

機関番号：14301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760275

研究課題名 (和文) 環境情報の不確かさを考慮した移動ロボットのロバスト予測制御

研究課題名 (英文) Robust predictive control for mobile robots in uncertain environments

研究代表者

福島 宏明 (FUKUSHIMA HIROAKI)

京都大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：40377015

研究成果の概要 (和文)：本研究では、まず、モデル予測制御を用いた移動ロボットの軌道生成において、ロボットの予測軌道が離散的であることから離散予測時刻間で衝突が起こる問題に焦点を当て、これを防ぐことを目的としたアルゴリズムの提案した。また、提案した手法を複数ロボットのフォーメーション制御に拡張し、予測時刻間で移動体同士の衝突回避、最適制御問題の可解性や閉ループ系の安定性の解析を行った。また、最適化問題を解くための分子限定法において、衝突回避問題の特性を考慮することにより、不必要な子問題の生成を抑え、最適化問題を解くための計算量を低減するアルゴリズムを提案した。また、従来の多くのフォーメーション制御手法では、リーダからの相対位置の指令値を各ロボットについて与える必要があり、ロボットの台数が増加すると困難になる問題を解決するため、ロボット群全体の重心の位置、向き、形状を特徴付ける抽象変数を導入し、オペレータによって与えられた軌道に対して、指定された幅を持つ経路を追従するようにロボット群の形状を自動的に変形させる制御手法を提案した。また、その制御手法の基礎となる、複数車両を直列に連結したヘビ型ロボットの先頭追従制御手法も提案した。さらに、これらの手法の有効性を計算機シミュレーションと実機実験により検証した。

研究成果の概要 (英文)：First, a new trajectory generation method based on model predictive control (MPC) has been proposed to prevent the collisions in time intervals between prediction time steps. This method has been extended to the multi-vehicle formation control based on MPC. We have also proposed an algorithm to decrease sub-problems generated to solve mixed integer problems for MPC based collision avoidance, which allows us to decrease the computation time for MPC at each sampling time. Furthermore, we have focused on a problem of most existing formation control method i.e. difficulty of determining the target position of each vehicle when the number of the vehicles is large, and have proposed a new formation method based on the abstraction of formation pattern. More precisely, we have introduced the abstraction variables which represent the position, orientation and shape of the formation, and proposed a method to control the shape of the formation automatically so as to move along the target path while keeping the width of the formation given by operators. We have also proposed a path tracking control method for snake-like robot which gives the basis of the proposed formation control method. The effectiveness of these methods has been demonstrated by simulations and experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：制御工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：予測制御，協調制御，ロバスト制御

### 1. 研究開始当初の背景

複数の自律移動ロボットによる協調作業の必要性が指摘され，フォーメーション制御に関する研究も多数報告されていた。また，それらの中でも，制御系の安定性のみならず，最適性の議論を行うことができる数少ない制御手法として，モデル予測制御に基づく方法が J. How (マサチューセッツ工科大学)，R. Murray (カリフォルニア工科大学)，研究代表者らにより研究されていた。これらの方法は，衝突回避を移動体の相対位置に対する不等式制約として記述し，リアルタイムで不等式制約付き有限時間最適制御問題を解くものであり，衝突回避の他にもモータトルクや速度の制限といった物理的な制約条件を考慮することができる。ところが，モデル予測制御によるフォーメーション制御の問題点として，(1) 最適制御問題が混合整数計画問題となるため，障害物や移動体の増加とともに計算時間が指数関数的に増加し，リアルタイムで解くことが困難となる，(2) 障害物の位置や各移動体の有限時間未来までの軌道は正確に与えられていると仮定し，その不確かさを考慮していない，などが残されていた。

### 2. 研究の目的

上記1. の背景を踏まえ，(1) フォーメーション制御のための高速混合整数計画ソルバーの開発，(2) 障害物の位置の推定誤差や各ロボットの軌道の予測誤差など，周辺環境の情報に一定の不確かさが存在する場合にもシステムを安定化するロバストな予測制御手法の開発，(3) 計算機シミュレーション，および実際の移動ロボットシステムを用いた実験による有効性の検証

### 3. 研究の方法

フォーメーション制御で想定される問題では，予測時間の中で常に衝突回避が必要となるのは稀であり，回避を行う対象も障害物の1部にすぎないため，多くの衝突回避制約は結果的には不必要となっている。したがって，標準的な混合整数計画法では，実際には不必要な衝突回避制約に対して大量の子問題を生成していることになる。そこで，上記の研究目的(1)については，衝突回避問題の特性を考慮することにより，不必要な子問題の生成を抑える新たな分枝限定法を提案する。(2)については，各ロボットの予測軌道

が離散的であることから離散予測時刻間で衝突が起こる問題に焦点を当て，これを防ぐことを目的としたアルゴリズムの提案，および実験検証を行う。

### 4. 研究成果

(1) 予測時刻間の障害物回避を考慮したモデル予測制御に基づく軌道計画法：各ロボットの予測軌道が離散的であることから離散予測時刻間で衝突が起こる問題に焦点を当て，これを防ぐことを目的とした「可変最大速度法」と「遷移制約法」という2つのアルゴリズムの提案を行った。可変最大速度法は，障害物を仮想的に拡大するだけでなく，それと連動して障害物近傍の最大速度を下げることにより，予測時刻間の障害物回避を保証し，なおかつ軌道が必要以上に遠回りになる従来の問題を低減する手法である。また，遷移制約法は障害物回避制約の遷移に着目し，安全な遷移条件のみ生成することで予測時刻間の障害物回避を保証する手法である。これらの手法は，従来の方法と異なり，最適化問題を繰り返し解くことなく，障害物と衝突しない軌道が得られるという利点をもつ。また，これらの方法を用いた場合に予測時刻間での衝突回避を理論的に保証するための条件を明らかにした。また，計算機シミュレーションおよび，図1に示す左右独立駆動二輪車両の`beego` (TechnoCraft 社製) を用いた実験検証を行った。最適化問題を解くためのサブルーチンには MATLAB Engine と CPLEX を用いた。



図1 Vehicle for experiment

図2の実線は予測時刻での障害物回避のみ考慮した場合の移動体の軌跡を示しており，障害物との衝突が起きてしまっていること

が確認できる．一方、破線と一点鎖線はそれぞれ可変最大速度法と遷移制約法を適用した場合の結果を示しており、これら2つの提案手法では衝突が起きていないことが確認できる．特に、可変最大速度法では障害物近傍において最大速度が制限されるため、障害物と距離を置いた軌道となっていることが確認できる．実際、移動体の入力を示した図3より、可変最大速度法では障害物近傍を走行した3～8 [sec]の間、速度が低く制限されていることが確認できる．

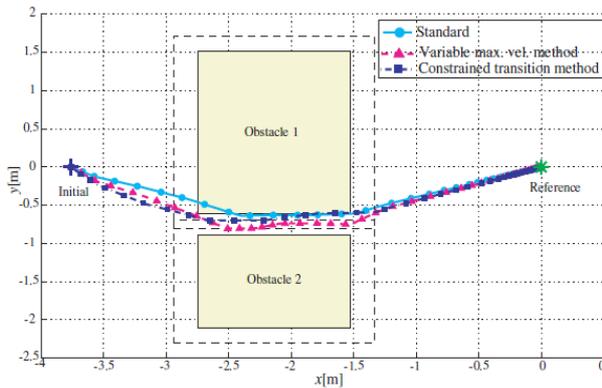


図2 Path of the vehicle in experiment

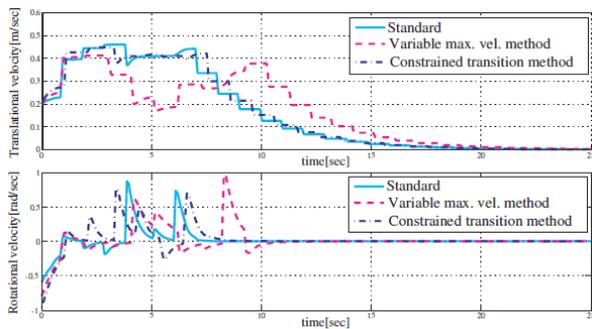


図3 Velocity input of the vehicle in experiment

(2) 予測時刻間の衝突回避を考慮した複数移動体のモデル予測編隊制御：上記(1)で静止障害物のみしか考慮していなかった単一移動ロボットの予測制御手法を、複数ロボットのフォーメーション制御に拡張し、予測軌道の不確かさに対してロバストな制御手法について研究を行った．静止障害物の場合と異なり、予測時刻間での衝突回避を保証する物体の仮想的な膨大量を見積もることが困難であるため、上記(1)で述べた可変最大速度法を拡張することは難しい．そのため、遷移制約法を拡張した方法を提案した．ただし、遷移制約法を用いる場合でも動的物体に対して予測時刻間の衝突回避を保証することは一般に困難である．そこで、フィードバック線形化を用いて閉ループ系を予測時刻間の衝突回避を考慮しやすい形に変換し、得ら

れたシステムに遷移制約を用いたモデル予測制御を適用している．また、この手法により予測時刻間で移動体同士の衝突が起きないことを数学的に証明した．また、最適制御問題の可解性や閉ループ系の安定性、および実機に実装する際に重要となる問題とアルゴリズムの修正法に関して考察した．さらに、計算機シミュレーションと実機実験により提案手法の有効性を検証した．実験には図1の独立駆動型2輪車両`beego(テクノクラフト社)`を4台使用し、1台をLeader、残りの3台をFollowerとあらかじめ設定した．図4は絶対座標系でのLeaderとFollowerの位置の軌跡を示したものである．図5はFollower間の最小距離を示したものである．これらの図より、衝突を回避しながら目標の編隊形状を達成できていることが確認できる．衝突回避制約を厳密には満たしていないが、制約の侵害量は最大でも約0.04[m]程度に抑えられ、衝突回避が達成されている．

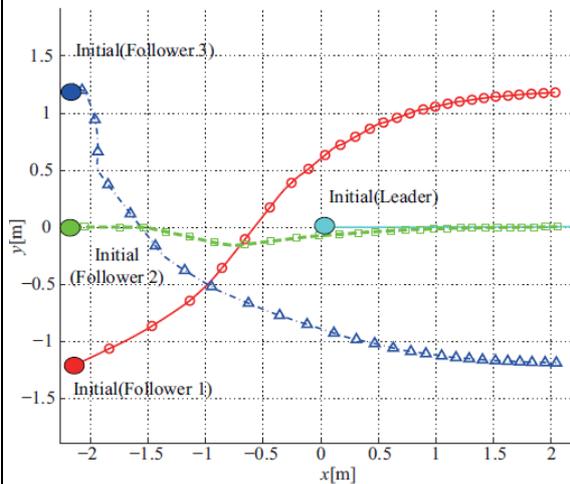


図4 Paths of the vehicles

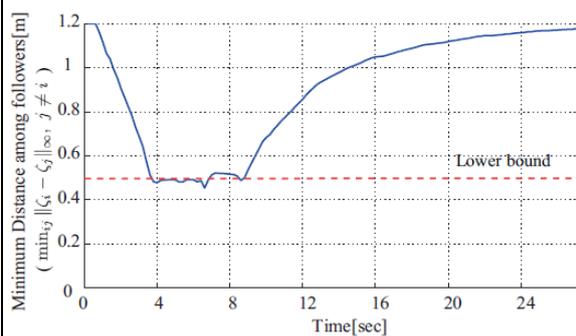


図5 Minimum distance among followers

(3) 衝突回避の特性を考慮した子問題生成法に基づくモデル予測編隊制御：モデル予測制御に基づく編隊制御における計算量を低減するために重要となるのが、整数混合最適化においていかに不必要な子問題の生成を抑えるかである．標準的な整数混合最適化手法を用いると、移動体の数の増加とともに最適

制御問題を解くための計算時間は指数関数的に増加し、Follower が 2 台の場合でも実装が困難となる場合があり、3 台ではほとんどの場合で実装が困難である。本研究で提案した手法では計算時間は Follower の台数よりも予測軌道における衝突の数に依存するため、多くの場合で計算量を低減できることを計算機シミュレーションで示した。また、モデル予測制御を用いた手法では過去に検証例が見られない 5 台のロボットで実機実験を行い、有効性を検証した。この結果は現在英文誌に投稿中である。

(4) 隊形の抽象化と配置の最適化に基づくロボット集団の先頭追従制御：従来の多くのフォーメーション制御手法では、リーダーからの相対位置の指令値を各ロボットについて与える必要があり、ロボットの台数が増加すると困難になる問題に着目して研究を行った。ロボット群全体の重心の位置、向き、形状を特徴付ける抽象変数を導入し、オペレータによって与えられた軌道に対して、指定された幅を持つ経路を追従するようにロボット群の形状を自動的に変形させる制御手法を提案し、目標隊形への収束性や衝突回避についての理論的な考察、および実験検証を行った。また、その制御手法の基礎となる、複数車両を直列に連結したヘビ型ロボットの



図 6 Snapshots of experiment of changing the width of the formation

先頭追従制御手法も提案した。実験検証は編隊の幅と長さを変化させる実験 (図 6) と、オペレータが指定した経路に沿って隊列を屈曲させる実験 (図 7) の 2 種類を行い、いずれもロボット同士が衝突することなく、目標の形状に制御されていることが確認できた。なお、実験には図 1 の移動ロボットを 8 台使用した。



図 7 Snapshots of experiment of path tracking

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 3 件)

①根和幸, 福島宏明, 松野文俊, 予測時刻間の衝突回避を考慮した複数移動体のモデル予測編隊制御, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 46 巻, 2010, 383-390

②福島宏明, 田中基康, 亀川哲志, 松野文俊, ねじ推進ヘビ型ロボットの先頭追従制御, 日本ロボット学会誌, 査読有, 28 巻, 2010, 707-714

③根和幸, 福島宏明, 松野文俊, 予測時刻間の障害物回避を考慮したモデル予測制御に基づく軌道計画法, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 45 巻, 2009, 406-413

〔学会発表〕 (計 3 件)

① Hiroaki Fukushima, Motoyasu Tanaka, Tetsushi Kamegawa and Fumitoshi Matsuno, Path-Tracking Control of a Snake-like

Robot using Screw Drive Mechanism,  
IEEE/RSJ International Conference on  
Intelligent Robots and Systems, 2011/9/24,  
Nice, France

② Kazuyuki Kon, Hiroaki Fukushima and  
Fumitoshi Matsuno, Trajectory Generation  
based on Model Predictive Control with  
Obstacle Avoidance between Prediction  
Time Steps, IFAC Symposium on Robot  
Control, 2011/9/11, Gifu, Japan

③有泉亮, 福島宏明, 松野文俊, 速度履歴に  
基づくねじ推進へビ型ロボットの先頭追従  
制御, 第28回日本ロボット学会学術講演会,  
2010年9月23日, 名古屋

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

福島 宏明 (FUKUSHIMA HIROAKI)  
京都大学・大学院工学研究科・講師  
研究者番号：40377015

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：