

自律分散型ドローンによる養殖施設向け 給餌支援システムの提案

柳澤太一^{†1} 高橋秀幸^{†2} 戸川大樹^{†3} 深江一輝^{†4}
荒井研一^{†5} 今井哲郎^{†5} 宮島洋文^{†5} 服部充^{†5} 小林透^{†6}

近年、養殖業では労働力不足や飼料費の高騰が深刻な課題となっている。本研究では、従来の船舶による給餌作業を代替するため、複数台のドローンを活用した自律分散型の給餌支援システムを提案する。具体的には、ドローンをマルチエージェントシステムとして、生け簀の状態を考慮した飛行スケジュール管理、飛行順序決定、および協調動作制御の各機能を設計した。シミュレーション実験によって、本システムの適応性と有効性を確認した。

Proposal of an Autonomous Decentralized Drone-based Feeding Support System for Aquaculture Facilities

Taichi Yanagisawa^{†1}, Hideyuki Takahashi^{†2}, Daiki
Togawa^{†3}, Kazuki Fukae^{†4}, Kenichi Arai^{†5}, Tetsuro Imai^{†5},
Hirofumi Miyajima^{†5}, Mitsuru Hattori^{†5}, Toru Kobayashi^{†6}

In recent years, labor shortages and soaring feed costs have become serious challenges in the aquaculture industry. This study proposes an autonomous distributed feeding support system utilizing multiple drones to replace conventional vessel-based feeding operations. Specifically, drones were designed as a multi-agent system incorporating functions for flight schedule management considering cage conditions, flight sequence determination, and coordinated motion control. Simulation experiments confirmed the adaptability and effectiveness of this system.

^{†1} 東北学院大学 教養学部 情報科学科
Department of Information Science, Faculty of Liberal Arts, Tohoku Gakuin University

^{†2} 東北学院大学 情報学部 データサイエンス学科
Department of Information Science, Faculty of Informatics, Tohoku Gakuin University

^{†3} 長崎大学 情報データ科学部
School of Information and Data Sciences, Nagasaki University

1. はじめに

2014年以降、海面養殖業の生産額が増加しており、今後の安定的な水産物の供給を支える重要な業種となっている。しかし、海面養殖業においては、漁業就業者数の減少や高齢化に加えて、燃料費や飼料費の高騰など多くの問題がある。これらの問題に対して、我々は、図1のようにIoTやAI技術を活用した完全自動養殖の実現を目指した「Aqua Colony Platform」の研究開発を進めている[1]。

本稿では、漁業従事者が船で飼料を生け簀まで運搬し、給餌を行う一連の作業に対して、ドローンを活用した運搬および給餌作業の自動化の実現を目的とする。具体的には、スマート生け簀による魚の空腹度の判定に応じて、複数台のドローンが効率よく飼料を運搬し、給餌作業を行うシステムモデルを提案する。そのためには、ドローンが運搬する飼料の積載量、バッテリーを考慮しつつ、ドローン同士の衝突を防ぎながら、適切なドローンの台数で運搬および給餌作業を行うための仕組みを検討する必要がある。本稿では、自律分散型ドローンの連携による給餌支援システムの提案と本提案システムを構成する各機能およびシミュレーション実験について述べる。

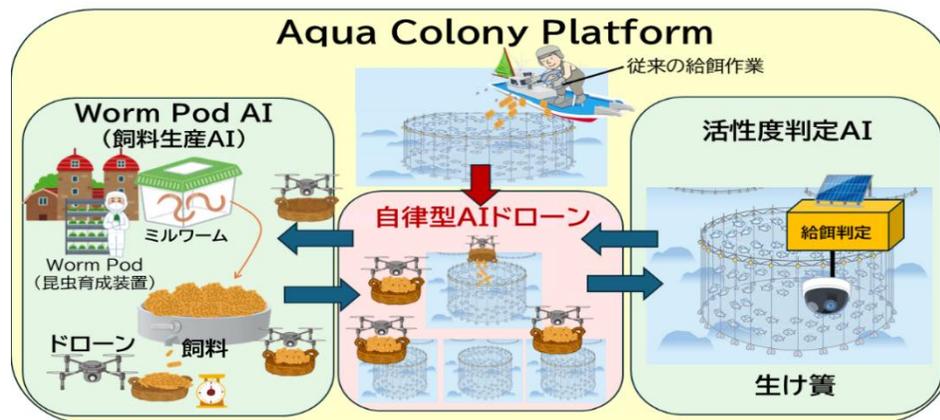


図1 Aqua Colony Platform の概要

^{†4} 長崎総合科学大学 総合情報学部
Faculty of Applied Information Technology, Nagasaki Institute of Applied Science

^{†5} 長崎大学大学院 総合生産科学研究科
Graduate School of Integrated Science and Technology, Nagasaki University

^{†6} 駒澤大学 グローバル・メディア・スタディーズ学部
Faculty of Global Media Studies, Komazawa University

2. 関連研究と課題

群知能やマルチエージェントシステムを用いた複数台のドローンの協調制御に関する様々な研究が行われている[2]。例えば、農地への農薬散布が挙げられるが、これは主に、ドローンが事前に計画された経路やスケジュールに従って広範囲を移動し、対象区域に対して均一に農薬散布することを目的としている。これに対し、海面養殖業における給餌作業では、特定の生け簀への正確な移動に加え、魚の空腹状態など生体変化に基づく適応的な給餌制御が不可欠となる。

本研究の基盤的な取り組みとして、魚の空腹状態を評価する「活性度判定 AI」や飼料生産の効率化を目的とした「Worm Pod」、飼料投下を行うための「ドローン搭載型給餌機構」に関する研究開発が行われている[3-5]。活性度判定 AI は、給餌中の生け簀の魚の様子を撮影した映像を解析することによって、魚が空腹か満腹かを定量的に判定するシステムである。また、Worm Pod は、魚の飼料となるミルワームの収穫時期を自動予測し、飼料生産の自動化を目指すものである。給餌機構は、生け簀に到着した際、飼料を投下するためのシステムである。現在、活性度判定 AI と連携し、空腹度の判定結果に応じて、給餌機構を装備したドローンが生け簀まで飼料の運搬と給餌を行う制御機構を開発しているが、ドローン単体での実証実験を行っている段階である。

さらに、複数台のドローンの経路計画においては、遺伝的アルゴリズムや粒子群最適化などの最適化手法を用いて、配送計画問題の解決を目指した既存研究が多い[6][7]。これらの手法は、中央サーバが全てのエージェントの情報を集約して最短経路を算出する必要がある。そのため、状況の変化に応じて再計算を行う際に膨大な計算時間を要するため、海面養殖のようなリアルタイムな環境における対応が困難になるリスクを伴う。また、災害支援ドローンの荷物配送における配送計画に関する研究では、配送期限や荷物の重要度に応じた経路計画や、通常モードと高速飛行モードを切り替える手法が提案されている[8]。この手法では、緊急度の高い荷物の配送成功率向上を実現しているが、バッテリーの劣化や複数台のドローン運用時における衝突回避の考慮については十分に検討されていない。

これらの課題に対処するため、本稿では、自律分散型ドローンによる養殖施設向けの給餌支援システムを提案する。具体的には、本提案システムを実現するために、ドローン群をマルチエージェントシステムとすることで、協調連携可能な給餌ドローンを実現する。そして、各ドローン間で各種情報を必要に応じてやり取りやシステム全体として共有し合うことで、生け簀への給餌に向かう離陸タイミングや衝突回避などの自律的な意思決定を行いながら給餌対象の生け簀まで飛行し、必要な量の給餌を行う。また、バッテリー劣化防止を考慮したドローンのタスク割り当てや、生け簀の空腹度に応じた飛行スケジュール計画を行うことで、動的な状況変化に適応可能な長期的な給餌制御の実現を目指す。

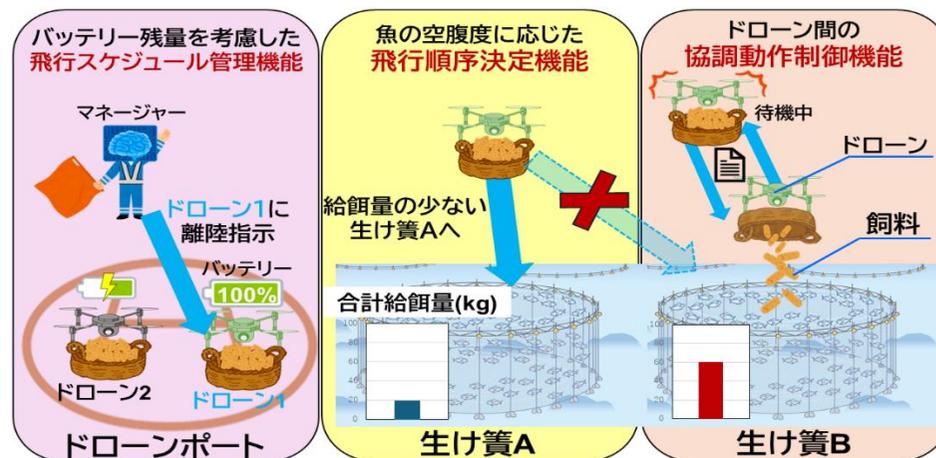


図2 提案システムの概要

3. 給餌支援システムの提案

3.1 提案システムの概要

図2に給餌支援システムの概要を示す。本研究では、マルチエージェントシステムによる複数台の給餌ドローンの制御を行う。本提案の給餌支援システムにおいては、まず、ドローンは離着陸、充電、飼料の補充などを行うためのドローンポート（格納庫）から生け簀まで飼料を運搬するための制御を行う。次に、生け簀に到着後、各生け簀ごとに必要な量の給餌制御を行う。給餌後にドローンは、ドローンポートへの自動帰還制御を行う。本提案システムは、(1)飛行スケジュール管理機能、(2)飛行順序決定機能、(3)協調動作制御機能の3つの基本機能から構成される。

(1) 飛行スケジュール管理機能

生け簀内の魚の空腹状態を考慮し、給餌量や給餌のタイミングの調整を行う機能である。例えば、空腹時には、一度に複数台のドローンを生け簀に飛行させ給餌を行い、満腹時に近づいた場合は、各ドローンの離陸間隔を長くし、給餌量を調整することで給餌効率の最適化が可能となる。

(2) 飛行順序決定機能

複数台のドローンによる運用を考慮した場合、生け簀までの往復に必要なバッテリー残量や充電中のドローンを管理しながら飛行順序を考慮する必要がある。本機能は、各ドローンのバッテリー残量や充電状態を考慮し、生け簀まで往復可能なドローン群の

中から飛行順序を自動的に決定することで、ドローン全体としての稼働率の向上が可能となる。

(3) 協調動作制御機能

複数台のドローンが衝突を回避しながら協調して飛行するためには、各ドローンが互いに動作状況を把握する必要がある。そこで、各ドローンの状態として、飼料の運搬中、給餌中、帰還中といった飛行中のドローンの情報を共有し、給餌中の場合は、運搬中のドローンは衝突を回避するためにホバリングを行うなどの協調動作を本機能で実現する。

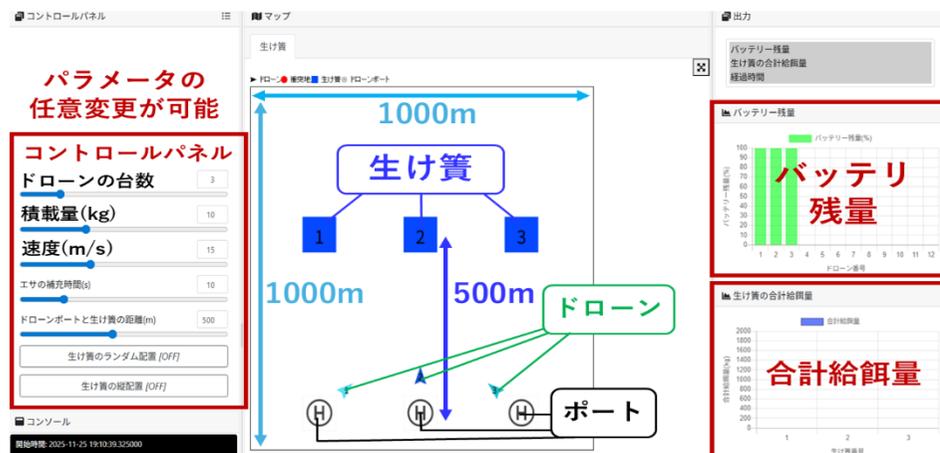


図3 シミュレーション実験環境の様子

4. 提案システムの設計と実装

マルチエージェントシステムによるシミュレーション実験の環境構築として、artiso Cloud[9]とPythonを用いた(図3)。本シミュレーション実験では、ドローンの台数や速度などのパラメータを任意に変更可能であり、バッテリー残量や生け簀ごとの合計給餌量を可視化できる仕様とすることで、様々な条件や環境で実験が可能である。また、各ドローンは、「充電中」、「運搬中」、「給餌中」、「帰還中」に加え、バッテリー劣化を防ぐための「冷却中」など、現在の動作を表す状態変数を持つ。さらに、各生け簀は合計給餌量を記録する。なお、本稿におけるシミュレーション環境においては、風や気温などの外的要因は考慮しないこととする。各機能の実装詳細を以下に示す。

4.1 飛行スケジュール管理機能の実装

図4に、飛行スケジュール管理機能の概要を示す。先行研究の提案である魚の空腹状態を判定する「活性度判定AI」を疑似的に再現するため、合計給餌量に基づき魚の空腹度をモデル化した。具体的には、生け簀の初期状態を「空腹状態」とし、合計給餌量が300kgを超過した時点で、設定された遷移確率に基づき「満腹状態」へと移行し、ドローンの飛行間隔を変更する仕組みとした。「空腹状態」においては、先行するドローンが200m移動した時点で後続するドローンの離陸が許可されるのに対し、「満腹状態」ではこの飛行間隔を400mへと延長する。これにより、生け簀の状況に応じた単位時間当たりの給餌量の調整が可能となる。

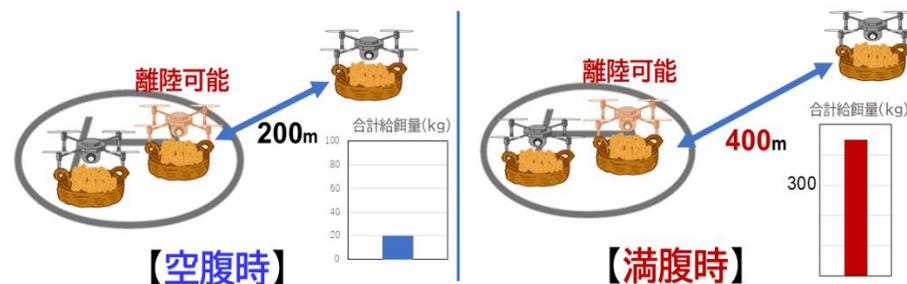


図4 飛行スケジュール管理機能の概要

4.2 飛行順序決定機能の実装

本シミュレーション実験では、各ドローンのバッテリー残量を管理する機能を有しており、そのバッテリー残量の管理および情報のやり取りを行うことで、待機中のドローン群の中からバッテリー残量が最も多いドローンを自動的に選択し、そのドローンが離陸を行う。なお、バッテリー残量は、パーセンテージ(%)で表され、バッテリー変化率は、充電中は3.0%/分で増加し、無積載飛行・待機・給餌中は2.5%/分で減少、積載飛行中は5.0%/分で減少するように設定した。加えて、バッテリーの劣化抑制を考慮し、帰還後から充電開始までに一定の冷却時間を設けた。なお、冷却時間は3分に設定している。

4.3 協調動作制御機能の実装

図5に協調動作制御機能の概要を示す。本機能では、各ドローンが半径20m以内に存在する他機の位置座標と運行状態を取得し、状況に応じてホバリングによる待機や経路変更を行う。なお、シミュレーション空間内でドローン同士が重なり合った場合は衝突と判定し、衝突回数を記録する。ドローン同士の衝突回避を実現するために、

人工ポテンシャル法に基づく衝突回避アルゴリズムを導入した。

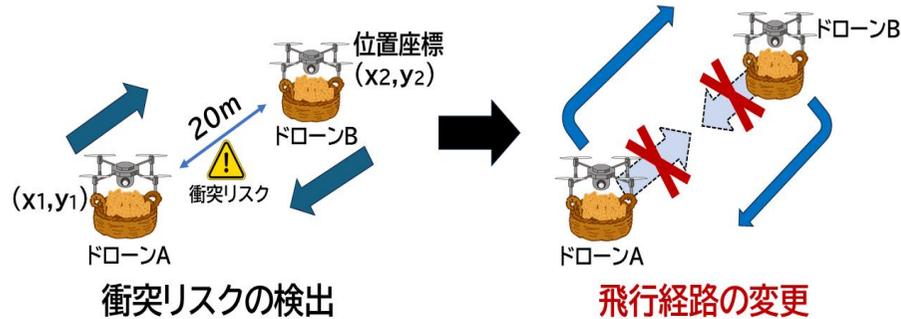


図5 協調動作制御機能の概要

各ドローンは、検出した他のドローンから遠ざかるための反発ベクトル \mathbf{v}_{rep} を計算する。この反発力は、ドローン間の距離の2乗に反比例するため、ドローン間の接近に伴い増大する。最終的な飛行ベクトル \mathbf{v}_{move} は、目的地に向かう目標ベクトル \mathbf{v}_{target} と反発ベクトルの重み付き和によって決定され、次の式で示される。

$$\mathbf{v}_{move} = \mathbf{w}_{target} \cdot \mathbf{v}_{target} + \mathbf{w}_{avoid} \cdot \mathbf{v}_{rep}$$

また、飛行効率と安全性のバランスを担保するために、重み係数を経験的に \mathbf{w}_{target} , $\mathbf{w}_{avoid} = 0.8$ に設定した。また、算出されたベクトルは正規化し、さらに各ドローン間のデッドロックを防ぐため、移動ベクトルに微小なランダムノイズを付加することで、移動方向を決定する。

表1 シミュレーションの条件

条件項目	説明
試行回数	10
実行時間(秒)	3600
ドローンの台数	9
生け簀の数	3
ドローンの速度(m/s)	15
積載量(kg)	10

5. 実験

5.1 シミュレーション条件と機能検証

シミュレーション環境および本提案システムにおける各機能の動作検証を行うため、シミュレーションを実行するとドローンが飛行、給餌、帰還、充電という一連の動作を自律的に実行することを確認した。また、シミュレーション条件を表1に示す。

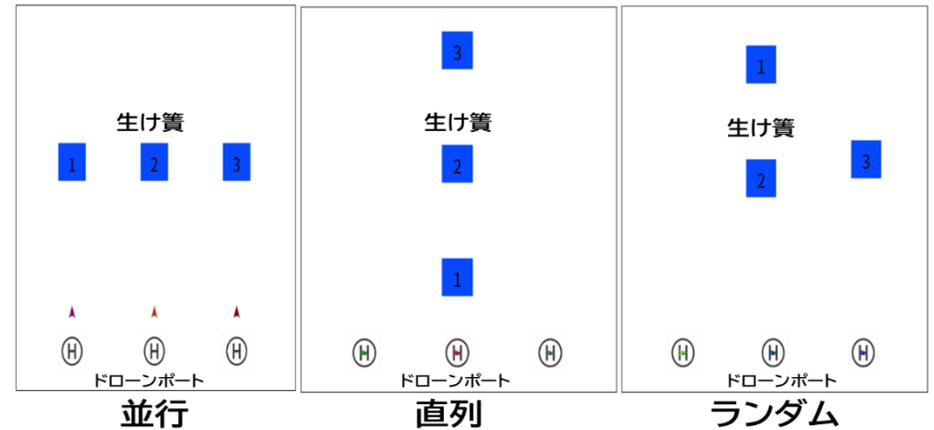


図6 生け簀の配置パターン

5.2 実験方法

評価指標には、ドローンとの衝突回数、バッテリー切れ回避による強制帰還回数、各生け簀の平均合計給餌量、平均バッテリー消費量を用いる。また、合計給餌量やバッテリー消費量などの標準偏差を算出し、システムの均一性を示す指標として用いる。給餌量の標準偏差が小さいほど均一な給餌が可能であることを示し、バッテリー消費量の標準偏差が小さいほど、ドローン群全体にわたってタスクが公平に割り当てられていることを示す。また、本提案手法を評価するために、以下の2つの実験を行った。

(1) 比較実験

提案手法の有効性を定量的に評価するため、提案手法とベースライン手法の比較実験を行う。比較対象のベースライン手法は、衝突回避機能の無効化や、ドローンや生け簀の選択方法を考慮しないものとする。なお、バッテリー残量を考慮したタスク割り当てを行う飛行順序決定機能が適切に動作していることを確認するため、飛行中のドローンのバッテリー残量が10%以下となった場合には、ドローンポートへの強制帰還を

行い、その回数を記録するものとした。

(2) ロバスト性の検証実験

様々な生け簀の配置状況下における給餌の均一性を評価するため、図6に示すような並行配置、直列配置、ランダム配置の3種類の生け簀配置パターンで実験を行った。

(3) 実環境を想定したシミュレーション実験

提案システムの実用性を評価するため、実環境を想定したドローンのパラメータおよび生け簀の配置方法を設定し、シミュレーション実験を行う。ドローンのモデルには DJI FlyCart 100[10]を採用し、ドローンポートおよび生け簀の配置は長崎県総合水産試験場の地図データに基づき設定した。本実験では、ドローンの積載量を 50kg、飛行速度を 20m/s と定義する。また、図7に実環境を想定したシミュレーション空間のレイアウトを示す。

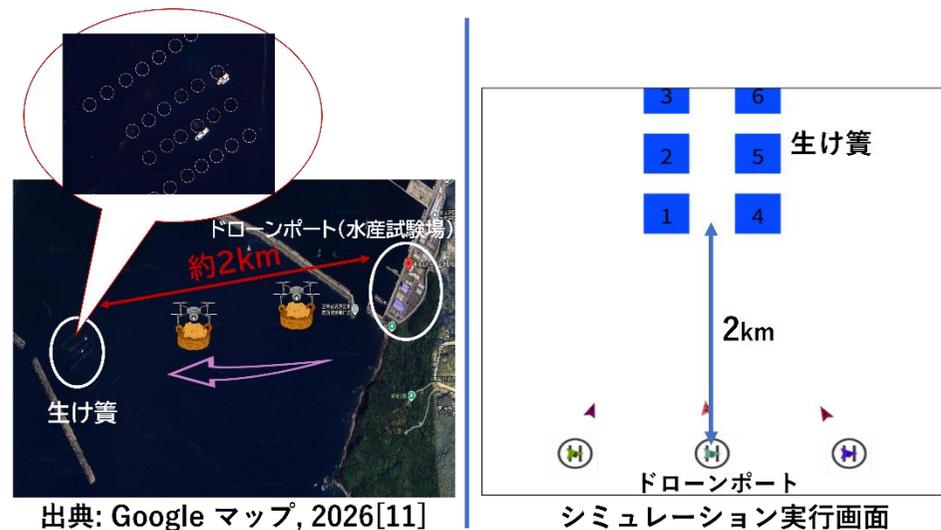


図7 実環境を想定したシミュレーションのレイアウト

6. 評価

6.1 提案手法の有効性

図8に提案手法とベースライン手法の比較結果を示す。はじめに、安全性について、衝突回避制御を欠くベースライン手法による衝突回数は31回であった。これに対し、

提案手法による衝突回数は0回であり、人工ポテンシャル法による協調動作制御機能の有効性を示した。運用効率について、ベースライン手法では、バッテリー残量が不十分なドローンへのタスク割り当てによるバッテリー切れ回避を目的とした強制帰還が6回発生した。一方、提案手法では、強制帰還が一度も発生しておらず、バッテリー状態を考慮したタスク割り当てを行う飛行順序決定機能が適切に動作していることを示した。最後に、給餌の公平性について、ベースライン手法の合計給餌量の標準偏差は34.96であり、給餌分配に大きな偏りが生じた。提案手法は、この値を2.35まで大幅に低減し、各生け簀に対して均一な給餌が実現できているといえる。

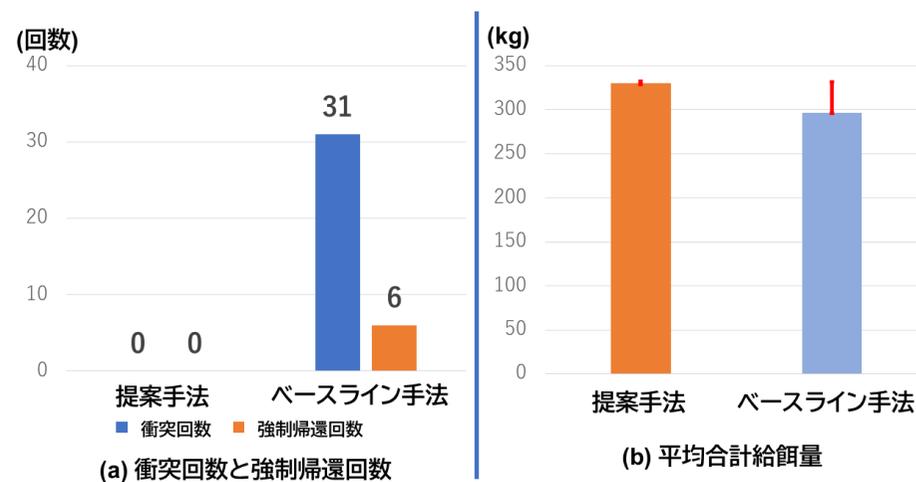


図8 提案手法とベースライン手法の性能比較

6.2 生け簀の配置状況によるロバスト性の評価

図9に実験結果を示す。実験結果から、飛行中のドローン間で衝突は発生しなかった。この結果は協調動作制御機能と飛行スケジュール管理機能が正常に動作したことを示すものであり、システムの高い安全性を実証している。さらに、生け簀の配置が異なる条件下において、平均合計給餌量や平均バッテリー消費量に有意な差が認められず、全指標の標準偏差が10.0未満に収まった。この結果は、飛行順序決定機能による制御の有効性を示すものである。特に、低い標準偏差は、生け簀の配置によらずドローン群全体に対して均一な給餌を行うための、公平なタスク割り当てが実現可能であることを示した。

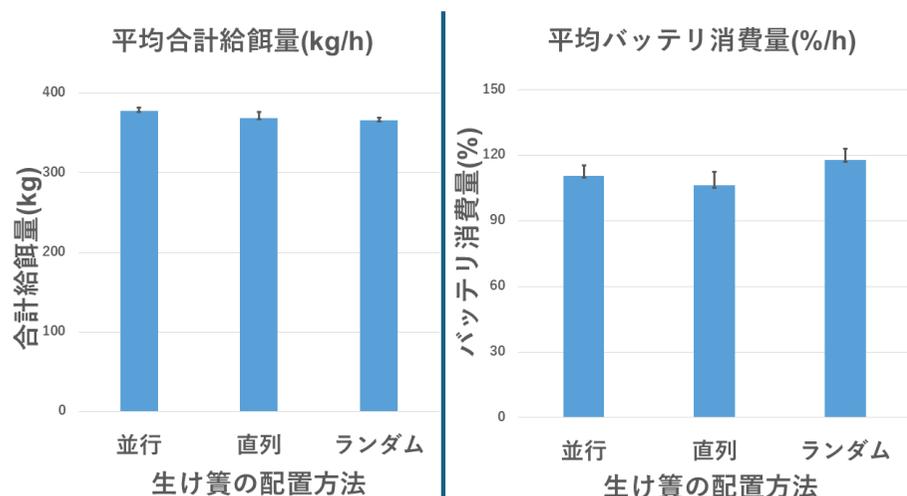


図9 生け簀の配置方法による平均合計給餌量と平均バッテリー消費量の比較

6.3 提案手法の実用性の評価

実環境を想定したシミュレーション実験の結果を表2に示す。衝突回数や強制帰還回数がともに0回であることから、協調制御機能および飛行スケジュール管理機能が正常に機能することを示した。また、各生け簀における平均合計給餌量およびドローン間の平均バッテリー消費量の標準偏差に有意な差は認められなかった。このことから、実環境を想定した生け簀の配置や距離によっても、均一な給餌と公平なタスク割り当てを実現可能であるといえる。以上の結果から、実機相当のパラメータを用いた実環境下においても、本システムが高い安全性と実用性を維持できることを示した。

7. おわりに

本稿では、養殖業における給餌作業の自動化を目的としたドローンを活用した給餌支援システムを提案した。バッテリー残量を考慮したタスク割り当て機能を有する分散型制御手法を構築し、シミュレーションを通じて、衝突やバッテリー切れによる強制帰還を回避できることを実証した。さらに、本システムは生け簀の配置パターンに依存せず、各生け簀への均一な給餌とドローン間での公平なタスク配分を達成した。これらの結果から、動的に変化する多様な養殖環境に対する、本システムの高いロバスト性と適応能力を実証した。今後は、外的要因などを含めた、より実環境に近い条件下でのシミュレーション実験の実施や実機のドローンを用いたシステムの実装と評価を

行う予定である。

表2 実環境を想定したシミュレーション実験の結果

平均合計給餌量(kg)	標準偏差(kg)	平均バッテリー消費量(%)	標準偏差(%)	衝突回数	強制帰還回数
451.6	14.516	114.28	4.47	0	0

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 24H00744, 24K07933 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 深江一輝, 原田凌, 山脇令央那, 梶原康輝, 半田丈都, 戸川大樹, 服部充, 宮島洋文, 高橋秀幸, 今井哲郎, 荒井研一, 小林透, "Meta AI Architecture により完全自動養殖を可能とする Aqua Colony Platform の提案," 信学技報, LIOS2024-75, pp.21-25, Mar. 2025.
- 2) T. Volovoda, "Swarm Intelligence for UAV," Proc. of the 2024 IEEE 7th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD2024), pp.313-316, Oct. 2024.
- 3) 原田凌, 戸川大樹, 深江一輝, 今井哲郎, 荒井研一, 宮島洋文, 服部充, 高橋秀幸, 小林透, "スマート養殖向けオンデマンドデジタルツインの研究," 信学技報, LIOS2024-78, pp.38-43, Mar. 2025.
- 4) 山脇令央那, 木村福義, 戸川大樹, 服部充, 橋爪海, 小林透, "ミルワーム習性ドリブ型収穫予測システムの研究," 信学技報, LIOS2024-76, pp.26-31, Mar. 2025.
- 5) 半田丈都, 戸川大樹, 深江一輝, 荒井研一, 高橋秀幸, 今井哲郎, 宮島洋文, 服部充, 小林透, "完全自動養殖を可能とする AI ドローンの研究," 信学技報, LIOS2024-79, pp.44-49, Mar. 2025.
- 6) J. Bi, W. Huang, B. Li, L. Cui, "Research on the Application of Hybrid Particle Swarm Algorithm in Multi-UAV Mission Planning with Capacity Constraints," Proc. of the 2024 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS2024), pp.928-933, Oct. 2024.
- 7) F. Meng, K. Yan, "Multi-UAV task allocation based on improved particle swarm optimization," Proc. of the 2024 4th International Symposium on Computer Technology and Information Science (ISCTIS2024), pp.768-773, July 2024.
- 8) 岩佐大智, 西川浩紀, "災害支援ドローンの荷物配送のための Mixed Criticality に基づく経路計画," DA シンポジウム 2025, pp.129-132, Aug. 2025.
- 9) (株)構造計画研究所, artisoc Cloud, <https://mas.kke.co.jp/artisoccloud/> (accessed Jan. 7, 2026).
- 10) DJI, DJI FlyCart 100 -新たな運搬方法の提案, <https://www.dji.com/jp/flycart-100>
- 11) www.google.com/maps