測制御の考え方によって追従させることを提案した。そこでは、計算機上で仮想的に構成した履帯車両モデルを、観測された収穫対象物の位置情報に基づいて計算機シミュレーションによって仮想的に経路追従させる。その場合、履帯車両の旋回半径制約はモデルに含まれるため、その制約条件を満たす解軌道しか導出されない。その手順で得られた解軌道(履帯車両への操作量)を実際の履帯車両の操作量として与えることで、制約条件を満たした制御が可能となる。実圃場で観測したレタス位置への追従制御シミュレーションを行ったところ、提案方法によれば旋回半径制約を逸脱することなく経路追従制御が実現できることを確認した。一方、収穫対象位置をスプライン補間などで滑らかに結んだ場合には旋回半径制約を逸脱する状況が発生することも確認した。

(課題2) 制御対象の姿勢変動、圃場の勾配の影響を考慮した操舵制御方法の構築を行う。

(成果2-1) [5]

制御対象の姿勢変動や圃場の勾配の影響を低減化させるためには、制御系をサーボ系として構成し、外乱抑圧性能を高める必要が有る。一方、操作量がオンオフ駆動である場合には、目標値追従制御性能が劣化する可能性が高い。また、定常偏差無く目標値追従させることは実現が非常に難しく、スライディングモード制御に見られるチャタリングのように、操作量の頻繁な切替が発生する懸念が高い。そこで、操作量の頻繁な切替を低減化した形でのサーボ系の設計方法を提案した。そこでは、リアプノフ関数を評価関数として、その差分の正負によって操作量の印加を切り替える。その際、操作量の印加を行わない時間帯では積分器による補償のループを遮断することで操作量の頻繁な切替を回避する。この方法は、操作量に不感帯を導入することと本質的に同じであるが、不感帯の閾値はリアプノフ関数の差分値に依存して可変となるため、固定値による不感帯利用の場合に比較して性能が向上する。計算機シミュレーションの結果を図4に示す。提案方法は、定常状態でのパルス状の操作量印加を回避できていることが分かる。

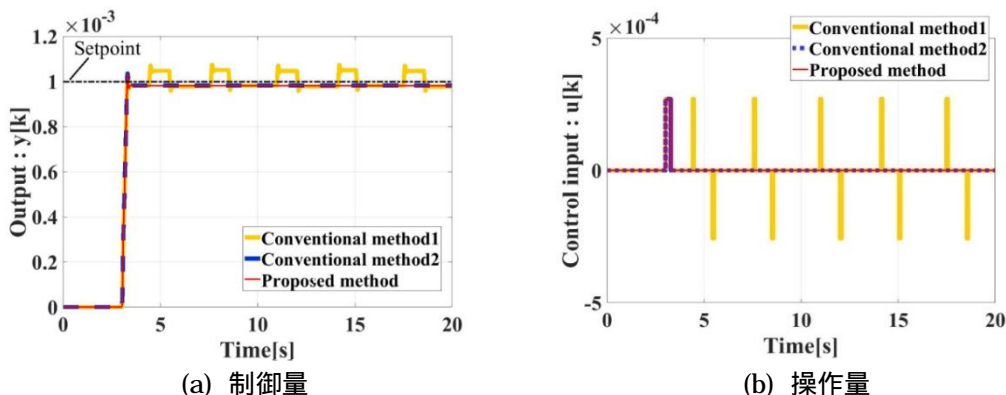


図4 操作量の頻繁な切替を回避したサーボ系の応答

(成果 2-2) [6]

オンオフ駆動型の履帯車両に時間軸状態制御系を用いた場合,進行速度一定の場合には良好な応答が得られるが,速度が変化する場合には応答が劣化する可能性が有る.この問題を解決するため,時間軸状態制御系の離散化時にサンプリング周期を進行速度に応じて変化させる方法を提案し,これにより良好な応答が得られることを見出した.この方法を目指値追従制御に適用し,その性能を検証した.シミュレーションによる制御性能評価結果を図5に示す.

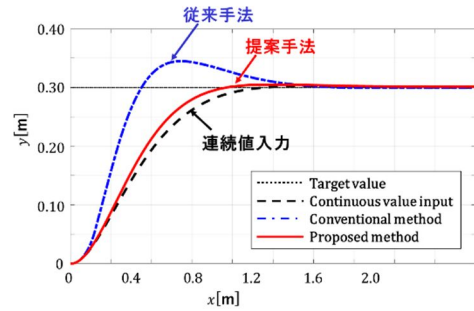


図5 目標値追従制御結果

(課題3) 傾斜地における操舵実験を実施し,自動操舵制御技術の検証を行う.

(成果 3-1: 未発表)

時間軸状態制御系に基づいたサーボ系設計手法を,傾斜地における経路追従制御に適用した.設定した傾斜環境は図6に示し,初期誤差の有る状態から原点に収束させる形での実験を実施した.実験結果の一例を図7に示す.図7は傾斜角が無い場合と10度の状態での応答の比較を示している.傾斜環境の場合には応答が劣化しているが,これは履帯の滑りに伴う劣化である.この点を改善した制御方法の開発が課題として明確化された.しかしながら,サーボ制御によって履帯の滑りが発生した状況でも目標経路への追従が実現されており,サーボ系による外乱抑圧性能の効果が確認できた.以上より,オンオフ型の操舵によっても,目標経路への追従が可能であることが確認できた.

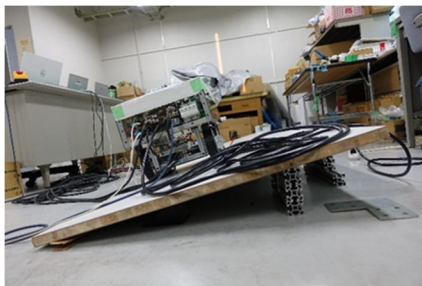


図6 傾斜面の設定

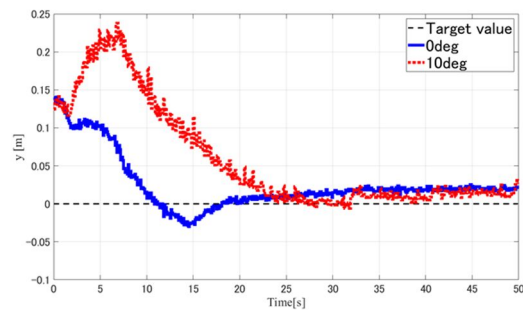


図7 追従制御結果

<引用文献>

- [1] 上條友和, 千田有一, 離散値入力を考慮したモデル予測制御に基づく履帯車両の軌道追従制御, 計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2016, pp.9-12, 2016
- [2] H. Seguchi, and T. Ohtsuka: Nonlinear Receding Horizon Control of an Underactuated Hovercraft, International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol. 13, Nos. 3-4, pp. 381-398 (2003)
- [3] 室伏拓馬, 千田有一, 林晴貴, モデル予測制御に基づく離散値駆動型履帯車両の経路追従制御, 第62回自動制御連合講演会, 2E1-02, 2019
- [4] T. Mitsuhashi, Y. Chida and M. Tanemura, Autonomous Travel of Lettuce Harvester using Model Predictive Control, Proc. of IFAC PapersOnLine 52-30, 155-160, 2020
- [5] Y. Chida and R. Hara, Setpoint tracking control with discrete actuators using controller switching, Proceedings of the ASME 2018 Dynamics Systems and Control Conference(DSCC2018), pp.1-9, 2018
- [6] 三橋朋也, 林晴貴, 千田有一, 種村昌也, 時間軸状態制御形における入力時間の補正によるオンオフ駆動型履帯車両の制御, 第62回自動制御連合講演会, 1I3-02, 2019

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Tomoya Mitsuhashi ,Yuichi Chida,Masaya Tanemura	4. 巻 52-30
2. 論文標題 Autonomous Travel of Lettuce Harvester using Model Predictive Control	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IFAC PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 155-160
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

1. 著者名 Yuichi Chida, Ryotaro Hara	4. 巻 -
2. 論文標題 Setpoint tracking control with discrete actuators using controller switching	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the ASME 2018 Dynamics Systems and Control Conference(DSCC2018)	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Tomoya Mitsuhashi ,Yuichi Chida,Masaya Tanemura
2. 発表標題 Autonomous Travel of Lettuce Harvester using Model Predictive Control
3. 学会等名 IFAC AGRICONTROL 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三橋朋也, 千田有一
2. 発表標題 レタス収穫用履帯車両におけるモデル予測制御を応用した経路生成
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2019 in Hiroshima
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三橋朋也, 千田有一, 種村昌也
2. 発表標題 オンオフ駆動型履帯車両の直線追従制御性能の向上
3. 学会等名 SICE中部支部シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 室伏拓馬, 千田有一
2. 発表標題 入力の切替回数制約を考慮した評価関数の凸関数表現と履帯車両のモデル予測制御
3. 学会等名 SICE中部支部シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三橋朋也, 林晴貴, 千田有一, 種村昌也
2. 発表標題 時間軸状態制御形における入力時間の補正によるオンオフ駆動型履帯車両の制御
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 室伏拓馬, 千田有一, 林晴貴
2. 発表標題 モデル予測制御に基づく離散値駆動型履帯車両の経路追従制御
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原 遼太郎, 千田有一
2. 発表標題 離散値入力型制御系における積分器の遮断を用いたサーボ系の構成
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 原 遼太郎, 千田有一, 種村昌也
2. 発表標題 離散値入力を用いた目標値追従制御系における積分器の遮断による応答改善
3. 学会等名 第60回自動制御連合講演会
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