

群ドローンの自律分散制御技術

Autonomous Distributed Control Technology for Drone Swarm Systems

*先端技術総合研究所(博士(工学))
†同研究所

要 旨

社会インフラの維持管理の省力化と業務の高度化のため、屋内の狭く閉鎖的な空間に対する点検・計測の自動化が重要である。三菱電機は、狭隘(きょうあい)な閉鎖空間で安全・柔軟な運用を実現する群ドローンの自律分散制御技術の開発に取り組んできた。当社は、群ドローンのシステム構成や、小型・安全・柔軟な運用を実現する自律分散制御技術を検討し、これらの技術のシミュレーション及び実験による編隊飛行の検証を実施した。そして、この技術をドローンに適用することで、複数機で協調・交代運用して多様なタスクを実行する編隊飛行を実現した。

1. ま え が き

労働人口の減少が社会課題になる昨今、国土の維持に必要な社会インフラの管理で省力化と業務の高度化が求められる。特に対策が必要な職種である社会インフラの点検・計測は、労働集約でなされており、限られた人員・財源の下で効率的に業務を遂行することが求められる。それに加えて、点検・計測の現場には、高所や狭隘部、交通供用下、又は有害・危険因子の存在などで安全かつ容易に接近できない箇所が少なくない。こうした課題に対して、実空間の情報を効率的に取得するために、例えば、ドローン(マルチコプター)の活用が求められる。

ドローンは、GNSS(Global Navigation Satellite Systems)などの測位情報を用いて屋外を広く自律的に運用される。一方、社会インフラ内部では、GNSSが利用できず、狭く閉鎖的な空間の飛行が要求されるため、屋外の点検用途で普及する大型ドローンに代わって小型のドローン(マイクロドローン)の活用が期待される。しかし、マイクロドローンは、取り回しに優れる反面、運用時間や故障等の安全性に課題があった。この課題解決には、複数機で協調・交代運用する群ドローンの自律分散制御技術が有効である。

本稿では、多様な協調関係を統一的に扱う自律分散制御理論に注目し、隊列を姿勢も含めて指定する編隊を形成する“SO(3)分散制御技術”と機体同士が互いの相対位置姿勢を計測して高精度に同定する“合意推定技術”について述べる。さらに、この技術を複数のマイクロドローンに適用した群ドローンのシステムを構成し、シミュレーションと実験で小型・安全・柔軟な運用を実現する編隊飛行を検証する(図1)。今後、群ドローンによって、屋内の狭隘な閉鎖空間での安全かつ高効率な点検・計測に基づくデジタル技術の高度な活用が期待できる。

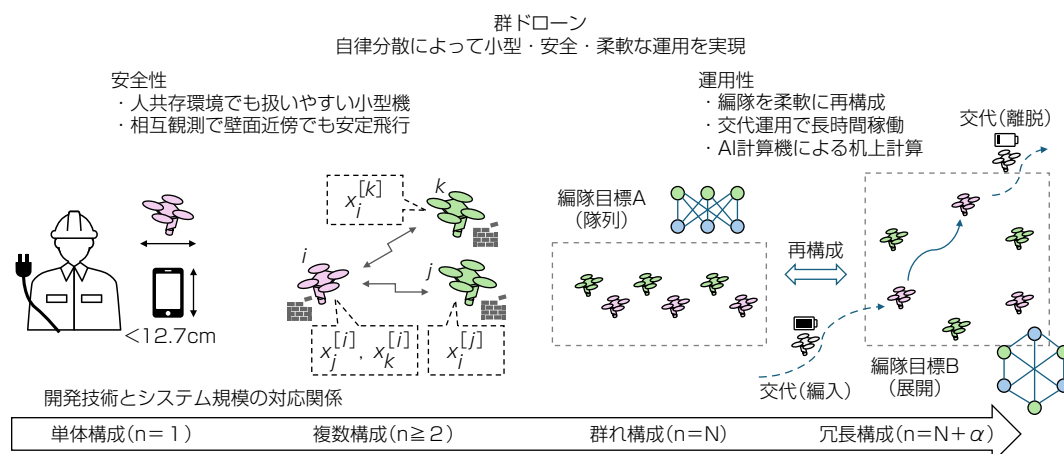


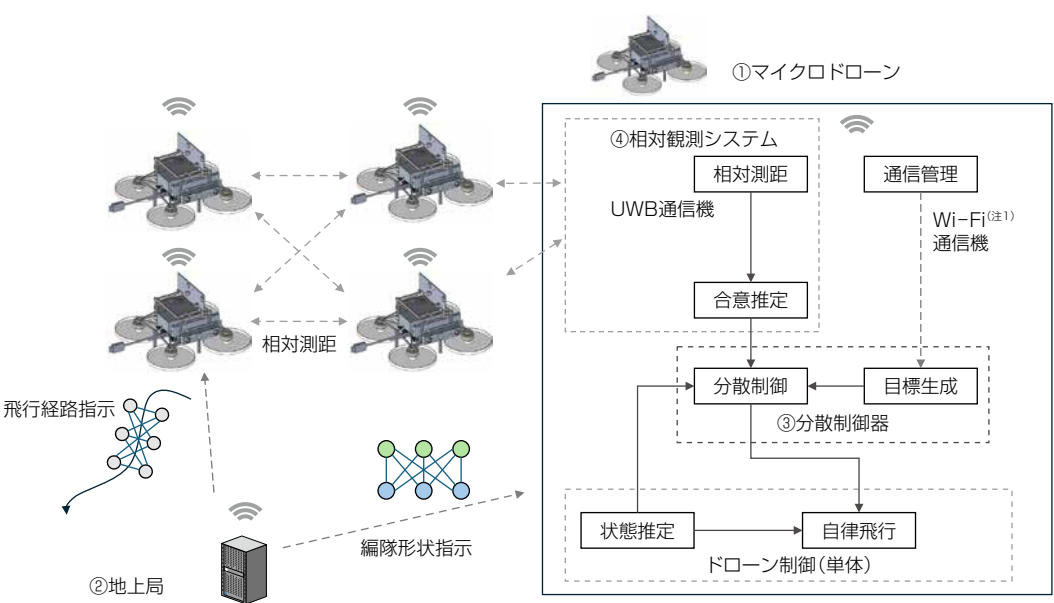
図1-群ドローンの概念図

2. 群ドローン

この章では、群ドローンのシステム構成と、自律分散制御技術について述べる。

2.1 システム構成

本稿で述べる群ドローンは、複数のマイクロドローン(図2①)と一つの地上局(図2②)で構成される。各々のマイクロドローンは、分散制御器(図2③)と相対観測システム(図2④)及び単体のドローン制御を搭載する。



①	マイクロドローン	取り回しに優れた10cm角の大きさとAI組み込み計算機を搭載できる300g級の機体構成で、周囲環境を観測して飛行する自律飛行機能を備えるドローンシステム
②	地上局	編隊形状指示、飛行経路指示及び安全確保のための指令を与える通信システム
③	分散制御器	群れの形状(幾何構造)を所望の状態にすることを目的とし、相対観測情報を入力して機体の速度指令を出力する分散制御システム
④	相対観測システム	測位センサー(UWB通信機)による他機との相対位置の取得に加えて、合意推定によって相対姿勢を推定する観測システム

(注1) Wi-Fiは、Wi-Fi Allianceの登録商標である。
UWB : Ultra Wide Band

図2-群ドローンのシステム構成

2.2 自律分散制御技術

この節では、分散制御器及び相対観測システムを構成する当社独自の自律分散制御技術(一般化協調)と、その実現に必要なSO(3)分散制御技術、合意推定技術について詳細を述べる。

2.2.1 多様な協調関係を統一的に扱う自律分散制御理論(一般化協調)

群ドローンを実現するには、多数の機体を安定的に運用できる自律分散制御が重要になる。従来の自律分散制御による編隊制御では、機体間の一对一の関係に基づくペアワイズ設計が広く用いられてきた。このペアワイズ設計は安定した編隊形成を実現しやすい一方で、列を成す編隊飛行や広域を探索する被覆作業など、タスクごとに異なる設計が必要になる。また、GNSSやコンパスなどの絶対測位情報を用いる場合の設計と、測距センサーなどの相対測位情報を用いる場合の設計では、別々の設計が求められる。そのため、一つのシステムで複数のタスクを滑らかに切り替えることや、編隊を組み変えながら多様な協調関係を扱うことが難しかった(図3(a))。

そこで大阪大学と当社は、複数機体間で共有される相対観測情報の連結度に着目し(図3(b))、“多様な協調関係を統一的に扱う自律分散制御理論”(以下、“一般化協調”という。)の共同研究を2019年から進めてきた。この理論によって、利用可能な観測手法の種類や精度に応じて、要求されるタスクを満たす制御器の設計条件を体系的に整理した⁽¹⁾。さらに、相互観測に基づく相対関係を適切に管理することで、単機制御やペアワイズ設計では実現が難しい制御性能を達成できる⁽²⁾。

一般化協調の自律分散制御理論を群ドローンに適用することで、隊列を姿勢も含めて指定する編隊形成(以下、“相対位置姿勢型編隊制御”という。)を実現する分散制御器を設計した。理論によって任意の初期状態で安定性が保証されるため、機器の置き換えで群れが不安定な挙動を示すことがない。これによって、群ドローンは、運用中に機体の置き換えや機体の追加、削減に頑健な編隊飛行を実現する。また、小型・軽量の測距センサー(UWB通信機)に対して相対姿勢を同定する合意推定技術を開発し、屋内の閉鎖空間での相対位置姿勢型編隊制御を実現した。これによって、群ドローンは、複数機体で壁近傍の対象をカメラで指向する利用等、インフラの点検・計測に有用な運用を実現する。

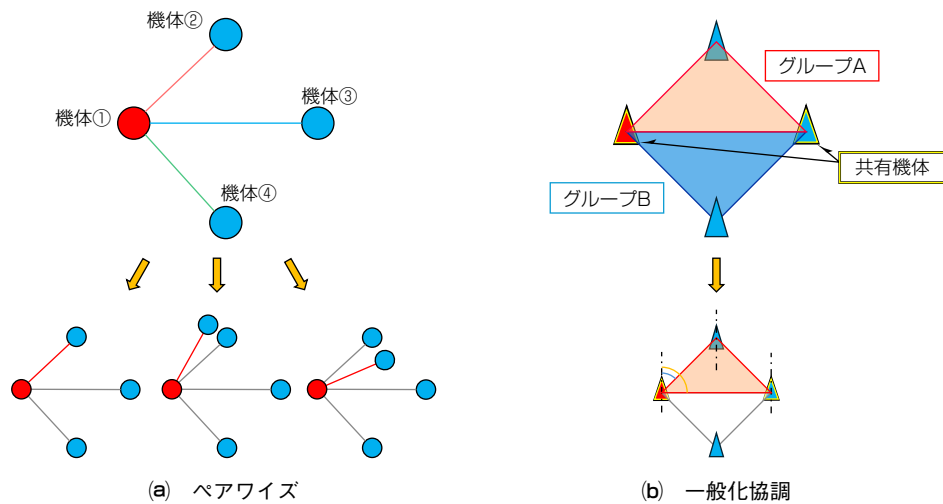


図3-分散制御器の設計イメージ

2.2.2 SO(3)分散制御技術

相対位置姿勢型編隊制御では、機体間の相対位置と相対姿勢の両方を用いて編隊を形成する。以前は、相対位置の制御と相対姿勢の制御を個別に計算し、それらを組み合わせて指令を生成するため、局所解への収束や編隊全体のドリフトが生じやすいという課題があった。

そこで、機体の姿勢表現と機体間の相対位置関係を特殊直交群SO(3)によって記述した幾何構造を制御指令とするSO(3)分散制御技術を開発した。SO(3)分散制御技術は、一般化協調に基づく自律分散制御によって、任意の初期状態で安定性が保証され、かつ、編隊形成も初期状態の重心近傍にまとまるため、狭隘部や危険箇所でも安全な運用を実現する。また、相対観測が疎な場合でも安定した編隊形成が成立することを証明し⁽³⁾、主従関係があるようなセンサー(例えばUWB通信機)によって機体が二つのグループに分かれる条件でも群ドローンが構成できることを示した。

2.2.3 合意推定技術

相対位置姿勢型編隊制御には、機体間の相対位置に加えて相対姿勢の情報が要求される。従来の屋外編隊飛行は、各機体がGNSSやコンパスから絶対位置情報を取得し、通信によって取得した情報を基に相対位置又は相対姿勢を推定して編隊制御の入力とする方法が一般的であった。しかし、屋内ではGNSSやコンパスが利用できず、撮像情報や電波測距(例：UWB通信機)で絶対位置や相対位置を取得するため、機体間の相対姿勢を求めることが容易でない。

そこで、UWB通信機の搬送波に受信側と送信側の相対観測情報を個別に付加することで相対姿勢を推定する合意推定技術を開発し、既存のEKF(Extended Kalman Filter)ベースの推定器よりも高い精度で相対位置と相対姿勢が得られることを確認した。これによって、マイクロドローンに搭載できる小型・軽量の相対観測システムを実現し、屋内のインフラ環境で編隊形成できる群ドローンの設計及び開発を実現した。

3. シミュレーション及び実験による評価

マイクロドローン5台に対する編隊飛行を数値解析と実機によって検証した(図4)。マイクロドローンは、ドローン制御(単体)を物理シミュレーターで構成するシミュレーションと、10cm角の小型筐体(きょうたい)による実験で構成する。前者は、編隊形成の応答や誤差、統計的な成否を評価し、後者はアクチュエーターやセンサー、通信の遅れやノイズによる影響を評価する。地上局は任意の1機を誘導し、他の機体は編隊を維持して飛行する。分散制御器及び相対観測システムはシミュレーションと実験で同一のソフトウェアで実装し、地上局からの指令に基づいて編隊形成する。機器の構成から二つのグループ(図4の青色、オレンジ色)に分けて配置し、様々な初期位置や姿勢に対して目標隊列を形成できることを確認した。

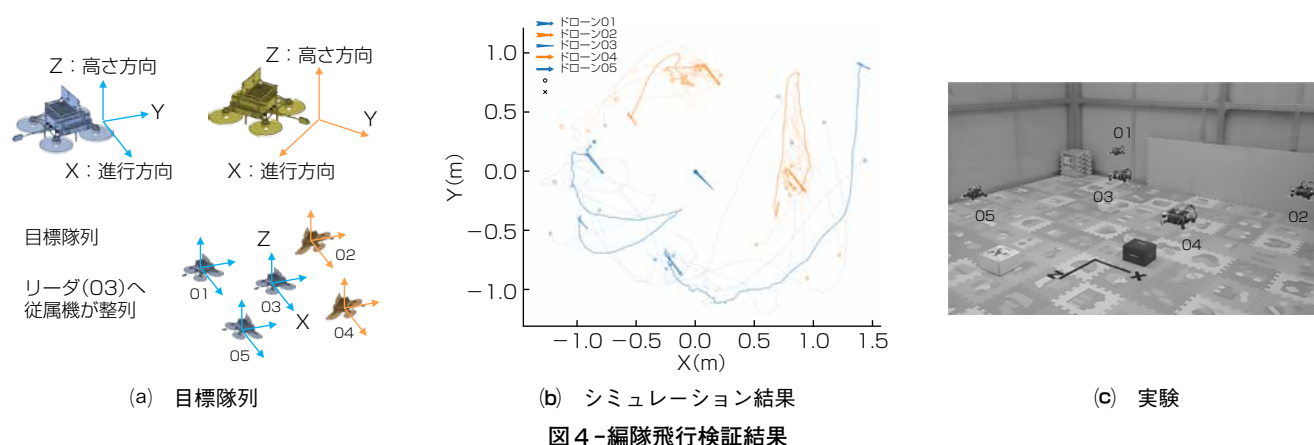


図4-編隊飛行検証結果

4. む す び

デジタル技術の活用には実空間の情報を効率的に取得する技術が不可欠であり、様々な環境で無人機による自律的な点検・計測の自動化が普及に向けて重要になる。本稿の群ドローンは、屋内の狭隘な閉鎖空間に対する自動化技術として今後の社会インフラ管理を維持することに貢献していく。また、一般化協調による自律分散制御技術はマイクロドローンに限らず、自動車や衛星、電力のマイクログリッドなど様々な適用できる技術である。当社は、高い制御技術に基づく多様な製品群を持っており、これらの自律化・分散化・協調化によるソリューションの革新を支える基盤技術として期待される。自律性及び作業性が高いマイクロドローンの開発及び分散制御器の応答速度向上や相対観測システムの小型化、高性能化によって、社会インフラの維持管理への実利用に向けた開発を進めて、日本国土全体のデジタル技術の進展に寄与していく。

参考文献

- (1) Sakurama, K. : Unified Formulation of Multiagent Coordination With Relative Measurements, IEEE Transactions on Automatic Control, **66**, No.9, 4101~4116 (2021)
- (2) Sakurama, K., et al. : Multiagent Coordination With Relative Measurement via Cooperative and Individual Control, IEEE Transactions on Automatic Control, **70**, No.2, 992~1007 (2025)
- (3) Peng, C., et al. : Distributed SE(d) Formation Control of Multi-Agent Systems Using Relative Measurements, International Journal of Robust and Nonlinear Control, **36**, No.1, 100~116 (2026)