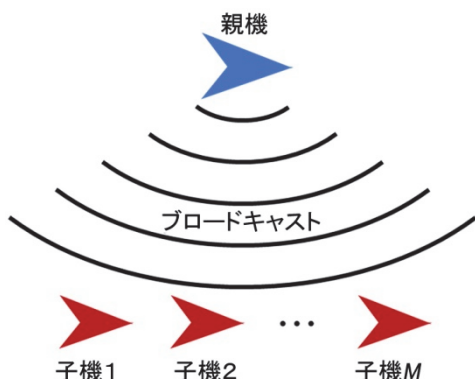


ブロードキャスト制御を基とした複数無人ビークルの誘導及びフォーメーション制御技術の開発

Development for Navigation and Formation Control of Multiple Autonomous Vehicles Based on Broadcast Control Method



藤倉 大貴*1
Daiki Fujikura

藤島 泰郎*1
Yasuo Fujishima

三菱重工業株式会社(以下、当社)が開発している無人ビークル製品において、複数台のビークルを協調的に運用してタスクを遂行する、いわゆる群制御の実現が求められている。群制御技術活用の一例として、ビークル群の誘導タスクを考える場合、任意台数のビークルを誘導可能な手法が存在すれば、一度に多数のビークルを誘導できるため、運用効率の向上が期待できる。そこで当社は、任意台数のビークルを制御可能な群制御手法の一つであるブロードキャスト制御を基とした、無人ビークルの複数台誘導技術を開発した。今後、当技術を用いた実機検証を実施し、製品適用に向けた開発を進めていく予定である。

1. はじめに

当社では陸上、水上、水中、空中といった領域で活動する無人ビークル製品を多数開発している。これら製品の一部では、運用効率の向上といったニーズを満たすべく、複数台のビークルを協調的に運用してタスクを遂行する、いわゆる群制御の実現が求められている。群制御技術を活用して実施したい主要なタスクの一つに、複数ビークルで構成される群の誘導がある。誘導に際しては、歩行者や他のビークルといった障害物の出現、あるいは道幅の変化等に対処するため、環境の状況に応じてビークル群のフォーメーションを変更可能な制御技術であることが望ましい。

フォーメーション制御と群の誘導を両立する手法の中には、ビークル同士の通信による相互情報共有が必要なものが存在する。しかし、ビークル台数が増えるほど相互通信可能なビークルの組合せが大規模になる他、ビークルの位置関係の変化によっては組合せの変更が必要になるなど、群全体の通信システムが複雑になる可能性が考えられる。通信システムの複雑さを抑制したい場合は、一度に誘導可能なビークル台数が限られるため、群制御によるタスク実施効率の向上は限定的である。

他方、ビークル間の相互通信を前提とする群制御とは別のアプローチとして、“ブロードキャスト制御”⁽¹⁾が提案されている。ブロードキャスト制御は、群全体の位置など状態を観測でき、世界座標系で静止している基地局が、全ビークルに対して共通のスカラ情報を一斉送信(ブロードキャスト)することで、ビークル群のフォーメーションを制御する手法である。この特徴により、ビークル台数の増減に依存しない通信システムの実現が可能で、理論的には任意台数のビークルを制御可能である。

前述した特徴を踏まえ、ビークル群の効率的な誘導を達成すべく、本研究では、ブロードキャスト制御における基地局の役割をビークル1台(親機)に割り当て、それ以外のビークル(子機)と

*1 デジタルイノベーション本部 CIS 部

ブロードキャスト通信する群制御システムを開発した⁽²⁾。このシステムでは基地局が子機とともに移動するため、基地局が従来のブロードキャスト制御のように世界座標系基準で静止していない。また、本報の以降で説明する通り、システムで定義する子機の状態遷移モデルも従来手法とは異なる。本報では、これらの差異から生じる課題を解決し、ブロードキャスト制御を対象のシステムに適用するための手法について、10台の子機ビークルモデルを用いたシミュレーション結果を交えて述べる。

2. ブロードキャスト制御⁽¹⁾について

ブロードキャスト制御とは、複数のビークルで構成される群の全体を管理する基地局を設け、そこからすべてのビークルに同一の制御指令をブロードキャストし、群全体を一括で制御する手法である。図1にブロードキャスト制御系のブロック線図を示す。本章では世界座標系を基準として、 M 台のビークルがフォーメーションを形成することを考える。図中の P_i ($i = 1, 2, \dots, M$)はビークル i の状態遷移モデル(ビークルのキネマティクス)であり、全方向に移動できるビークルを仮定している。式で表すと、

$$P_i: x_i(t+1) = x_i(t) + u_i(t)$$

と書ける。ここで、 t は時刻、 $x_i(t)$ はビークル i の位置、 $u_i(t)$ は制御入力である。

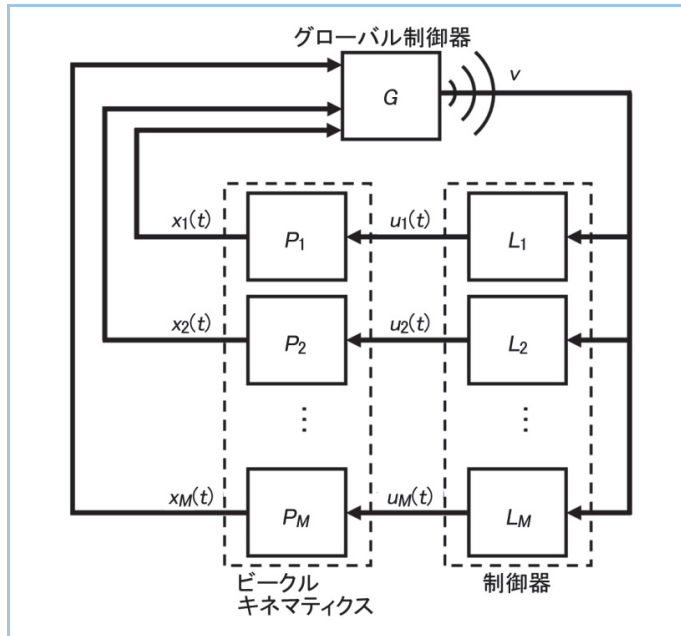


図1 ブロードキャスト制御系のブロック線図

図1中の G は、グローバル制御器と呼ばれる基地局である。 G は全ビークルの位置情報を入力として、ビークル群が目標のフォーメーションをどの程度達成できているか、言い換えると目標フォーメーションと現在のフォーメーションとの偏差を、評価関数を用いて計算し、結果をスカラーの評価値 v として群全体にブロードキャストする。

L_i ($i = 1, 2, \dots, M$)は、ビークル i の制御器である。制御器は、 v を入力として $u_i(t)$ を出力する。 $u_i(t)$ は、

$$u_i(t) = \begin{cases} c(t)\Delta_i(t) & (t = 0, 2, 4, \dots), \\ -c(t-1)\Delta_i(t-1) - a(t-1)\frac{\Delta v(t)}{c(t-1)}\Delta_i^{-1}(t-1) & (t = 1, 3, 5, \dots) \end{cases}$$

と記述される。 $\Delta v(t)$ は、 t が奇数の時の評価値と、前回(時刻 $t-1$)に送られてきた評価値との差分、 $\Delta_i(t)$ は、1または-1を等確率で出力する確率変数のベクトル、 $\Delta_i^{-1}(t)$ は、 $\Delta_i(t)$ の要素毎の逆数、 $a(t)$ 、 $c(t)$ は調整パラメータである。制御器の入力と制御入力の導出式は、全子機で共通で、ビークル台数によって増減する情報がないため、台数のスケーラビリティが維持されている。

以上の定義の基ブロードキャスト制御では、基地局から送られてくるフォーメーションの評価値を用いて、その評価値を減少させるようにビークルが移動し、指定のフォーメーションへ群を収束させる。

3. 対象とするビークル群のシステム

本報では図2に示すような1台の親機とM台の子機からなり、親機から子機群へ情報が一斉かつ、一方的に送信されるビークル群に対してブロードキャスト制御の適用を考える。図3に親機と子機のブロック線図を示す。親機は自身の速度と方位を計測できるものとする。加えて、親機を原点とし、親機の方位方向に軸を有する座標系(親機座標系)基準で計測される子機の位置も計測可能である。また、親機は子機群に対して、共通のスカラ情報を一斉送信可能である。親機による子機群の位置計測と情報の送信は、一定の通信周期で実行される。以上の定義によって、親機に従来のブロードキャスト制御における基地局の役割を割り当てる。一方で、子機は自身の方位を計測できるが、親機座標系基準、及び世界座標系基準の自己位置は計測できないことを前提とする。親機と子機は共に、それぞれの制御器に与えられた入力から移動の制御指令を計算し、それぞれの状態遷移モデルによって位置の更新がなされる。

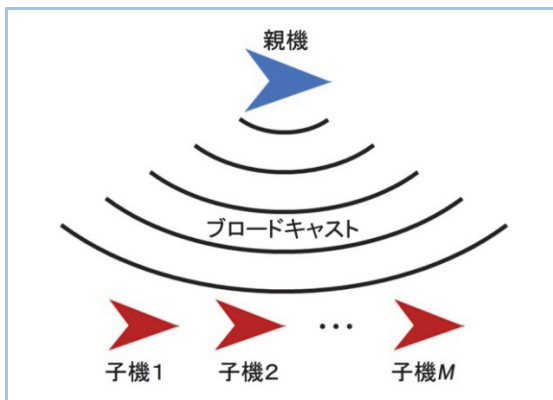


図2 想定するビークル群システム

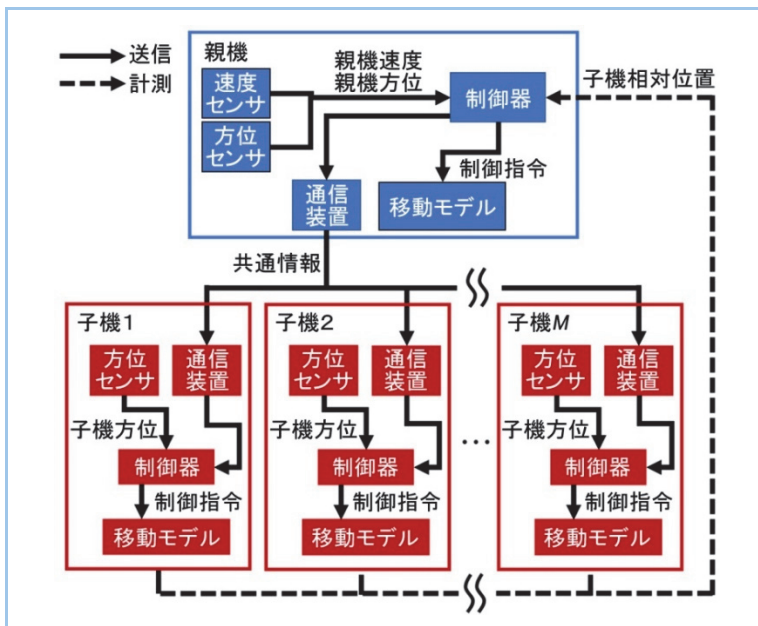


図3 親機—子機間のブロック線図

最後に、本報で想定するビークル群システムの前提条件として以下に示す項目を定義する。

- ・ 子機は真横方向への移動ができない(非ホロノミックな)キネマティクスを有する。
- ・ ビークルは速度・加速度・角速度に制約を有し、上下限值を超えた動作はできない。
- ・ 子機間の衝突は考慮しない。

- ・ 計測される情報の誤差は考慮しない。
- ・ 親機と子機群の間の通信は途絶しない。

4. ビークル群へのブロードキャスト制御の適用

3章で定義したビークル群のシステムに対して、ブロードキャスト制御を適用することを考える。従来手法とはシステムが異なるため、適用には以下の課題解決が必要である。

- ・ 課題①:従来手法では基地局が世界座標系で静止している状態を想定しているが、本報で想定するビークル群では基地局とする親機が子機群とともに移動してしまう。
- ・ 課題②:従来手法では全方向移動可能なビークルを想定しているが、本報で想定するビークルは真横移動のできない非ホロミックなキネマティクスを有している。

これらの課題に対し、本報では以下の対策を講じた。

- ・ 対策①:親機座標系でブロードキャスト制御を完結させることで、子機群から見た基地局(親機)を見かけ上静止させ、従来手法の適用を可能にする。そのために速度や方位など親機の移動情報も子機群に対して新たにブロードキャストする。
- ・ 対策②:ビークルの非ホロミック性、通信周期を考慮した目標位置への到達経路、及びそれに基づく制御指令を導出する。

対策を踏まえ、[図4](#)に示すように、子機 i の制御器を考案した。子機 i は、この制御器を実行し、速度・方位の制御指令を計算する。制御器内の“従来手法の制御入力導出”ブロックでは、2章で示した制御入力 $u_i(t)$ の導出式をそのまま適用する。次の“親機移動を考慮した目標位置計算”ブロックは、対策①に対応している。本ブロックでは、 $u_i(t)$ を次の通信までに子機が到達しているべき目標位置とみなし、受信する親機の移動情報を基にこの値を再計算することで、親機への追従を実現する。最後の“非ホロミック性を考慮した速度・方位指令計算”ブロックは、対策②に対応している。本ブロックでは、目標位置までの経路を求め、生成した経路から各時刻における子機の速度・方位の目標値を計算し、これを指令値として出力する。経路は[図5](#)に示すような2つの同一半径円弧を用いる制約の下で計算することで、解を一意に定めつつ、ビークルの非ホロミック性を考慮する。

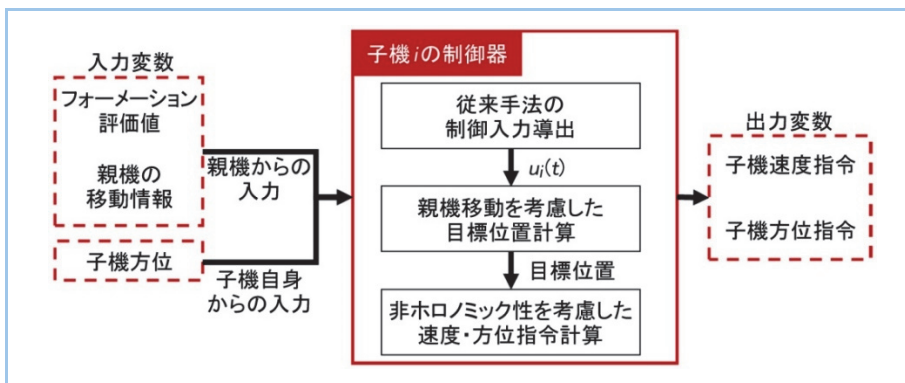


図4 子機制御器のフローチャート

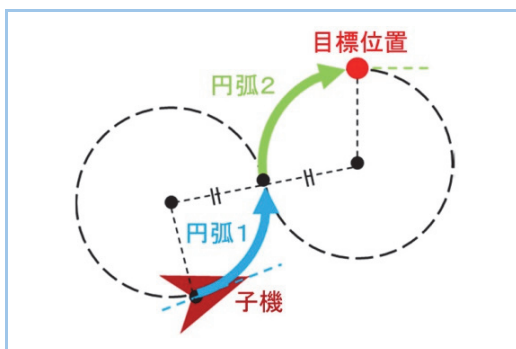


図5 子機の目標位置までの経路生成手法

5. シミュレーション

開発した手法の成立性を評価するため、実機相当のモデルを用いてビークル群フォーメーションの制御性能を検証した。図6に本シミュレーションにおけるフォーメーション遷移のイメージを示す。はじめ親機両側に存在する子機 10 台からなる群を親機周囲の同一円周上に等間隔配置し、次に、親機後方の同一半円周上に等間隔配置することを目指す。子機群を同一円周上に配置するフォーメーションでは、評価関数を、①子機群に同一円周上に留まることを求める項、②互いの距離を最大限離すことを求める項、の和として定義した。同一半円周上に子機群を配置するフォーメーションでは、評価関数を、①子機群に親機後方の半円周上に留まることを求める項、②互いの距離を最大限離すことを求める項、③親機との相対距離を一定値以下に保つことを求める項、の和として定義した。シミュレーションの際、親機は一定速度、一定方位で直進運動をさせ続けた。

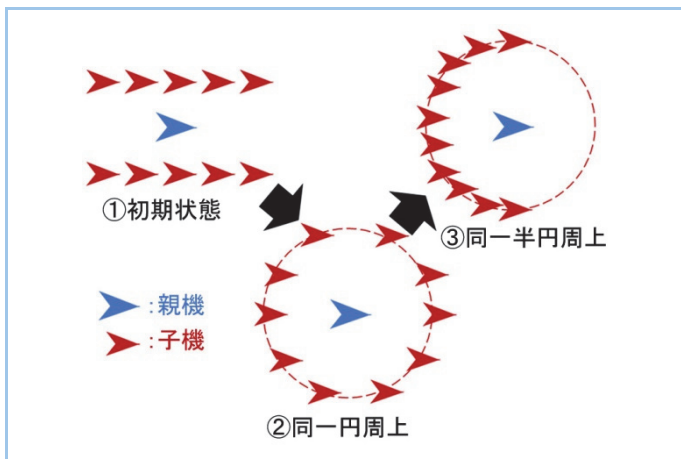


図6 シミュレーションにおけるフォーメーション遷移シナリオ

図7にシミュレーションにおける子機群フォーメーションの遷移の様子を示す。親機が子機と共に移動するような条件において、非ホロノミックな子機群は2度のフォーメーション変更が実現できていることを確認した。

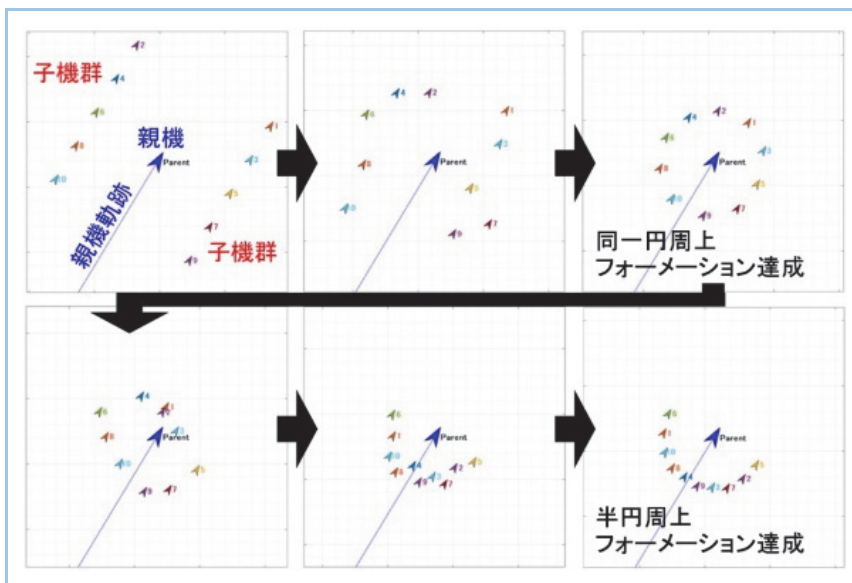


図7 フォーメーション遷移結果

6. まとめ

無人ビークル製品を対象として、任意のビークル台数を制御可能なビークル群誘導技術を開発した。本技術は、従来のブロードキャスト制御を、親機・子機を有し、親機が子機とともに移動するようなビークルシステムへ適用することを可能にするものである。シミュレーションの結果から、本技術を用いることで子機群を親機に追従させつつ、指定したフォーメーションの維持あるいは変更を制御できることを確認した。今後は、本技術の製品への適用に向け、ビークル実機を用いて、制御の成立性検証に取り組む予定である。並行して、フォーメーション収束時間の短縮、ビークルのダイナミクスを考慮した経路生成等の開発に取り組み、技術の完成度を高めていく所存である。

参考文献

- (1) Azuma, S. et al., Broadcast control of multi-agent systems, *Automatica* Vol.49 No.8 (2013), 2307-2316.
- (2) 藤倉大貴ほか, ブロードキャスト制御の非ホロノミックなビークル群への適用, 第41回日本ロボット学会学術講演会(2023)