

令和3年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書

機械学習と物理学ベース群知能による状況適応型群制御の研究

令和4年5月

クラスターダイナミクス株式会社

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、クラスターダイナミクス株式会社が実施した令和3年度「機械学習と物理学ベース群知能による状況適応型群制御の研究」の成果を取りまとめたものです。

目次

0.	研究背景	1
0.1.	波及効果	1
0.1.1.	民生分野への波及効果	1
0.1.2.	学術分野への波及効果について	1
0.2.	類似業績等と比較した本技術の特長	2
0.2.1.	本研究の物理学ベース群知能の特徴	2
0.2.2.	類似業績	4
1.	委託業務の目的	5
1.1.	研究課題の最終目標（業務計画書 3.1 項）	5
1.2.	最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題（業務計画書 3.2 項）	7
1.3.	要素課題に対する実施項目及び体制（業務計画書 3.3 項）	9
1.3.1.	群協調アルゴリズム研究の実施内容	11
1.3.2.	群誘導アルゴリズム研究の実施内容	11
2.	研究開始時に設定した研究目標の達成度	12
2.1.	実施内容	12
2.1.1.	適用シナリオ(ユースケース)	12
2.1.2.	試験研究の実施手順	14
2.1.3.	実施結果概要	16
2.2.	達成度	21
2.2.1.	最終目標の達成度	21
2.2.2.	要素課題の達成度	22
2.2.3.	実施項目の達成度	23
2.2.4.	達成度の水準	24
3.	業務委託における研究の方法及び成果	25
3.1.	成果概要	25
3.1.1.	物理学ベース群知能アルゴリズムの研究開発	25
3.1.2.	仮想環境（シミュレータ）での試験研究	25
3.1.3.	実環境における部分実機試験	26
3.2.	物理学ベース群知能とスウォーム飛行力学モデル	27
3.2.1.	スウォームの構成	27
3.2.2.	スウォーム飛行力学モデルの定義	28
3.2.3.	協調内力の概要	30
3.2.4.	誘導外力の概要	33
3.2.5.	スウォームの機数増加における問題と解決策	34
3.2.6.	小集団の群協調モデル(Swarm of Swarm)	35
3.3.	物理学ベース群知能アルゴリズムの研究開発	37
3.3.1.	群協調アルゴリズムに関する研究	37
3.3.2.	群誘導アルゴリズムに関する研究	40

3.4.	試験シナリオの検討	48
3.4.1.	研究目標とユースケース	48
3.4.2.	小集団の群協調(Swarm of Swarm)モデルによる試験シナリオ	51
3.4.3.	COVID-19による試験エリアの見直し	52
3.4.4.	予備飛行試験シナリオ	53
3.5.	仮想環境(シミュレータ)での試験研究	54
3.5.1.	コンピューティング環境技術の調査・評価	54
3.5.2.	試験シナリオA 予備スウォーム飛行シミュレーション	55
3.5.3.	試験シナリオB 予備スウォーム飛行シミュレーション結果	60
3.5.4.	試験シナリオA/Bのスウォーム飛行シミュレーションと実機検証	61
3.6.	実機スウォーム飛行試験環境の構築	66
3.6.1.	試験環境構築に向けた設備機材の調査選定(R1FY)	66
3.6.2.	試験設備機材の再選定と変更届	75
3.6.3.	実験用 UAV の検討	77
3.6.4.	測位システムの検討	82
3.6.5.	測位用マーカーマウントの設計	86
3.6.6.	測位用マーカーのレイアウト設計	98
3.6.7.	測位用カメラのレイアウト設計	102
3.6.8.	カメラの画角設定	123
3.7.	実環境での試験研究	132
3.7.1.	実環境スウォーム飛行テストの概要	132
3.7.2.	R1 単一グループ・スウォーム・アルゴリズムの実機検証(R1FY)	135
3.7.3.	R2 スウォーム飛行予備試験	139
3.7.4.	R3 スウォーム飛行の実環境試験の概要(R3年度)	143
3.7.5.	試験シナリオA: 2重ループ合流・分流、3重ループ大規模スウォーム飛行試験	145
3.7.6.	試験シナリオB: 複数ゴール流れ場誘導スウォーム飛行試験	149
3.7.7.	障害物回避 流れ場誘導スウォーム飛行試験	153
4.	委託業務全体の成果	155
4.1.	計画時に想定していなかった成果(副次的成果)や、目標を超える成果	155
4.1.1.	仮想環境と実環境のギャップ(応答遅延)による衝突の危険回避方法	155
4.1.2.	UAV ダウンウォッシュ(プロペラ後流)による墜落の危険回避方法	158
4.2.	研究課題の発展性(間接的成果を含む)	159
4.2.1.	研究成果の産業分野発展に向けたロードマップ	159
4.2.2.	【産業】物流・工場の搬送工程における無人搬送ビークル制御への適用	160
4.2.3.	【産業】IPA ドローン高密度運用サイバー・フィジカルシステムへの適用	163
4.2.4.	【学術・産業】CAE シミュレーション技術を応用した制御演算の高速化	165
4.2.5.	【学術・産業】デジタルツイン、サイバー・フィジカルシステムのグリーン化	167
4.3.	研究成果の発表・発信に関する活動	169
5.	プロジェクトの総合的推進	170
5.1.	研究実施体制とプロジェクトマネジメント	170

5.1.1.	運営上の課題への対処	170
5.1.2.	経費の効率的執行	170
5.2.	対外発表	171
5.2.1.	研究発表の学会等の調査	171
5.2.2.	対外発表の実績	173
5.3.	特許出願	174
6.	まとめ、今後の予定.....	175
6.1.	報告書全体のまとめ	175
6.1.1.	物理学ベース群知能アルゴリズムの研究開発	175
6.1.2.	仮想環境（シミュレータ）での試験研究	177
6.1.3.	実環境における部分実機試験	177
6.2.	今後の発展に向けた取り組み	178
6.2.1.	研究成果の産業分野への展開	178
6.2.2.	【産業】物流・工場の搬送工程における無人搬送ビークル制御への適用	178
6.2.3.	【産業】IPA ドローン高密度運用サイバー・フィジカルシステムへの適用	178
6.2.4.	【学術・産業】CAE シミュレーション技術を応用した制御演算の高速化.....	179
6.2.5.	【学術・産業】グリーン・デジタルツイン	179
7.	研究発表、知的財産権等の状況.....	180

0. 研究背景

本研究の物理学ベース群知能は、移動体のトラフィック制御やマルチエージェント制御に、CAE/物理シミュレーション技術を応用した制御技術の一種である。その特徴は、制御演算の高速化、移動体の機数・台数の大規模化、集団の連携の柔軟性向上に対応するものである。

本研究により見込んでいる民生分野および学術分野への波及効果を以下に示す。

0.1. 波及効果

0.1.1. 民生分野への波及効果

本研究によって得られる状況適応型群制御技術は、二つの分野への適用が考えられる。一つ目は特定の目的を達成するための群制御システム、二つ目は不特定多数の自律ビークルの移動や協調を支えるための社会インフラとしての群制御システムである。

(1) 特定目的達成型の群制御システム

引き続き工業製品としての品質や信頼性の向上を図ることにより、以下の分野への適用が可能となる。

- ① 空港バードストライク防止用 UAV スウォーム制御システム
- ② 重要施設・インフラ監視用 UAV 管制システム (HLS: Homeland security)
- ③ 倉庫物流用の AGV(無人搬送台車)の管制システム

(2) 社会インフラ型の群制御システム

異なる諸元のエージェントが混在し、それぞれが独立に異なる出発地・目的地・経路を有する場合においても、運行量の増加とともに、エージェントが局所的に集中するケースが想定される。ここに群制御技術を適用することで、運行管理・管制の効率化・省人化に寄与することが可能となる。以下の分野への適用が可能となる。

- ① 災害時における UAV 緊急通信・物流システム
- ② エアモビリティに向けた高キャパシティ UAV 空路管制システム(次世代 ATC/TCAS)
- ③ 自動運転車のためのインフラ協調型制御への適用
- ④ 信号や車線の無い自動運転システム

0.1.2. 学術分野への波及効果について：

本研究は、制御工学・計算力学・人工知能の各分野の発展に寄与することができる(図 0.1-1)。

物理学ベース群知能は、従来のマルチエージェント制御の延長ではなく、連続体力学・数値解析などの計算力学技術をマルチエージェントの制御に応用したデジタルツイン制御技術であり特許も取得している。この数値解析等の計算力学技術を異分野の制御に用いる点が、学術的に新規性があり、制御工学・計算力学の範囲の拡大に貢献することができる。

また、複数エージェントの挙動を最適化するために、群知能における仮想物理モデルの係数や機体諸元・平均機体間距離などの内的要因の影響をシミュレータによる仮想データに基づいた学習、仮想環境と実環境の差異を最小化するために実データに基づいた学習を行い、エージェントの諸元や外部環境に対して安定的に稼働できる状況適応型マルチエージェント制御システムへ発展可能である。

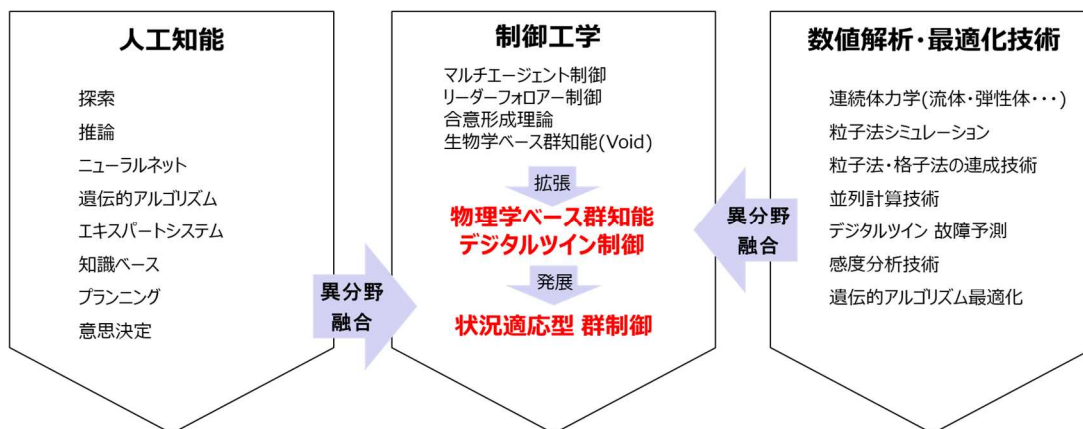


図 0.1.2-1 学術的な位置付け

0.2. 類似業績等と比較した本技術の特長

以下に、本研究の物理学ベース群知能の特長、および他の類似業績との比較を示す。

0.2.1. 本研究の物理学ベース群知能の特徴

本研究の物理学ベース群知能は、従来のマルチエージェント制御の延長ではなく、連続体力学や数値解析技術を、マルチエージェント制御に利用するデジタルツイン制御(サイバー・フィジカル・カップリング技術、図 0.3-1 参照)であることが新規性のポイントであり特許も取得している。

実世界の複数ビークルが移動する状況をサイバー空間に再現し、集団全体を仮想的物理モデルに従って協調・誘導させる。本群知能により、衝突回避に加え、集団の協調運動を実現する。

中核となる粒子法シミュレーションは、流体や固体を粒子に分割して現象や挙動を予測・評価する数値解析技術である(図 0.3-2、3 参照)。その粒子同士は衝突せずに、物理モデルに従って魚や鳥の群れのように創発的で協調的な挙動をすることから、センシング・IOT 技術と融合させることで、リアルタイム・シミュレーション&アクチュエーションにより移動体集団の協調的な制御を行うものである。

本物理学ベース群知能の最大の特徴は、異種ビークルの混在に容易に対応できる点にある。従来の生物学ベース群知能やフォーメーション制御に比べ以下の優位性がある。(補足：研究の進捗に伴い、制御計算の高速性についての優位性もあることが分かった)

(イ)ベースとなる連続体力学や数値解析技術は確立されておりアルゴリズムとしての信頼性が高い。対する生物学ベース群知能は、魚や鳥の挙動を観察しアルゴリズムをゼロから作る必要がある。

(ウ)数百万・数千万の粒子の挙動を対象としている技術を、数百・数千のエージェントを対象とするため処理が高速で、様々な数値解析手法を移動体の群制御に応用できるため拡張性が高い。例えば、群誘導と群協調の連携は、流体構造連成技術の応用で対応可能。

(エ)必要な数値解析の人材も豊富であり即応性が良い。

(オ)連続体力学や各種保存則を適用しビークル分布を密度分布として捉えるため異種協調に適する。一方、魚や鳥など生物は同一種としか協調しない。

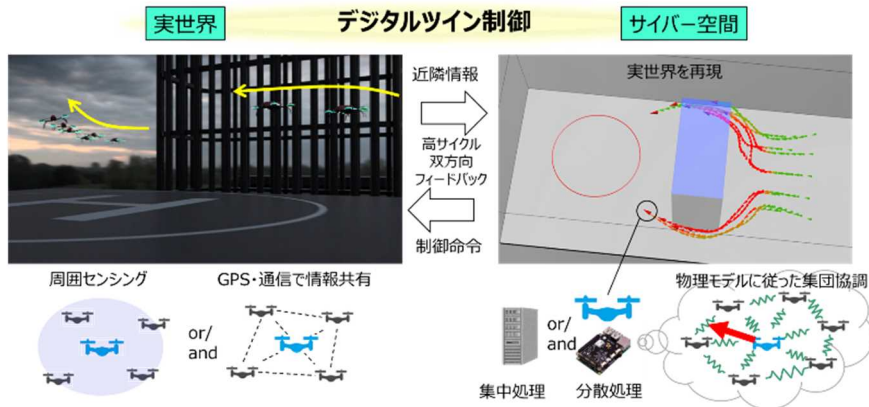


図 0.2.1-1 物理学ベース群知能・デジタルツイン制御概要

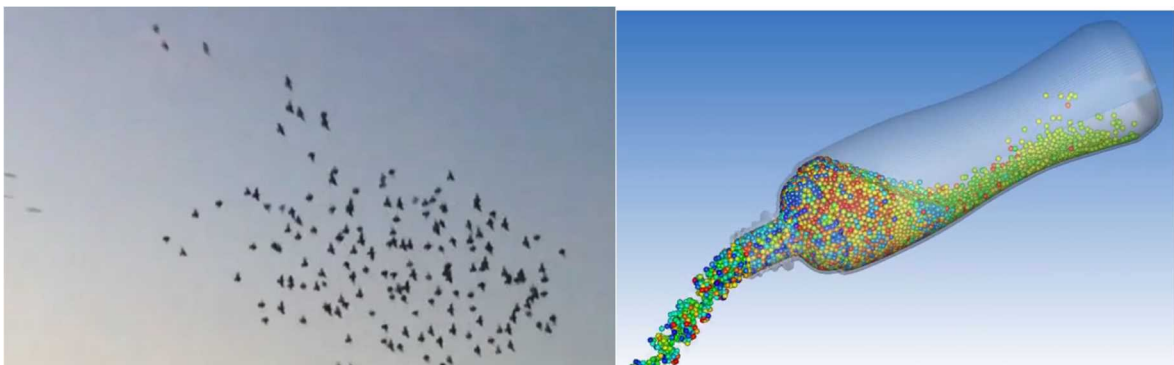


図 0.2.1-2 鳥の群れの挙動と粒子法の流体シミュレーション

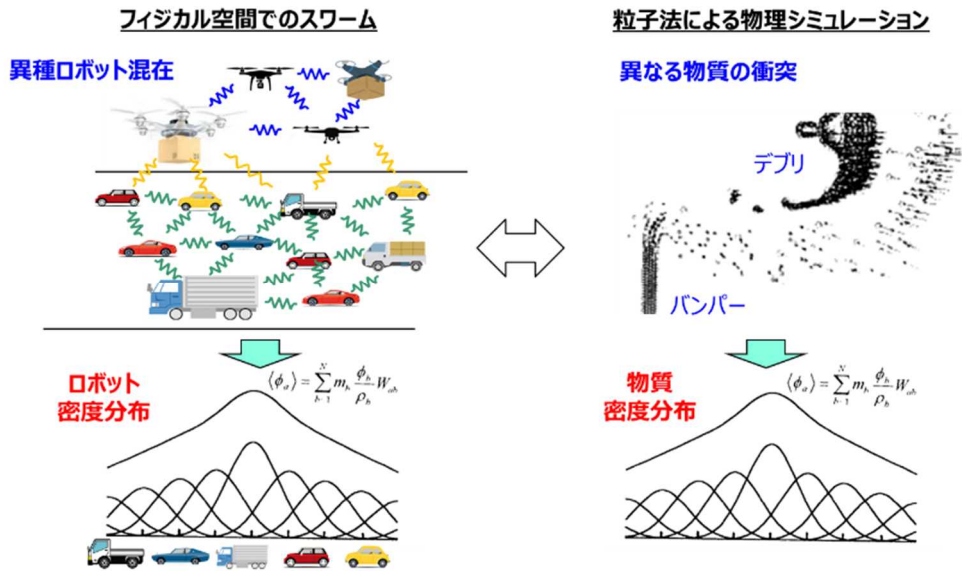


図 0.2.1-3 粒子法によるビークルの表現

0.2.2. 類似業績

類似業績の一覧を図 0.3-4 に示す。また、物理学ベース群知能と類似業績との比較を表 0.3-4 に示す。物理学ベース群知能は、既に確立された数値解析技術のフレームワークを制御に応用しているので、実機への適用や応用がし易い。

(群知能には、集団運動に適用するものと最適化問題に適用するものの2種類ある。参考のために合わせて示す。)

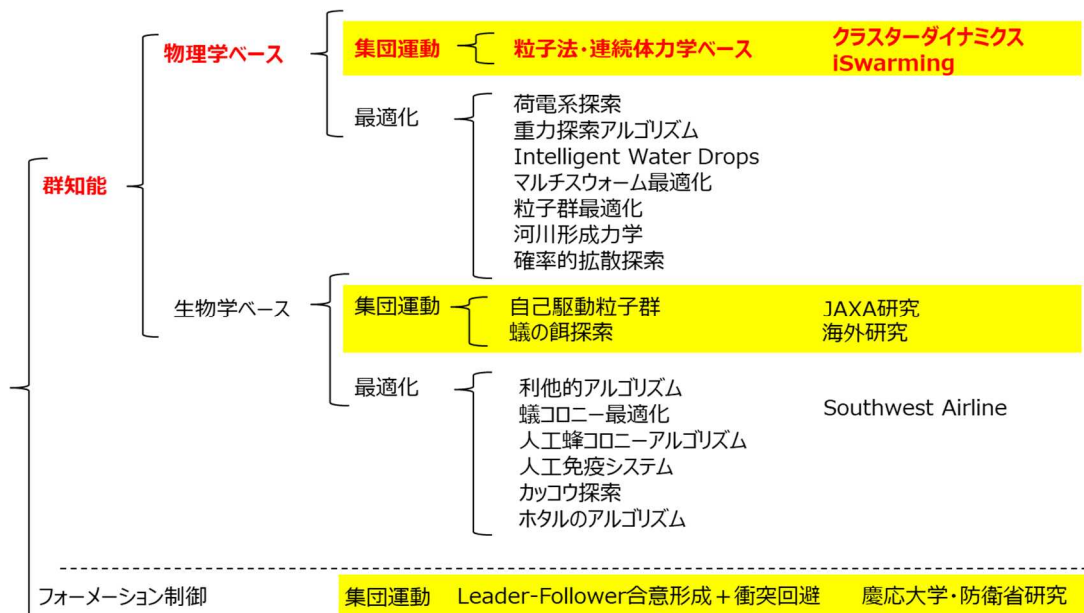


図 0.2.2-1 マルチエージェント制御の類似業績

表 0.2.2-1 物理学ベース群知能と類似業績との比較分析

	群知能		フォーメーション制御 慶応義塾大学・防衛省研究 三菱重工研究
	物理学ベース Cluster Dynamics	生物学ベース JAXA研究、欧州CPSwarm	
モデル化	○：モデル構築が不要。検証済みの物理法則・数値解析技術を応用している。	×：モデル構築に、生態の観察、仮説検討・検証が必要。	×：フォーメーション形成と衝突回避の2種類のアルゴリズムの相互作用の考慮が必要
数の増加	○：数百万～数億の計算粒子を扱う大規模解析技術を、数百機のピークルに縮小適用するので、対応が容易	△：分散処理には対応するが、数十匹の観察の結果を、拡大適用する必要があるため大規模化検討が必要	×：数の増加は対応困難
異種協調	○：サイズが異なる粒子に対応した計算アルゴリズムを利用している。	×：生物の群れは、同種同サイズが前提で、モデル構築が必要	△：モデル構築が必要
編隊飛行	○：流体モデルから弾性体モデルに切り替えることで、集団の挙動の特性を変更できる。	×：周囲との速度合意形成なので、編隊は形成せず塊となる。	○：得意
個別操縦	○：集団は物理法則でモデル化されているので、操縦は個々の粒子に作用する外力として扱うことで、力学に基づいた協調運動が可能	×：モデル化が必要	△：リーダーの操縦は可能であるが、フォロワーは不可

1. 委託業務の目的

1.1. 研究課題の最終目標（業務計画書 3.1 項）

本研究では、数百超の移動体が協調的に状況変化に安全に円滑に対応できる技術の獲得を目的とした、状況適応型群制御に関する基礎研究を行う。このため、3年間の業務において、空港バードストライク防止のシナリオ(下記(1)参照)を最終的に実現するため、要素技術を下記(2)に示す手順で段階的に積み上げて、下記(3)(4)の目標の達成を目指す。

なお、「状況適応型群制御」は、飛来する鳥などの外部状況の変化に適応するための計画を生成する「群行動計画生成技術」、及びその生成された計画に従って複数の UAV を安全に効率的に運用するための「群誘導・協調技術」の二つで構成される。今回の研究の範囲は、後者の「群誘導・協調技術」の研究である。前者の「群行動計画生成技術」の研究は今後実施して行く予定である。

また、下記(2)の手順で技術を段階的に積み上げていくことで、多様な適用局面への対応が可能となり、UAV・UGV の高密度運用を汎用的に対応できるように、周回空路の巡航、空路への流入・流出を想定したシナリオ、UAV ポートを想定した、ポート近傍の経路重複での衝突回避・すれ違い協調運行のシナリオの検討を行う。

(1) シナリオ

タイトル：「空港バードストライク防止用 UAV 群制御システム」

ミッション：滑走路に飛来し侵入する鳥の群れの進路を、UAV 集団で遮り侵入を防ぐ。

概要：飛来する相手集団は、味方の UAV の集団の配置や進路に応じて、集団の形状や進路を時々刻々と変化させて侵入を試みる事が想定される。効率的・効果的に相手の侵入を防ぐためには、相手の変化に対して味方 UAV 集団の配置や進路を時々刻々と適応させる必要がある。本研究では、時々刻々と変化すべき味方 UAV 集団の配置パターンを所与のゴールとして、UAV 集団を安全に協調的にゴールの配置パターンに誘導する技術の研究を行う。

(2) 手順

群誘導・群協調技術の組合せは、下記(a)の3種類がある。

今回の研究テーマ「空港バードストライク防止のシナリオ」はタイプ3であるが、これを実現するための大規模化・状況適応の技術は、ステップ・バイ・ステップで積上げていく必要がある。このため、タイプ1、タイプ2、タイプ3の順で、下記(b)に示す課題について研究を進める。

(a) 群誘導・群協調技術の組合せ：

タイプ1：親機追従+群協調（親機は実機でも仮想機体でも可）

タイプ2：ウェイポイント+群協調

タイプ3：誘導場+群協調

(b) 組合せタイプ別の研究課題：

タイプ1：群協調アルゴリズムの研究（2～20機）

タイプ2：大規模対応（UAV 集団高密度化）の研究（250 機）

タイプ3：誘導場アルゴリズムの研究及び大規模対応の研究（250 機）

(c) 用途：

タイプ1：UAV 集団のワンマン運用による省人化・作業時間短縮

タイプ2：UAV 空路・UAV ポートの高密度運用の自律化

タイプ3：鳥の集団の空港バードストライク防止

(d) 補足説明：

・タイプ1 異なる2集団すれ違い試験について：

上記シナリオでは、飛来する相手集団が二つに分かれることが想定される。この時、味方 UAV 集団も二つに分かれた運用がなされ、集団同士がすれ違う場面が起きることが想定される。このため、本試験では、UAV 集団を集団 A と集団 B の二手に分けて、集団 A と集団 B が安全にすれ違うためのスウォーム性能の検証を行う。

・タイプ2 大規模対応のための UAV 集団高密度化試験について：

大規模化対応の検証は、巡航 UAV の数の増加の検証、及び空路への流入・流出の検証を行う。試験は、陸上長距離走のトラック競技のような UAV 空路を設定し、その中にウェイポイントを配し、UAV を周回巡航運行させた状態で行う。ステップ1として、巡航 UAV の増加の検証を行う。周回空路に UAV を0機から250機まで段階的に流入させる。当初はウェイポイントに従って UAV は単線状で巡航を始める。単線でのキャパシティを超えると、複線化することが想定されるが、群協調により対応できることを検証する。次に、ステップ2として、周回空路にバイパスを設けて本線を巡航する UAV とバイパスを巡航する UAV のすれ違いや分流、バイパスから本線への再合流が安全に行われることを検証する。これらの検証により、250機の大規模対応のスウォーム性能を確認する。

(3) 必達目標

(a) スウォーム性能

仮想環境及び実環境において、以下に示す機数を制御できること。

(ア) 仮想環境(シミュレータ)試験：250機(*1)

(イ) 実環境での部分実機試験：実機20機+仮想230機(*2)

*1 米国 DARPA OFFSET プログラム 250 機を参考に設定

*2 仮想環境 250 機のうち、20 機を実環境に置き換えた試験を実施する。

なお、予算の制約上 20 機とした。

(b) 状況適応性能（外部状況の変化への対応）

UAV 集団が相手集団(鳥の群れ)に接近したときに、相手集団の変形・分裂・合流などの挙動に対応するため、以下に示すように UAV 集団を誘導できること。

(ア) 250 機で構成される一つの集団の群誘導

(イ) 異なる二つの集団の合流・分離・すれ違いの群誘導

(4) 努力目標

(a) スウォーム性能

UAV 集団を安全に運用するために必要な運用限界エンベロープを確立する。現時点では、以下示す運用限界エンベロープを明らかにする。なお、研究の進捗により、検討する運用限界エンベロープを追加する場合もある。

(ア) UAV 集団の高密度化に関する指標：

各種の応答遅れにより UAV 同士が衝突しない領域を示す。

- ・位置情報取得サイクル(Hz)
- ・制限速度
- ・平均機体間距離

(イ) 環境変化に対する安定性に関する指標

UAV 集団が突風を受けた場合でも UAV 同士が衝突しない領域を示す。

- ・突風速度
- ・運用速度
- ・平均機体間距離

(b) 実環境適応性能

(ア) 仮想環境で最適化した群知能システムを、機械学習で実課題に適応するプロセスを構築する。UAV 集団の安全運用・効率運用に資する目的関数の検討を行い、感度分析により UAV 集団の挙動に影響を及ぼす要因を明らかにする。

(イ) 仮想環境において、目的関数を最大化または最小化するような群知能条件パラメータの探索をシミュレータと遺伝的アルゴリズム等の最適化技術を用いて行った後、仮想データによる機械学習で調整するためのプロセスを構築する。

(ウ) 実環境において、群知能システムを運用して実機データを取得し、仮想環境では考慮できなかった要因を含む機械学習プロセスを構築する。

1.2. 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題（業務計画書 3.2 項）

状況適応型群制御に関する本研究における要素課題は、(1)群誘導、(2)群協調、(3)実環境適応の要素技術である。このため、最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題は、各要素技術における課題に加え、要素技術間の連携における課題、並びに各要素技術に共通する仮想環境から実環境への移行における課題となる。詳細は以下のとおりである。

(1) 群誘導

群誘導とは、エージェント集団をある目的地へ誘導することを言う。群誘導は、ウェイポイントによる方法が一般的であるが、流体数値解析技術を応用した仮想流れ場による方法を用いる。仮想

流れ場による誘導は、空路内に仮想流れ場を生成し、流水プールで人が浮き輪に乗って流れるが如く、域内のエージェントは仮想流れ場から誘導力を受けて、目的地に導かれる。この誘導場は、次項の群協調によるエージェント間内力と連成して、エージェントの行動を決定する。

最終目標の実現には、状況変化に対応するために群行動計画示された指示に基づいて、柔軟に誘導場を生成する必要がある。

しかし、これまでに研究した誘導場は、一旦経路が決まると変更されない静的な誘導場であった。この静的な誘導場は、事前に準備が出来るため、圧力場による流れを数値解析により求めてきたが、計算に時間がかかるので、時々刻々と変化する目的地に対応するにはリアルタイム性が低い。

そこで、本研究では、相手集団の状況に応じて時々刻々と変化する目的地へエージェント集団を導くため、予め準備した数値解析の結果を教師データとする機械学習を用いた誘導場の自動生成技術について研究を行う。

なお、今回の群誘導は、大規模化対応を優先して取り組むため、UAVは指向性のないマルチコプタータイプを想定している。有翼無人機のように飛行するタイプは、目的地に達した後にそこに留まるためには、目的地のまわりを周回飛行させる必要がある。このため、目的地到達後、機数分の周回用ウェイポイントを、下記の群協調技術を用いて均等に配置することで、目的地での周回運動を行うことは可能である。または、UAVを直接協調制御するのではなく、UAVが追従する動的ウェイポイントを生成し、その動的ウェイポイントの集団を群誘導・群協調にて制御し、実機は自身と対となっている動的ウェイポイントに追従させることで、有翼機のスウォームが可能となる。これらの有翼無人機の制御は、別途研究を進める予定である。

(2) 群協調

本研究の群協調は、粒子法による数値解析技術をマルチエージェント制御に応用したものである。粒子法とは、流体や弾性体を点群の集まりとして表現した数値解析の一手法であり、計算において粒子同士は物理モデルに応じた内力を及ぼし合って、重ならない点に注目し、マルチエージェントの衝突回避と協調運動に応用したものである。これまで、ROSシミュレータでは数10機のエージェントについて、実機では数機のエージェントについて群誘導・群協調の研究を行った。ドローンの突風に対する応答特性については、数値解析シミュレータにて数百機について研究を行った。

最終目標は、仮想環境において数百機レベルの集団について、実環境においてその集団の一部を数十機の実機に置き換えて、群制御を行う必要がある。このため本研究では、ROSによるデジタルツイン制御において、エージェント数の増大に対応するため、シミュレータの計算速度が実世界を制御するに足るようにコンピューティング環境を踏まえたアルゴリズムのアーキテクチャの研究を行う必要がある。

また、機体諸元（重量、寸法、加速・減速性能、移動方向制約）の変動に対する安定性、デジタルツイン制御安定性（エージェント応答遅れ、数値解析遅延、位置情報共有遅延）について、研究を行い、群制御の運用エンベロープ（運用速度・機体密度・突風制限など）を明らかにする必要がある。

(3) 実環境適応：仮想環境から実環境への移行

仮想環境から実環境へ移行においては、現状、通信遅延や実機応答遅延が課題になると考えている。本研究では、上記への対応に加え、その他の仮想環境と実環境の差異の原因となる要因を特定し、その感度(影響度)を明確にする。また、シミュレータによる仮想データと実験による実データに基づいて、仮想環境と実環境の差異を最小にするための感度分析を行い、最適化技術および機械学習を利用して機体諸元の変化や環境変化に柔軟に安定的に対応できるロバストな群制御技術を確立する。

1.3. 要素課題に対する実施項目及び体制(業務計画書 3.3 項)

各要素課題に取り組むために、下記の(1)から(4)の実施項目を、年度毎に3つのフェーズに分けて、年度毎に目標を達成するよう段階的に進める。1年目のフェーズ1は要素技術と相互連携の研究、2年目のフェーズ2はシミュレータによる検証、3年目のフェーズ3は実機による検証とする。

【実施項目】

(1) 物理学ベース群知能アルゴリズムの要素研究(1~3年目)

1年目は、数百超のエージェントに対応できる実環境適応型の群誘導・群協調のアルゴリズムの研究開発を行った。実環境適応を踏まえた群協調アルゴリズムおよび群誘導アルゴリズムの研究内容については、第3.3.1項および第3.3.2項に示す。

2年目の仮想環境での試験研究および3年目の実環境での部分実機試験のフィードバックを受けて、仮想環境のシミュレーションデータおよび実環境の試験データを用いた、実環境適応のための感度分析・最適化・機械学習プロセスの構築を行う。

(2) 仮想環境(シミュレータ)での試験研究(2年目)

2年目において、上記(1)の群誘導及び群協調の要素技術をシミュレータに実装し、仮想環境および実環境において250機のUAVの運用が出来るコンピューティング環境の構築を行う。また、実環境での部分実機試験において20機のUAVのデジタルツイン制御ができる環境の構築を行う。

また、シミュレータを用いた試験を実施し、上記(1)の群協調アルゴリズムおよび群誘導アルゴリズムについて、仮想データを用い、数値解析遅延、実機応答遅れ、位置情報共有遅延などの影響を検証し、実環境適応技術にフィードバックする。

(3) 実環境における部分実機試験(3年目)

1年目において、本研究に適したUAVの調査を行い、機種を選定し、実機での性能確認を行った。また、実環境での部分実機試験の環境整備のため、通信機器および測位機器について、調査を行い、2年目に機種を選定し調達する。なお、UAVの機種選定には、通信機器及び測位機器の性能を考慮して行う。

実環境での部分実機試験では、取得したデータについて仮想環境データとの差異について分析を行い、差異の要因を明らかにするとともに、群知能アルゴリズム、最適化・機械学習プロセス、シミュレータへ成果のフィードバックを行う。

(4) プロジェクトの総合的推進

各要素課題に関する研究の進捗を管理し、要素技術間の統合、及び仮想環境と実環境との間の統合を円滑に進める。

【フェーズ毎の実施内容と達成目標】

(1) フェーズ1（1年目）要素技術と相互連携の研究

(ア)仮想環境（作業配分90%）

- ① 群知能アルゴリズムの要素研究
- ② 相互連携アーキテクチャ検討
- ③ 実環境適用の機械学習アーキテクチャ検討
- ④ 大規模コンピューティング環境検討

(イ)実環境（作業配分10%）

- ① デジタルツイン環境の構築
- ② 実験用 UAV の調査・調達・試験飛行
- ③ 通信機材、測位機材の調査

(2) フェーズ2（2年目）シミュレータによる検証

(ア)仮想環境（作業配分70%）

- ① 要素技術の統合
 - (a) 数機～20機レベルのスウォーム飛行で検証
 - (b) 機械学習、実環境適応の検証
- ② 大規模マルチエージェント制御対応
 - (a) UAV 250機スウォーム飛行

(イ)実環境（作業配分30%）

- ① 実環境における予備試験
 - (a) UAV 単機の地上試験・飛行試験
 - (b) デジタルツイン10機スウォーム飛行（仮想環境の10機を実機に置換）

(3) フェーズ3（3年目）実機による検証

(ア)仮想環境（作業配分20%）

- ① デジタルツインシステムへの実環境試験結果の反映

(イ)実環境（作業配分80%）

- ① 大規模マルチエージェント制御対応:仮想環境の250機のうち20機を実機に置き換えてデジタルツイン制御を実施

1.3.1. 群協調アルゴリズム研究の実施内容

群協調による UAV の挙動は仮想物理モデルに従う。群協調で相互に作用する内力の構成式は、下式のようにビークル間の密度分布（相対位置関係）と相対速度、及びビークルの慣性特性により定まる。

$$m(i) \dot{x}_a(i) = F_{in}(i) = \text{仮想弾性係数}(k) \times \text{密度分布} + \text{仮想粘性係数}(\eta) \times \text{相対速度}$$

現状では、機種や協調運動パターンに応じて、手動でトライ&エラーにおいて求めているが、この手順を体系化・自動化することを考えている。そこで、遺伝的アルゴリズムによる最適化、Q 学習および DQN (Deep Q-Network) の活用の検討を、次の通り実施する。

場面は、親機に追従する子機を想定する。親機の挙動に対する子機の追従性能として、応答遅れ時間、応答の収束時間、及び親機の挙動に対する子機の挙動のオーバーシュート量を重みづけを考慮した上で目的関数として、最小化する。

はじめに、機体が 1 対 1 の状態で、遺伝的アルゴリズムによる最適化により、仮想物理係数 (k , η) の大凡の範囲を見積もり、応答局面により傾向を把握し、Q 学習における行動数の削減につなげる。次に、位置と速度の状態に応じて k と η を変化させ、各状態(各時刻)での最適な k と η を求める。ただし、 k と η のそれぞれの値は、遺伝的最適化で求めた範囲の中から抽出し、各位置と速度の状態(各時刻)で最適な k と η を求める。規模が小さい場合(機体数 2 など)は、Q 学習で対応可能と思われる。

しかし、規模が大きくなると(機体数 3 以上など)、状態と行動の組合せが無限に大きくなる。このため、次のステップとして、親機 1 機・子機 2 機について、DQN(Deep Q-Network)を適用し、Q 値(状態行動価値 Q(ある状態においてある行動 a を行ったときの価値))をニューラルネットワークで近似し、Q 値を推定する。

1.3.2. 群誘導アルゴリズム研究の実施内容

群誘導の一つの方法として、ポテンシャル場の解析や流体数値解析技術によりベクトル場を計算し、そのベクトルに従って集団を誘導する。しかし、この方法だと解析に時間を要する。そこで、教師有り学習による誘導ベクトル場の生成アルゴリズムについて研究を行う。

すでに先行的な研究として、定常流の近似的な解の予測を「CNN (Convolutional Neural Networks)」を用いて行う試みが行われており、外形形状データから CNN により流れ場を予測することが行われている。本研究では、この先行研究を参考に、誘導場の自動生成技術の研究に取り組む。

ステップ 1 として、数値解析で教師データを生成する。様々な形状の目的地のデータを作成し、メッシュを生成し、数値解析を実施して、圧力場や流速ベクトル場を得る。

次のステップ 2 においては、これらの数値解析結果を教師データとして使い、CNN を用いて、圧力場や流速ベクトル場の近似解をリアルタイムで生成させる。

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

【研究の概要】

本研究は、鳥の群れのように、数百機の無人ビークルを状況変化に適応するように制御する技術「物理学ベース群知能」の研究である。近隣ビークルの状況をサイバー空間に再現し、少し未来の相互関係を高速でシミュレートし、誘導と衝突回避を行うデジタルツイン制御を実現する。

【研究の成果】

ドローン空路の合流と分流を模擬した2重周回コースを、5機編成集団が5つ、集団内の協調を保ちながら、集団同士の合流と分流を繰り返すスウォーム飛行に日本で初めて成功した。さらに、サイバー空間にドローン250機まで追加し、増大する機数に本技術が耐え得ることを実証した。また、ゴール誘導流れ場生成AI適用、及び相互協調のAI適用の試験研究を行った。生成した流れ場を用いて、多数の集団を一括で誘導できることを確認した。

以下に、本研究の目標を達成するために実施した内容、及び研究目標の達成度を示す。

2.1. 実施内容

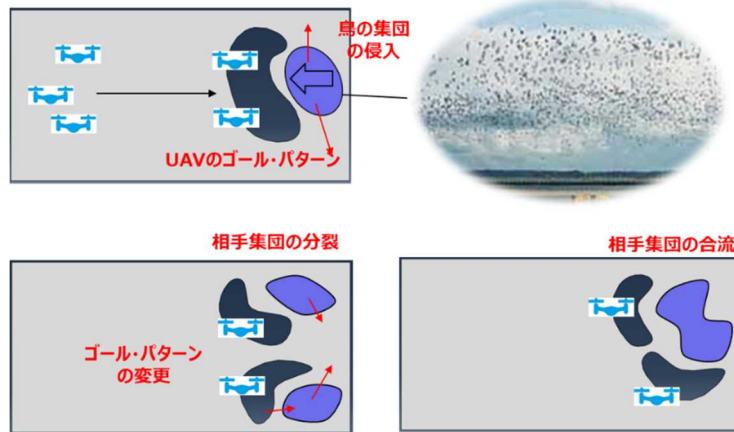
本研究の目標は、250機のスウォーム性能を確認し、数百機レベルの大規模マルチエージェント制御に対応できる技術を獲得することである。本研究の成果の適用先である適用シナリオを2.1.1項に示す。また、本研究の要素技術を獲得するために必要な試験シナリオを2.1.2項に示す。結果を2.1.3項に示す。

2.1.1. 適用シナリオ(ユースケース)

メインの適用シナリオ(ユースケース)は、バードストライク防止用UAV群制御システムである。サブの適用シナリオ(ユースケース)は、UAV航空管制の高密度化である。

表 2.1-1 本研究の適用シナリオ (ユースケース)

項目	内容
目的	数百超の移動体が協調的に状況変化に安全に円滑に対応できる技術の獲得すること
シナリオ	空港バードストライク防止用UAV群制御システム
ミッション	滑走路に飛来し侵入する鳥の群れの進路を、UAV集団で遮り侵入を防ぐ。
概要	飛来する相手集団は、味方のUAVの集団の配置や進路に応じて、集団の形状や進路を時々刻々と変化させて侵入を試みる事が想定される。効率的・効果的に相手の侵入を防ぐためには、相手の変化に対して味方UAV集団の配置や進路を時々刻々と適応させる必要がある。本研究では、時々刻々と変化すべき味方UAV集団の配置パターンを所与のゴールとして、UAV集団を安全に協調的にゴールの配置パターンに誘導する技術の研究を行う。



異なるゴール・パターンに応じて誘導場ベクトルを生成

*ゴール・パターンの自動生成は今回の対象外

図 2.1.1-1 メインユースケース：バードストライク防止 UAV 群制御システム



図 2.1.1-2 サブユースケース：高密度 UAV 運用管制システムへの適用

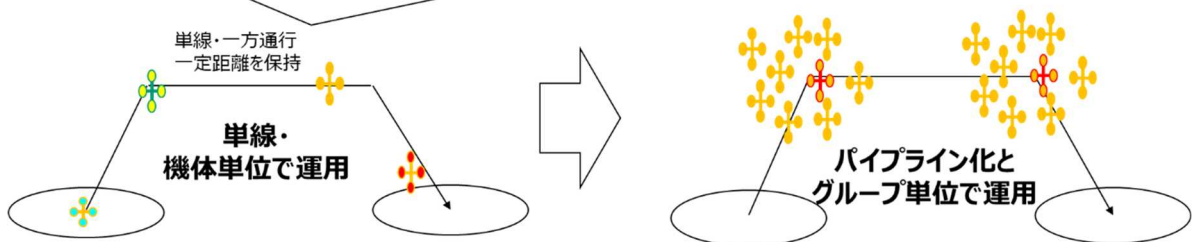


図 2.1.1-3 サブユースケース：群知能による UAV 管制の高密度化

2.1.2. 試験研究の実施手順

UAVの大集団の群制御は、協調制御と誘導制御の要素技術で構成される。そこで、試験研究は、協調制御と誘導制御の技術を確認するため、図 2.1.2-1 及び表 2.1.2-1 試験研究の実施内容表 2.1.2-1 に示す手順にて実施した。

表 2.1.2-1 試験研究の実施内容

手順	タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3
想定用途	UAV 集団のワンマン運用による省人化・作業時間短縮	UAV 空路・UAV ポートの高密度運用の自律化	鳥の集団の空港バードストライク防止
試験方法	予備飛行試験	試験シナリオ A ・ 図 2.1.2-2 参照 ・ 図 2.1.2-3 参照	試験シナリオ B ・ 図 2.1.2-4 参照
形態	飛行エリア内の自由操縦 ・ 親機を操縦 ・ 子機は親機に追従	多重ループ周回 ・ 親機をウェイポイントで誘導 ・ 子機は親機に追従	飛行エリア内の流れ場誘導 ・ 全機を誘導場で誘導
目的	オペレータによる操縦	大規模対応	大集団運用の効率化
要素技術	複数機ワンマンオペレーション 1 個集団の群協調の確認	群協調アルゴリズム 複数集団の群協調 大規模対応(250 機)	群協調アルゴリズム 群誘導アルゴリズム 大集団の効率的な運用

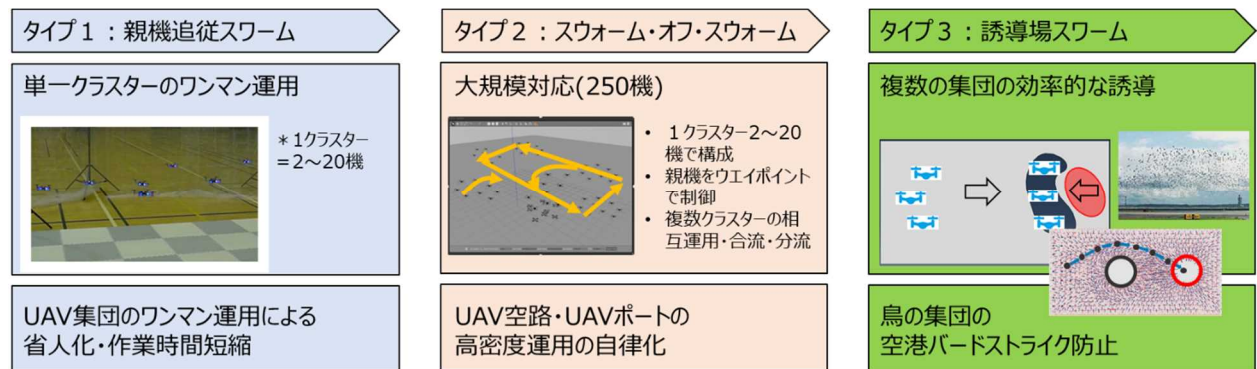


図 2.1.2-1 試験研究の実施手順

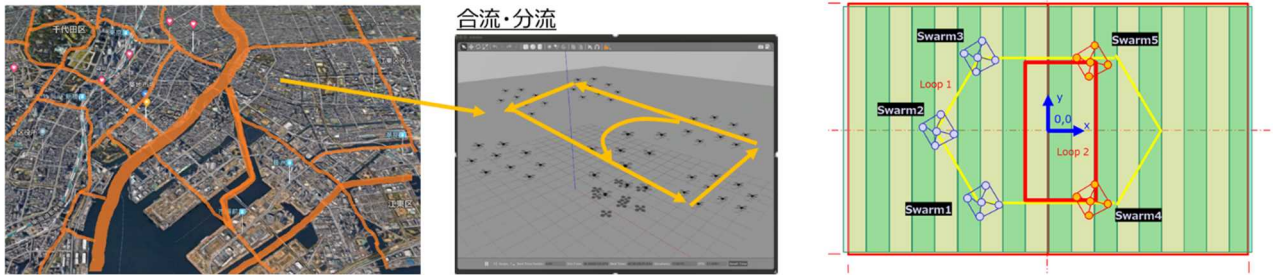


図 2.1.2-2 小集団の群制御（スウォームの合流・分流）検証（試験シナリオ A）

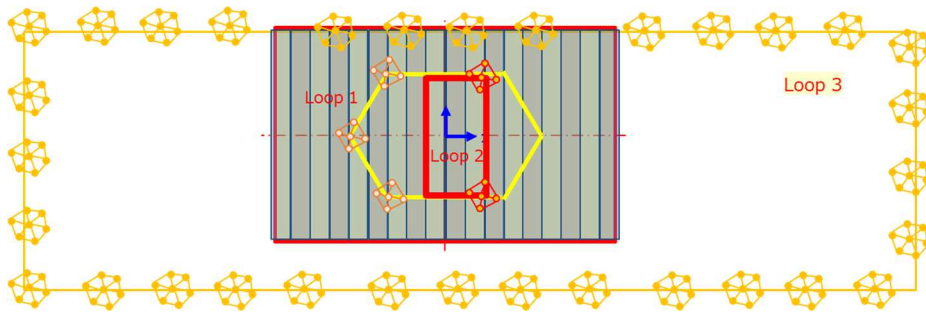


図 2.1.2-3 大集団(250機)の群制御（試験シナリオ A 拡張）



図 2.1.2-4 スウォーム(集団)の誘導・協調（試験シナリオ B）

2.1.3. 実施結果概要

試験研究の結果概要を表 2.1.3-1 に示す。屋内体育館に試験環境を構築し(図 2.1.3-1 参照)、図 2.1.3-2 に示す試験用小型 UAV を用いて行った。

表 2.1.3-1 試験研究の結果概要

手順	タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3
試験方法	予備飛行試験	試験シナリオ A	試験シナリオ B
実施時期	R1 年度	R3 年度	R3 年度
成果概要	オペレータが親機をコントローラで操縦し、子機は親機に追従する。実機 9 機でスウォーム飛行させ、群協調アルゴリズムが動作することを確認した。	スウォーム飛行は、陸上競技場のような周回コースを 2 重にした空路で行った。実機 20 機で小集団同士の群協調ができることを確認した。また 3 重ループで仮想 250 機のうち 20 機を実機としスウォーム飛行し、大規模対応できることを確認した。	誘導場は、運用領域の中にゴールに向かう流れ場を生成し、その中の UAV をゴールに誘導するものである。試験は、実機 20 機で、ゴールからゴールへと流れ場を切り替えてスウォーム飛行を行い、アルゴリズムが動作することを確認した。
参照	図 2.1.3-3	図 2.1.3-4、図 2.1.3-5	図 2.1.3-6

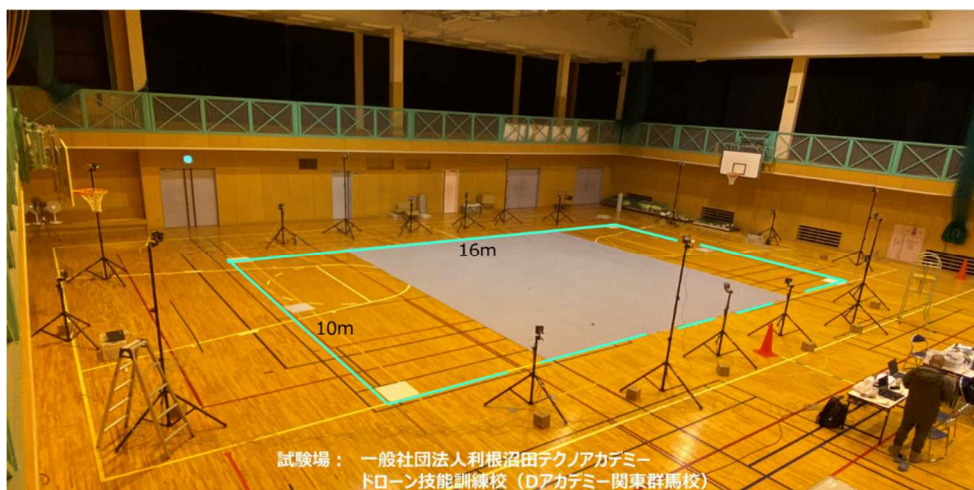


図 2.1.3-1 実機試験環境

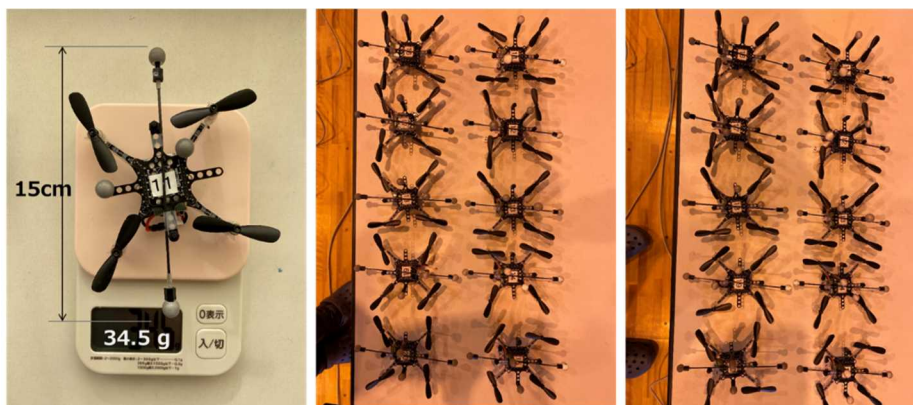


図 2.1.3-2 試験用の小型 UAV

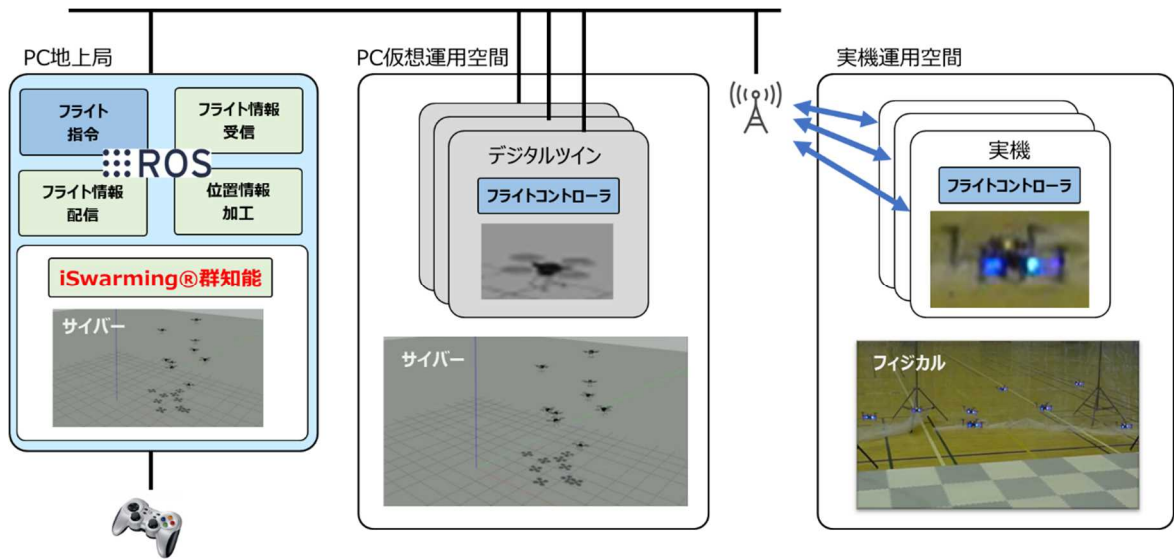
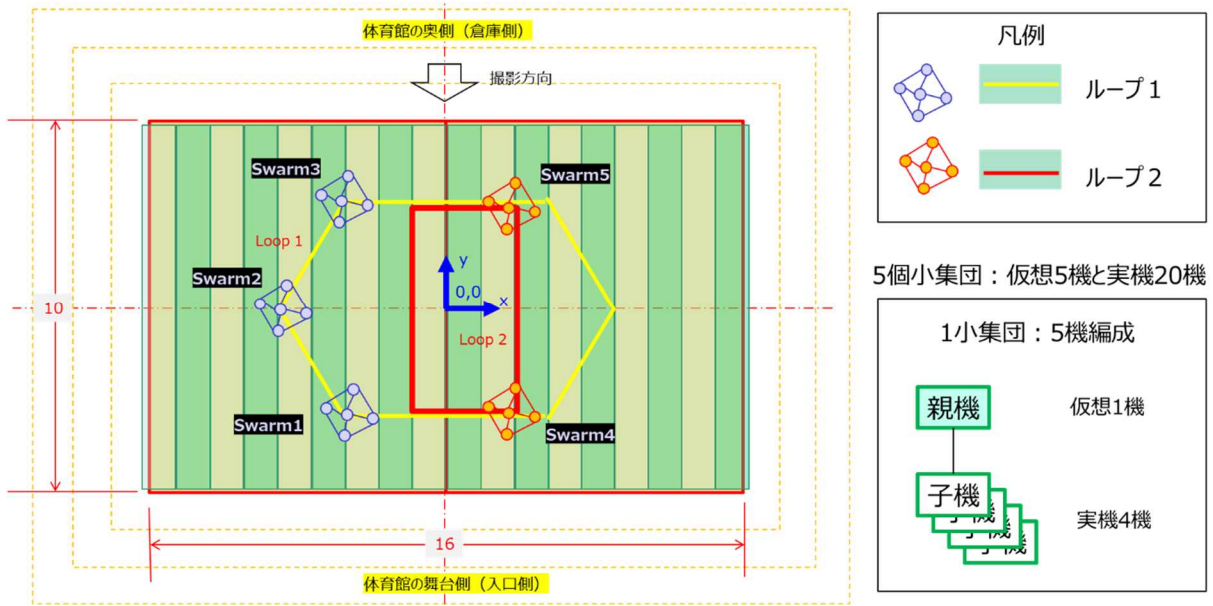


図 2.1.3-3 予備飛行試験：UAV 9 機のワンマンオペレーション



5機小集団(仮想1機・実機4機) x 5個 (仮想5機と実機20機)

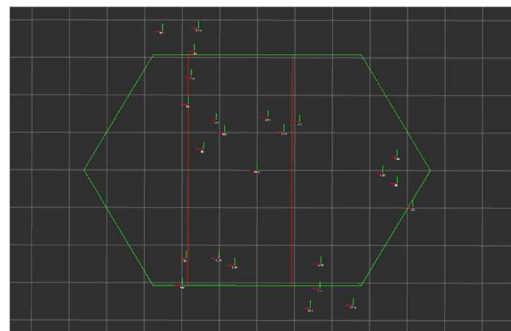
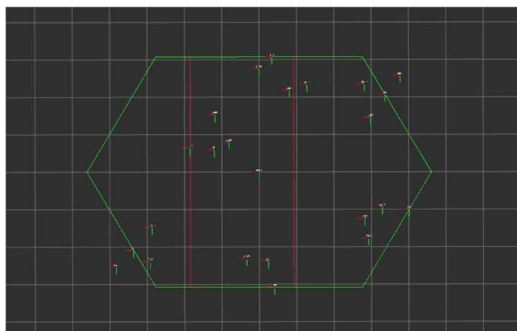
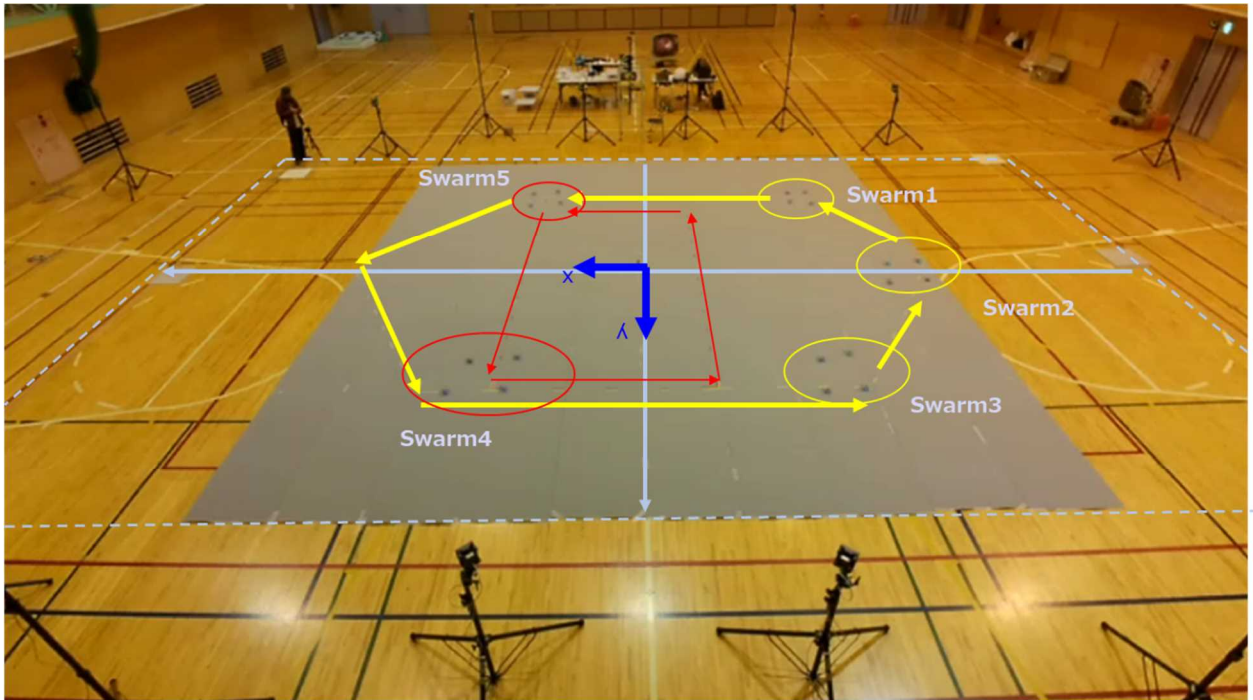
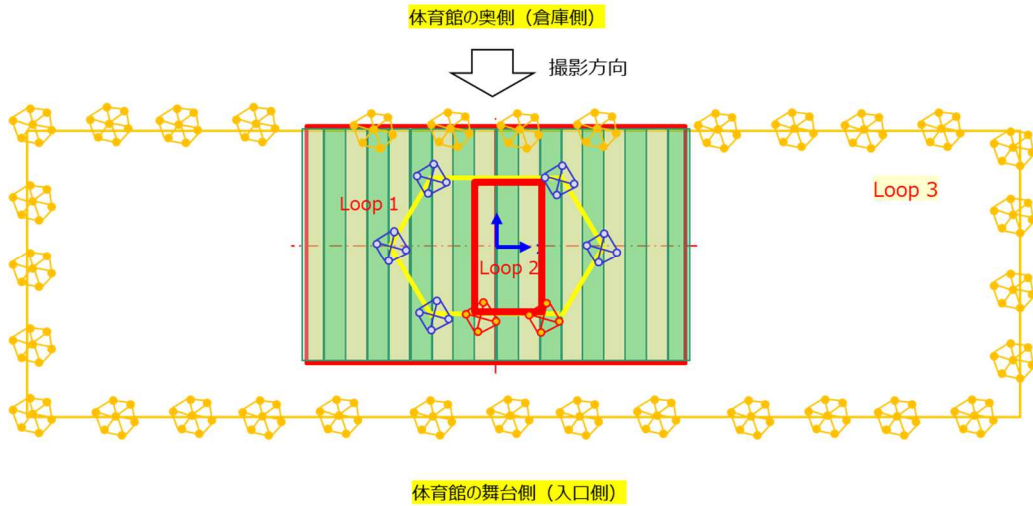


図 2.1.3-4 試験シナリオ A：2重ループ周回・ウェイポイント誘導外力・飛行テスト



Loop1, 2: 4機小集団(仮想1機・実機3機)x7個(28機)+Loop3: 7機小集団(仮想) x32個(224機)
 仮想232機と実機20機

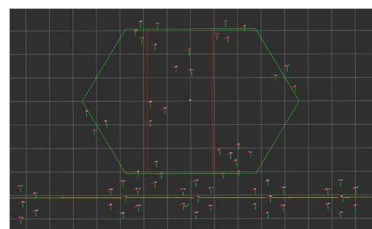
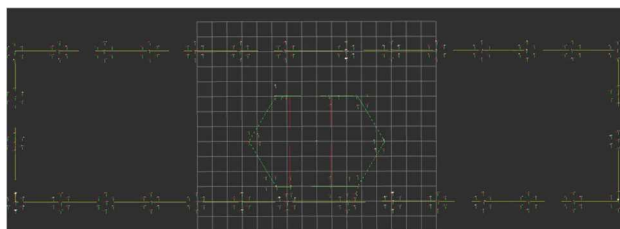
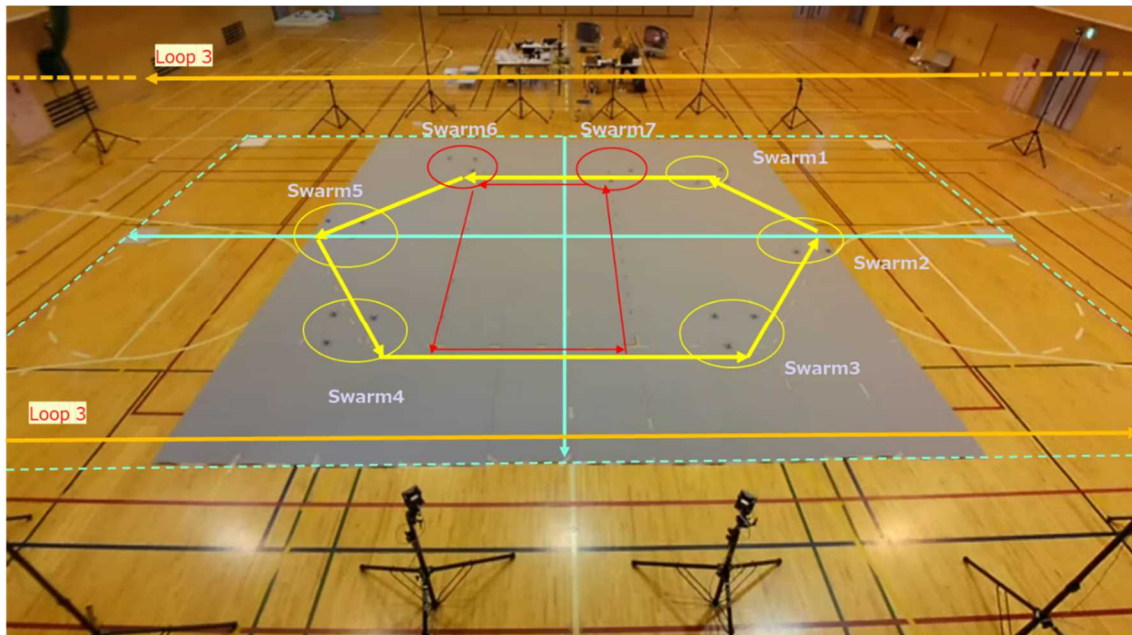
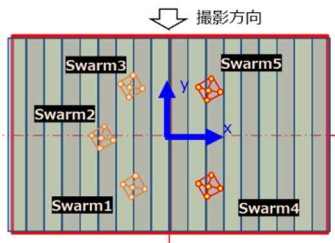
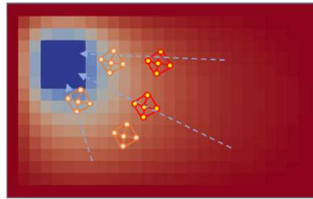


図 2.1.3-5 試験シナリオ A 拡張: 3重ループ周回(仮想230機と実機20機)飛行テスト

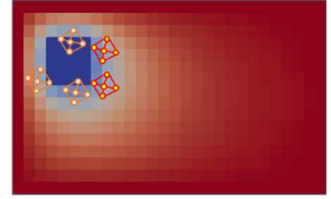
① 初期配置 5個集団



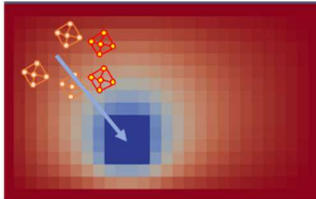
② Flow1の流れ場に従って移動



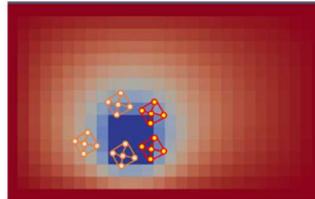
③ Flow1のゴールに到着



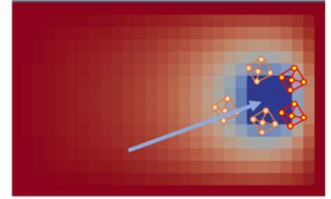
④ Flow2に切替、移動



⑤ Flow2に移動、ゴール着



⑥ Flow3に切替、移動ゴール着



5 機小集団(仮想 1 機・実機 4 機) x 5 個 (仮想 5 機と実機 20 機)

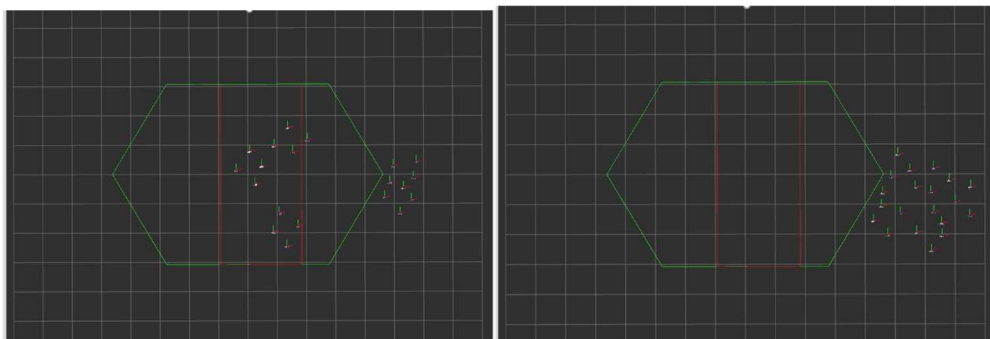
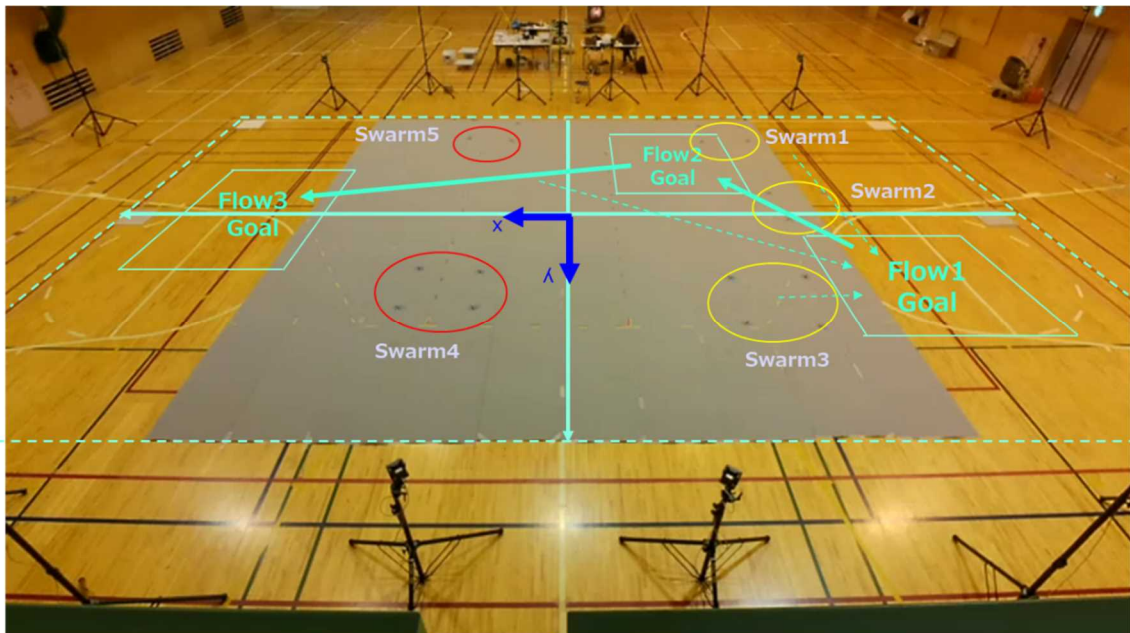


図 2.1.3-6 試験シナリオ B : 流れ場誘導外力ゴール

2.2.2. 要素課題の達成度

最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題について、達成度を以下に示す。

表 2.2.2-1 要素課題と達成度

要素課題	内容	達成度
群誘導	<p>① 群誘導とは、エージェント集団をある目的地へ誘導することを言う。群誘導は、ウェイポイントによる方法が一般的であるが、流体数値解析技術を応用した仮想流れ場による方法を用いる。仮想流れ場による誘導は、空路内に仮想流れ場を生成し、流水プールで人が浮き輪に乗って流れるが如く、域内のエージェントは仮想流れ場から誘導力を受けて、目的地に導かれる。この誘導場は、次項の群協調によるエージェント間内力と連成して、エージェントの行動を決定する。</p> <p>② 最終目標の実現には、状況変化に対応するために群行動計画示された指示に基づいて、柔軟に誘導場を生成する必要がある。本研究では、相手集団の状況に応じて時々刻々変化する目的地へエージェント集団を導くため、予め準備した数値解析の結果を教師データとする機械学習を用いた誘導場の自動生成技術について研究を行う。</p>	<p>① 群誘導は、ウェイポイントによる方法及び仮想流れ場による方法について、実機 20 機によるスウォーム飛行を行い、その機能を確認した。</p> <p>② 群誘導 CNN は運用領域にゴールが一つある形態で実施した。CNN で生成した圧力場から流れ場を生成し、実環境でテストを行った。</p>
群協調	<p>① 本研究の群協調は、粒子法による数値解析技術をマルチエージェント制御に応用したものである。最終目標は、仮想環境において数百機レベルの集団について、実環境においてその集団の一部を数十機の実機に置き換えて、群制御を行う必要がある。</p> <p>② このため本研究では、ROS によるデジタルツイン制御において、エージェント数の増大に対応するため、シミュレータの計算速度が実世界を制御するに足るようにコンピューティング環境を踏まえたアルゴリズムのアーキテクチャの研究を行う必要がある。</p> <p>③ また、機体諸元（重量、寸法、加速・減速性能、移動方向制約）の変動に対する安定性、デジタルツイン制御安定性（エージェント応答遅れ、数値解析遅延、位置情報共有遅延）について、研究を行い、群制御の運用エンベロープ（運用速度・機体密度・突風制限など）を明らかにする必要がある。</p>	<p>① 群協調は、ウェイポイントと流れ場による群誘導と連携しスウォーム飛行を行った。仮想環境で 250 機、うち 20 機を実機に置き換えて群制御を行った。</p> <p>② 本システムでは、エージェント数（機数）が仮想環境で 250 機（うち実機 20 機）の場合でもスウォーム飛行をすることができた。</p> <p>③ 制御安定性は数値解析安定性と密接に関係することが分かった。群制御の運用エンベロープは今後の課題とする。</p>
実環境適応	<p>① 通信遅延や実機応答遅延への対応を行う。その他の仮想環境と実環境の差異の原因となる要因を特定し、その感度（影響度）を明確にする。</p> <p>② シミュレータによる仮想データと実験による実データに基づいて、仮想環境と実環境の差異を最小にするための感度分析を行い、最適化技術および機械学習を利用して機体諸元の変化や環境変化に柔軟に安定的に対応できるロバストな群制御技術を確認する。</p>	<p>① 通信遅延や実機応答遅延の対応として、応答遅延対応アルゴリズムを考案し特許出願した。2 次元シミュレータで確実に衝突を回避できることを確認した。</p> <p>② 実環境と仮想環境のデータを分析し、差異が微小であることを確認した。仮想環境での群制御計算に実環境データを用い、スウォーム飛行を行うことが出来た。</p>

2.2.3. 実施項目の達成度

各要素課題に取り組むために設定した実施項目および年度毎の各フェーズについて達成度を以下に示す。

表 2.2.3-1 実施項目と達成度

No	実施項目	達成度
1	<p>物理学ベース群知能アルゴリズムの要素研究</p> <p>① 数百超のエージェントに対応できる実環境適応型の群誘導・群協調のアルゴリズムの研究開発を行い、各要素技術間の相互連携のアーキテクチャを設計する。</p> <p>② 2年目の仮想環境での試験研究および3年目の実環境での部分実機試験のフィードバックを受けて、仮想環境のシミュレーションデータおよび実環境の試験データを用いた、実環境適応のための感度分析・最適化・機械学習プロセスの構築を行う。</p> <p>③ 群協調アルゴリズムの研究では、遺伝的アルゴリズムによる最適化、Q学習およびDQN (Deep Q-Network) を活用した検討を実施する。</p> <p>④ 群誘導アルゴリズムの研究は、「CNN (Convolutional Neural Networks)」を用いて外形形状データから流れ場を予測する誘導場の自動生成技術の研究に取り組む。</p>	<p>① 群誘導・群協調の相互連携に構造力学の外力内力モデル・接触モデルを適用し、仮想230機・実機20機のスウォーム飛行を実現した。</p> <p>② 実環境適応は、応答遅延対応アルゴリズムを考案し特許出願した。2次元シミュレータで機能することを確認した。</p> <p>③ 群協調DQN適用は仮想環境で機能した。一方で実環境での運用に改善の余地があることが分かった。</p> <p>④ 群誘導CNNは運用領域にゴールが一つある形態で実施した。CNNで生成した圧力場から流れ場を生成し、実環境でテストを行った。</p>
2	<p>仮想環境(シミュレータ)での試験研究</p> <p>① 群誘導及び群協調の要素技術をシミュレータに実装し、仮想環境および実環境において250機のUAVの運用が出来るコンピューティング環境の構築を行う。また、実環境での部分実機試験において20機のUAVのデジタルツイン制御ができる環境の構築を行う。</p> <p>② シミュレータを用いた試験を実施し、群協調アルゴリズムおよび群誘導アルゴリズムについて、仮想データを用い、数値解析遅延、実機応答遅れ、位置情報共有遅延などの影響を検証し、実環境適応技術にフィードバックする。</p>	<p>① 群誘導・群協調アルゴリズムを仮想環境に実装を行った。また、仮想250機のうち20機を実機としたスウォーム飛行できる環境を構築した。</p> <p>② 上記①について仮想230機と実機20機のスウォーム飛行試験を実施し、データを取得した。</p>
3	<p>実環境における部分実機試験</p> <p>① 本研究に適したUAVの調査を行い、機種を選定し、実機での性能確認を行う。実環境での部分実機試験の環境整備のため、通信機器および測位機器について調査を行い機種を選定し調達する。なお、UAVの機種選定には、通信機器及び測位機器の性能を考慮して行う。</p> <p>② 実環境での部分実機試験では、取得したデータについて仮想環境データとの差異について分析を行い、差異の要因を明らかにするとともに、群知能アルゴリズム、最適化・機械学習プロセス、シミュレータへ成果のフィードバックを行う。</p>	<p>① UAVはBitcraze社 CrazyFlie、測位システムはOptiTrackを調達し実環境を構築し、性能確認のスウォーム飛行テストを行った。</p> <p>② 実環境と仮想環境のデータを分析し、差異が微小であることを確認した。仮想環境での群制御計算に実環境データを用い、スウォーム飛行を行うことが出来た。</p>
4	<p>プロジェクトの総合的推進</p> <p>各要素課題に関する研究の進捗を管理し、要素技術間の統合、及び仮想環境と実環境との間の統合を円滑に進める。</p>	<p>本研究はCOVID-19の影響を受け、実環境の構築は一部計画を変更した。初年度に調査・選定した機体はその影響で調達できないことが分かった。このため再選定、変更届の手続きを行い、半年遅れで2年目を開始した。</p>

表 2.2.3-2 フェーズ毎の実施内容と達成目標

フェーズ	内容	達成度
1年目	要素技術と相互連携の研究 (ア) 仮想環境 (作業配分90%) ① 群知能アルゴリズムの要素研究 ② 相互連携アーキテクチャ検討 ③ 実環境適用の機械学習アーキテクチャ検討 ④ 大規模コンピューティング環境検討 (イ) 実環境 (作業配分10%) ⑤ デジタルツイン環境の構築 ⑥ 実験用 UAV の調査・調達・試験飛行 ⑦ 通信機材、測位機材の調査	計画通り実施した。 計画では予定していなかった予備飛行試験(図2.2-3)を追加で実施することができた。
2年目	シミュレータによる検証 (ア) 仮想環境 (作業配分70%) ① 要素技術の統合 ② 数機～20機レベルのスウォーム飛行で検証 ③ 機械学習、実環境適応の検証 ④ 大規模マルチエージェント制御対応 ⑤ UAV250機スウォーム飛行 (イ) 実環境 (作業配分30%) ① 実環境における予備試験 ② UAV単機の地上試験・飛行試験 ③ デジタルツイン10機スウォーム飛行 (仮想環境の10機を実機に置換)	COVID-19の影響によりR1FYに選定したUAVが調達できなくなった。このため機種の変更と変更届を行った。このため半年スケジュールが遅れた。試験研究は、必達目標に必要な内容を実施することができた。
3年目	実機による検証 (ア) 仮想環境 (作業配分20%) ① デジタルツインシステムへの実環境試験結果の反映 (イ) 実環境 (作業配分80%) ① 大規模マルチエージェント制御対応：仮想環境の250機のうち20機を実機に置き換えてデジタルツイン制御を実施	試験研究は、必達目標に必要な内容を実施することができた。

2.2.4. 達成度の水準

本研究の成果の水準は、群制御の規模と複雑さ(機数・集団数・複数経路交差)において、日本にて同時期に実施されていた同様の群制御の事例と比べ、上回る成果を得ることができたといえる。

比較対象の事例として、NICT 情報通信研究機構は、2022年4月11日のプレスリリース「世界初、ドローン同士の直接通信で自動追従群飛行と自律接近回避に成功」にて、4機編成1個集団でスウォーム飛行(群飛行)の実証事例を発表した。

本研究では、同水準のスウォーム飛行をR1FYに予備試験として9機編成1個集団でのスウォーム飛行を実施し、更にR3FYには集団の規模を5個集団(1集団2-5機編成)まで増やし各集団の合流・分流のスウォーム飛行、及び5個集団全体の誘導スウォーム飛行を実施した。また、250機の仮想空間のスウォーム飛行のうち、20機を実機と連携して飛行することができた。

なお、NICTの事例では、無人機の通信技術について優れた研究開発がなされている。これらの技術を参照しながら、スウォーム飛行の技術発展に取り組んでいきたい。

3. 業務委託における研究の方法及び成果

業務計画書の「3.2 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題」に記載の要素課題又は「3.3 要素課題に対する実施項目及び体制」に記載の実施項目について、研究開始から終了までの全期間を通じた研究の方法及び成果を以下に示す。

3.1. 成果概要

3.1.1. 物理学ベース群知能アルゴリズムの研究開発

群協調アルゴリズムについて、研究1年目はUAV2機を想定した2質点系についてQ学習・DQNの検討及び評価を行い、群協調AIモデルの基礎研究を行った。研究2年目は、3機以上のUAV集団についてDQNの検討及び評価を実施し、複数機に対する群協調AIモデルの性能を明らかにした。また、仮想環境へのアルゴリズム実装の研究として、関数化（モジュール化）の検討を行った。研究3年目は、群協調AIモデルを実装し、仮想環境および実環境において制御特性を確認した。

群誘導アルゴリズムについて、研究1年目は、単純形状(矩形)ゴールへの群誘導について、「CNN (Convolutional Neural Networks)」の教師有り学習（パターン認識）技術及び、画像生成アルゴリズム pix2pix による画像生成技術を用い、未学習の位置に対して、誘導場コンターの生成を試みた。その結果、単純形状については、誘導場コンターの生成を行うことができた。研究2年目は、複雑形状ゴールへの群誘導について、研究初年度に引き続き CNN と pix2pix を用い、未学習の位置及び形状に対する誘導場の生成を試み、実用化への課題を明らかにした。研究3年目は、複雑形状ゴールへの誘導場の生成方法について検討を行い、仮想環境へ実装し、実環境で試験を行った。

3.1.2. 仮想環境（シミュレータ）での試験研究

研究1年目は、コンピューティング環境技術の調査・評価として、10機水準のスウォーム計算を250機に規模を拡大するために必要なコンピューティング環境技術について調査を行った。

研究2年目は、群誘導・群協調・実環境適応技術などの要素技術を検討し、250機のスウォームは、250機を複数の集団(親機1機と子機複数機で構成)に分けて制御する複数集団の群制御（スウォーム・オブ・スウォーム）の手法で行うこととした。また、実環境における部分実機試験の研究も踏まえ、試験シナリオを策定した。また、スウォーム・オブ・スウォームへの対応のための群協調アルゴリズムの検討を行い、仮想環境のシミュレータで250機のスウォームを行えることを確認した。また、デジタルツイン制御のため、仮想環境シミュレータと実環境を連携し、小型UAV単機及び複数機での飛行試験、1スウォームでの飛行試験を行った。

研究3年目は、仮想環境のシミュレーション結果に基づいた移動コマンドにより実環境において実機UAVスウォーム飛行の制御を行った。本研究の試験環境では、制御コマンドと実環境データの応答遅延は微小で、スウォーム飛行は問題無く行えた。応答遅延の解決策は二つある。ひとつ目は5Gなどによる低遅延技術を利用すること。もう一つは、今回本研究の成果として考案した遅延許容デジタルツイン制御である。シミュレーションにてその有用性を確認した(4章参照)。

3.1.3. 実環境における部分実機試験

研究1年目は、デジタルツイン制御環境構築のため、測位システム技術及び通信技術の調査・検討・選定を行った。また、実験用 UAV の調査・選定を行い、飛行試験を実施して単機での機能性能を確認した。

研究2年目は、選定した測位システム及び実験用 UAV の調達を行い、研究1年目に自社機体で実機検証した粒子法ベース群協調アルゴリズムを用いてスウォーム飛行試験を行う予定であった。しかし、COVID-19 の影響により研究1年目に選定したオープンスタック型の実験用 UAV の調達が難しくなり、その影響を最小限にするため、業務委託変更承認の申請を行うこととなった。

業務委託変更承認の申請に際し、実験用 UAV 及び屋内測位システムの再調査を行い、試験シナリオの検討を行った。その結果、Bitcraze 社の小型ドローン Crazyflie と光学式測位システム OptiTrack により高い位置精度で群制御ができることを確認できたため、業務委託変更承認の申請を行い、承認を受けた。

実験用 UAV は Bitcraze 社の Crazyflie を 22機調達し、電波法第38条の6第1項の規定に基づく技術基準適合証明書(通称：技適)を一般財団法人テレコムエンジニアリングセンター(略称：TELEC)から取得した。屋内測位システムは、光学式測位システムの OptiTrack モーションキャプチャシステムを選定し、試験環境確認に必要な飛行エリアをカバーする最小構成のカメラ及び備品を調達した。

調達した測位システムの性能確認試験を沼田試験場で行い、測位範囲および機体個体識別の性能について、試験シナリオの実現に必要な性能を有することを確認した。また、初年度において検討した群協調アルゴリズムを用いて、スウォーム試験飛行を実施して、デジタルツイン制御環境の機能性能を確認した。

研究3年目は、測位システム構成品(カメラ及び備品)の残りを追加で調達し、試験シナリオに従った実機スウォーム飛行試験により群知能アルゴリズムの検証を行った。試験は、試験シナリオ A と試験シナリオ B の2つに分けて行った。試験シナリオ A は、複数集団による2重ループの周回飛行である。実機 20機を複数の集団に分けて、スウォーム・オブ・スウォームによる合流・分離について試験を実施し評価した。また、試験シナリオ A を拡張し3重ループとし、仮想環境シミュレータで制御された250機のうち20機を実機に置換して、大規模制御に対応できることを確認した。試験シナリオ B では、矩形の運用エリアの中に流れ場誘導外力を生成し、域内の UAV 全体をゴールに向けて移動できることを確認した。

3.2. 物理学ベース群知能とスウォーム飛行力学モデル

将来、無人航空機(UAV)のスウォームは、各 UAV が自己判断で自律的に行動し、さらに群れの仲間同士で連携を行いながら共通の目的を持って任務を行う。UAV 自身は、人工知能 (AI) とセンサー、群れの仲間との通信ネットワーク能力を有し、群れ全体で得た情報を統括し、目標付近の仲間に攻撃を指示し、遠くの仲間を呼び集め、群れ全体が一つの生き物のように考えながら行動するシステムとなる。

このスウォームを安全に運用するためには、各 UAV をある目的地に誘導しながら、近傍の仲間と衝突しないように協調する必要がある。

そこで、我々はこれを実現するために、協調と誘導を両立するように構造力学の法則を応用したスウォーム飛行力学モデルを導入し協調と誘導を両立させた。また、制御計算においては、粒子法シミュレーションを適用している。これを物理学ベース群知能と呼称している。

以下に、スウォーム(集団)の構成、協調内力・誘導外力、異種スウォーム(集団)同士の協調モデルについて解説する。

3.2.1. スウォームの構成

スウォームとは群れ・集団を意味する。本研究では、下図に示す構成を前提としている。スウォーム(集団)は、親機と複数の子機で構成される。ここで親機は目的地を持って行動する機体である。親機は実機でも仮想的な親機でも良い。子機は親機に従って行動する機体である。原則、目的地を持たないが、親機と同じ目的地を持って良い。また、流れ場による誘導においては、親機も子機も場から力を受けても良い。

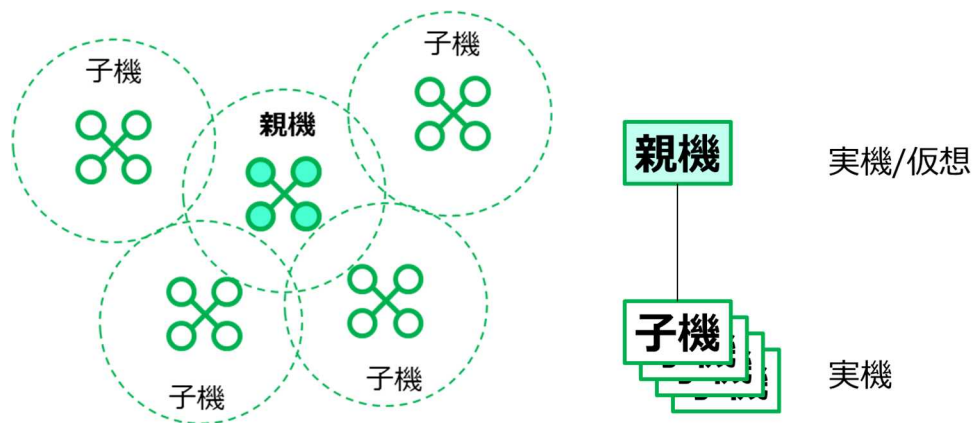


図 3.2.1-1 スウォーム (集団) の構成

3.2.2. スウォーム飛行力学モデルの定義

スウォーム飛行力学モデルとは、スウォーム(集団)を構成する個々の機体が目的地に誘導される時(移動する時)に、集団としての協調(集団としてのまとまり)を安全に保つため、誘導と協調を両立するように、機体が向かうべき方向と加速度を計算するための仮想的な力学モデルである。

協調と誘導を両立するための制御モデルの定式化に、連続体力学のうちのひとつである構造力学の法則を応用している。(制御計算においては、粒子法シミュレーションを適用している。これを物理学ベース群知能と呼称している。)

スウォーム飛行力学モデルは、個々の期待に作用する仮想的な力として、協調内力と誘導外力を用いている。協調内力は、個々の機体が衝突せず協調を保つ仮想的な力のことを言う。誘導外力は、機体が目的地に向かって移動する仮想的な力のことを言う。従来の幾何学的な規則に基づく制御(リーダーフォロワー構造、メッシュモーフィングによる集団制御)に比べて、スウォームの形状の変形に対する適応性が高い。

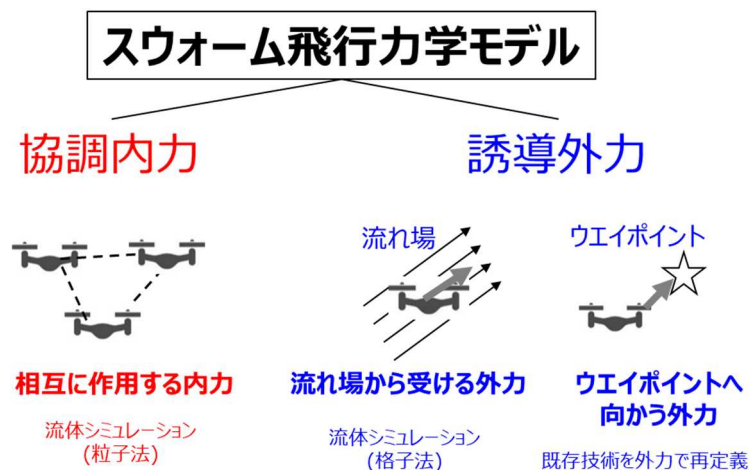


図 3.2.2-1 スウォーム(集団)の構成: 複数の機体で構成・制御単位は機体

スウォーム(集団)を構成する UAV が協調運動するとき機体に作用する力の力学モデルを下図に示す。機体に作用する力は、協調内力と誘導外力の合力となる。これが、各機体への移動コマンドのベースとなる。

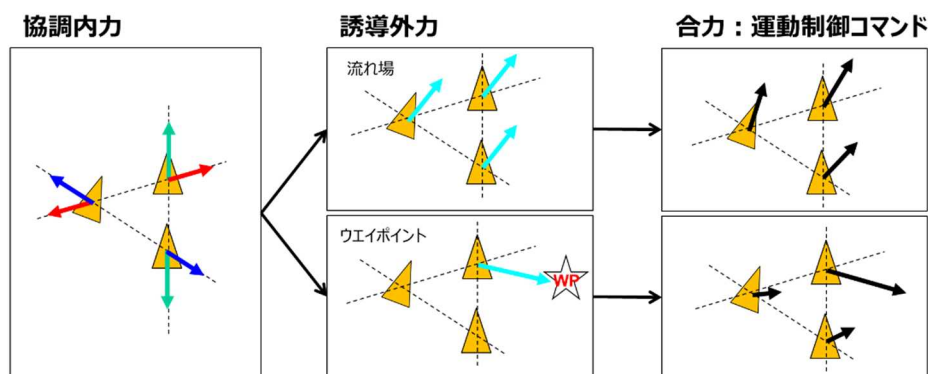


図 3.2.2-2 UAV 機体運動作用力(加速度)の力学モデル

UAV が密集し集団行動を安定的に行うため機体に作用する力は協調内力である。協調内力は UAV 間に相互作用する力で、そのベクトル和はゼロで系の中で閉じている。機体を目的地に導くために機体に作用する力は誘導外力である。個々の機体に応じて目的地が異なっても良い。そして、誘導外力と協調内力の和が機体運動作用力となり、集団として協調しつつ、個々がそれぞれの目的地に向かって運動する。このように、構造力学の作用反作用の法則を用いることで、集団の運動が調和がとれたものとなる(下図参照)。

- 各機は、誘導外力と協調内力を受ける。

$$f_{total} = f_{in} + f_{ext}$$

- 外力と内力を分けることで、力学的な機能を明らかにする。
 - 外力は慣性力と釣り合う。集団全体の運動を決定する。
 - 内力は作用反作用で総和はゼロ。集団の運動に影響は無い。

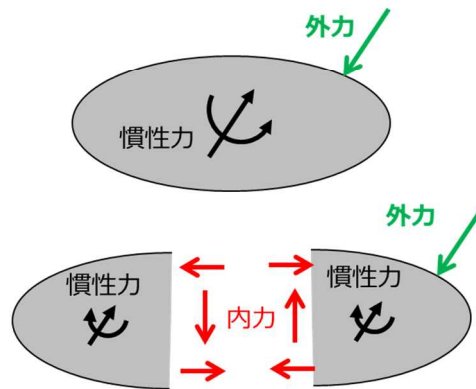


図 3.2.2-3 力学モデルによる集団としての安定性

3.2.3. 協調内力の概要

協調内力は、基本的には、スウォーム(集団)を構成する機体同士に、集団としてのまとまりを安全に保つために仮想的に作用する力である。集団を構成する子機同士は相互に協調内力が作用する。親機と子機の間では、親機は子機から協調内力を受ける場合と受けない場合を想定している。

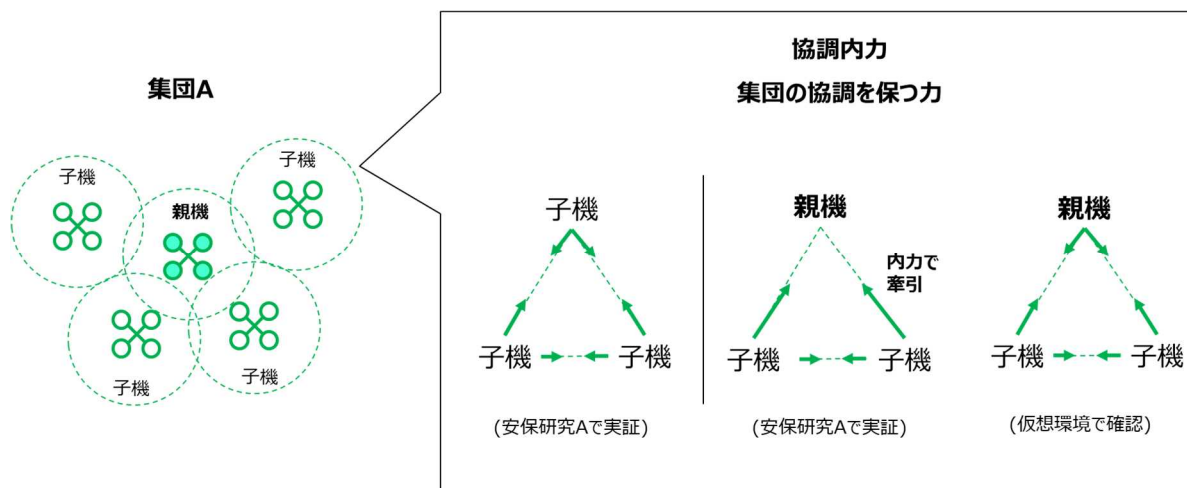


図 3.2.3-1 協調内力の概要：スウォーム(集団)を構成する機体同士の相互作用

スウォーム(集団)を構成する機体同士が、飛行時に保つ相対距離を中立距離と言う。機体同士が中立距離より近づく場合は、協調内力は相互に斥力が作用し、相対距離が中立距離より大きくなる場合は、協調内力は相互に引力が作用する。

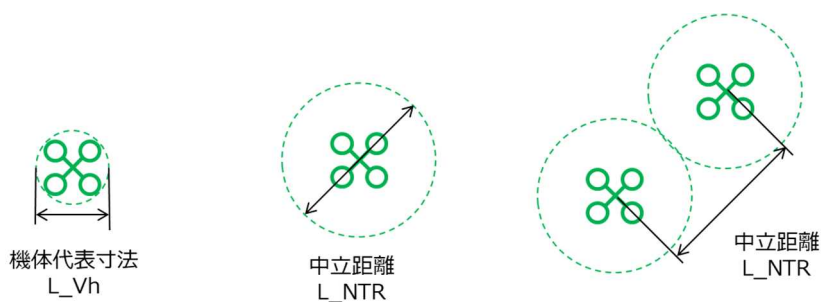


図 3.2.3-2 中立距離の定義

相対距離 r_{ij} と中立距離 L_{NTL} の関係

協調内力



図 3.2.3-3 同スウォーム(集団)に属する機体間の協調内力

また、異なるスウォーム(集団)に属する機体同士は、固体の接触モデルを適用し、中立距離より近づく場合は斥力が作用するが、中立距離より離れている場合は、引力は作用しない。

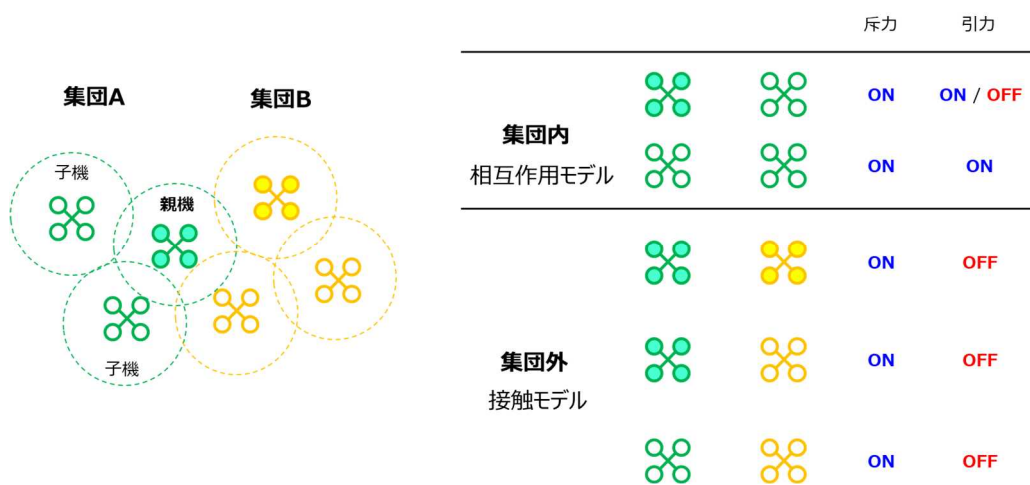


図 3.2.3-4 異種スウォーム(集団)間の協調内力の概要

相対距離 r_{ij} と中立距離 L_{NTL} の関係

協調内力

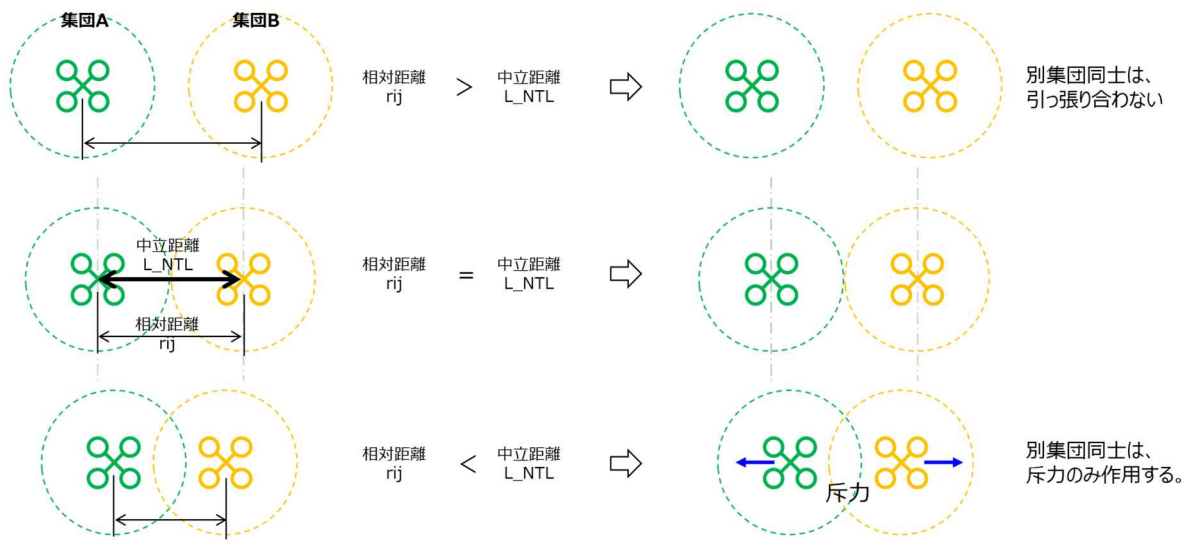


図 3.2.3-5 異なるスウォーム(集団)に属する機体間の協調内力

3.2.4. 誘導外力の概要

誘導外力は、ウェイポイント誘導外力と仮想的な流れ場による誘導外力がある。誘導外力を受ける対象となる機体は、親機のみが誘導外力を受ける場合、親機も子機も誘導外力を受ける場合を想定している。

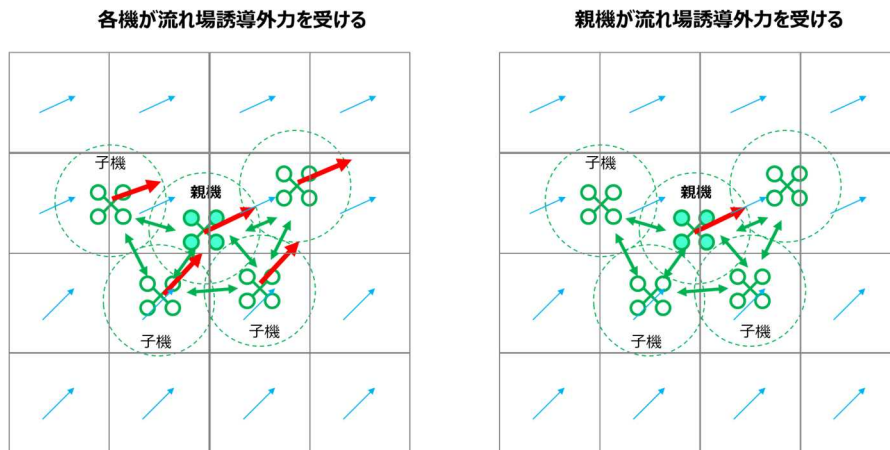


図 3.2.4-1 流れ場誘導外力(スウォームを)の形態

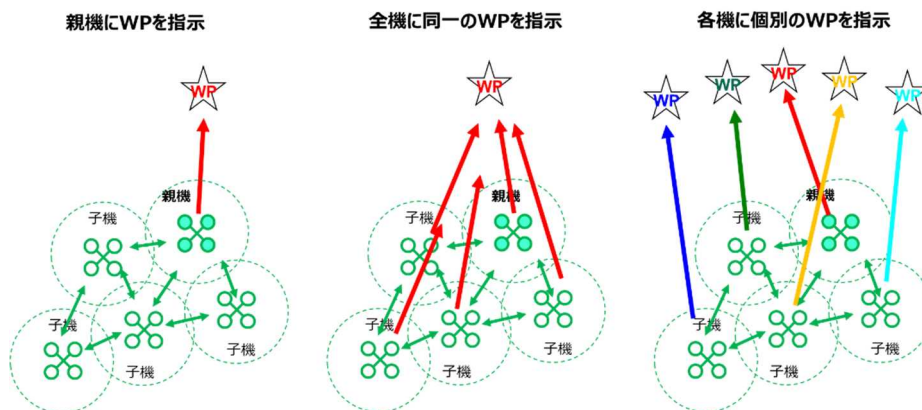


図 3.2.4-2 ウェイポイント誘導外力(WP 誘導外力)の形態





誘導外力が作用する機体	誘導外力の種類	
	ウェイポイント	流れ場
親機のみ外力が作用 (子機は親機に内力で牽引)	 ウェイポイント (安保研究Aで実証)	 (対応可能)
親機・子機に外力が作用 (親機の牽引内力併存可)	 (対応可能)	流れ場  (安保研究Aで実証)

図 3.2.4-3 ウェイポイント誘導外力(WP 誘導外力)の形態

3.2.5. スウォームの機数増加における問題と解決策

UAV250機を平面状に分布すると下図のようになる。250機の集団は一集団として扱おうと、集団を二つ、三つと複数に分けて運用する必要がある場合、一機一機に命令を出す必要がある場合、指揮命令系統が増大し、制御が複雑になる。

そこで、UAV集団の運用を効率的に行うため、250機を5~10機程度で構成される小集団に分ける。各小集団に群協調制御を行い、各小集団は融合・一体化させない。そして、各小集団の親機を誘導することで、命令を小集団単位で管理し、250機のUAVの運用をシンプルにすることができる。

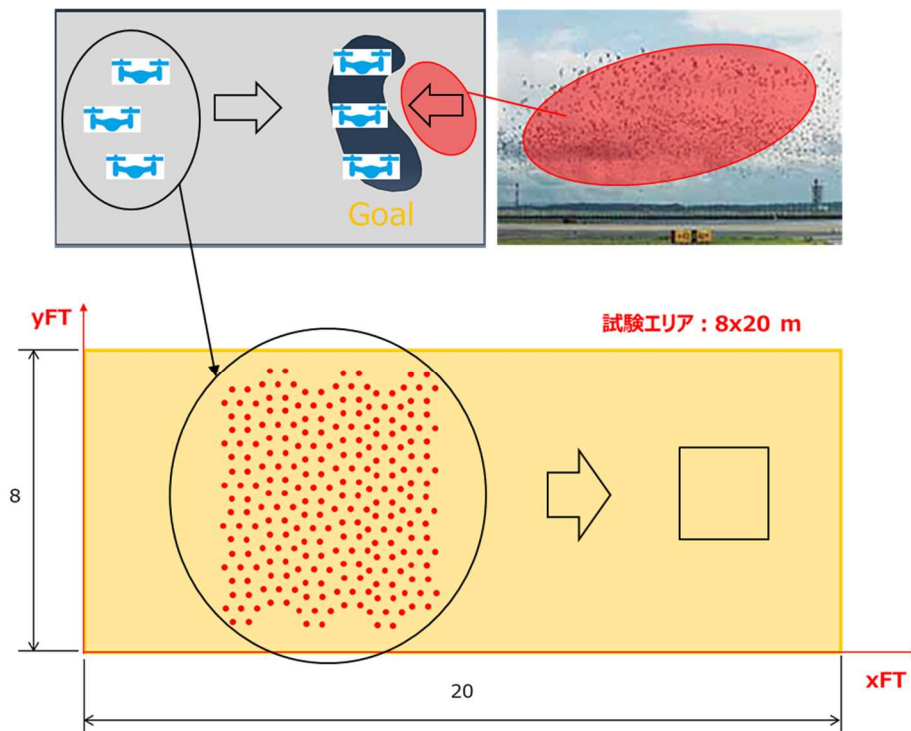


図 3.2.5-1 UAV250機の分布

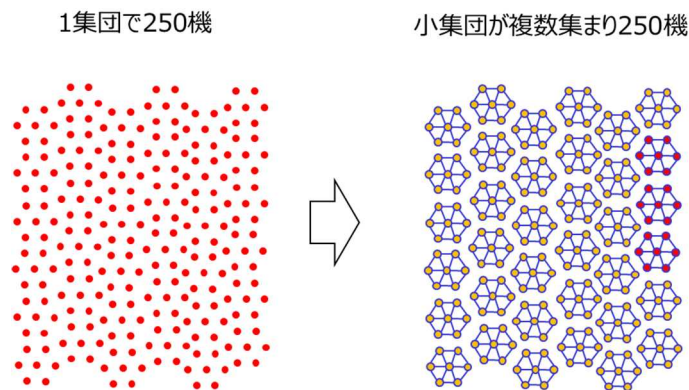


図 3.2.5-2 複数の小集団にグループ化し 250機の運用を省力化

3.2.6. 小集団の群協調モデル(Swarm of Swarm)

異なる複数集団の群制御(Swarm of Swarm)の実現には、構造力学における接触モデルを用いて行う。これにより異なる小集団同士の融合・一体化を回避することができる(下図参照)。

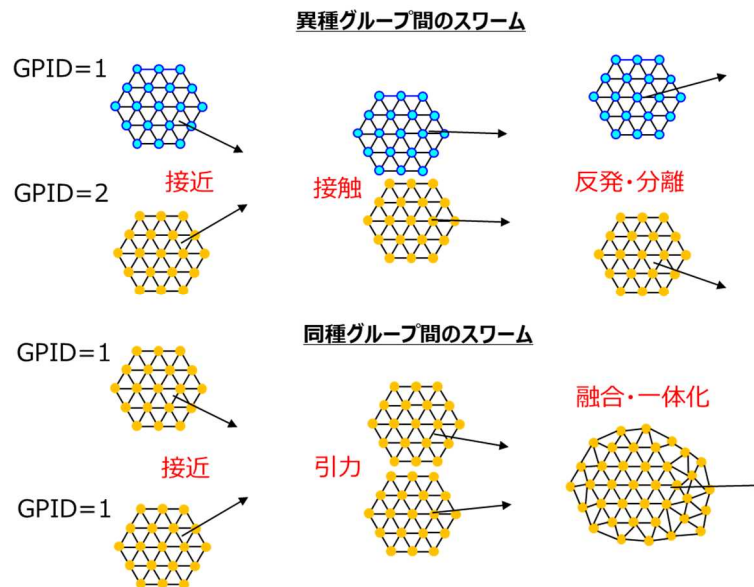


図 3.2.6-1 接触モデルによる小集団の群協調モデル (Swarm of Swarm)

接触モデルの概要を下図に示す。親機をプロポやウェイポイントなどで誘導すると、子機は所属する小集団の親機に追従する。同じ小集団に属する機体同士は、機体間距離に応じて引力と斥力が作用し、協調飛行を行う。異なる小集団に属する機体同士では斥力のみが作用する。これにより、異なる小集団の間での協調飛行が効率的に行うことができるようになる。

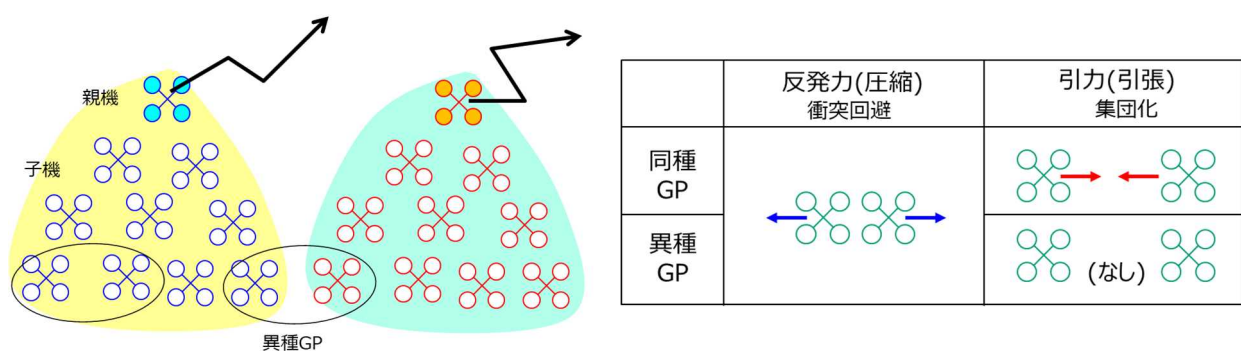
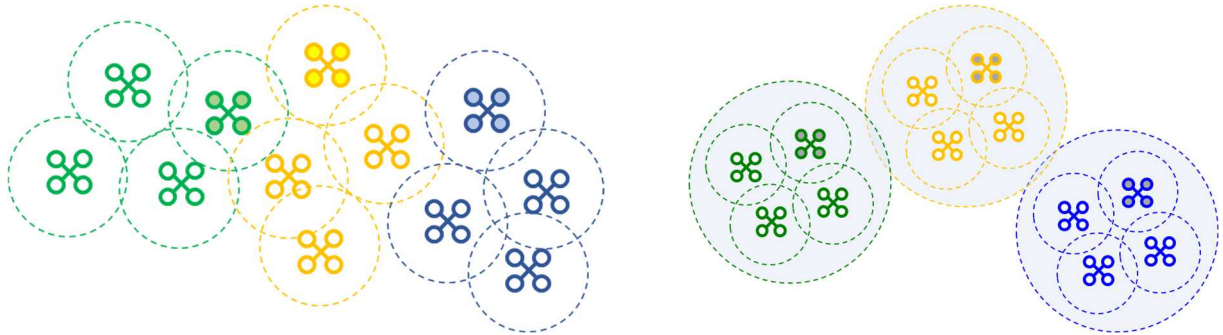


図 3.2.6-2 接触モデルによる小集団の群協調内力

これまでに述べた複数スウォームは、異なる集団に属する機体に接触モデルを適用している。複数スウォームの群制御の形態は、スウォーム(集団)間に接触モデルを適用することも可能である。なお、本研究では前者の複数スウォームの形態を採用している。



形態1：機体間接触モデル適用

形態2：スウォーム(集団)間接触モデルを適用

図 3.2.6-3 複数スウォーム(複数集団)の形態

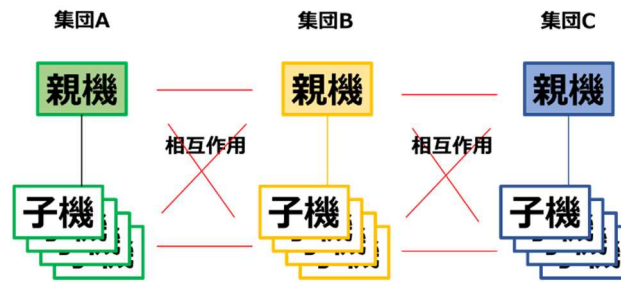


図 3.2.6-4 複数スウォーム形態1(機体間接触モデル適用)の概念図

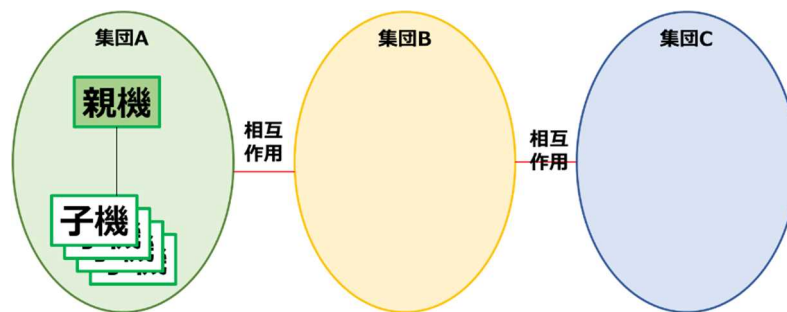


図 3.2.6-5 複数スウォーム形態2(集団間接触モデル適用)の概念図

3.3. 物理学ベース群知能アルゴリズムの研究開発

3.3.1. 群協調アルゴリズムに関する研究

群協調アルゴリズムについて、Q 学習・DQN の検討及び評価を行い、群協調 AI モデルの基礎研究を行った。3 機以上の UAV 集団について DQN の検討及び評価を実施し、複数機に対する群協調 AI モデルの性能を明らかにした。群協調 AI モデルを実装し、仮想環境および実環境において制御特性を確認した。以下に、研究内容について示す。

学習の対象とする機体規模について説明する。多数の機体からなる集団の群協調への機械学習の適用において、一般的に考えられる方法は、集団を構成する全ての機体に着目して、機械学習を適用することである。しかし、この方法では、関連する機体の全ての相対位置や相対速度などの設計パラメータを、機体の数を 2 機、3 機、4 機・・・250 機と増やししながら、網羅的に学習させる必要がある。この方法では、機械学習に終わりが見えないのが問題である。よって、群協調問題への機械学習の適用は、2 機で 1 対 1 の相互作用を機械学習で学習させ、3 機以上の集団には、学習させた行動を粒子法により足し合わせて適用することとした。



図 3.3.1-1 検討モデル

本研究で用いた機械学習の手法を示す。本研究の機械学習のアルゴリズムは Q 学習を用いた。Q 学習は強化学習アルゴリズムの 1 つである。行動価値 (Q 値) を学習するためのアルゴリズムで、ある状態における最適な行動を求める際、極めて有用な手法である。ここでは協調内力と質点速度がゼロとなるような行動を行うように学習させた。

群協調問題への適用方法として、2 質点系の相互作用モデルを考える。Q 学習では、ある時刻における状態 (位置と速度) での行動は加速・減速・等速の 3 つとし、2 質点の協調内力がゼロになるような行動を学習させる。協調内力がゼロとは、各質点で引力、または斥力がゼロを意味し、一定の距離を保持した状態が平衡状態である。本研究では Q 値を推定するために Deep Learning を用いて近似する手法である DQN (Deep Q-Network) を用いた。また Q 学習には OpenAI Gym (強化学習プラットフォーム (OpenAI))、Keras (TensorFlow (Google)) を用いた。

研究1年目では、UAV2機を想定した2質点系についてQ学習・DQNの適用研究を行った。その結果、1対1の質点同士の相対距離が中立距離から乖離がある場合、乖離を解消する方向に質点は加速し、相対距離が中立距離になめらかに漸近するように、相対速度が一定の水準に到達したら減速を始める。位置(質点間距離)の振動はほぼ無く滑らかに平衡距離へ向かっていることが分かった。一方、行動は、減速・等速・加速の3つであり、その行動の様は、相対距離が中立距離になるように前半は等価速度運動を行うが、後半は相対距離が中立距離に漸近するように、減速と加速を組み合わせながらOn・Off制御(バンバン制御)のような運動を行っていることが分かった。

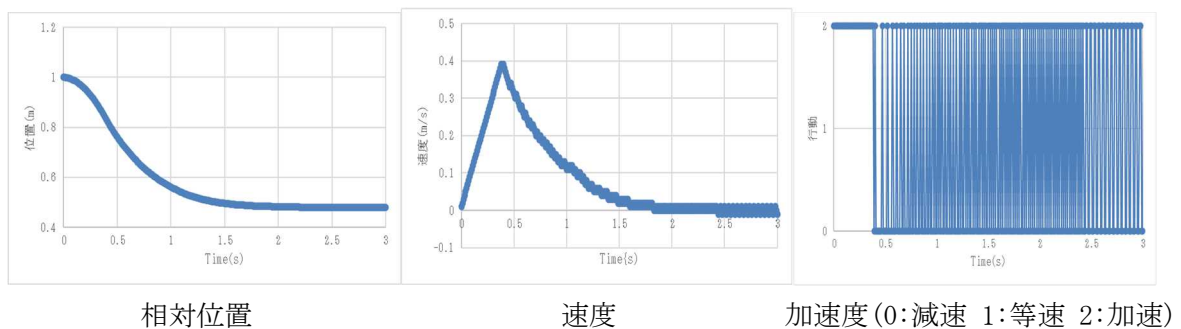


図 3.3.1-2 応答の時間履歴

研究2年目は、3機以上のUAV集団についてQ学習・DQNの適用研究を行った。はじめに、1次元空間において3機で構成される集団が直線上に配置され、直線往復運動を行う系について検討を行った。次に、2次元空間において、5機で構成される集団と7機で構成される集団の2ケースについて、直線往復運動を行う系について検討を行った。いずれの集団についても、親機1機とその他子機で構成される。親機は、外部から強制的に移動のための入力を与えている。その結果、3ケースとも親機の運動に対して、子機は周囲の機体との間隔を保持するよう速度を調整しながら運動していることが分かる。特に親機が停止する際、子機には大きな振動は見られない。各子機は親機の運動に伴い、周囲の近接している機体とそれぞれ一定の距離を保つよう加速・減速・等速の何れかの行動を選択しながら親機を追随していることが分かる。更に親機が停止する際にも大きく振動することなく平衡位置に達することができた。

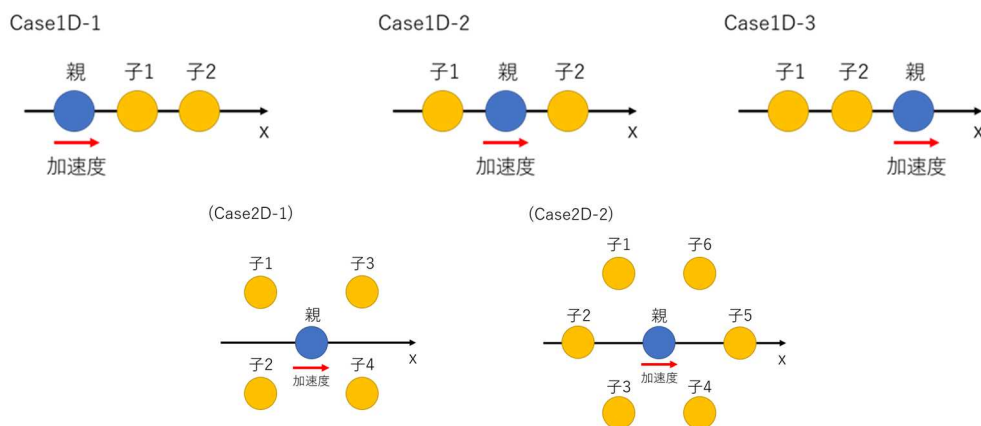


図 3.3.1-3 UAV 集団の構成 (上段：1次元空間 下段：2次元空間)

研究3年目は、DQN群協調アルゴリズムを用いて、実機テストを想定し、仮想環境及び実機環境にて検証を行った。DQN協調内力アルゴリズムの学習は、自己と相手1対1の関係で相対位置・相

対速度をインプットとして1次元の直線運動で学習させた。これを複数機1集団へ適用した結果、期待通りにスウォーム運動が行えた。しかし、集団の数を増やしたところ、5機X4集団のシミュレーションの検討で、合流部など集団が集中する場面で、スウォームの発散が生じた。DQN群協調アルゴリズムは、相対位置ベクトルと相対速度ベクトルが一致している状態で学習させている。スウォーム発散の原因は、集団の集中部では、相対位置ベクトルと相対速度ベクトルの方向が大きく異なるためと考えた。そこで、相対位置ベクトルと相対速度ベクトルを一致するようにアルゴリズムを改修した。その結果、集団の集中部でも発散しないことが確認できた。これにより、1対1の学習結果を1対複数機のスウォームに適用しても動作するプロセスを確立した。

しかし、実機環境において飛行テストを行ったところ、物理モデルに比べて、落下する頻度が大幅に増加した。その原因は、群協調アルゴリズムの協調内力(加速度)値について、DQNモデルで求めた値が、物理モデルで求めた値に比べて、大きくなっている。この要因の一つはDQNの行動に由来すると考えられる。DQNでは、行動の加速度が最大加速度か最大減速度のOn・Off制御(バンバン制御)のようになっている。これに対し、物理モデルでは運動が相対距離・相対速度に対して相関を持つようになっている。対策としては、学習により取りえる行動の選択肢を増やすなどの対策が必要と思われる。



従来版

改良版

図 3.3.1-4 DQN 群協調アルゴリズムの飛行テスト想定の検討

3.3.2. 群誘導アルゴリズムに関する研究

3.3.2.1. 先行研究と機械学習適用の背景

SPH 法の理論に基づく制御アルゴリズムにより、UAV の群れが互いの位置・速度を共有することで衝突回避と相互協調を達成する一方で、ある目的地まで誘導する機能は備わっていない。そこで、当社と名古屋大学での先行共同研究では、格子法による数値解析技術を用い、空路に流れ場を発生し、SPH 法/格子法の連成技術を利用して、ドローン群を協調的に誘導できることを確認した(図 3.3.2-1 参照)。

しかし、数値解析技術による誘導場は、一旦経路が決まると変更されない静的な誘導場であった。またその誘導場の生成には時間を要することが課題である。

そこで、本研究では、時々刻々変化する目的領域へエージェント集団を導くため、以下の技術について適用研究を行う。そして、初年度の研究では単純形状の矩形のゴールに向かう誘導場ベクトルの生成を教師有り学習(パターン認識)技術の検討及び評価を実施した。

- (1) CFD の AI 技術「CNN (Convolutional Neural Networks)」の適用
- (2) 画像生成アルゴリズムの適用

初年度(R1 年度)の研究では単純形状の矩形のゴールに向かう誘導場ベクトルの生成を教師有り学習(パターン認識)技術の検討及び評価を実施した(図 3.3.2-2 参照)。2 年目(R2 年度)の研究では、複雑形状のゴールについて、検討及び評価を実施した。これは、鳥の群れの挙動に応じて、ドローン集団を誘導し陣形を組み立てることを想定している(図 3.3.2-3 参照)。3 年目(R3 年度)の研究では、学習データを追加して、精度向上の検討を行った。

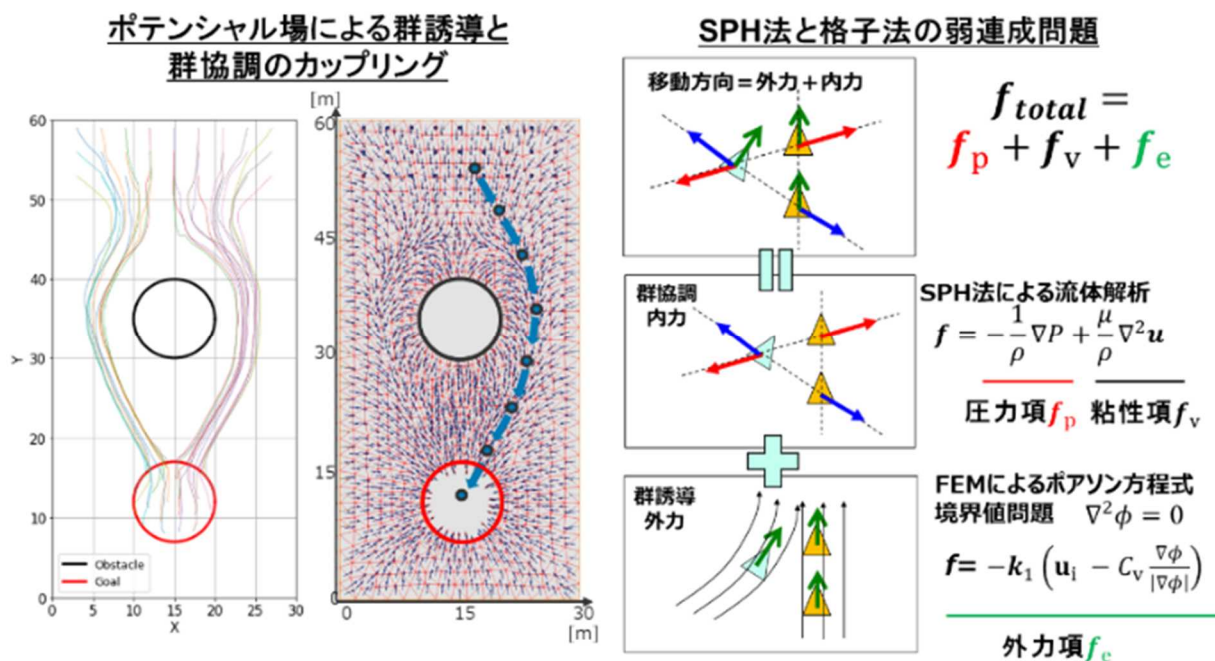


図 3.3.2-1 格子法と粒子法のカップリングによる UAV 集団の誘導と協調

(CD・名古屋大学 共同研究)

教師有り学習 (パターン認識)
 目的：ゴール形状に応じた誘導流線ベクトル場の生成

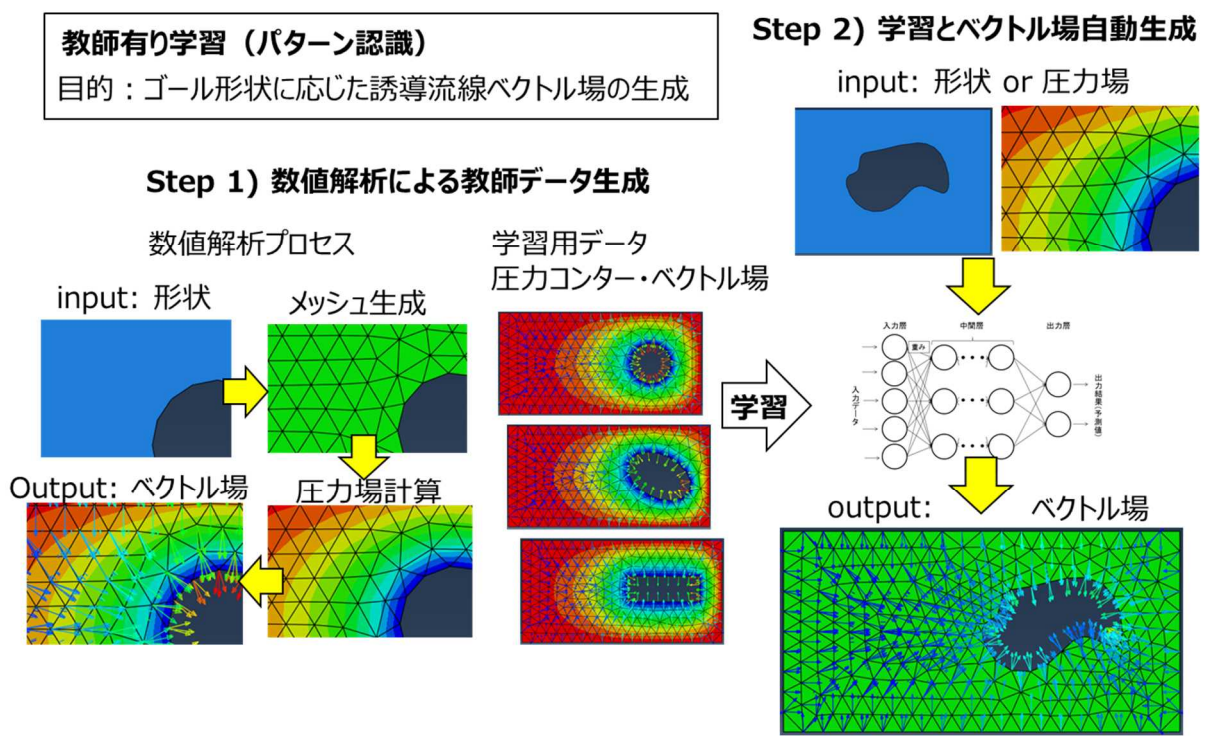


図 3.3.2-2 機械学習による誘導場生成プロセス

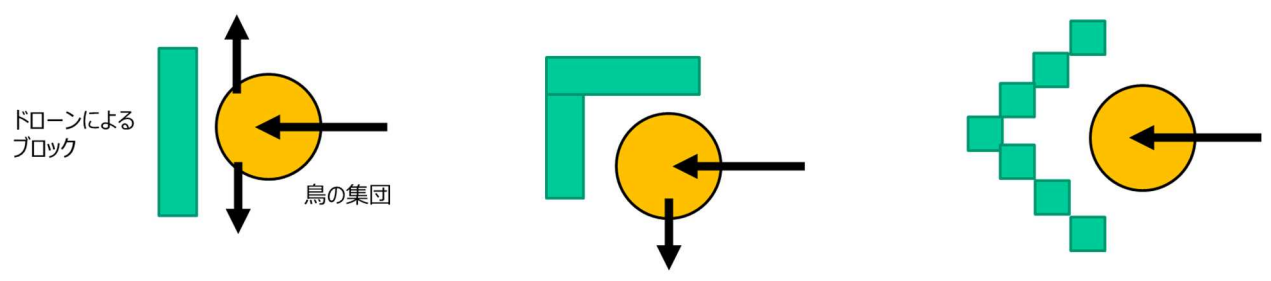


図 3.3.2-3 鳥の集団の挙動に応じた陣形への対応

3.3.2.2. 群誘導アルゴリズムの研究実施手順

群誘導アルゴリズムについて、研究1年目は、単純形状(矩形)ゴールへの群誘導について、「CNN (Convolutional Neural Networks)」の教師有り学習 (パターン認識) 技術及び、画像生成アルゴリズム pix2pix による画像生成技術を用い、未学習の位置に対して、誘導場コンターの生成を試みた。その結果、単純形状については、誘導場コンターの生成を行うことができた。昨年度研究2年目は、複雑形状ゴールへの群誘導について、前年度に引き続き CNN と pix2pix を用い、未学習の位置及び形状に対する誘導場の生成を試み、実用化への課題を明らかにした。今年度は、複雑形状ゴールへの誘導場の生成方法について検討を行い、選定した手法を仮想環境へ実装する手法の選定を行う。

群誘導の機械学習の対象とする規模について説明する。群誘導では所定のエリア内の UAV 群を任意のゴールに仮想流れ場を発生させて誘導する。理想的には、あらゆる状況に対応できるように、対象とするエリアの境界、ゴールの配置、障害物の配置など自由度が高いのが理想である。しかし、機械学習で流れ場を生成することは初めての取り組みであるため、ステップ・バイ・ステップで研究を進めていくこととした。よって、群誘導の対象エリアの大きさと形状は、本研究の実機環境に適合するように長方形とし、ゴールの数は一つとした。なお、ゴールの形状は変更できるようにしている。

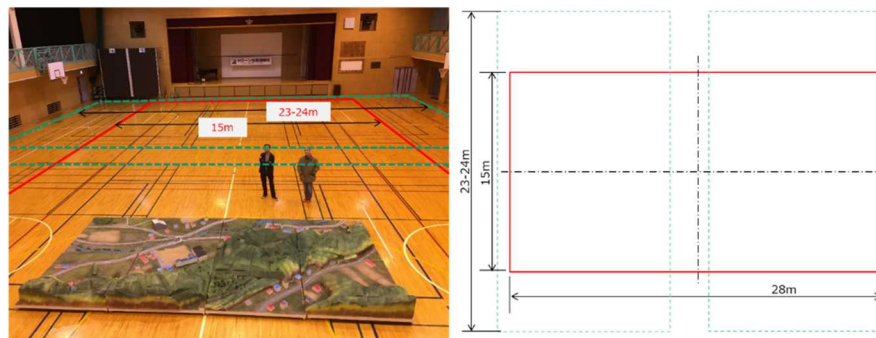


図 3.3.2-4 実機環境の飛行エリア

本研究で用いた機械学習の手法を示す。用いた手法は2種類ある。ひとつは、CFD(Computational Fluid Dynamics 数値流体力学)の解析結果をCNN(Convolutional Neural Networks)を用いて再現する手法(ここでは、AI CFD と呼称)による群誘導である。ふたつ目は、画像生成アルゴリズム pix2pix による手法である。次にそれぞれの研究内容について説明する。

3.3.2.3. AI CFD による群誘導

AI CFD による群誘導アルゴリズムの研究内容を示す。想定フィールド 28m x 16m を、1m 四方の要素で分割したフィールドとした。

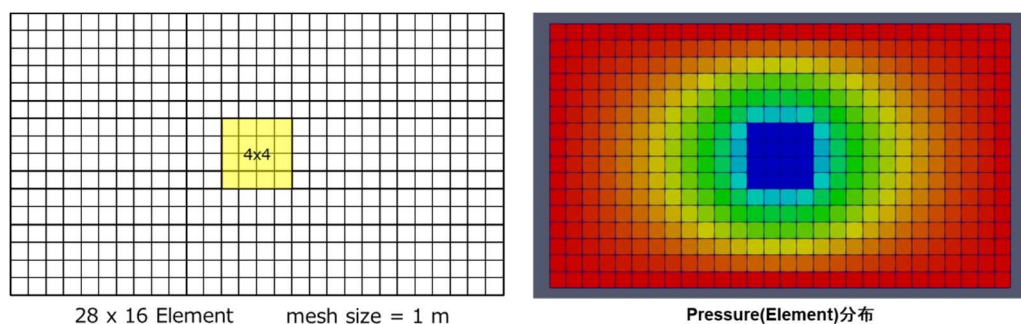


図 3.3.2-5 対象エリアと圧力場

群誘導問題への AI CFD の適用方法は、誘導先のゴールが1か所であることから、学習データ数を極力少なくする方針とした。そして、検討は段階を踏んで行うこととした。

初年度は、ゴール形状が正方形の単純形状について検討を行った。その結果、AI CFD の推定結果が、評価形状に対してコンター形状が概ね一致する結果を得た。2年目はゴール形状が複雑な形状について学習データを追加し検討を行った。この時も学習データを極力少なくする方針で臨んだ。しかし、AI CFD の推定結果は、評価形状に対して輪郭がぼやけ、ほぼ正方形に近い圧力コンター図

の推定結果しか得られなかった。そこで、3年目は、学習データを1500に増やし学習を行った。その結果、学習データの数の増加が推定精度の向上に大きく寄与していることが確認できた。特に、その学習データ数の推定精度向上への寄与度は、正方形や長方形などの単純形状ゴールに比べ、L字や鶴翼などの複雑形状ゴールに対して大きいことが示された。

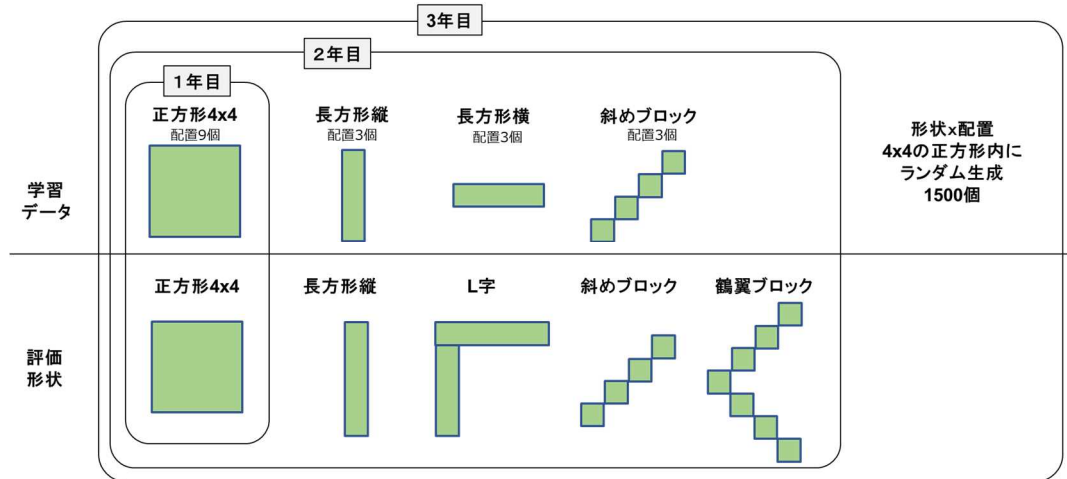


図 3.3.2-6 AI CFD の学習と評価の進め方

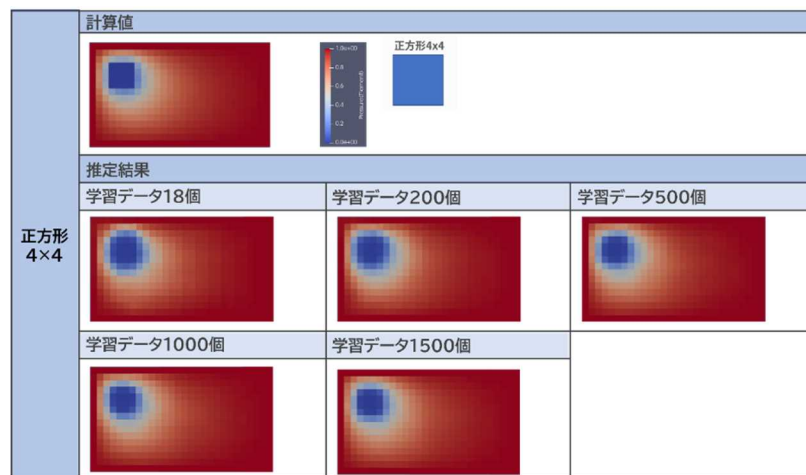


図 3.3.2-7 AI CFD の推定結果：ゴール形状が正方形の場合

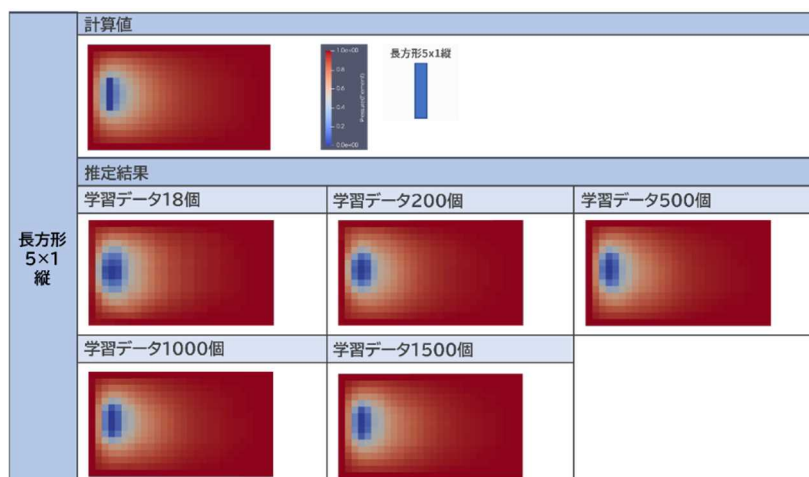


図 3.3.2-8 AI CFD の推定結果：ゴール形状が長方形の場合

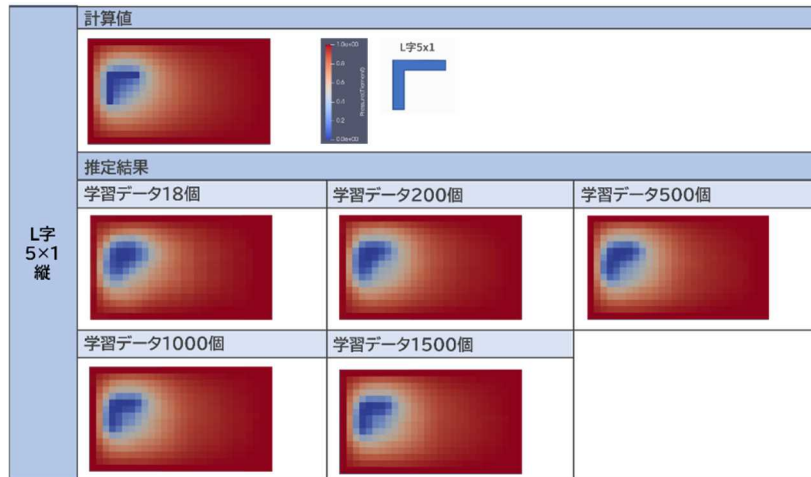


図 3.3.2-9 AI CFD の推定結果：ゴール形状がL字の場合

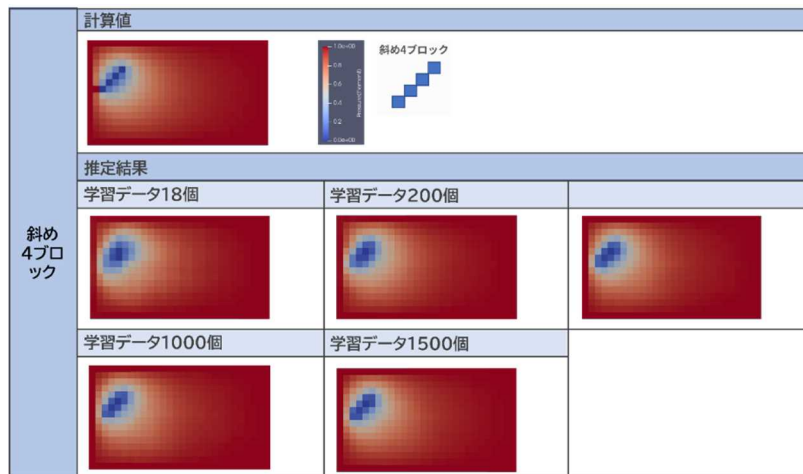


図 3.3.2-10 AI CFD の推定結果：ゴール形状が斜めの場合

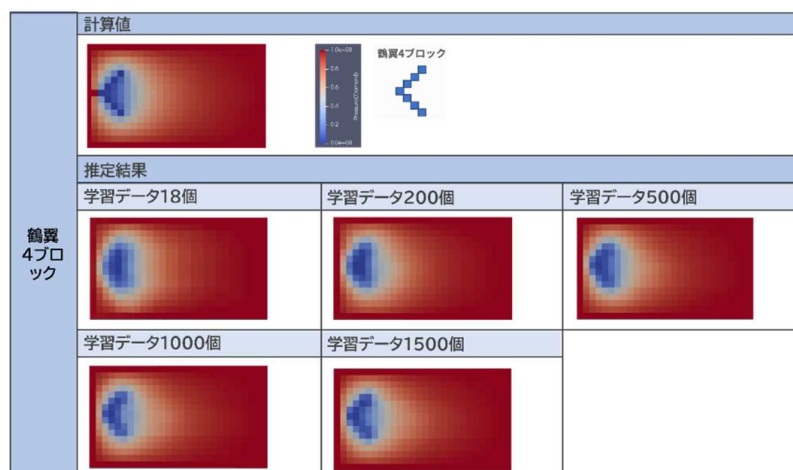


図 3.3.2-11 AI CFD の推定結果：ゴール形状が鶴翼の場合

3.3.2.4. 画像生成アルゴリズムによる群誘導

群誘導流れ場の圧力コンターの生成に、画像生成アルゴリズムを用いる検討を行った。用いた画像生成アルゴリズムは、機械学習の一種である pix2pix である。pix2pix は、カルフォルニア大学

バークレー校で開発された AI 教育用の画像生成アルゴリズムである。このアルゴリズムは 2 つのペア画像から関係性を学習し、未学習の画像に対してその関係性を考慮した補間を行い、ペア画像を生成する。そして画像を生成する AI (Generator) とその画像が Generator によって生成された画像 (偽画像) かどうかを判断する AI (Discriminator) の 2 つの AI を競合させた敵対的生成学習を行う。これにより、白黒画像からカラー画像を生成することや、航空画像から地図画像を生成することなどが可能である。

このような画像生成手法を用い、CFD 計算から出力される誘導場 (圧力分布) を学習させ、未学習の形状 (ここでは目的地の位置や形状) に対する誘導場の生成を試みた。なお、pix2pix の学習と評価は TensorFlow (Google 社) を用いた。pix2pix を用いた研究成果として、Phillip Isola, et al. Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks, 2016 が挙げられる。本研究の参考とした。

はじめに、教師データを用いた敵対的生成学習を行った。教師データ用の画像を図 3.3.2-12 に示す。教師データは 6 つとし、各画像において画像左が誘導場 (圧力場)、画像右が目的地の位置 (灰色) を示している。TensorFlow による学習において epoch 数 (学習回数) は 100 とした。

次に、未学習形状における誘導場の生成を行った。3 つの未学習形状に対する CFD 結果と AI 出力結果の比較を図 3.3.2-13 に示す。AI が出力した結果は高い精度で特徴を捉えており、本研究で用いるには十分な精度であると考えられる。

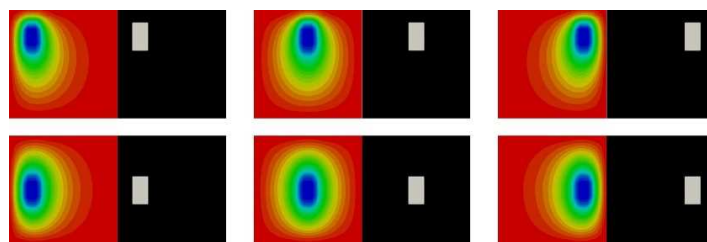


図 3.3.2-12 教師データ画像

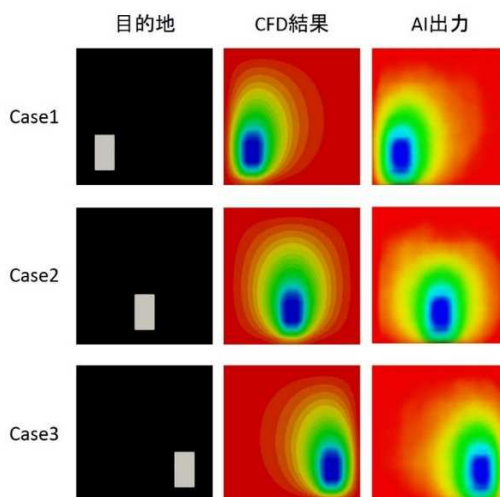


図 3.3.2-13 CFD 結果と AI 出力結果との比較

そして、未学習である AI CFD で実施した複雑形状ゴールについて検討を行った。その結果を、図 3.3.2-14～図 3.3.2-18 に示す。本研究で用いる誘導場としては、十分使える精度であると考えら

れる。僅か6つの教師データを学習しただけで、これほど高精度な結果を出力する pix2pix は、極めて有効な手段の1つであると考えられる。

なお、本結果を用いるには、画像生成アルゴリズムの座標系から、飛行試験座標系へ変換する必要がある。また、AIが出力した画像データ(png)を基に各ピクセルでRGB値を取得し、得られたRGB値を用いて輝度値を算出し、輝度値を用いて差分法により勾配ベクトルを求める必要がある。

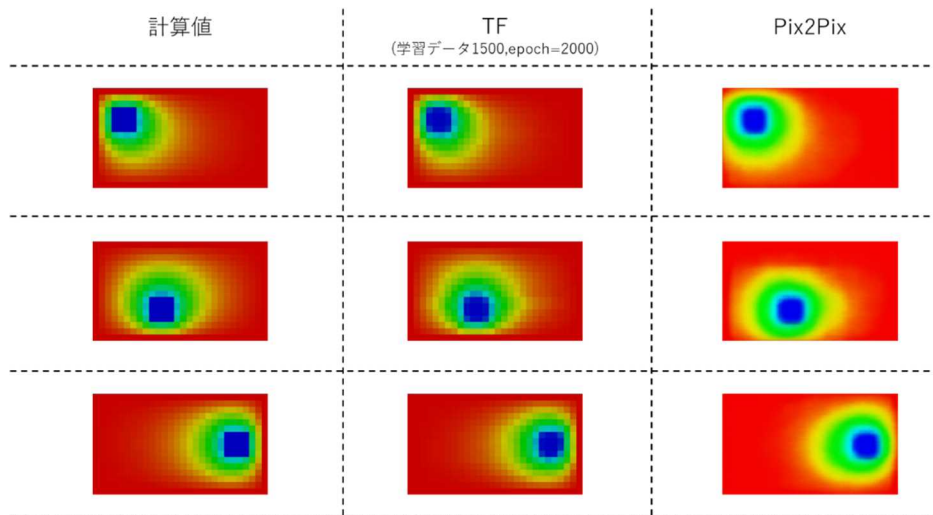


図 3.3.2-14 AICFD(TF)と画像生成アルゴリズム(Pix2Pix)の比較：正方形

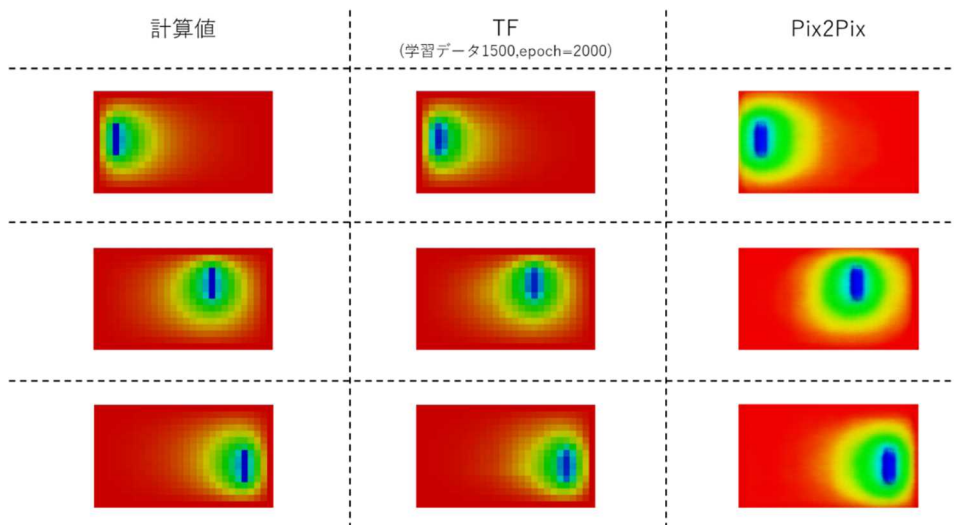


図 3.3.2-15 AICFD(TF)と画像生成アルゴリズム(Pix2Pix)の比較：長方形

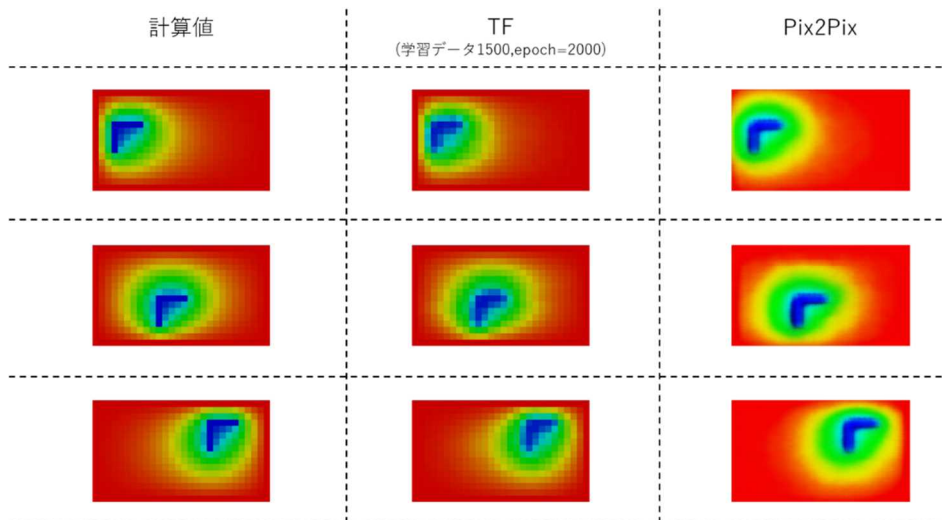


図 3.3.2-16 AICFD(TF)と画像生成アルゴリズム(Pix2Pix)の比較:L字

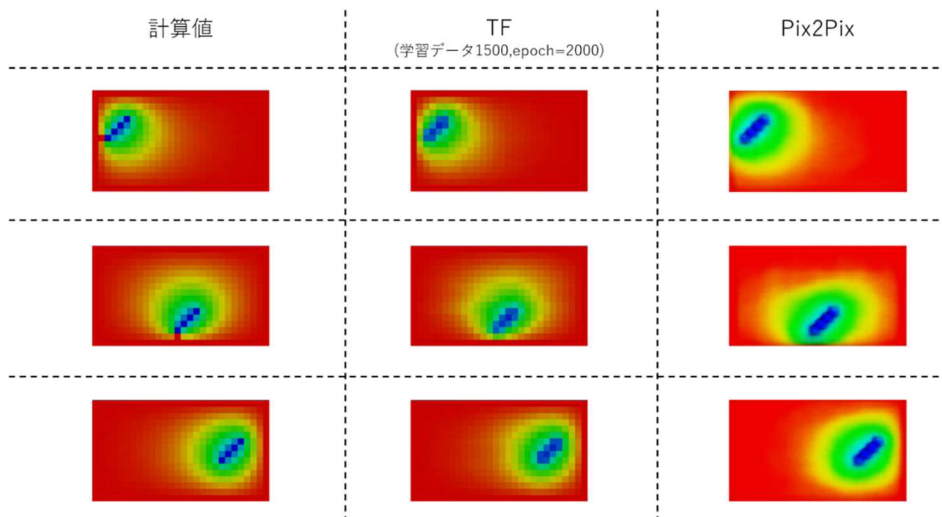


図 3.3.2-17 AICFD(TF)と画像生成アルゴリズム(Pix2Pix)の比較:斜め

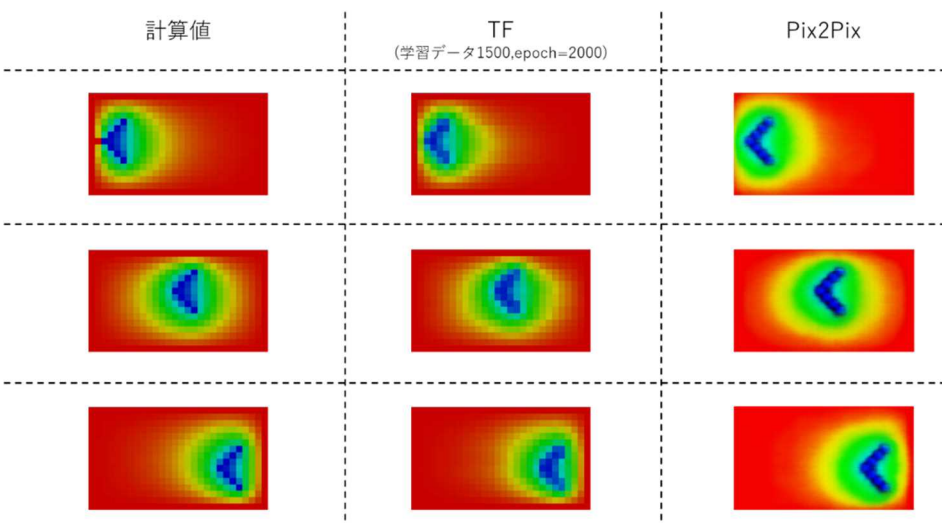


図 3.3.2-18 AICFD(TF)と画像生成アルゴリズム(Pix2Pix)の比較:鶴翼

3.4. 試験シナリオの検討

3.4.1. 研究目標とユースケース

250機の大集団の群制御に必要な要素技術の獲得は、試験シナリオは、研究目標(表 3.4.1-1 参照)とユースケース(図 3.4.1-1~図 3.4.1-3 参照)を踏まえて、検討を行う。

表 3.4.1-1 研究目標

<p>(a) スウォーム性能：大規模マルチエージェント対応</p> <p>仮想環境及び実環境において、以下に示す機数を制御できること。</p> <p>(ア) 仮想環境(シミュレータ)試験：250機(*1)</p> <p>(イ) 実環境での部分実機試験：実機20機+仮想230機(*2)</p> <p>*1 米国 DARPA OFFSET プログラム 250機を参考に設定</p> <p>*2 仮想環境 250機のうち、20機を実環境に置き換えた試験を実施する。</p> <p>なお、予算の制約上20機とした。</p>
<p>(b) 状況適応性能(外部状況の変化への対応)</p> <p>UAV 集団が相手集団(鳥の群れ)に接近したときに、相手集団の変形・分裂・合流などの挙動に対応するため、以下に示すように UAV 集団を誘導できること。</p> <p>(ア) 250機で構成される一つの集団の群誘導</p> <p>(イ) 異なる二つの集団の合流・分離・すれ違いの群誘導</p>

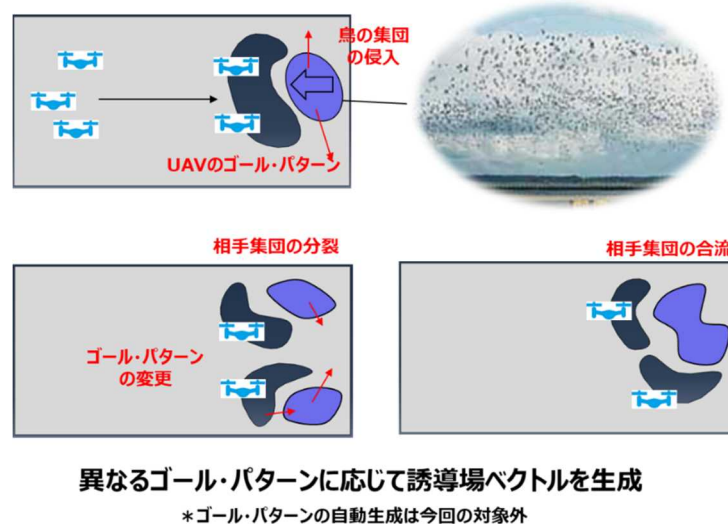


図 3.4.1-1 メインユースケース：バードストライク防止 UAV 群制御システム



図 3.4.1-2 サブユースケース：高密度 UAV 運用管制システムへの適用

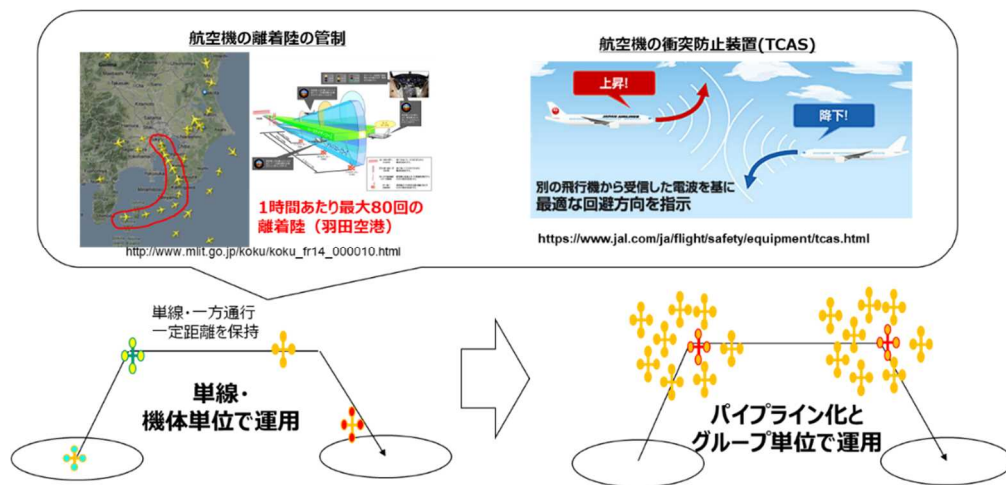


図 3.4.1-3 サブユースケース：群知能による UAV 管制の高密度化

UAVの大集団の群制御は、協調制御と誘導制御の要素技術で構成される。そこで、試験研究は、協調制御と誘導制御の技術を確認するため、図 3.4.1-4 及び表 2.1.2-1 試験研究の実施内容表 2.1.2-1 に示す手順にて実施する。

表 3.4.1-2 試験研究の実施内容

手順	タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3
想定用途	UAV 集団のワンマン運用による省人化・作業時間短縮	UAV 空路・UAV ポートの高密度運用の自律化	鳥の集団の空港バードストライク防止
形態	飛行エリア内の自由操縦 ・親機を操縦 ・子機は親機に追従	多重ループ周回 ・親機をウェイポイントで誘導 ・子機は親機に追従	飛行エリア内の流れ場誘導 ・全機を誘導場で誘導
目的	オペレータによる操縦	大規模対応	大集団運用の効率化
要素技術	複数機ワンマンオペレーション 1 個集団の群協調の確認	群協調アルゴリズム 複数集団の群協調 大規模対応 (250 機)	群協調アルゴリズム 群誘導アルゴリズム 大集団の効率的な運用

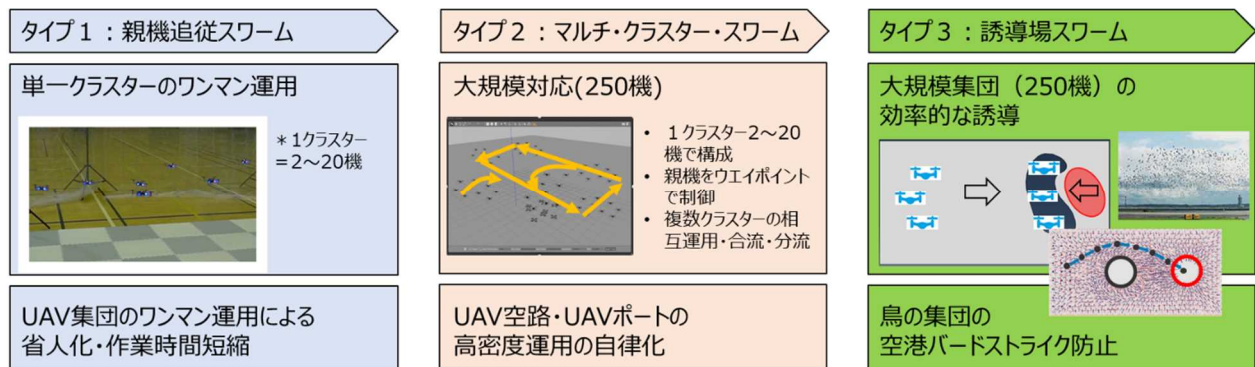


図 3.4.1-4 試験研究の実施手順

3.4.2. 小集団の群協調(Swarm of Swarm)モデルによる試験シナリオ

UAV250 機の大集団の効率的な運用は、小集団の群協調(Swarm of Swarm)の要素技術、及び多数の機体を群誘導する要素技術の試験研究が必要となる。

試験シナリオ A として、異なる 2 つ以上の小集団が合流・分離・すれ違う群協調について試験研究を行う(図 3.4.2-1 参照)。次に、ユースケースを想定した集団の運用を行うため、流れ場による群誘導の試験研究を行う(図 3.4.2-2 参照)。

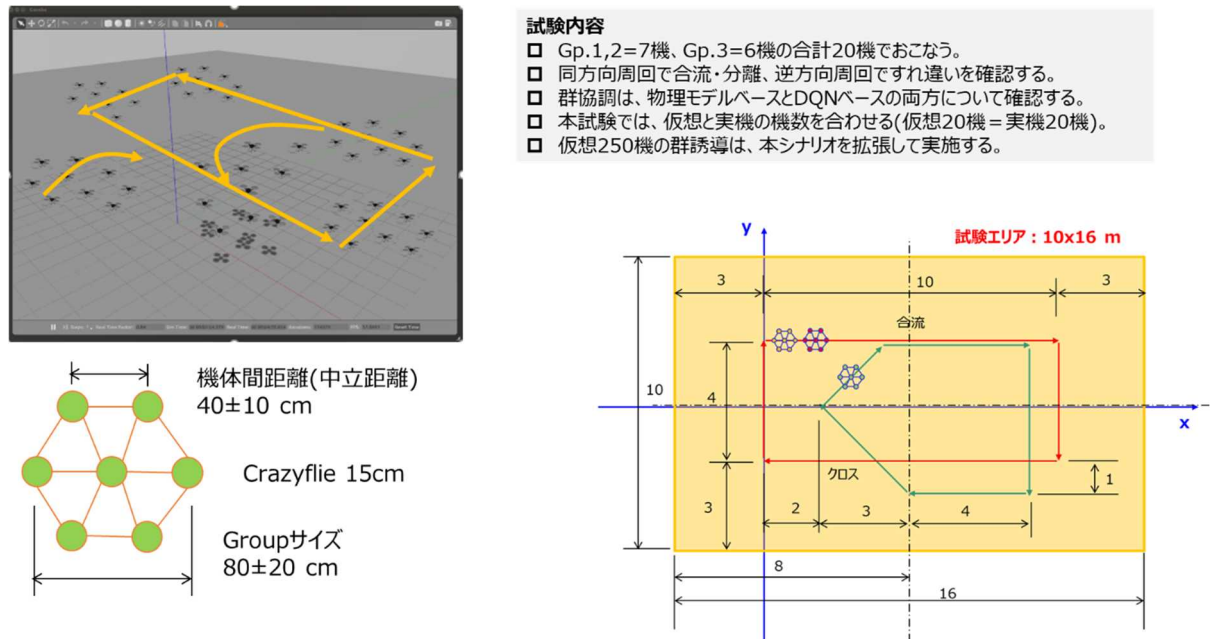


図 3.4.2-1 試験シナリオ A 小集団群協調(Swarm of Swarm)の試験形態

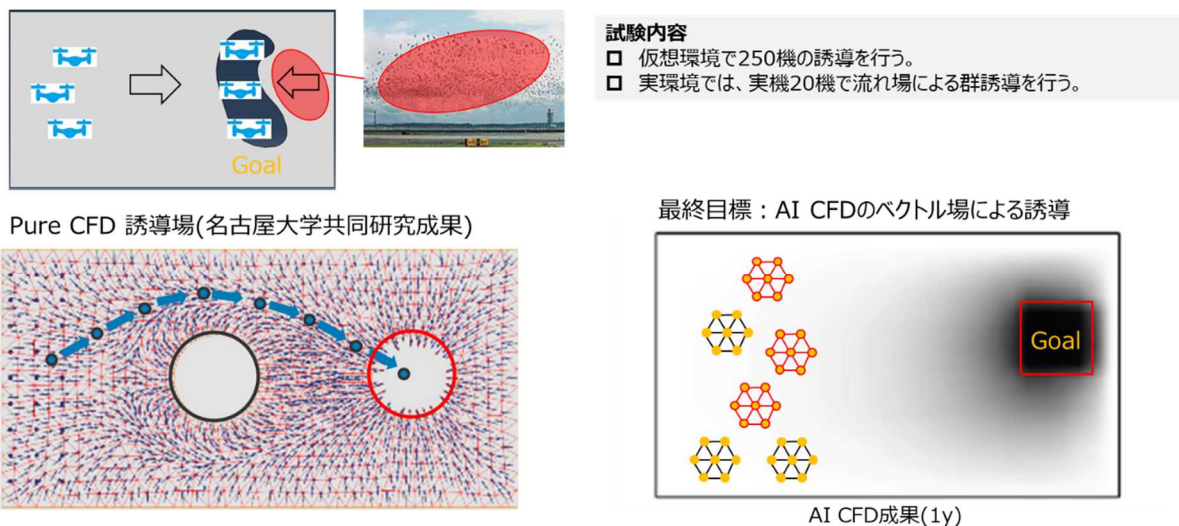


図 3.4.2-2 試験シナリオ B UAV250 機の群運用の試験形態

3.4.3. COVID-19 による試験エリアの見直し

試験エリアは、COVID-19 の影響を受けた。R1 年度で選定したオープンソース UAV の調達に、COVID-19 の影響により部品入手が困難となり、実験用機体と測位システムを見直した。この見直しにより機体を小型化したので、飛行試験エリアを縮小した。

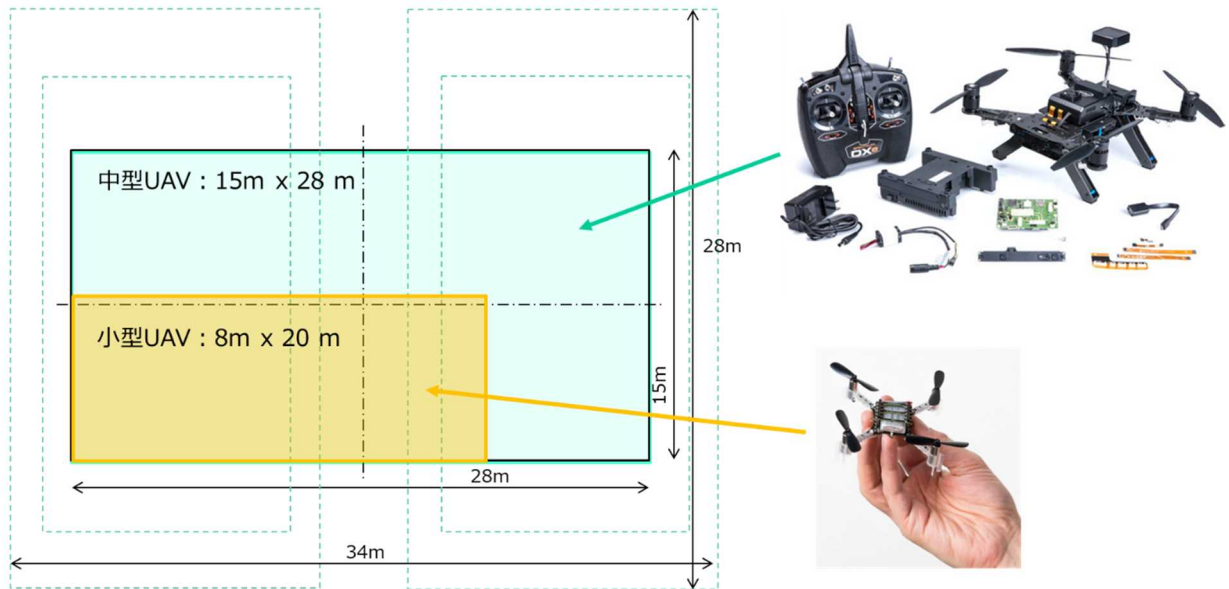


図 3.4.3-1 実験用 UAV と試験エリアの変更(機体に合わせて縮小)

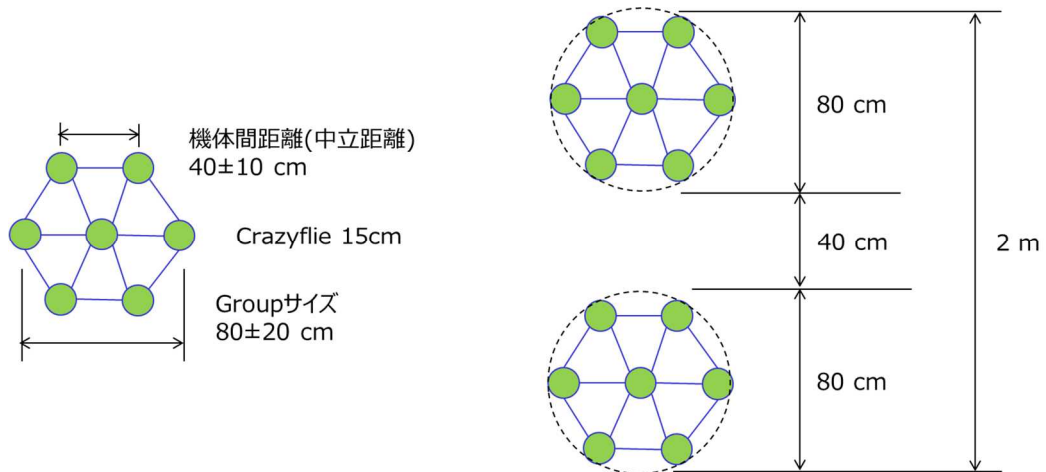


図 3.4.3-2 小型 UAV と小集団のサイズ

3.4.4. 予備飛行試験シナリオ

予備飛行試験シナリオは、R3年度に実施する試験シナリオ A/B 及び R2 年度に調達する試験機材を考慮して検討した。R2 年度の実環境試験の目的は、測位システムの現地動作確認、小型 UAV と試験環境の動作確認が主目的である。動作確認前に全ての機材を一括で R2 年度に調達するのはリスクが高い。よって、R2 年度の試験機材の調達は、動作確認に必要な試験エリアの半分のサイズに適合する数量とした。

上記を踏まえ、予備飛行試験の試験エリア及び飛行パスは図 3.4.4-1 に示す内容とした。なお、飛行試験の結果に応じて、試験エリアのサイズや飛行パス見直す。

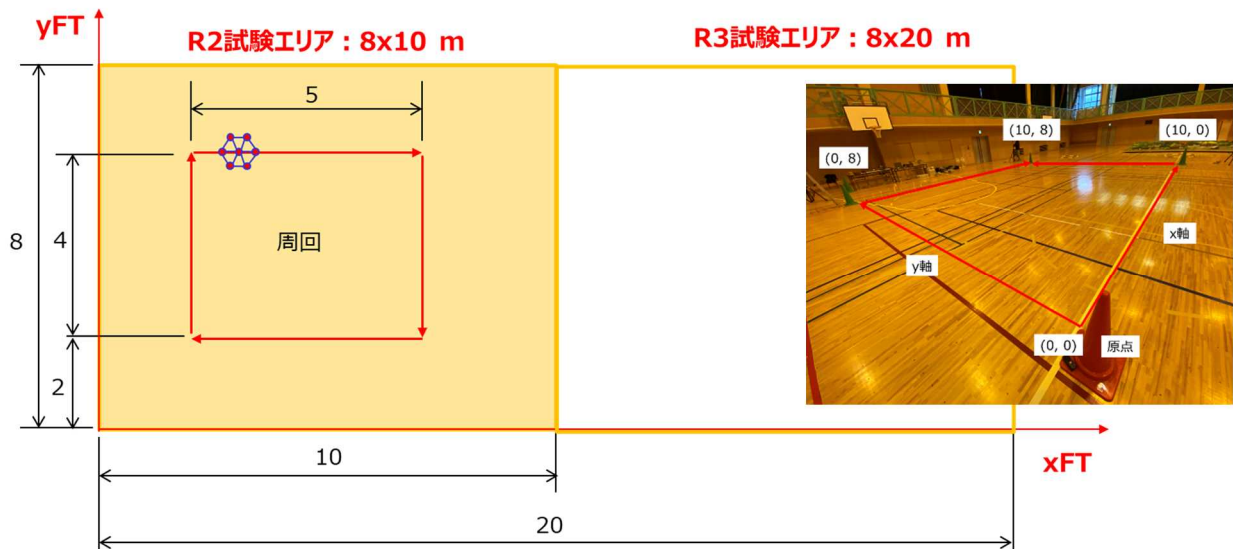


図 3.4.4-1 予備飛行試験シナリオ

3.5. 仮想環境（シミュレータ）での試験研究

3.5.1. コンピューティング環境技術の調査・評価

3.5.1.1. 調査検討

研究・技術開発の目的である250機に規模を拡大するために必要なコンピューティング環境技術について調査を行う。有望とされるエッジでの分散処理を前提とした並列化技術、クラウドコンピューティング技術について評価を実施し、基本性能を明らかにする。

メジャークラウドサービスである、アマゾン、マイクロソフト、グーグルを対象に、基本ハードウェア性能（CPU、メモリ、GPU、課金単位）、提供サービス（スケーリング等の拡張性）、提供パッケージ（IoT、ロボティクス、機械学習関連）を比較した（表 3.5.1-1 参照）。

どのプラットフォームも提供（および提供準備）しており、我々の研究プラットフォームとしては、利用可能と思われる。

モジュール間のインターフェースはROS標準プロトコルを採用している。そのため、現時点では、ROS/ROS2環境を既に提供しているAWSが一番良いと思われるが、今後もサービス提供状況をモニターし、モジュール実行の段階で、モジュールと親和性の高いインターフェース、および結果評価のやりやすさに合わせてサービスを選択する方向とする。

3.5.1.2. 実機試験を踏まえた環境の選定

大規模コンピューティング環境は、Azure、AWSのいずれにも対応可能である。一方、現状アルゴリズムや手法で必要となるコンピューティング性能は、クラウドレベルは不要で、開発用PC（intel core i7）でも対応できることが分かった。このため、開発用PCにて研究を行うこととした。

表 3.5.1-1 メジャークラウドサービスの比較

	AWS	Azure	GCP
仮想マシン	Amazon EC2	Azure Virtual Machines	Compute Engine
CPU	vCPU: 1~128 (論理プロセッサ448もあり)	vCPU: 1~128	仮想CPU: 0.2~160 (2019/4/3 early accessながら vCPU 208, 416が登場)
メモリ	0.5~12TB	0.75~27TB	0.6~11TB
GPU	EC2: P3/P2/G3, Elastic GPU	VM: NC/NCv2/ND/NV	GCE, Dataproc, GKE
課金単位	秒(最低1分)と時間単位が混在	分単位(秒切り捨て)	秒(最低1分)
オートスケール	Amazon EC2 AutoScaling	Virtual Machine Scale Sets	Autoscaling
バッチコンピューティング	AWS Batch	Azure Batch	Cloud Tasks
IoT	AWS IoT Core/Greengrass	Azure IoT Hub/Edge	Cloud IoT Core/Edge
ロボティクス	RoboMaker (ROS/ROS2)	(ROS VM on Azure)	(Cloud Robotics)
機械学習	Amazon Machine Learning	Azure Machine Learning	Machine Learning Engine

3.5.2. 試験シナリオ A 予備スウォーム飛行シミュレーション

本シミュレーションでは、小集団の群協調モデル(Swarm of Swarm)の動作確認をした。前述の小規模の群協調モデルについて、複数のウェイポイントの経路上を複数の UAV 小集団を飛行させて制御できることを確認する。

表 3.5.2-1 R2 年度シミュレータ試験・予備飛行試験における仮想物理モデル

<ul style="list-style-type: none"> ・誘導外力 <ul style="list-style-type: none"> ・親機：ウェイポイント（誘導外力はオフ） ・子機：なし（協調内力で親機から引っ張られる）
<ul style="list-style-type: none"> ・協調内力 <ul style="list-style-type: none"> ・同種グループ <ul style="list-style-type: none"> ・子機と子機：作用・反作用の法則に忠実、群れを形成する力。 ・親機と子機：作用・反作用の法則が非対称 親機が子機から受ける力*1<子機が親機から受ける力*2 *1 ゼロにする場合もあり得る。*2 子機が親機から引っ張られる。 ・異種グループ：親機・子機の区別なく、作用・反作用の法則に忠実。 但し、異種グループでは接触条件を適用する。 中立距離より近づく場合は反発力、離れる場合はゼロ

試験シナリオ A 予備シミュレーションとして、以下のケースについてシミュレーションを行った。それぞれケースについて、飛行パスとウェイポイントを下表に示す。

ケース 1：同一直線上での 2 個小集団のすれ違い

ケース 2：少しずらした経路での 2 個小集団のすれ違い

ケース 3：2つのループ経路を移動する 3 個小集団

表 3.5.2-2 飛行パスとウェイポイント

ケース	飛行パス	ウェイポイント	小集団ID
ケース 1	Pass1	(-5.0, 0.0) -> (0.0, 0.0) -> (5.0, 0.0)	Swarm1
	Pass2	(5.0, 0.0) -> (0.0, 0.0) -> (-5.0, 0.0)	Swarm2
ケース 2	Pass1	(-5.0, 0.0) -> (0.0, 0.0) -> (5.0, 0.0)	Swarm1
	Pass2	(5.0, 0.0) -> (0.0, 0.1) -> (-5.0, 0.0)	Swarm2
ケース 3	Loop1	(0.0, 0.0)->(4.0, 0.0)->(4.0, 3.0)->(0.0, 3.0)->(-4.0, 3.0)->(-4.0, 0.0)	Swarm1, 2
	Loop2	(0.0, 0.0)->(2.0, 0.0)->(4.0, -2.0)->(0.0, -2.0)->(-2.0, -2.0)	Swarm3

シミュレーションの結果を以下に示す。

ケース 1 :

単純なすれ違いでは、親機の経路が重なりスタックする(図 3.5.2-1 参照)。よって、片方の経路を少しずらして確認することとした(ケース 2)。

ケース 2 :

片方の経路を少しだけ(変更量 10cm、機体寸法 15cm)ずらすと、時間はかかるが、すれ違った(図 3.5.2-2 参照)。

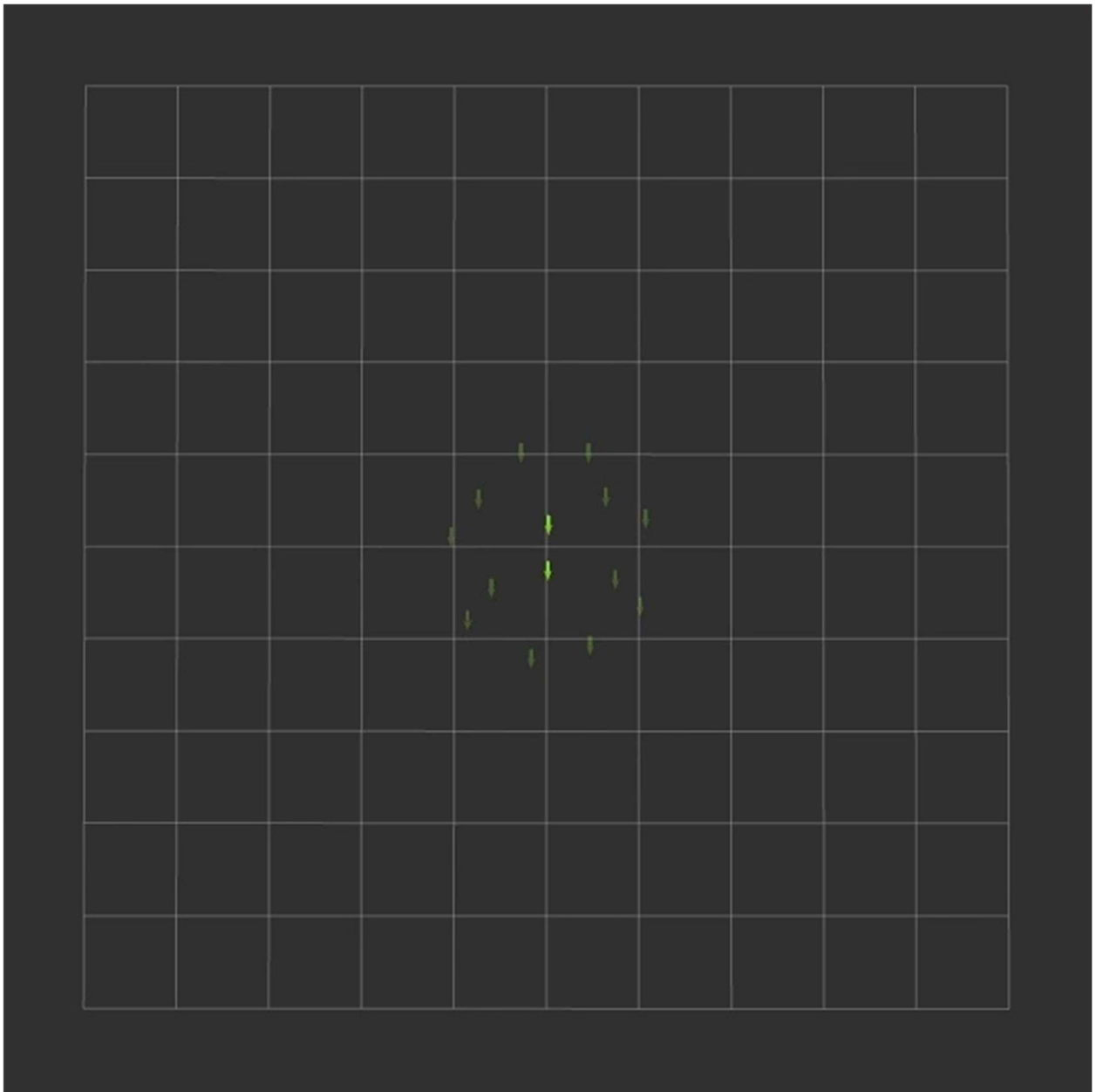
ケース 3 :

合流点をウェイポイントに持つ場合、ウェイポイントの取り合いになり、時間がかかる(図 3.5.2-3 参照)。このように同一ウェイポイントを持つ群の数が多いと、そのウェイポイントで渋滞が起これ各群のウェイポイント通過に時間がかかる。それにより、他の群にも影響が起これることが考えられる。

考察 :

多数の小集団が狭い間隔で移動すると、少しの渋滞が伝搬し、群間の間隔が維持できなくなる。

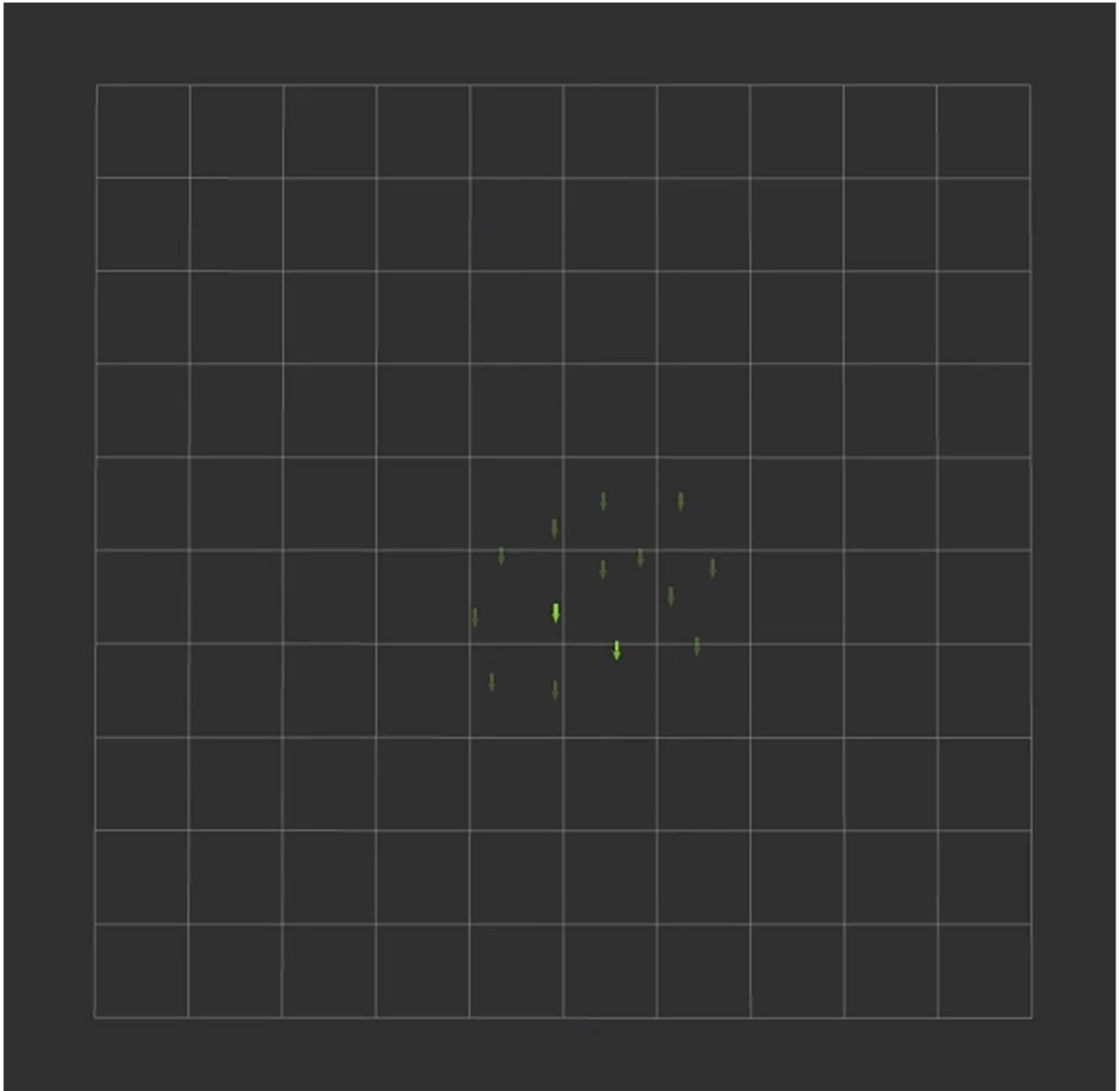
親機同士がウェイポイントを取り合う場合について、親機間の協調制御を考慮する必要がある。



Pass1 for Swarm1: $(-5.0, 0.0) \rightarrow (0.0, 0.0) \rightarrow (5.0, 0.0)$

Pass2 for Swarm2: $(5.0, 0.0) \rightarrow (0.0, 0.0) \rightarrow (-5.0, 0.0)$

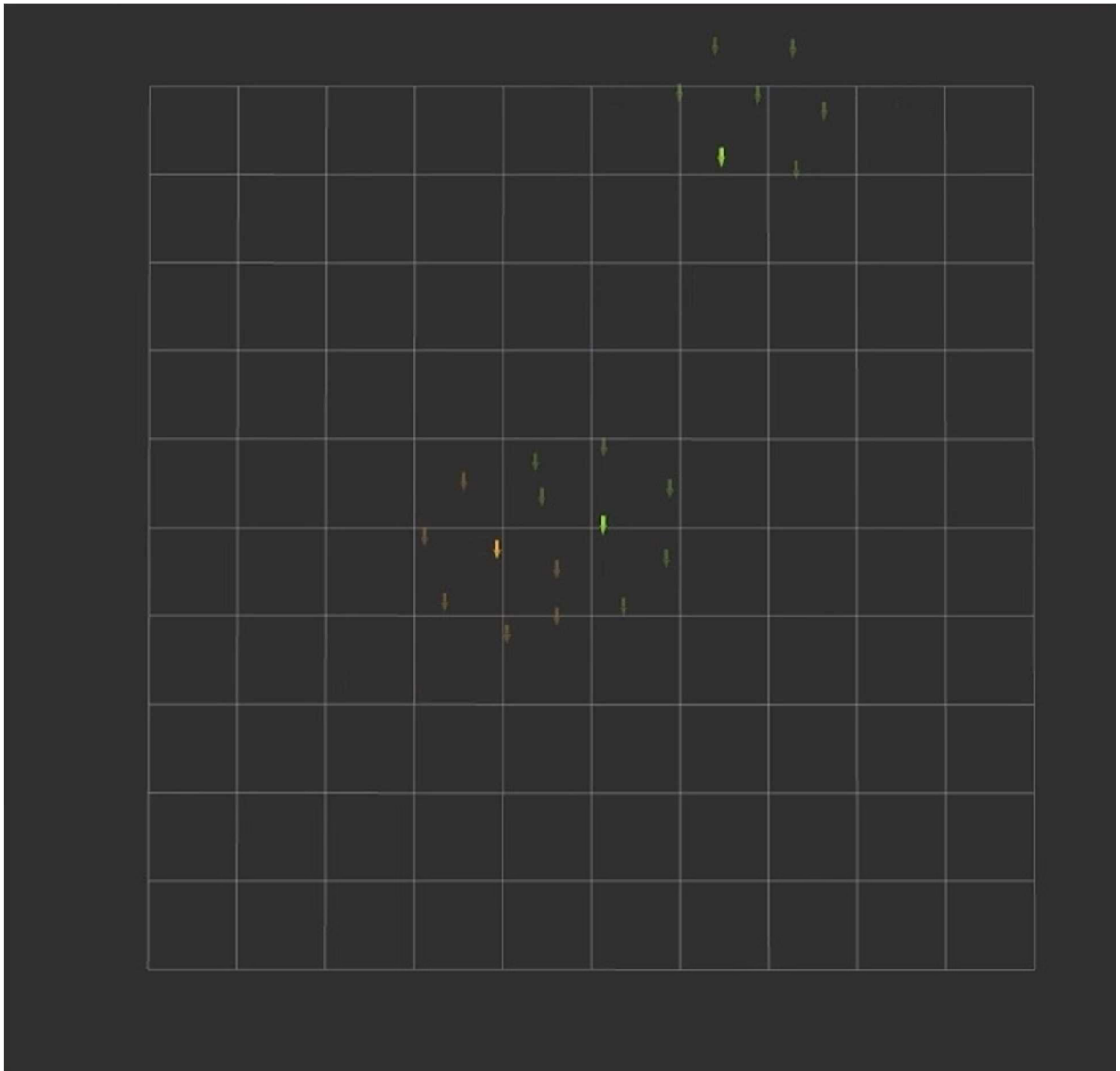
図 3.5.2-1 ケース 1 : 同一直線上での 2 個小集団のすれ違い



Pass1 for Swarm1: $(-5.0, 0.0) \rightarrow (0.0, 0.0) \rightarrow (5.0, 0.0)$

Pass2 for Swarm2: $(5.0, 0.0) \rightarrow (0.0, 0.1) \rightarrow (-5.0, 0.0)$

図 3.5.2-2 ケース 2 : 少しずらした経路での 2 個小集団のすれ違い



Loop1 for Swarm 1, 2:

$(0.0, 0.0) \rightarrow (4.0, 0.0) \rightarrow (4.0, 3.0) \rightarrow (0.0, 3.0) \rightarrow (-4.0, 3.0) \rightarrow (-4.0, 0.0)$

Loop2 for Swarm3:

$(0.0, 0.0) \rightarrow (2.0, 0.0) \rightarrow (4.0, -2.0) \rightarrow (0.0, -2.0) \rightarrow (-2.0, -2.0)$

図 3.5.2-3 ケース 3 : 2つのループ経路を移動する 3 個小集団

3.5.3. 試験シナリオ B 予備スウォーム飛行シミュレーション結果

大集団の群誘導は、仮想流れ場による誘導ベクトルを想定して、250機の個々の機体にターゲット座標に向かう誘導ベクトル(仮想流れ場を想定)を作用させ、ターゲット座標をランダムに変化させてその挙動を確認した。その結果、個々に誘導外力が作用しても、小集団及び大集団はまとまりを保持しながら、任意の誘導ベクトル場に従って、ターゲットに向かうことを確認した。

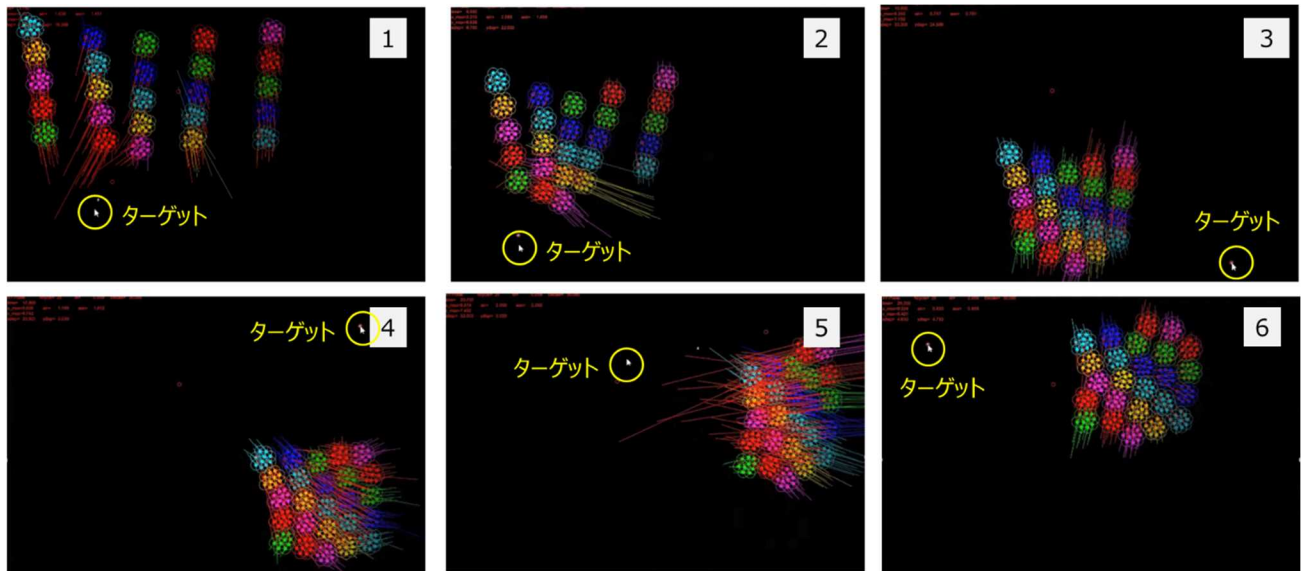
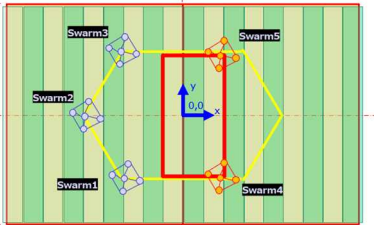
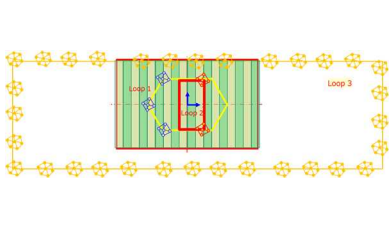
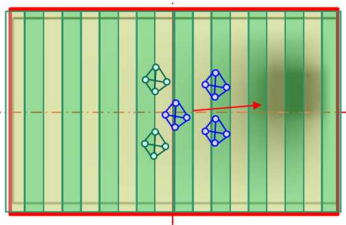


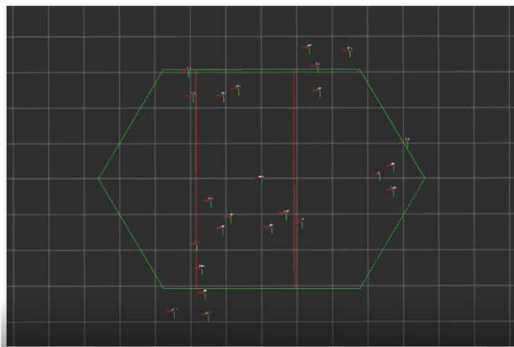
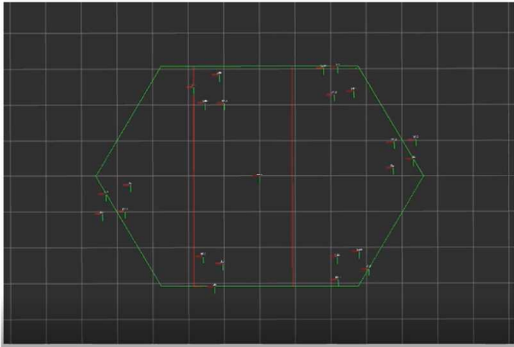
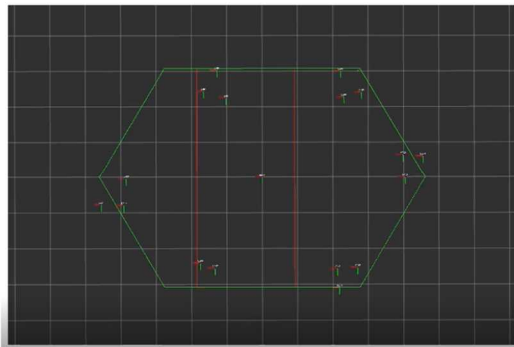
図 3.5.3-1 小集団 25 個による大集団の群制御シミュレーション

3.5.4. 試験シナリオ A/B のスウォーム飛行シミュレーションと実機検証

表 3.5.4-1 に示す試験シナリオに基づいて、仮想環境でスウォーム飛行が出来ることを確認し、実環境と連携できることを検証した。検証結果を図 3.5.4-1～図 3.5.4-3 に示す。また、試験シナリオ A から試験シナリオ B へ連続的に移行できることを確認した(図 3.5.4-4 参照)。

表 3.5.4-1 試験研究の実施内容

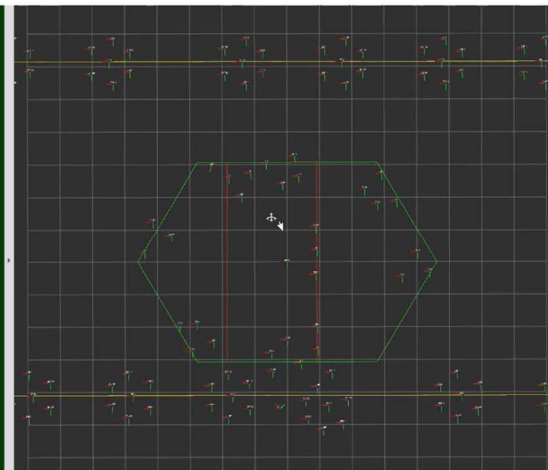
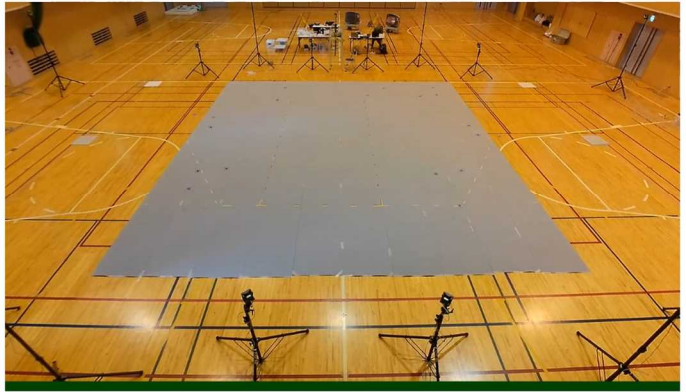
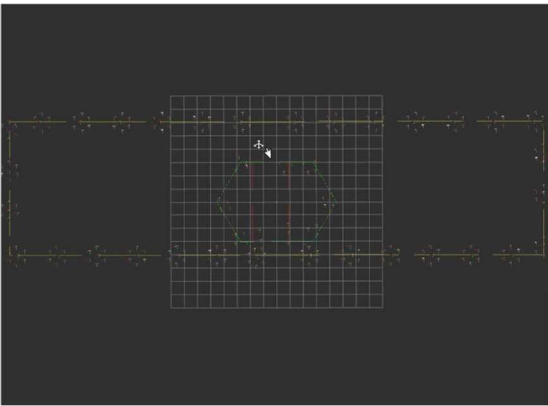
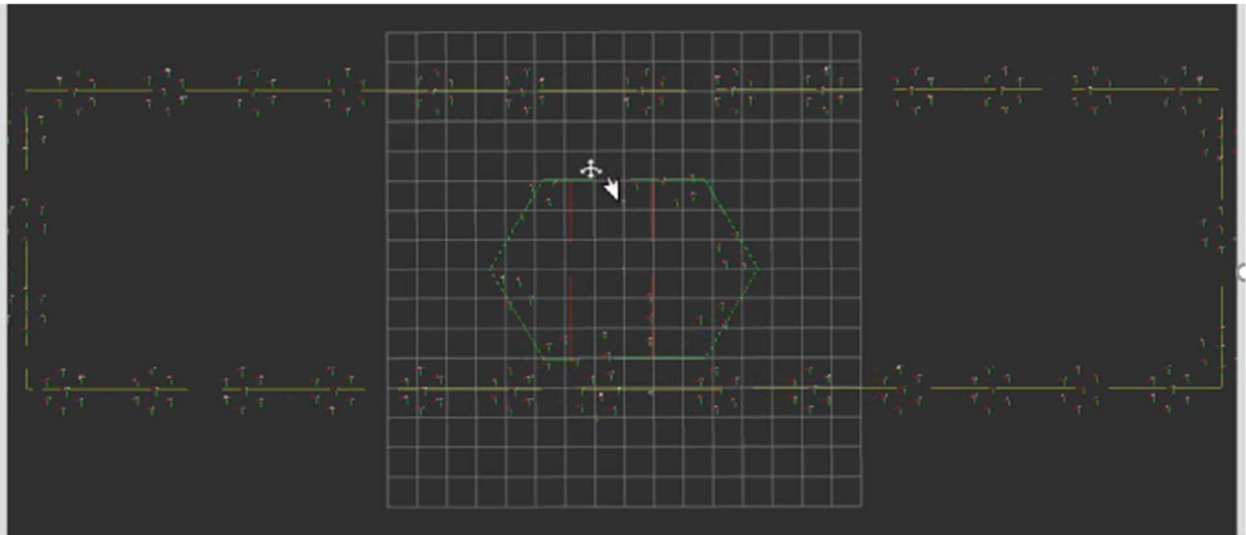
試験シナリオ A 2 重ループ	試験シナリオ A 拡張 3 重ループ	試験シナリオ B 流れ場切替誘導
実機 20 機 集団の群制御	仮想 230 機・実機 20 機	実機 20 機 集団の流れ場誘導
複数集団の合流・分離・すれ違いの検証 アルゴリズムの差異の検証	UAV250 機の群制御	誘導場によるスウォーム往復飛行
ウェイポイントによる周回飛行	ウェイポイントによる周回飛行	誘導場切り替えによるスウォーム飛行
		
図 3.5.4-1 参照	図 3.5.4-2 参照	図 3.5.4-3 参照



(左) 仮想環境でのシミュレーション

(右) 実環境での飛行テスト

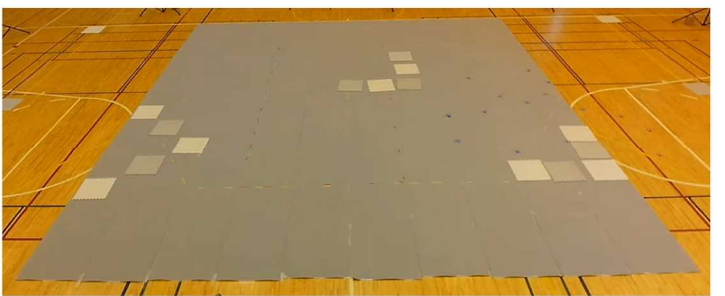
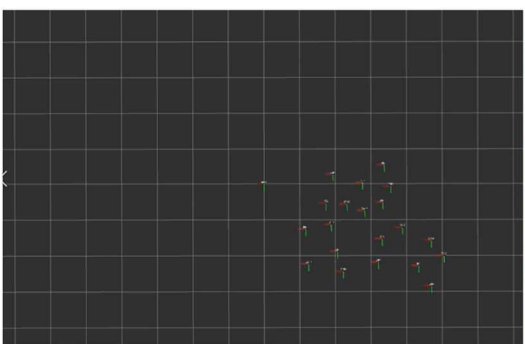
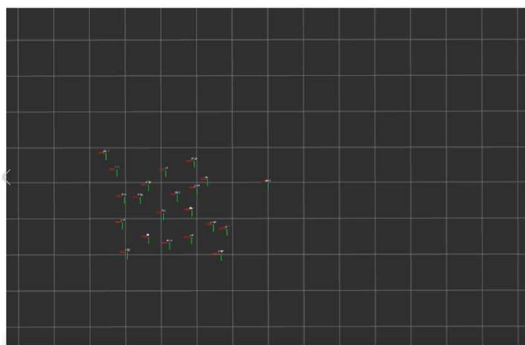
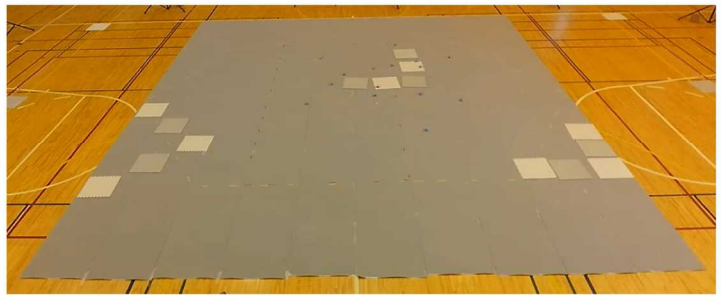
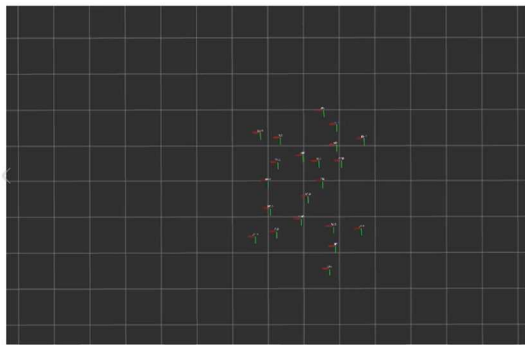
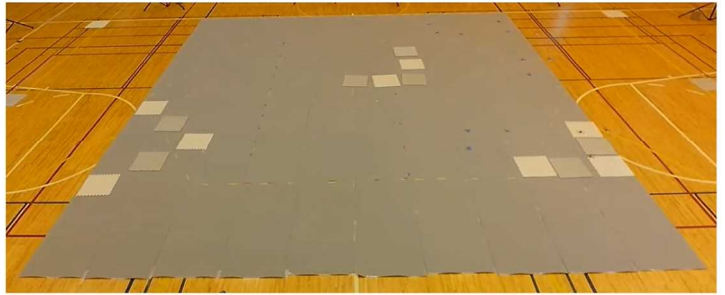
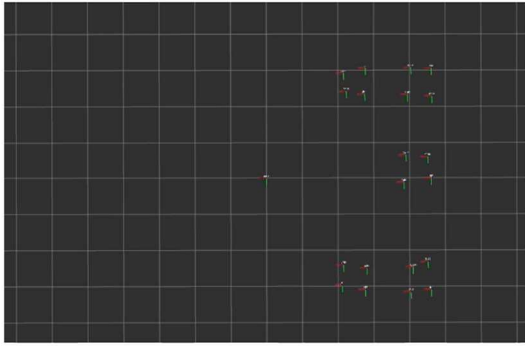
図 3.5.4-1 試験シナリオ A 2重ループ周回のデジタルツイン制御



(左) 仮想環境でのシミュレーション

(右) 実環境での飛行テスト

図 3.5.4-2 試験シナリオA 拡張 3重ループ周回の 250機(うち実機20機)の群制御



(左) 仮想環境でのシミュレーション

(右) 実環境での飛行テスト

図 3.5.4-3 試験シナリオB 流れ場誘導外力ゴール切替のデジタルツイン制御

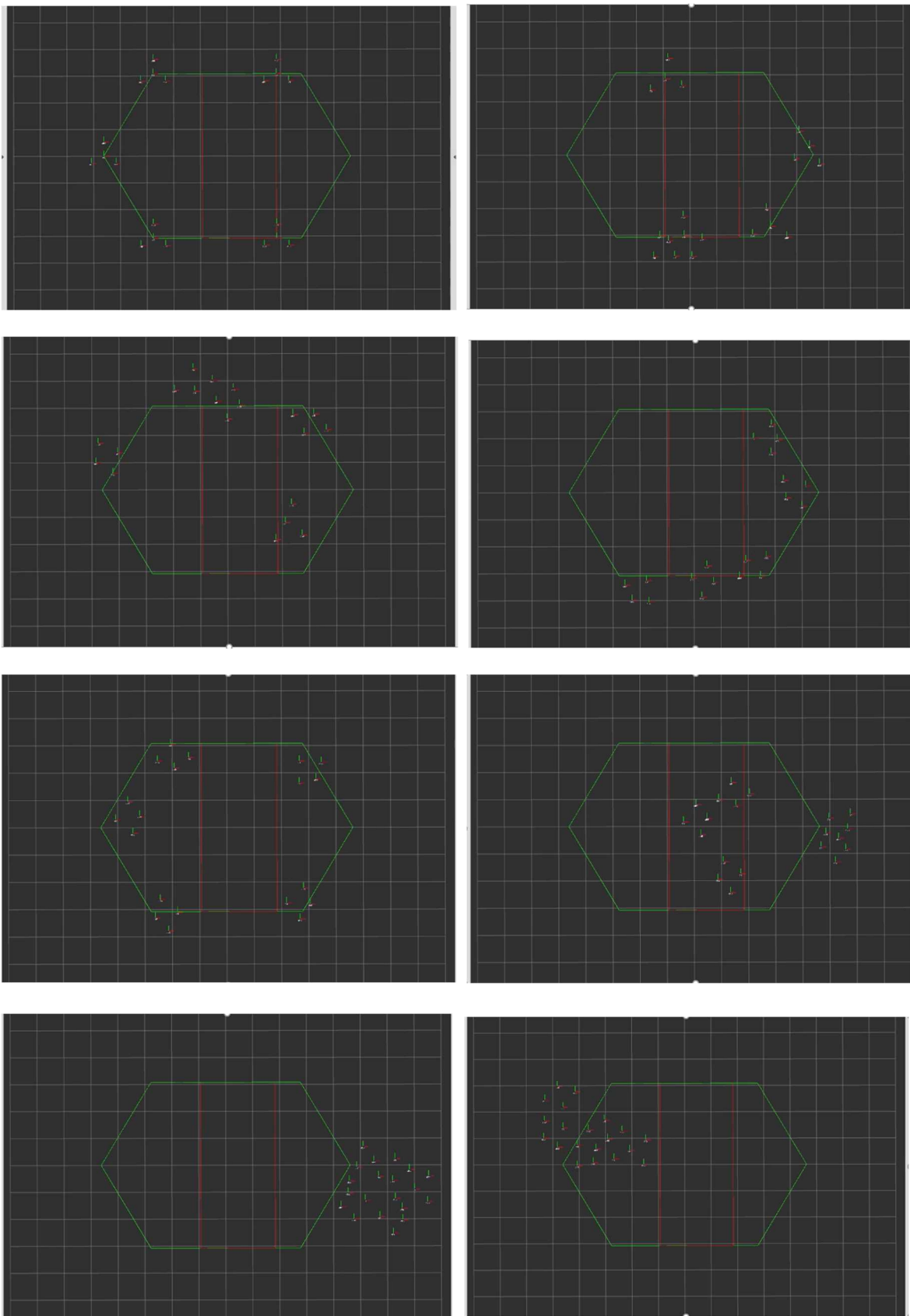


図 3.5.4-4 試験シナリオ A・B の連続実施 仮想環境(シミュレータ)テスト

3.6. 実機スウォーム飛行試験環境の構築

3.6.1. 試験環境構築に向けた設備機材の調査選定(R1FY)

初年度(R1FY)は、実機試験環境構築のため、測位システム及び通信システムの調査・検討・選定を行った。また、実験用 UAV の調査・選定を行い、試験飛行を実施して単機での機能性能を確認した。それらの成果を以下に示す。

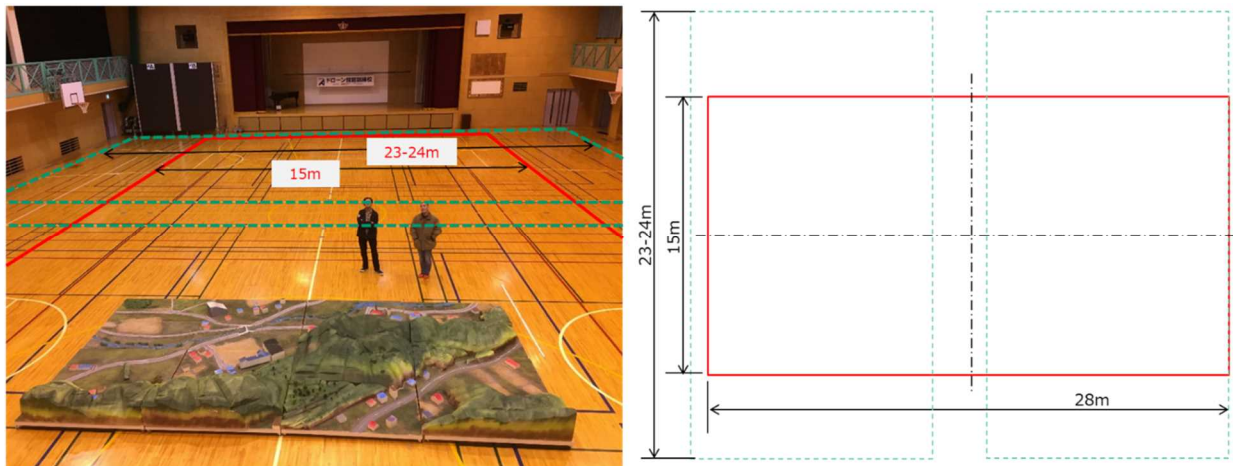


図 3.6.1-1 屋内試験場概要

3.6.1.1. 測位システムの調査検討

実環境試験は屋内を予定しているため、GPS を使うことが出来ない。このため、屋内用の測位システムを準備する必要がある。

屋内測位システムは、電波式によるものと光学式によるものについて調査をおこなった。その結果を表 3.6.1-1 に示す。電波式によるものは、AoA 方式によるものと UWB によるものに大別される。光学式によるものは、カメラ、赤外線光源及びパッシブマーカを用いたモーションキャプチャによるものがある。

我々の研究用の測位システムとしては、ドローンへのマーカなどの搭載が前提となるため、搭載物が重くなる電波式の EWC による測位システムは対応が難しい。現時点では、電波式の AoA による測位システムである QuuPPa、または光学式モーションキャプチャによる OptiTrack または Qualisys が性能面で良いと思われるが、実験用 UAV とのトータルのコストを考えると電波式測位システムの QuuPPa が一番良いと思われる。但し、実験用 UAV の調達など今後の研究の進捗を踏まえ、状況をモニターし実行の段階で選択する方向とする。

表 3.6.1-1 測位システムの比較

方式	電波				光学	
	AoA	UWB			モーションキャプチャー	
社名	QuuPPa	ユビセンス	日本ジー・アイ・ティー	海外製品	OptiTrack	Qualisys
代理店	国際航業	-	-	岡谷エレクトロニクス	エースポイントシステムズ	アーカイブティップス
精度	10-100cm	15-100cm	30-50cm	30-50cm	1cm	1cm
検知間隔	100 Hz	1エリア0.1sec 10機=1sec	1-5 sec	1-5 sec	60-120 Hz	60-120 Hz
搭載物質量	10g	数10g	数10g	数10g	数g	数g
コスト	550+170万円	-	-	-	3000万円	1000万円 (但し5x5m)
その他			日本製	技適未対応		
評価	○	X	X	X	X	X
		搭載質量オーバー・検知間隔がNG			試験エリアが広くカメラ台数必要、コスト高でNG	

3.6.1.2. 通信システムの調査検討

移動体と制御システム間、将来的には移動体間の通信を行うためには無線通信が必要となる。無線通信には様々な種類があるが、デジタルツイン制御環境を構築するために、必要な要件を表 3.6.1-2 にまとめる。また、現在から近い将来に実現される代表的なものについて比較対象となる無線通信方式を表 3.6.1-2 併せて示す。

調査検討の結果を、表 3.6.1-3 に示す。現時点では、我々の研究用の通信システムとしては、免許が不要で到達距離や複数機の通信により適すると思われる無線 LAN(WiFi)によるものが一番良いと思われる。但し、実験用 UAV の調達など今後の研究の進捗を踏まえ、状況をモニターし実行の段階で選択する方向とする。

表 3.6.1-2 無線通信に対する要件

項目	内容
到達距離	屋内：30m、屋外：100m（実証実験時）
通信速度	制御用（上り）：1～10Mbps 以上 テレメトリ用（下り）：10Mbps 以上
遅延	制御用の通信については、遅延が少ないことが望ましい
無線免許	実証実験においては免許不要で利用できる周波数帯を利用する通信方式が望ましい
その他	複数の機体と同時に接続、通信ができること

表 3.6.1-3 比較対象となる無線通信方式

区分	無線通信方式
免許不要で使える無線通信方式	<ul style="list-style-type: none"> 無線 LAN (WiFi) Bluetooth ZigBee
免許が必要な無線通信方式	<ul style="list-style-type: none"> 4G LTE 5G <p>※ これらは通信キャリアが提供するサービスを利用する範囲においては、利用者が免許を申請/取得する必要はない。ただしローカル 5G の場合は申請が必要な可能性がある。</p>

表 3.6.1-4 無線通信方式の比較表

名称	規格	周波数帯	通信速度	到達距離	検討事項
無線LAN	802.11b	2.4GHz	11Mbps	100m	無線LANデバイスは複数の通信規格をサポートするものが多く、通信環境が悪くなった場合、よりつながり易い通信規格での通信に移行する可能性がある。またレイヤー2の通信で、フレーム送信に対してAckが返ってこない場合、フレームを再送する仕様になっている。このため混雑時など通信状態が悪くなった場合に、通信速度の低下や通信の遅延が発生することがある。
	802.11g		54Mbps		
	802.11n		600Mbps		
	802.11ax	2.4/5GHz	9.6Gbps		
	802.11a	5GHz	54Mbps		
	802.11ac		6.9Gbps		
Bluetooth	4.2	2.4GHz	1Mbps (BTLE)	100m	
	5.0	2.4GHz	2Mbps (BTLE)		
ZigBee	802.15.4	2.4GHz	250Kbps	30m	レイヤー2での再送は無いが上位のプロトコル開発が必要となる
4G LTE		800MHz～2.5GHz (キャリアによって異なる)		サービスエリア内無制限	キャリアのサービス網を使う場合、end-endでのスループットと遅延の影響を考える必要がある。
5G		3.7GHz、4.5GHz、28GHz		500m (ローカル5G)	5Gの場合ローカル基地局を立てることでこの問題を回避できるが、費用面、実験局申請など課題も大きい。

3.6.1.3. 実験用 UAV の調査・選定

実験用 UAV 研究・技術開発の目的：実験用 UAV の調査を行い、試験飛行を実施して単機での機能性能を確認する。

当初、実験用 UAV はインテル社製マルチコプター機を予定していたが販売中止となった。このため、市販のドローン調査検討およびオープンプラットフォーム機の調査検討を行った。

本研究で必要となる実験用 UAV の要件に併せて市販ドローンの候補を表 3.6.1-5 に示す。検討の結果、調査時点の市販品は表 3.6.1-5 の要件を満たす複数制御に対応するものが無いことが分かったため、オープンプラットフォーム機で検討を進めることとした。検討は、市販ドローン調査検討、オープンプラットフォーム機の調査検討及び単機での機能性能確認を実施した。詳細は後述する。

表 3.6.1-5 実験用 UAV に対する要件と比較対象となる UAV

(1) UAV に対する要件	(2) 比較対象となる UAV
<p>① 複数同時制御：同時に複数の機体を制御できること</p> <p>② コマンド等による飛行位置制御機能：機体の移動方向、移動距離あるいは移動したい地点の座標を与えることで機体の移動を制御できること。最低限、ピッチ、ロール、ヨー角とスロットルの制御よりは簡単にできるようにすること。</p> <p>③ 機体の安定性：安定してホバリングすること。ホバリング状態から上記コマンド等で飛行制御を行う。</p> <p>④ 飛行可能時間：1 回のバッテリー充電で最低 5 分間は飛行すること墜落時の耐久性。墜落した時にもプロペラやスキッドなどが破損しないようガードが装備されていること。</p> <p>⑤ ペイロード：位置情報計測用にターゲットや無線タグを搭載するため、50～100g 程度のペイロードを有すること。</p> <p>⑥ Return to Home 機能：屋外で飛行する場合、飛び立った地点に指示に応じて自動で帰還できること</p>	<p>市販製品として全世界で広く使われているメーカーは、DJI 社（中）、Parott 社（仏）である。これに DJI 社が技術供与している Ryze Tech 社（中）と、基礎研究で使用してきた Bitcraze 社（スウェーデン）を加え比較する。</p> <p>機種はそれぞれのメーカーにおいて SDK が公開されているもので、小型ものものを選定した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ DJI 社 : SPARK ・ Parott : ANAFI ・ Ryze Tech : Tello EDU ・ Bitcraze : CrazyFly

3.6.1.4. 市販ドローン調査検討

機体の安定性、SDK のサポートなどを考慮し、実験用に使える機体の候補として、Parott ANAFI、DJI Spark、RyzeTech/DJI Tello EDU を検討する。DJI Mavic mini は、今の時点で SDK サポートの予定はないため、候補からは外す。なお比較のため CrazyFlie についても状況を示す。

調査の結果を、表 3.6.1-6 に示す。実環境試験を考えた場合、複数の機体とどうやって通信し制御するのかがポイントとなる。CrazyFlie では 2.4GHz の周波数帯を使っているが、WiFi とは異なる CrazyRadio を使い、多くの機体とも制御用の通信ができるシステムとなっている。また前出のように ANAFI や Spark などは WiFi を使っているが、機体が AP となっているため、AP に複数機を接続して制御することができない。このための改造ができるか、各社に問い合わせる必要がある。Parott は以前 AR DRONE では対応していた。また DJI も、Phantom 4 RTK を 5 機連携して Waypoint 飛行させる機能はリリースしているので、このあたりも方式や SDK 対応可能か確認が必要である。

WiFi の同時接続について、20 機程度であれば対応可能であるが、次の課題がある。プロトコル上、再送が発生するため遅延が発生する。特に 2.4GHz の場合 WiFi のチャンネル数が少ないため、同時接続はするがタイムシェア（時分割多重）となってしまう、遅延が発生する可能性がある。DJI 等市販の機体では、映像伝送が切れない場合、帯域が消費される。このため、WiFi でどこまで遅延なく制御できるかの検証を行うと同時に、再送が無い ZigBee の使用、CrazyRadio の方式の検討が必要になる可能性もある。

表 3.6.1-6 実験用 UAV 比較検討

		ANAFI (Parott)	Spark (DJI)	Tello EDU (Ryze Tech)	CrazyFlie (Bitcraze)	
1	複数同時制御	不可	不可	可	可	Parott は AR DRONE では WiFi AP へ接続し複数機を同時制御することが可能であったが、ANAFI では未サポート。DJI では小型機用の Mobile SDK では複数機制御は未サポートだが、Phantom4 RTK で 5 機同時飛行が出来るので、要調査。
2	コマンド等による飛行位置制御機能	可	可	可	可	各社の SDK による違いはある。
3	機体の安定性	不明 (高)	高	中	高(光学) 低(電波) (*1)	上記は屋内での安定性。屋外では ANAFI と Spark は GPS があるので安定すると思われる。 (*1)CrazyFlie は、光学式測位システム (モーションキャプチャ) との連携では高い安定性を示す。電波式の測位システムは、±30cm 程度のふらつきがみられ安定性に欠ける。
4	飛行可能時間	25 分	16 分	13 分	5 分	上記は各メーカーのカタログ値。実際には気温等によって変わるので、この 8 割くらいを目安にする。
5	墜落時の耐久性	不明(低)	やや高	中	中	ANAFI は市販のガードがほとんど見つからない。Spark や Tello は大型のガードがいくつか出ている。機体が軽くプロペラを大きくガードできるものであれば、落ちてもある程度は耐えられる。(マットは必要) MAVIC mini 用に全面を覆うメッシュ状のカバーがあり、かなり丈夫とは聞いているが、SDK が対応していない。
6	ペイロード	中～大	中	小	極小	相対的な評価。実際には取付位置も含め実機での調整が必要。
7	Return to Home 機能	有り	有り	無し (*2)	無し	(*2) プログラミングできる可能性あり。要調査。

3.6.1.5. オープンプラットフォーム機の調査検討

今後の再利用性、他機種への移植性を重視し、オープンエコシステムな技術インターフェースを可能な限り利用した。

Linux ベースの機体

オープンスタック (Ardupilot/ROS/MAVLINK) 環境の構築

オープンプロトコルによる機体制御 (離陸/着陸/移動)

実験用機体の調査検討：

当初、今期は必要最小限構成でスタートを目指し、今後実験内容によりアップグレードする予定であったが、パーツ入手等の問題でカスタムでの機体作成がスケジュール上困難となったため、インテル社開発者用キット (Intel Aero Ready-To-Fly、以後 RTF と呼ぶ) で代替することとした。



図 3.6.1-2 実験用機体 インテル社開発者用キット (RTF : Intel Aero Ready-To-Fly)

オープンスタック環境の構築：

開発環境の利便性を考え、標準の Yocto OS を ROS 開発環境として推奨されている Ubuntu16 に変更。Ardupilot でキャリブレーションを行った上で、ROS/Mavlink (MAVROS) をインストールした。



図 3.6.1-3 オープンスタック環境

3.6.1.6. オープンプラットフォーム機の機能性能確認

機能性能確認は、利根沼田テクノアカデミードローン技能訓練校（図 3.6.1-4 参照）にて行った。

通常機体をプログラムで制御するためには、機体を OFFBOARD モードに変更する必要があるが、RTF は GPS 標準装備、プロポによる制御が標準となっているため、OFFBOARD モードが未サポートとなっており、標準のモード変更コマンドでは OFFBOARD モードへの移行ができなかった。そこで、ソケット通信により直接モード設定を行った。これにより、現在座標を指定することで、離陸、移動、着陸が行えることが確認できた。

ただ、制御空間の座標を正確に把握することができなかった。GPS 電波が受信できる屋外では安定しているが（図 3.6.1-5 参照）、室内ではローカル座標を正確に把握することができず離陸高度等が正確に指定できなかった（図 3.6.1-6 参照）。屋外では問題がなく見えるので、標準装備の GPS モジュールが関係していると思われるが、今回は解決することができなかった。

今回しようとした RTF はあくまでも代替機体であるのでここまでとしたが、来期利用する機体では、OFFBOARD モードによるローカル座標系での機体制御性能を重視した機体構成を考えるものとする。



図 3.6.1-4 単機機能性能確認試験場：利根沼田テクノアカデミードローン技能訓練校



図 3.6.1-5 GPS 受信下での飛行試験



図 3.6.1-6 屋内(非 GPS 環境)での飛行試験

3.6.2. 試験設備機材の再選定と変更届

COVID-19の影響で、初年度R1年度に選定したオープンスタック型ドローンの部品調達が困難な状況となった。また、小型ドローンと光学式測位システムにより高い位置精度での制御ができることが確認できた。そこで、R2年7月10日付で委託業務変更承認申請書を提出し、以下の計画変更をおこなった。

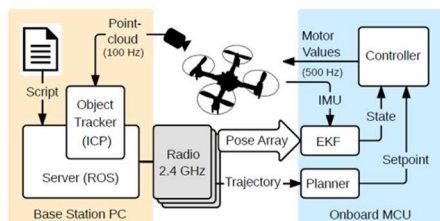


Fig. 2. Diagram of major system components. A point cloud of markers detected by a motion-capture system is used to track the quadcopters. All estimated poses are broadcasted using three radios. Planning, state estimation, and control run onboard each vehicle at 500 Hz.



Fig. 5. Forty-nine Crazyflies flying in a 4-layer rotating pyramid formation. The bottom layer is 3 m x 3 m with 0.5 m spacing between vehicles.

図 3.6.2-1 Crazyswarm: A Large Nano-Quadcopter Swarm

2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)

https://www.researchgate.net/publication/318695162_Crazyswarm_A_large_nano-quadcopter_swarm/link/5db9da924585151435d60ea5/download

表 3.6.2-1 委託業務変更承認申請内容

項目	内容
変更事項	<p>ア) 業務計画書「I. 委託業務の内容」第4項第③項</p> <p>①変更前 令和元年度に選定した通信システム(WiFi)及び測位システム(電波式屋内測位システム QuuPPa)を調達し、20機のデジタルツイン制御ができる環境の構築を行う。また、令和2年度は8機の実験用 UAV を調達する。</p> <p>②変更後 令和元年度に選定した通信システム及び測位システムを調達し、20機のデジタルツイン制御ができる環境の構築を行う。なお、研究の進捗を踏まえ状況をモニターし実行の段階で他のシステムの利用を妨げない。 また、令和2年度は8機以上の実験用 UAV を調達する。</p>
変更の理由	<p>令和元年度の研究成果報告書の第2.3.3.1項「測位システムの調査検討」に示した報告内容「但し、実験用 UAV の調達など今後の研究の進捗を踏まえ、状況をモニターし実行の段階で選択する方向とする。」に該当する状況となりました。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・小型ドローンと光学式測位システムにより高い位置精度で群制御ができることを実証・確認した。 ・オープンスタック型ドローンの部品調達の見通しが困難な状況となった。
変更が業務計画に及ぼす影響及び効果	<p>業務計画に及ぼす影響について、測位システムを変更しても当初の予定通り業務計画を遂行することができます。</p> <p>変更による効果としては次の効果を見込んでいます。光学式測位システムの利用により測位精度が向上し、より安価な小型ドローンによる試験が可能となり、実環境の試験における小型ドローンの挙動をより精度良く測定することが出来るため、仮想環境のシミュレーションの結果と実環境の試験の結果との比較分析の品質の向上が見込まれます。</p>

3.6.3. 実験用 UAV の検討

実験用 UAV は、スウェーデン Bitcraze 社の Crazyflie 2.1 を用いる。

3.6.3.1. 機体概要

Crazyflie 開発プラットフォームは、飛行性能、耐久性、無線が改善されている。また、ソフトウェアとデッキの拡張性は、教育、研究、群制御に理想的なものとなる。

Crazyflie 2.1 は、重量がわずか 27g で、手のひらに収まる多用途のオープンソースフライング開発プラットフォームである。Crazyflie 2.1 には、低遅延/長距離無線と Bluetooth LE が搭載されている。これにより、アプリをダウンロードしてモバイルデバイスをコントローラとして使用するか、Crazyradio PA と組み合わせて、コンピューターを使用してデータを表示し、ゲームコントローラで飛行するかを選択できる。

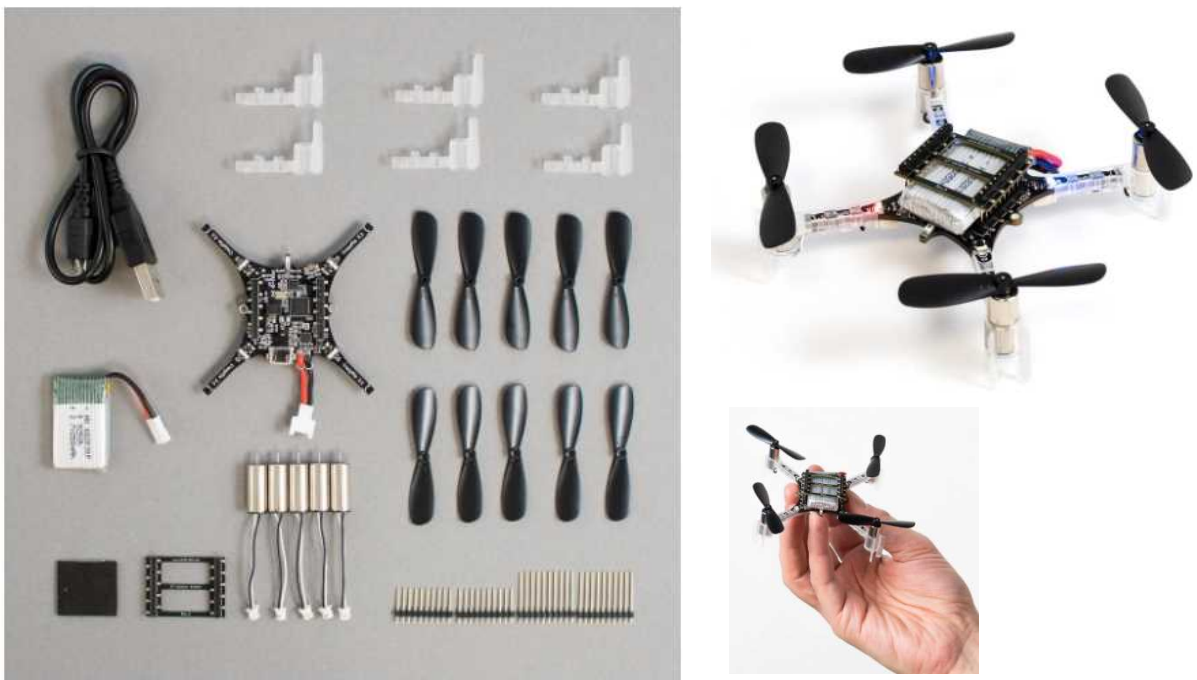


図 3.6.3-1 Crazyflie 2.1 外観

表 3.6.3-1 Crazyflie 2.1 諸元

特徴
高い耐久性のデザイン
組み立てが簡単で、はんだ付けは必要ない
自動検出機能を備えた拡張デッキをサポート
Bluetooth LE を使用した iOS および Android からの飛行、および Crazyradio または CrazyradioPA を使用した Windows / Mac OSX / Linux からの飛行をサポート
Crazyradio PA を使用して、1 km を超える無線範囲の見通し内 (LOS) でテスト済み
ワイヤレスファームウェアの更新
標準の uUSB を介したオンボード充電
高度なアプリケーション向けの専用無線/電力管理 SoC を備えたデュアル MCU アーキテクチャ
Crazyradio または CrazyradioPA とコンピューターを使用する場合の拡張デッキのフル活用に加えて、リアルタイムのロギング、グラフ化、変数設定
機械的仕様
離陸重量：27g
サイズ (WxHxD)：92x92x29mm (モーター間およびモーターマウントフィートを含む)
無線仕様
2.4GHzISM バンド無線
20 dBm の無線増幅器で範囲を拡大し、CrazyradioPA で 1km を超える範囲の LOS でテスト済み (環境に依存)
iOS および Android クライアントでの BluetoothLowEnergy のサポートが利用可能
オンボードチップアンテナと U.FL コネクタの両方を備えたデュアルアンテナサポート
マイクロコントローラ
STM32F405 メインアプリケーション MCU (Cortex-M4、168MHz、192kb SRAM、1Mb フラッシュ)
nRF51822 無線および電力管理 MCU (Cortex-M0、32Mhz、16kb SRAM、128kb フラッシュ)
uUSB コネクタ
100mA、500mA、980mA モードのオンボード LiPo 充電器が利用可能
フルスピード USB デバイスインターフェース
部分的な USBOTG 機能 (USB OTG は存在しますが、5V 出力はない)
8KB の EEPROM
IMU
3 軸加速度計/ジャイロスコープ (BMI088)
高精度圧力センサー (BMP388)
飛行仕様
純正バッテリーでの飛行時間：7 分
純正バッテリーでの充電時間：40 分
最大推奨ペイロード重量：15 g
サポートされているクライアント/コントローラ
Win / Linux / OSXpython クライアント
Xbox360 と Playstation3 で使用されるゲームパッドはリファレンスコントローラとして使用される
少なくとも 4 つのアナログ軸を備えたゲームパッド/コントローラ
Android モバイルデバイス
iOS モバイルデバイス

(出展) <https://store.bitcraze.io/collections/kits/products/crazyflie-2-1>

3.6.3.2. Crazyradio PA

Crazyflie 2.1 は、Crazyradio PA と無線で接続し制御される。概要を以下に示す。なお、本製品は、技術基準適合証明書を取得する必要がある(次項参照)。

(概要)

Crazyradio PA は、NordicSemiconductor の nRF24LU1 +をベースにした長距離オープン USB 無線 Dongle である。20dBm のパワーアンプ、LNA を備え、Crazyflie 互換のファームウェアが事前にプログラムされている。パワーアンプは範囲を拡大し、Crazyflie 2.X と一緒に最大 1km (見通し内)、CrazyradioPA から CrazyradioPA (見通し内) まで最大 2km の範囲を提供する。

Crazyradio PA は、Crazyflie および Crazyflie2.X と一緒に使用するためだけのものではない。これは、ゼロから作成されたファームウェアと使用用の Python API を備えたオープンプロジェクトであるため、WiFi よりも長い範囲を必要とし、帯域幅に同じ要件がないシステムに最適なビルディングブロックである。ハードウェアには、最新のファームウェアと、追加のハードウェアを必要とせずに USB 経由でファームウェアをアップグレードできるブートローダーが付属している。



図 3.6.3-2 Crazyradio PA 外観

表 3.6.3-2 Crazyradio PA 諸元

特徴
20dBm の出力パワーを提供するラジオパワーアンプ
Crazyflie 2.X を使用した 1km 以内の範囲の LOS (最良のシナリオ)
プロトタイピング用の 2x52.54mm ヘッダー (マウントされていない)
PPM のハードウェアサポート
第一世代の Crazyradio と同じ機械的フットプリント
オープンソースファームウェア
USB 経由のファームウェアアップグレード
低遅延
仕様
NordicSemiconductor の nRF24LU1 +チップに基づく
32Kb フラッシュと 2KbSRAM を備えた最大 16MHz の 8051MCU
2.4GHzISM バンド無線
USB デバイス周辺機器
125 のラジオチャンネル
2Mbps、1Mbps、250Kps の通信データレート
最大 32 バイトのペイロードのデータパケットを送受信する
アドレスとパケット ACK を自動的に処理する
ハードウェア SPI および UART
NordicSemiconductor の EnhancedShockBurst プロトコルと互換性がある
無線仕様:
20dBm 出力電力 (100mW)
低ノイズアンプ (LNA)
RP-SMA コネクタ
拡張ヘッダーを介して最大 13V で電力を供給できる
次の信号を含む 2x52.54mm 拡張ヘッダー (マウントされていない):
PPM 入力のハードウェアサポート
最大 13V の入力電力
GND
PPM
SPI / UART
標準の USB-A コネクタ
機械的仕様
重量: 6g
サイズ (WxHxD): 58x16x6.5mm (コネクタを含む)

3.6.3.3. 技術基準適合証明書

実験用 UAV のスウェーデン Bitcraze 社の Crazyflie2.1 及び Crazyradio PA について、技術基準適合証明書を取得した。



図 3.6.3-3 技術基準適合証明書

3.6.4. 測位システムの検討

3.6.4.1. 光学式モーションキャプチャ OptiTrack 概要

ドローンの測位には、米国製 OptiTrack を用いる。OptiTrack は赤外線 LED を搭載したカメラと三次元トラッキングソフトウェアからなる光学式のモーションキャプチャシステムである。



業界トップの精度
Prime^x 41を使えば、最も精度が高く、広範囲をカバーする三次元モーションキャプチャシステムが構築できます。Prime 41からPrime^x 41になってよりパワーアップしました。

距離、シャッタースピード、FOVの完璧なバランス
カメラからマーカまでの驚くほどの距離と三次元精度を実現しながら、あらゆるキャプチャ領域の端から端までをカバーします。

図 3.6.4-1 カメラ (<https://mocap.jp/optitrack/hardware/>)

3.6.4.2. 測位の方法

光学式モーションキャプチャシステムは、複数台のカメラを使ってマーカ位置をトラッキングするシステムである。

光学式モーションキャプチャのカメラは赤外光を照射し、赤外光による映像を映す。マーカは再帰性反射材という特殊な素材でできている。再帰性反射材は届いた光を拡散させることなく、入射角と同じ方向に反射させる特性をもっているため、反射光は光量を保ったままカメラに届く。

測位は、

- カメラが赤外光を発光
- マーカがその光を真っ直ぐ反射
- カメラが反射された光を認識

という流れでカメラはマーカを捉えていく。

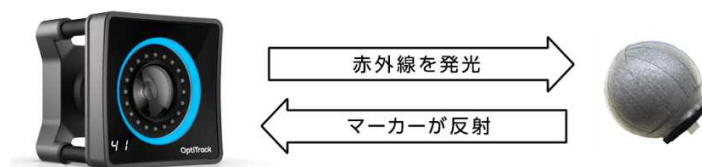


図 3.6.4-2 光学式モーションキャプチャシステムの測位の流れ

<https://mocap.jp/about-mocap/>

次に、マーカの2次元位置を算出する。赤外光がマーカに反射しカメラに戻った時、カメラでは画像処理が行われる。反射光の光量が強いほど白く映り、一定以上の白さを持つ画素の部分と

それ以外の部分という風に2値化が行われる。そして白い部分の数学的な重心の位置 (X, Y) が算出され、マーカーの2次元位置となる。

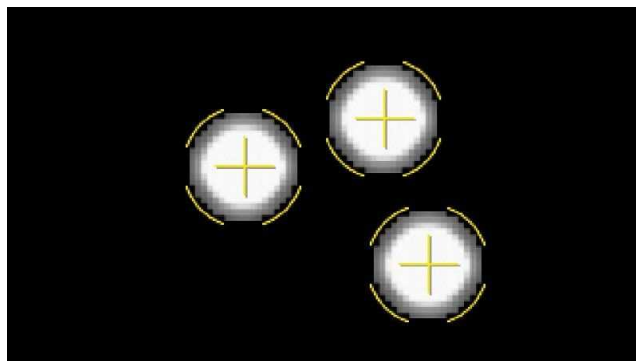


図 3.6.4-3 カメラがとらえたマーカーの2値化された反射光

<https://mocap.jp/about-mocap/>

最後に、マーカーの位置を3次元化する。1台のカメラでマーカーを捉えても奥行情報が得られないため、複数台のカメラで異なるアングルから同一マーカーを捉え、複数台分の2次元位置情報を得る。各カメラで得たマーカーの二次元位置情報と、各カメラの位置関係の情報（キャリブレーション結果）を組み合わせることでマーカーの3次元位置を算出する。

このため、測位性能は、マーカーのレイアウトおよび使用するマーカーの寸法に影響を受ける。



図 3.6.4-4 カメラがとらえたマーカーの2値化された反射光

<https://mocap.jp/about-mocap/>

3.6.4.3. 変更届事前調査

変更届の事前検討として、OptiTrack 代理店のスパイス社において、使用予定のカメラの性能の確認を行った。その結果を以下に示す。また、実験用のカメラレイアウトの検討を行った。その結果も併せて示す。

表 3.6.4-1 デモ確認(2020/5/26 @スパイス社)

	マーカ直径	カメラ Primeシリーズ			
		x22	x41		
事前情報	φ9.5	12m	15m		M3ねじ
デモ確認	φ9.5	8m	11.5m	ゲイン1	M3、M4ねじ
		-	12.4m	ゲイン4	
	φ12	12m	14.5m	ゲイン1	M4ねじ
		13m	-	ゲイン3	

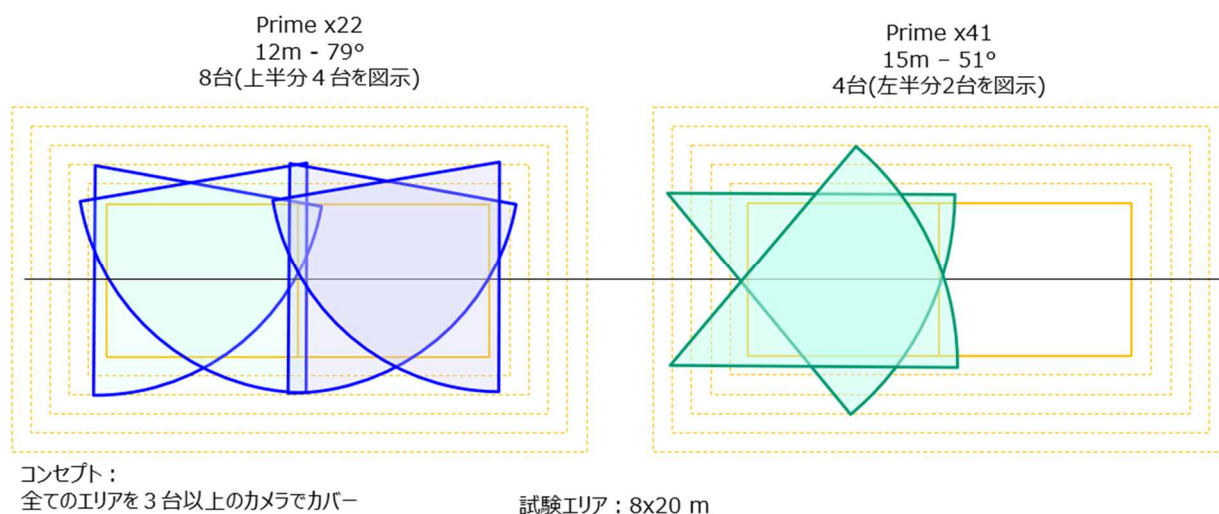
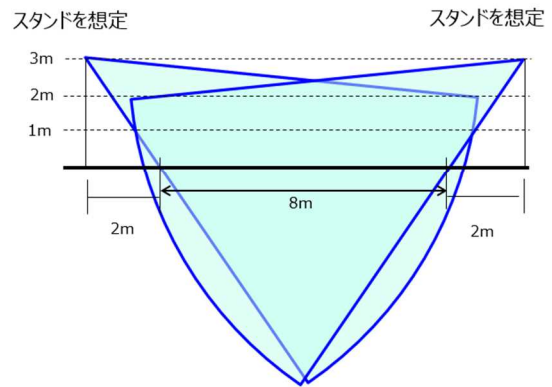
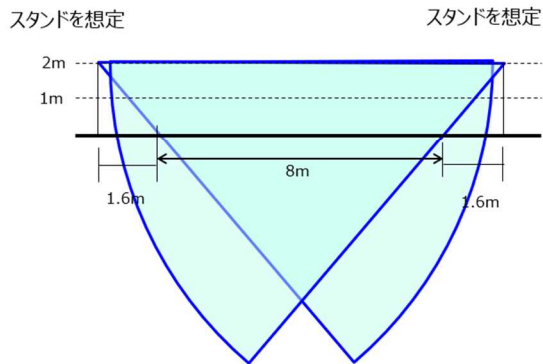
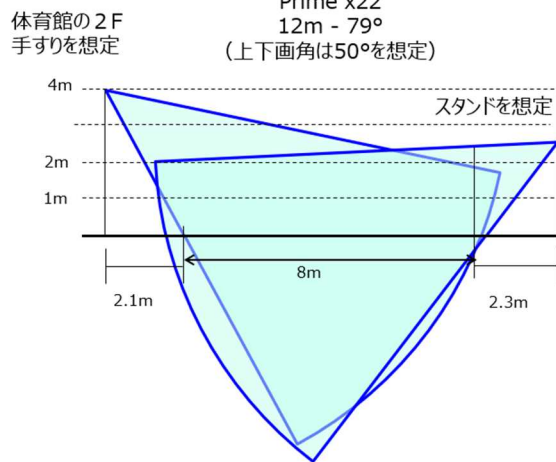


図 3.6.4-5 レイアウト検討

Prime x22
12m - 79°
(上下画角は50°を想定)



Prime x22
12m - 79°
(上下画角は50°を想定)



Prime x22
12m - 79°
(上下画角は50°を想定)

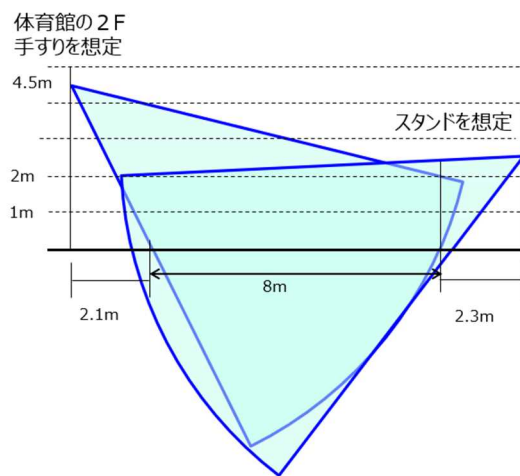


図 3.6.4-6 カメラの測位範囲 高さ方向の検討

3.6.5. 測位用マーカーマウントの設計

測位用マーカーマウントは、光学式測位システムの反射マーカータを搭載する部品である。実験用小型 UAV に搭載されるため、重量制約を受ける。また、測位用マーカーマウントの構造や形状は、測位性能に影響を及ぼすマーカレイアウトの設計を反映する必要がある。

以下に、測位用マーカーマウントの設計検討の内容を示す。マーカレイアウトの設計は後述する。

3.6.5.1. マーカーマウントの設計条件

マーカーマウントは、剛体認識性能と重量の相反する特性を満足する必要がある。

条件 1 : 測位性能 (マーカレイアウトに影響)

実験用 UAV の測位には、モーションキャプチャ測位システムを用いるため、機体の識別には、機体毎に固有の配置で反射マーカータを搭載する必要がある。

条件 2 : 重量制約 (マーカーマウントの構成に影響)

設計重量要件を満足するように、マーカ及びマーカーマウントは最大ペイロード 15g 以下 (機体含め 42g 以下) にする必要がある。

(設計重量要件) 最大離陸重量 42g = 離陸重量 27g + 最大ペイロード 15g

3.6.5.2. マーカーマウント設計の概要

マーカーマウントの設計の推移を以下に示す。

初期設計のマーカーマウントは、マーカレイアウトの中央部とパイプ拡張部で、上部マーカーマウントと下部マーカーマウントの別々の構造となっていた。このため、機体重量が最大離陸重量に対して余裕が無い設計となった。R2 年度のスウォーム飛行テストの結果、期待通りに UAV が飛行できなかった。このため、軽量化する必要があることが分かった。

軽量化設計では、中央部とパイプ拡張部を上部マーカーマウントに一体化し、下部マーカーマウントを削除して、軽量化を行った。これにより、スウォーム飛行の安定性が向上した。しかし、スウォーム飛行の機数を 20 機まで増やそうとすると剛体認識において誤認するようになった。このため、剛体認識性能を向上する必要があることが分かった。

認識性向上設計では、パイプ拡張部を縦一文字に加え、十字のパターンを追加した。これにより、20 機のスウォーム飛行を安定的に行うことが出来た。

各設計詳細については、次項以降に示す。



・初期設計



・軽量化設計

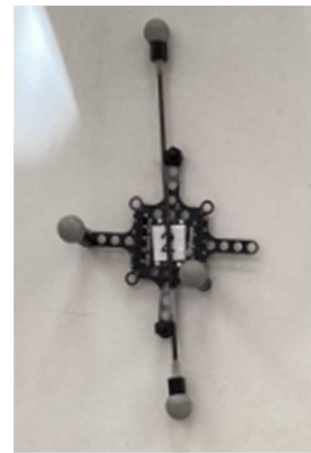
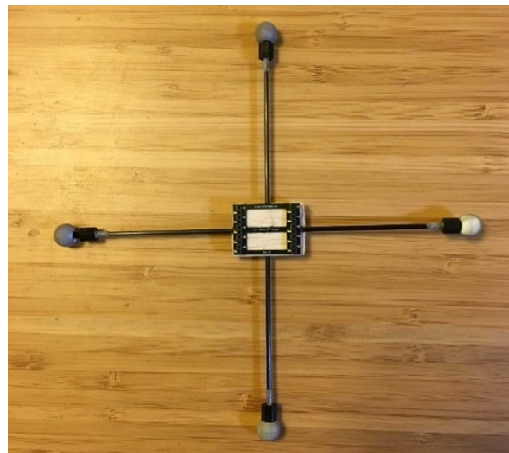


・認識性向上設計

図 3.6.5-1 マーカーマウントの設計の推移



・初期設計



・軽量化設計

図 3.6.5-2 マーカーマウントの構成の推移

3.6.5.3. マーカーマウント設計バージョン1

バージョン1の外観を下図に示す。構成は、機体本体、上部マーカーマウント、及び下部マーカーマウントで構成される。上部マーカーマウントは、Bitcraze社のMotion capture marker deck(1.6g)をベースとしている。下部マーカーマウントは、Bitcraze社のバッテリーホルダーデッキに、カーボンパイプを接着している。接着を堅牢にするため、以下の手順で組み立てる。

マーカー配置は、上部マウントについて5種類、下部マウントについて4種類、合計20種類の配置ができるように検討した。

バージョン1の設計離陸重量は39gとなった。しかし、飛行試験の結果、コントロールが不調であり、その一因として重量余裕3g(最大離陸重量の10%以下)が少ないことが問題と考えられるため、再設計を行った。再設計については次項に示す。



図 3.6.5-3 マーカーマウント設計バージョン1外観

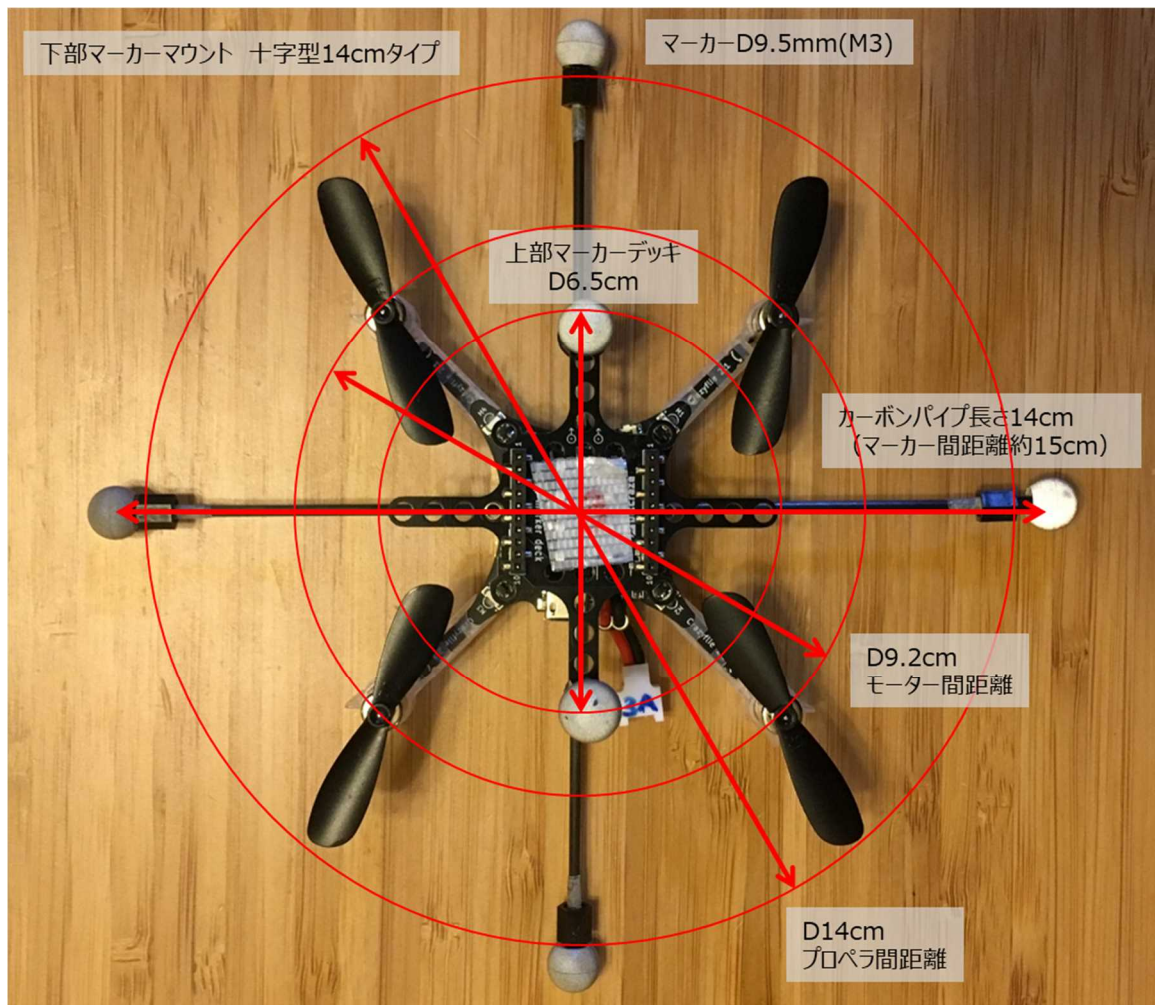


図 3.6.5-4 マーカーマウント設計バージョン1寸法概要

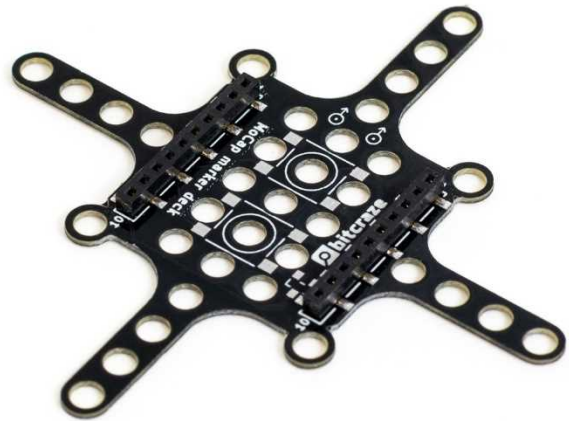
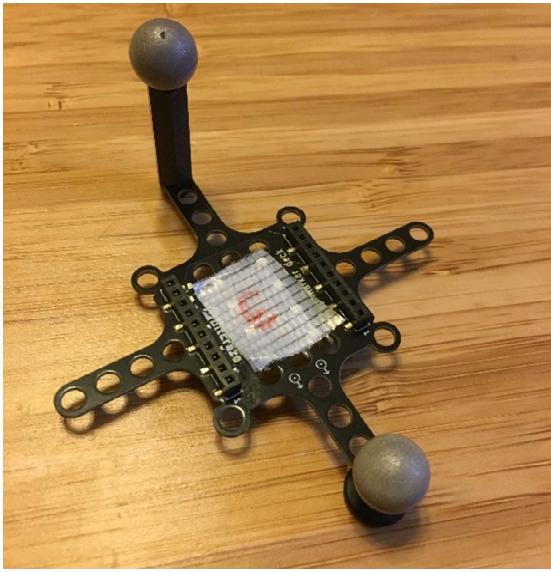


図 3.6.5-5 上部マーカーマウント

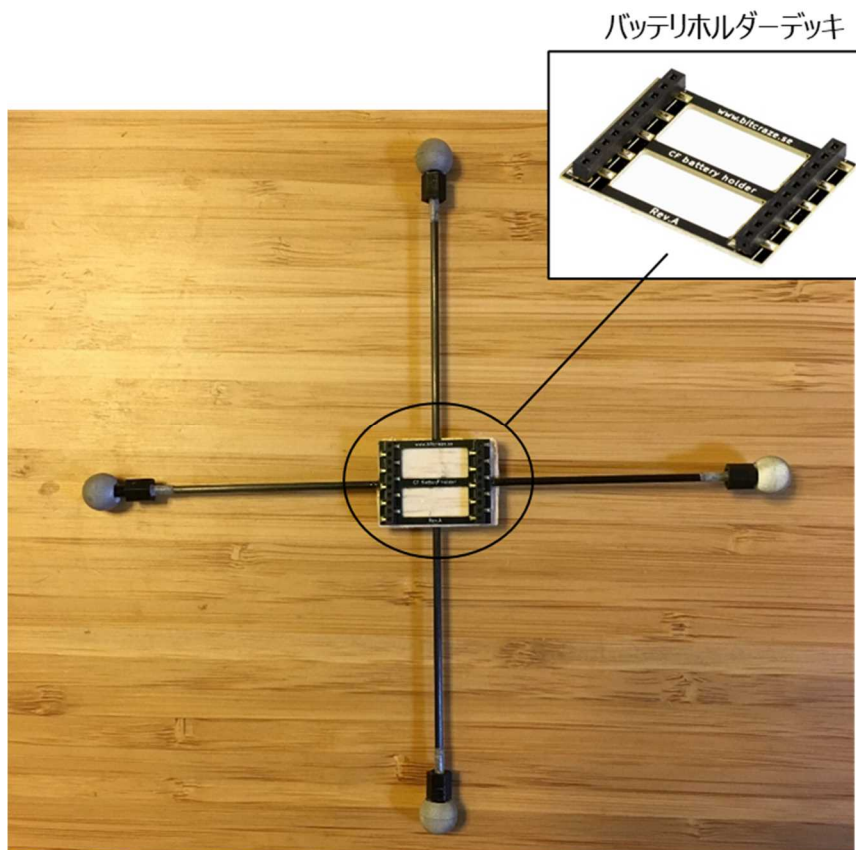


図 3.6.5-6 下部マーカーマウント

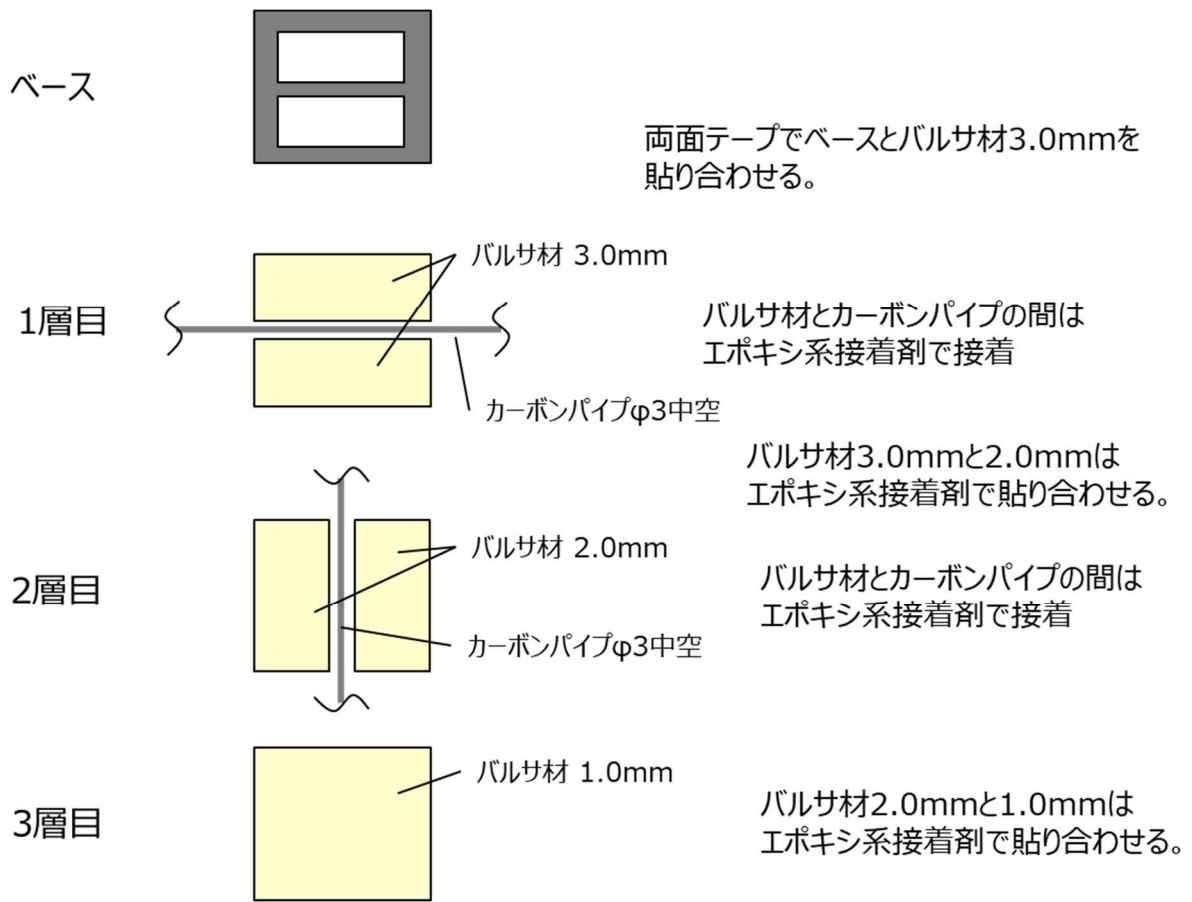


図 3.6.5-7 下部マーカーマウント制作手順

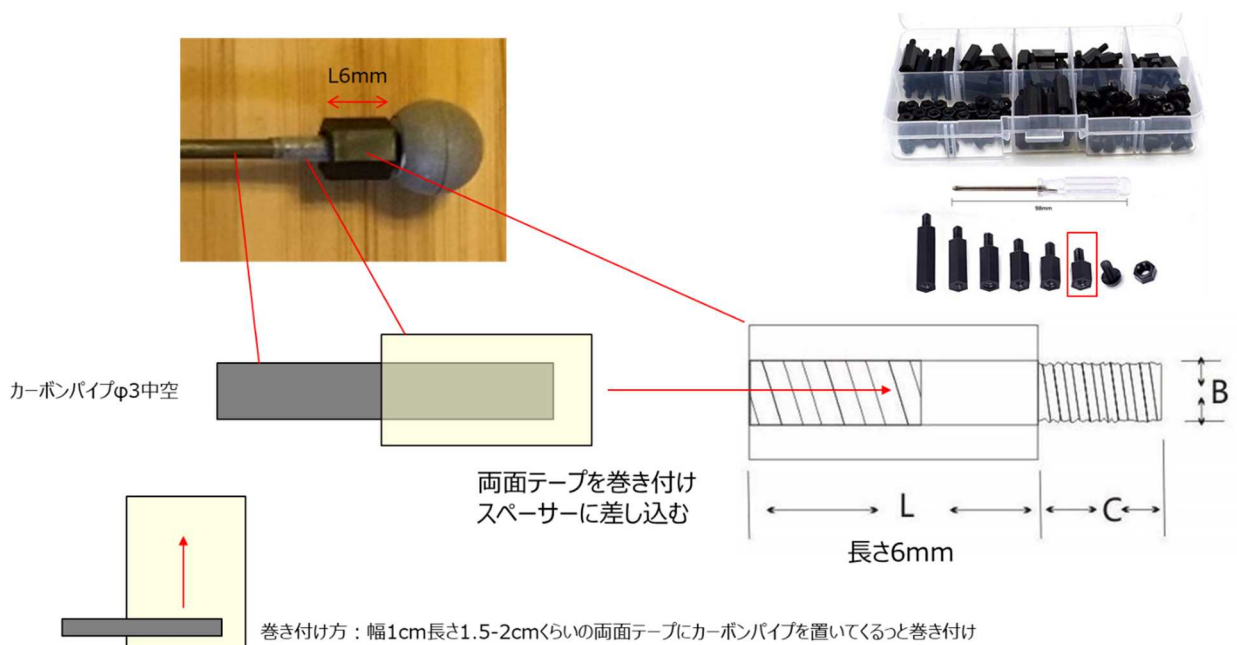


図 3.6.5-8 下部マーカーマウントのマーカータ取付部

上部マーカードッキ：5—6種類

下部マーカーマウント：4種類（腕の長さを変更）

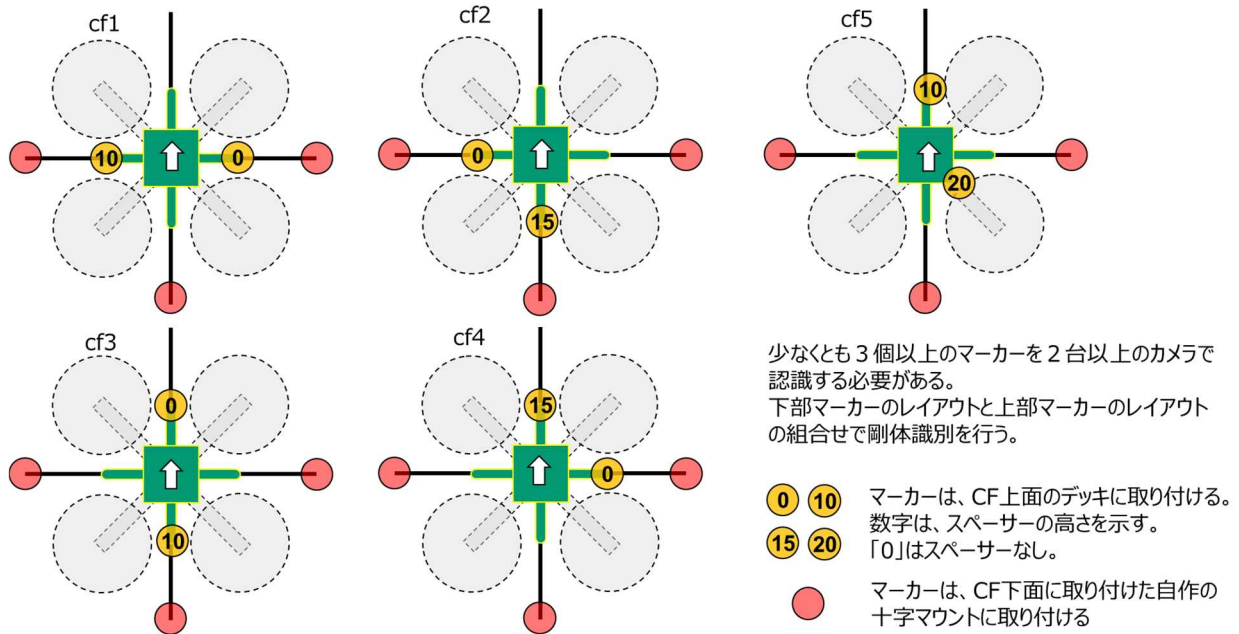


図 3.6.5-9 バージョン1設計マーカ-配置図

表 3.6.5-1 下部マーカーマウント重量設計

設計Ver.1.0				
種類	単位質量	測定個数	質量	
機体	31.1	1	31.11	
下部マーカーデッキ	4.08	1	4.08	
マーカー	Φ12.7	0.98	3	2.94
	Φ9.5	0.41	2	0.82
設計離陸重量	-	-	39.0	
ペイロード残	-	-	3.0	

機体諸元		
重量カテゴリー	カタログ値	単位
最大離陸重量	42.0	g
離陸重量	27.0	g
ペイロード	15.0	g

機体重量・下部マーカーデッキ除く (g)						
No.	空虚	バッテリー追加	上部マウント追加	マーカー数	マーカー質量	補正
1	-	-	-	-	-	-
2	20.5	28.6	31	1	0.41	30.59
3	20.6	28.5	31.7	2	0.41	30.88
4	21	29.2	32.3	2	0.41	31.48
5	20.7	28.9	32	2	0.41	31.18
6	20.7	28.9	32	2	0.41	31.18
7	20.6	28.6	30.8	0	0.41	30.8
8	20.6	28.7	31	0	0.41	31
9	20.9	29	31.3	0	0.41	31.3
10	20.9	28.9	31.2	0	0.41	31.2
11	20.9	29.3	31.5	0	0.41	31.5
12	20.7	28.7	30.9	0	0.41	30.9
13	21	29	31.2	0	0.41	31.2
14	20.9	29	31.2	0	0.41	31.2
15	20.9	29	31.2	0	0.41	31.2
16	20.8	29.1	31.3	0	0.41	31.3
17	20.7	28.9	31.2	0	0.41	31.2
18	20.7	29.1	31.3	0	0.41	31.3
19	20.7	28.9	31.2	0	0.41	31.2
20	-	-	-	-	-	-
21	20.6	28.8	30.5	0	0.41	30.5
22	20.8	29.1	32	2	0.41	31.18
平均	20.76	28.91				31.1

下部マーカーデッキ			
	No.	測定質量	平均
(1-5)	1	3.3	3.32
	2	3.3	
	3	3.2	
	4	3.5	
	5	3.3	
	B	3.3	
(6-10)	6	3.9	3.80
	7	3.8	
	8	3.7	
	9	3.8	
	10	3.9	
	C	3.7	
(11-15)	11	3.8	3.60
	12	3.8	
	13	3.6	
	14	3.5	
	15	3.5	
	A	3.4	
(16-20)	16	4.1	4.08
	17	4	
	18	4	
	19	4	
	20	4.2	
	D	4.2	

その他部品				
種類		測定個数	測定質量	単品質量
マーカー	Φ12.7	10	9.8	0.98
	Φ9.5	20	8.2	0.41
バッテリー		10	80.3	8.03
ネジ	6	20	3.7	0.19
	8	20	4.4	0.22
	10	19	5.2	0.27
	12	20	6.3	0.32
	15	10	3.9	0.39
	20	10	4.9	0.49
バッテリーホルダ	カタログ	0.4	0.40	
マーカーデッキ	カタログ	1.6	1.60	

カーボンパイプ				
パイプ	外径	内径	長さ	質量
実測	2.5	1.5	1000	4.9
D2.5	2.5	1.5	280	1.37
	2.5	1.5	240	1.18
	2.5	1.5	140	0.69
	2.5	1.5	120	0.59
	2	1	280	1.03
D2	2	1	240	0.88
	2	1	140	0.51
	2	1	120	0.44
	1.5	0	280	0.77
D1.5	1.5	0	240	0.66
	1.5	0	140	0.39
	1.5	0	120	0.33

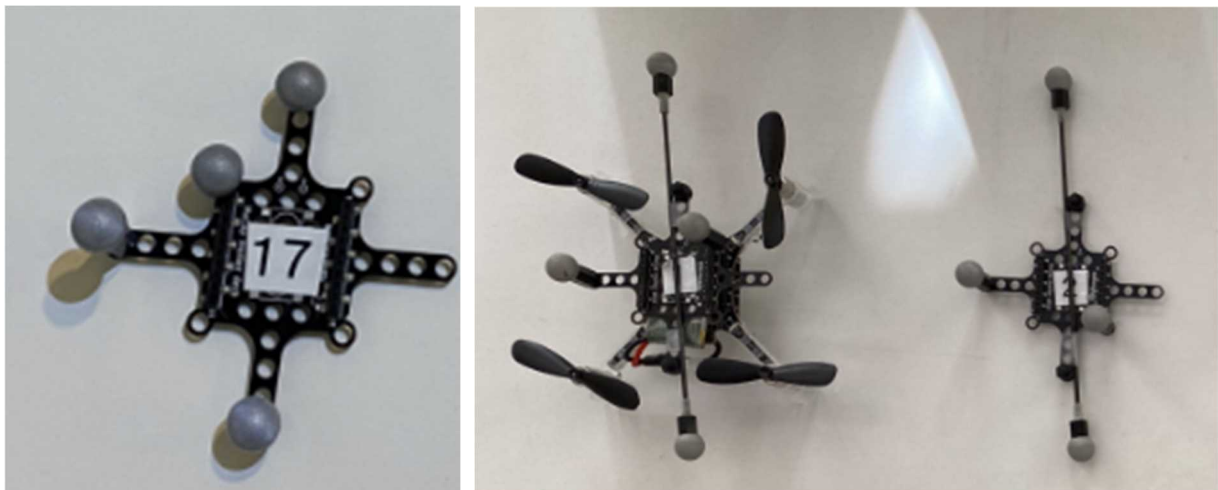
3.6.5.4. マーカーマウント設計バージョン2

軽量化検討を下表に示す候補について行った。重量設計の結果を下表に示す。その結果、マーカーをφ12からφ9.5に減らすことが最も効率よく軽量化できることが分かった。下部マウントを無くすことも軽量化に効果的であるが、上部マウントのみでは、個体識別できないことが分かった(案1)。

検討の結果、上部マウントに一文字のパイプを直付けすることで、軽量化と個体識別ができるマウント設計ができた(案6)。

表 3.6.5-2 バージョン2 候補と採用案

	上部マウント	下部マウント	余裕重量	結果
Ver. 1	φ9.5x2	φ12x3, 十字φ2mm	3.8g	NG 重量大
案1	φ9.5x5	なし	8.8g	識別不能
案2	φ9.5x2	φ9.5x3, 十字φ2mm	5.9g	-
案3	φ9.5x2	φ9.5x3, 十字φ1.5mm	6.4g	-
案4	φ9.5x2	φ9.5x2, 一文字φ2mm	6.9g	-
案5	φ9.5x2	φ9.5x2, 一文字1.5mm	7.1g	-
案6 Ver. 2	φ9.5x2 + φ9.5x2 一文字	なし	8.1g	OK



案1

案6 (Ver. 2 採用)

図 3.6.5-10 バージョン2の案1と案6

表 3.6.5-3 バージョン2案1～6の重量設計

	単位質量	Ver1.0			案1				案2				案3					
		個数	質量	小計	個数	質量	小計	軽量化	個数	質量	小計	軽量化	個数	質量	小計	軽量化		
機体(バッテリー・上部デッキ込み)	31.1	1	31.1	31.1	1	31.1	31.1	0.0	1	31.1	31.1	0.0	1	31.1	31.1	0.0		
マーカー	Φ12.7	0.98	3	2.94	3.76	0	0.00	2.05	1.71	0	0.00	2.05	1.71	0	0.00	2.05	1.71	
	Φ9.5	0.41	2	0.82		5	2.05		5	2.05	5		2.05					
下部デッキ	ネジ	L6	0.19	3	0.56	0.56		0.00	0.00	0.56	3	0.56	0.56	0.00	3	0.56	0.56	0.00
		L15	0.39		0.00			0.00			0.00			0.00				
	パイプ	D2.5-140	0.69		0.00	1.18		0.00	0.00	1.18		0.00	1.03	0.15		0.00	0.77	0.40
		D2.5-120	0.59	2	1.18			0.00			0.00							
		D2.0-140	0.51		0.00			0.00		2	1.03			0.00				
		D2.0-120	0.44		0.00			0.00			0.00			0.00				
		D1.5-140	0.39		0.00			0.00			0.00	2		0.77				
	D1.5-120	0.33		0.00		0.00		0.00		0.00								
	バルサ	t2.5	1.17	1	1.17	1.17		0.00	0.00	1.17		0.00	0.94	0.23		0.00	0.70	0.47
		t2.0	0.94		0.00			0.00		1	0.94			0.00				
		t1.5	0.70		0.00			0.00			0.00	1		0.70				
	Bデッキ	0.40	1	0.40	0.40		0.00	0.00	0.40	1	0.40	0.40	0.00	1	0.40	0.40	0.00	
設計離陸重量			38.2	38.2		33.2	33.2	5.0		36.1	36.1	2.1		35.6	35.6	2.6		
ペイロード残			3.8			8.8				5.9				6.4				
形態	下部デッキ			十字		無し				十字				十字				
	パイプ外径			Φ2.5		無し				Φ2				Φ1.5				
	マーカー			Φ12.7x3+Φ9.5x2		Φ9.5x5				Φ9.5x5				Φ9.5x5				
						最軽量												

	単位質量	案4				案5				設計					
		個数	質量	小計	軽量化	個数	質量	小計	軽量化	個数	質量	小計	軽量化		
機体(バッテリー・上部デッキ込み)	31.1	1	31.1	31.1	0.0	1	31.1	31.1	0.0	1	31.1	31.1	0.0		
マーカー	Φ12.7	0.98	0	0.00	2.05	1.71	0	0.00	2.05	1.71	0	0.00	1.64	2.12	
	Φ9.5	0.41	5	2.05		5	2.05	4		1.64					
下部デッキ	ネジ	L6	0.19	3	0.56	0.56	0.00	3	0.56	0.56	0.00	2	0.37	0.37	0.19
		L15	0.39		0.00			0.00			0.00				
	パイプ	D2.5-140	0.69		0.00	0.51	0.66		0.00	0.39	0.79		0.00	0.33	0.85
		D2.5-120	0.59		0.00			0.00			0.00				
		D2.0-140	0.51	1	0.51			0.00			0.00				
		D2.0-120	0.44		0.00			0.00			0.00				
		D1.5-140	0.39		0.00			0.00	1		0.39		0.00		
	D1.5-120	0.33		0.00		0.00		0.00	1	0.33					
	バルサ	t2.5	1.17		0.00	0.47	0.70		0.00	0.35	0.82		0.00	0.00	1.17
		t2.0	0.94	0.5	0.47			0.00			0.00				
		t1.5	0.70		0.00			0.00	0.5		0.35		0.00		
	Bデッキ	0.40	1	0.40	0.40	0.00	1	0.40	0.40	0.00	1	0.40	0.40	0.00	
設計離陸重量			35.1	35.1	3.1		34.9	34.9	3.3		33.9	33.9	4.3		
ペイロード残			6.9			7.1					8.1				
形態	下部デッキ			一文字		一文字				一文字					
	パイプ外径			Φ2		Φ1.5				Φ1.5					
	マーカー			Φ9.5x5		Φ9.5x5				Φ9.5x5					

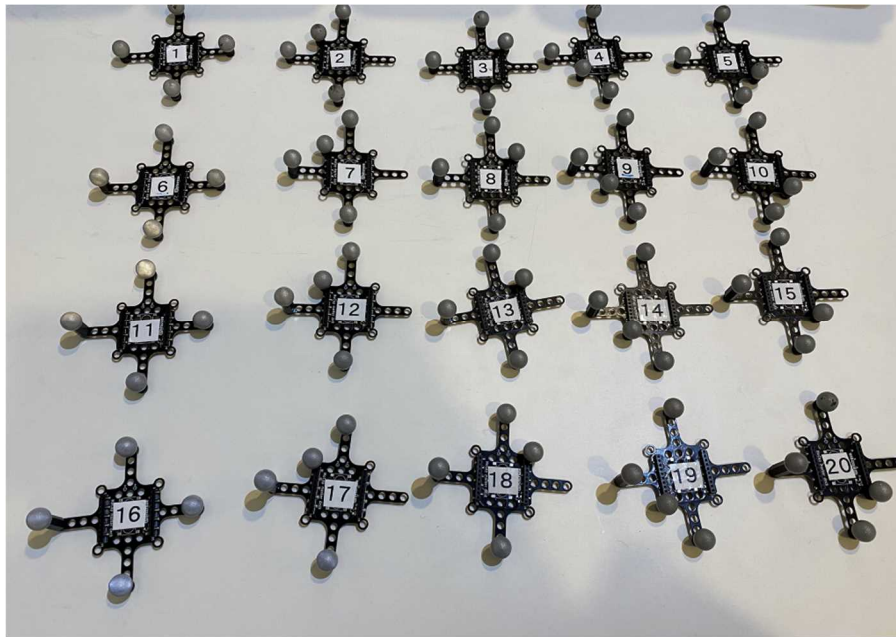


図 3.6.5-11 バージョン2 案1レイアウト



図 2.3.3.3.2-3 バージョン2 案6レイアウト

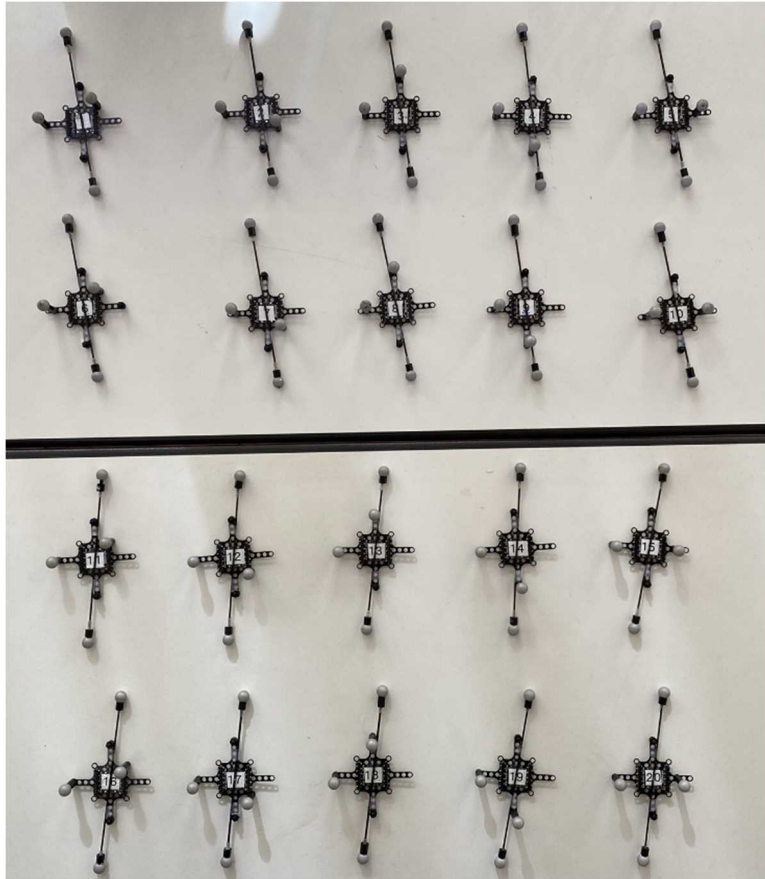


図 2.3.3.3.2-4 バージョン2 案6 レイアウト

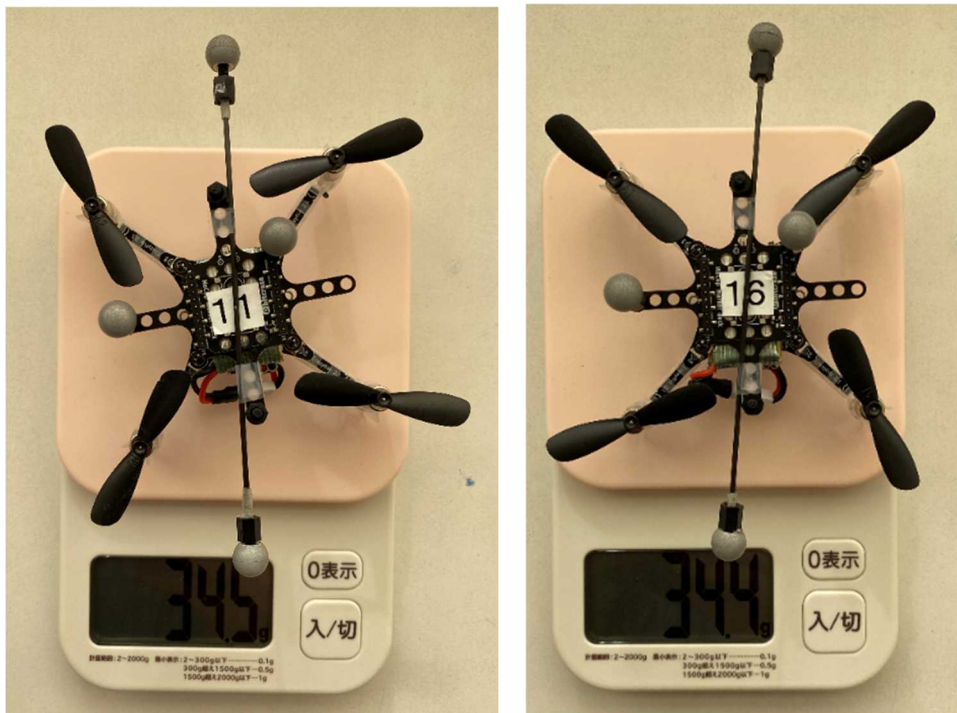


図 2.3.3.3.2-3 バージョン2 案6 重量測定

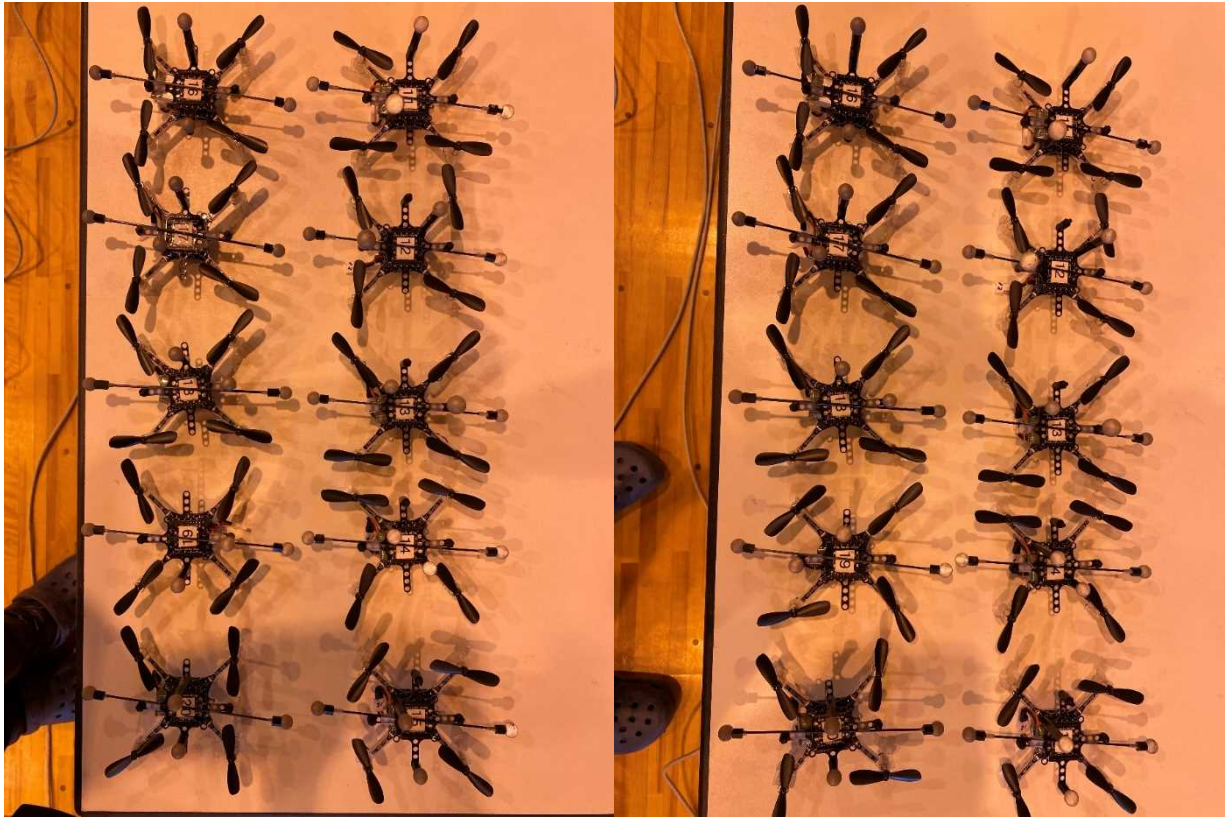


図 3.6.5-12 実験用 UAV への搭載

3.6.6. 測位用マーカークレイアウト設計

光学式測位システムによる機体の測位は、少なくとも3個以上のマーカークレイアウトを2台以上のカメラで認識する必要がある。また、機体の識別には、マーカークレイアウトが各機体で別々である必要がある。また、レイアウトの設計は、マーカークレイアウトを取り付けるマーカーマウントに制約を受ける。

本項では、マーカーマウントの制約下で、測位性能と個体識別を満足するようにマーカークレイアウトの設計を行った成果を示す。

3.6.6.1. マーカークレイアウトの設計方針

マーカーマウントは、市販部分のマウント中央部とマウントに増設したカーボンパイプ部で構成されている。マーカークレイアウトは、この構成の制約下で設計する必要がある。

マーカークレイアウトの設計は、ベースパターンと高さパターンの組合せで行う。ベースパターンは、カーボンパイプ部のマーカークレイアウトで平面的に識別する。高さパターンは、中央部のマーカークレイアウトの平面配置と高さ配置で識別する。

ベースパターンを基本に、中央部のマーカークレイアウトの平面的な配置と高さ方向の配置をユニークにして、剛体認識を行えるようにした。

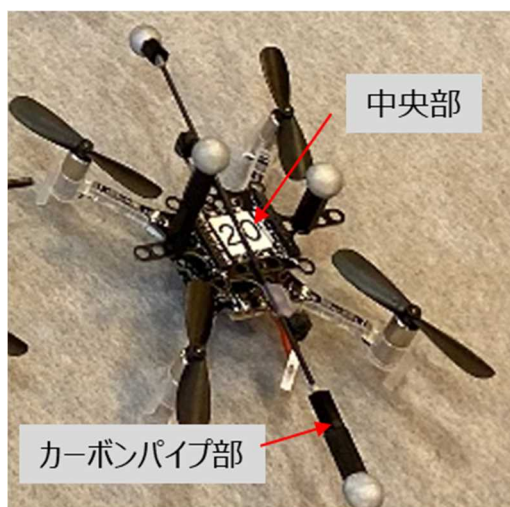


図 3.6.6-1 マーカーマウントの構成

表 3.6.6-1 マーカークレイアウト設計方針概要

マーカーマウント構成	マーカークレイアウト	マーカークレイアウト配置
カーボンパイプ部	ベースパターン	・縦一本、両端に2個 ・十字、縦は両端2個、横は1個配置
中央部	個体識別パターン	・2～3個配置 ・平面、高さ方向で重複させない

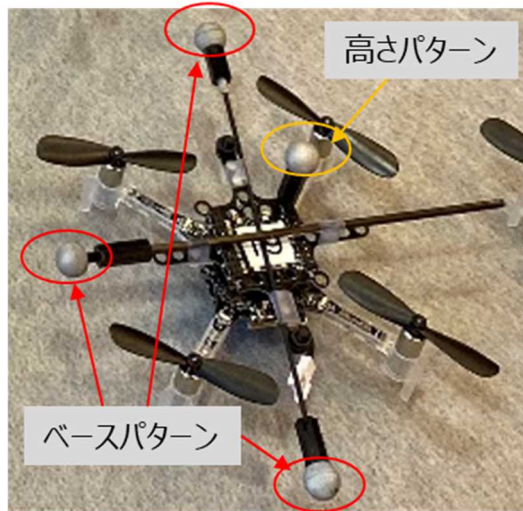


図 3.6.6-2 マーカーレイアウトの構成

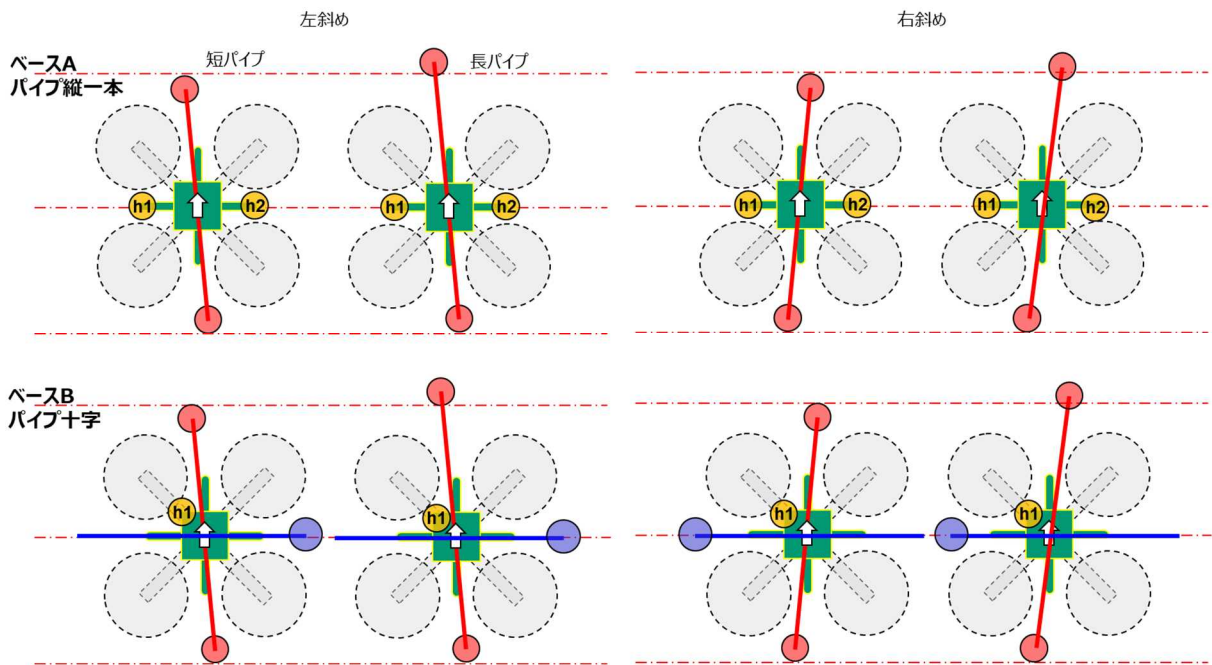


図 3.6.6-3 ベースパターンの構成

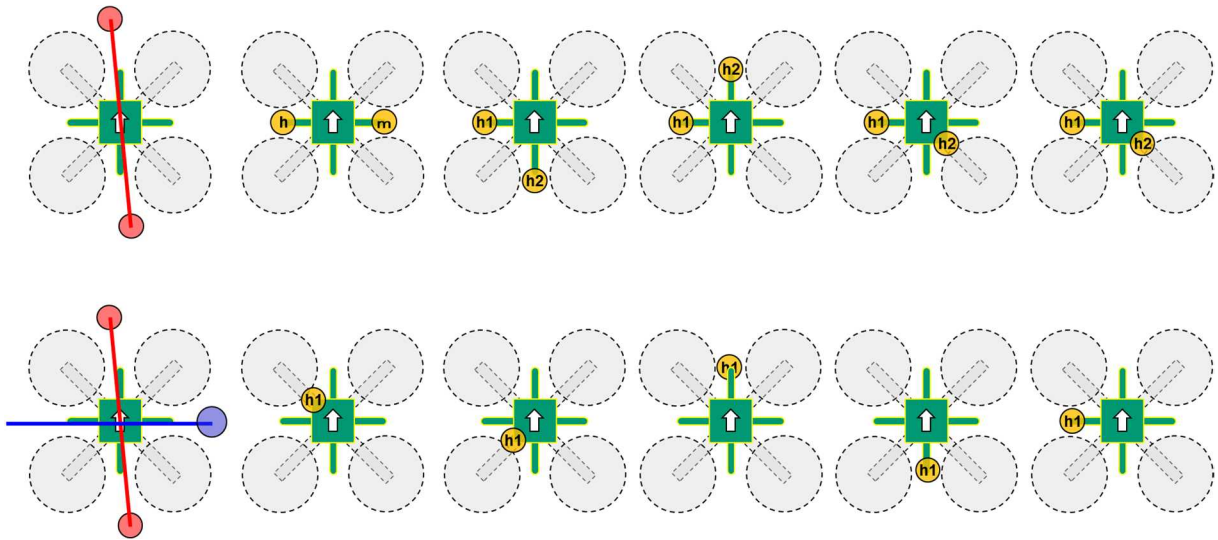


図 3.6.6-4 中央部のマーカー配置 (ベースパターンと組合せて固有レイアウトを設定)

3.6.6.2. マーカーレイアウトの最終形態

マーカーレイアウトの最終形態を以下に示す。本形態は、前項の設計方針を踏まえて検討し、スウォーム飛行テストの結果を受けて修正したものである。

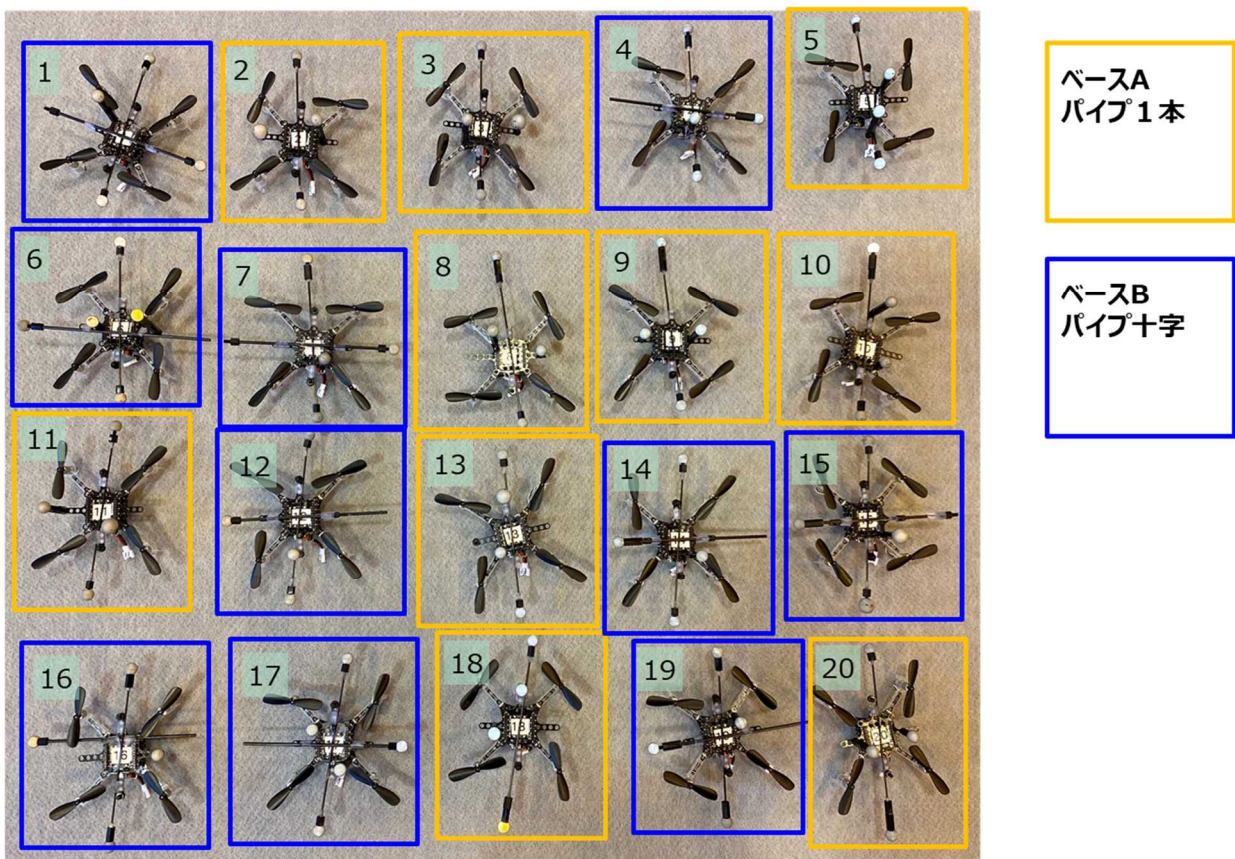


図 3.6.6-5 機体毎のマーカーレイアウト

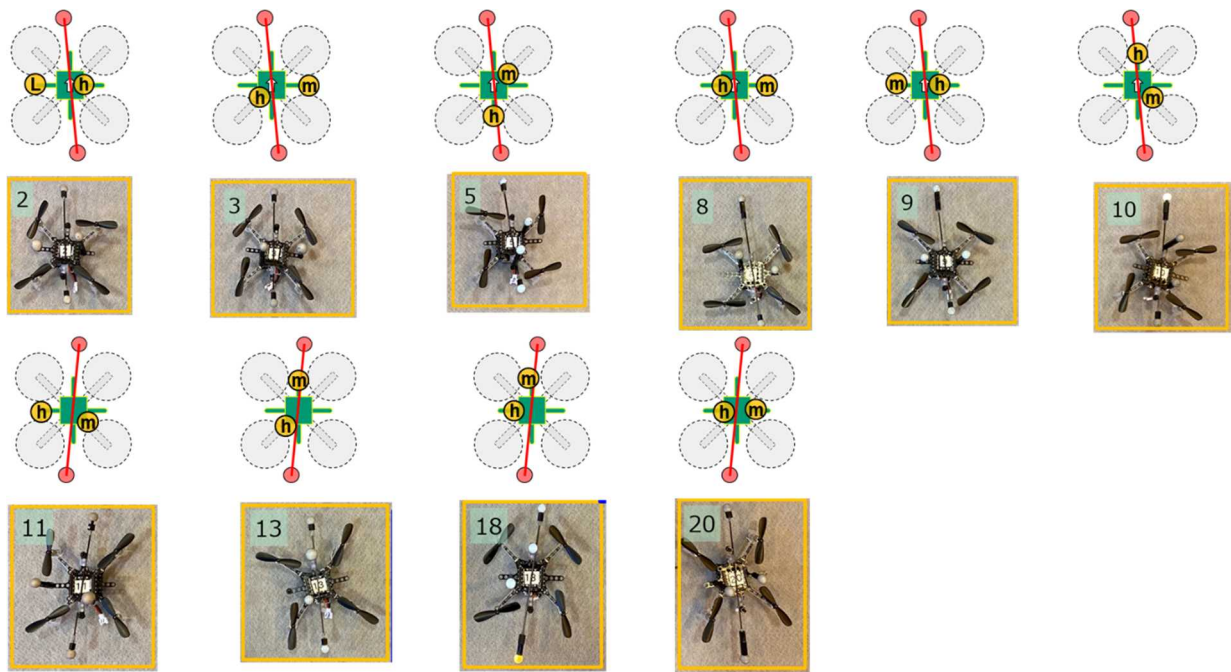


図 3.6.6-6 ベースパターン縦一文字タイプ

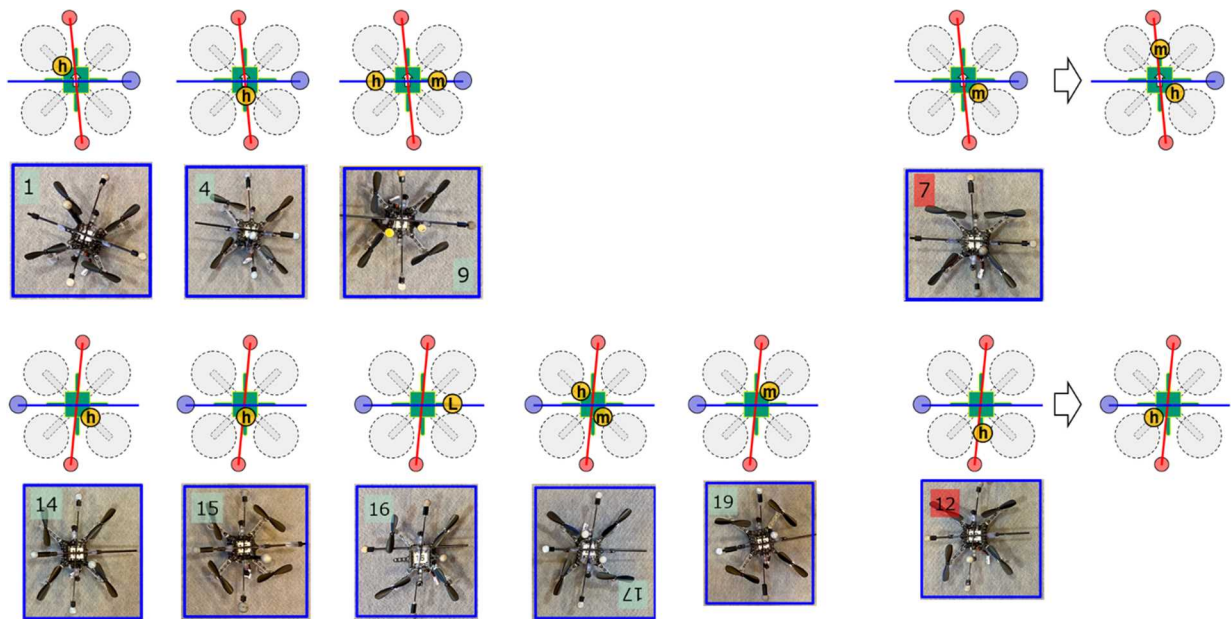


図 3.6.6-7 ベースパターン十字タイプ

3.6.7. 測位用カメラのレイアウト設計

光学式測位システムによる機体の測位は、少なくとも3個以上のマーカーを2台以上のカメラで認識する必要がある。事前の設計、予備試験、実環境試験の結果、以下のカメラレイアウトとなった。本項では、カメラの配置設計について検討内容をまとめる。

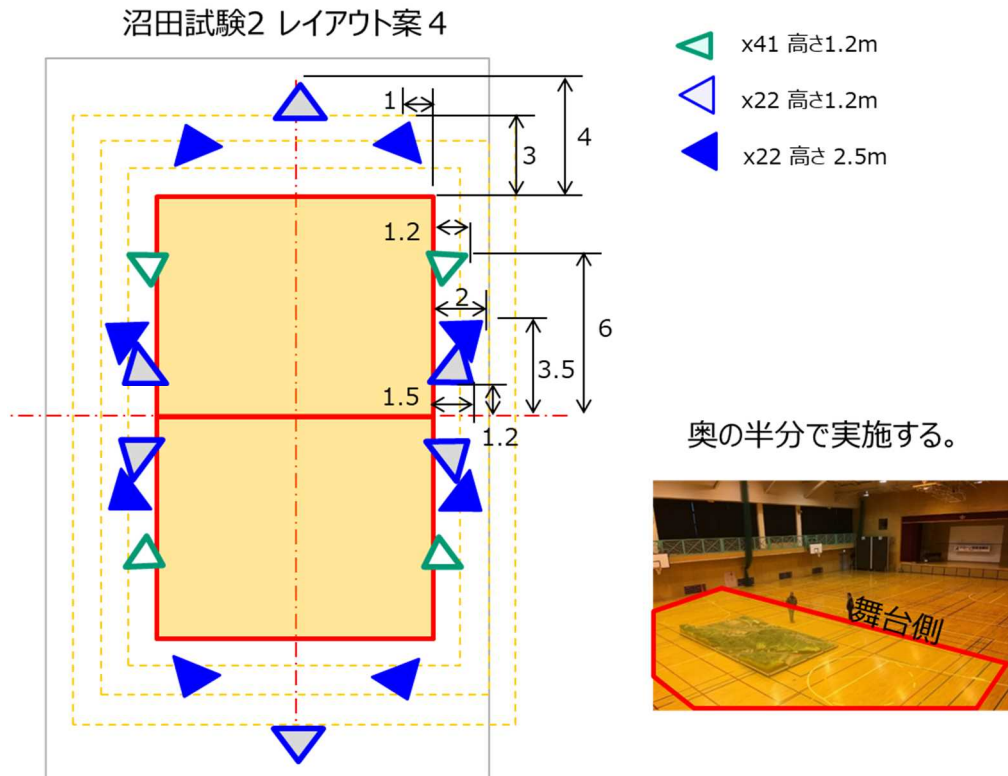


図 3.6.7-1 実環境試験でのカメラレイアウト

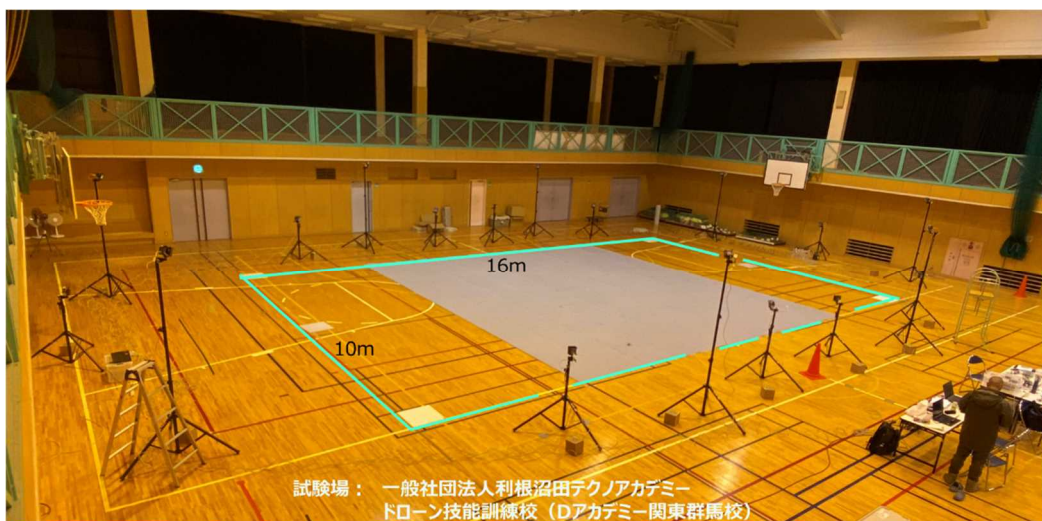


図 3.6.7-2 実環境試験でのカメラレイアウト

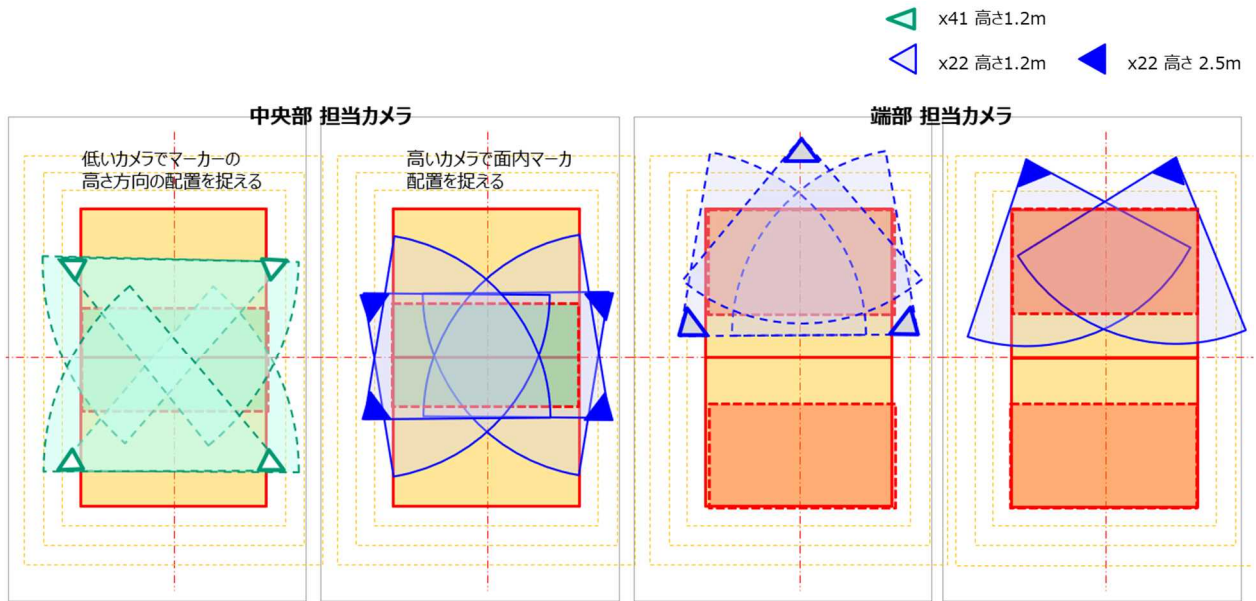


図 3.6.7-3 カメラの担当範囲

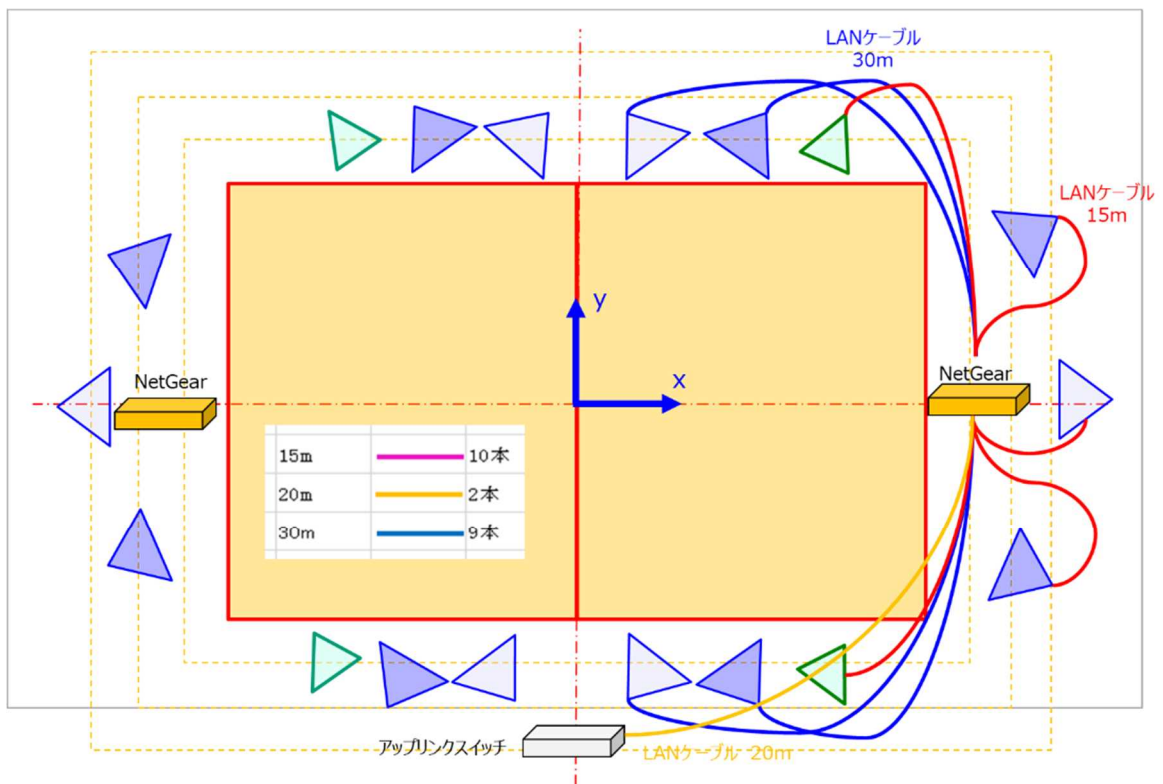


図 3.6.7-4 カメラ・測位用 PC 接続 LAN 配線

3.6.7.1. 初期設計(R2FY)

スウォーム飛行試験エリア(図 3.6.7-5 参照)をカバーするカメラレイアウトの初期設計案を図 3.6.7-6 に示す。本レイアウトは、測位システムの提供元であるスパイス社から提案を受けた。

しかし、測位システムは高価な機材であり、コスト削減が望まれる。

そこで、初期設計案をベースに、測位性能を保ったままコストを抑えるためのカメラレイアウト・構成の検討を行った。その結果を図 3.6.7-7 スウォーム飛行試験 カメラレイアウト検討に示す。測位距離が長く高価なカメラ(x41)2台を、測位距離が短いが高画角が広い安価なカメラ(x22)に変更しても飛行エリア内をカバーできることが分かった。また、測位システムはR2年度とR3年度と年度を分けて調達することとした。R2年度に実施する予備飛行試験のカメラレイアウトも併せて示す(図 3.6.7-8 参照)。

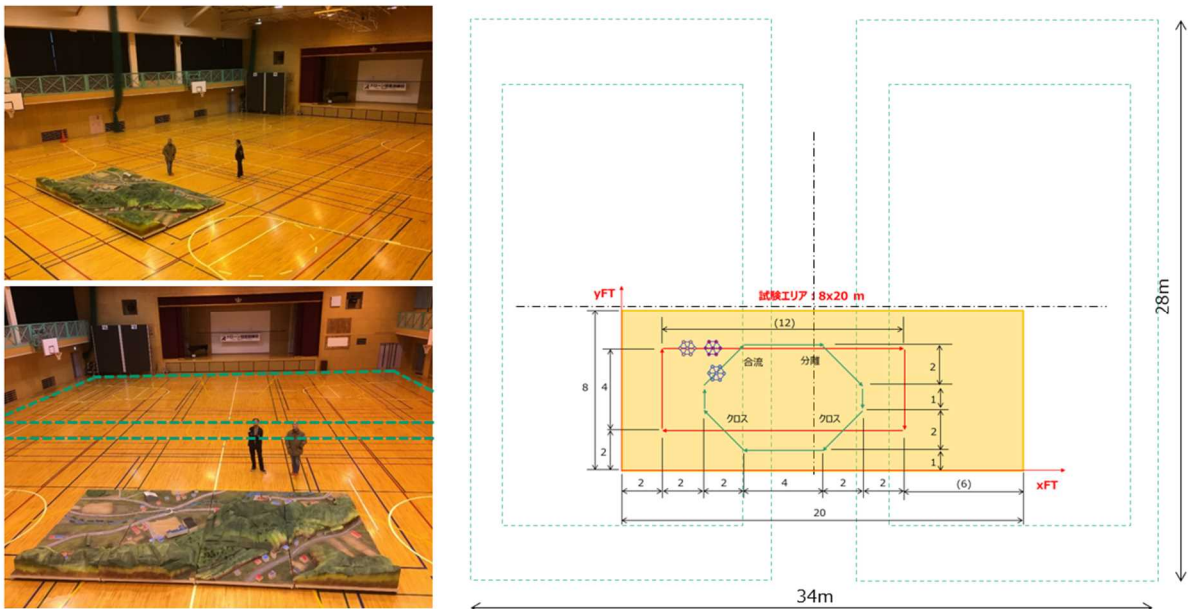


図 3.6.7-5 飛行試験エリア

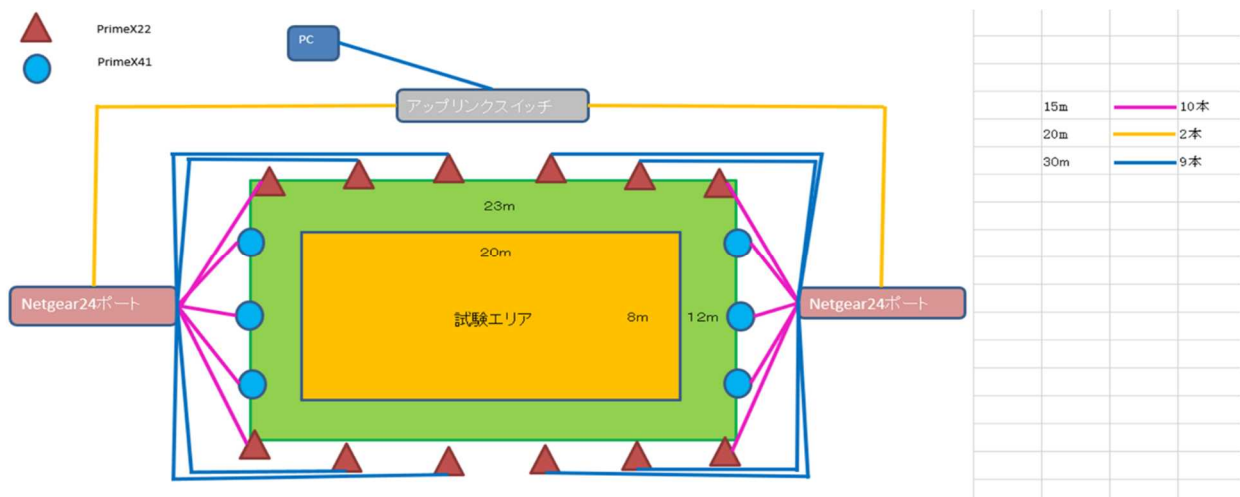
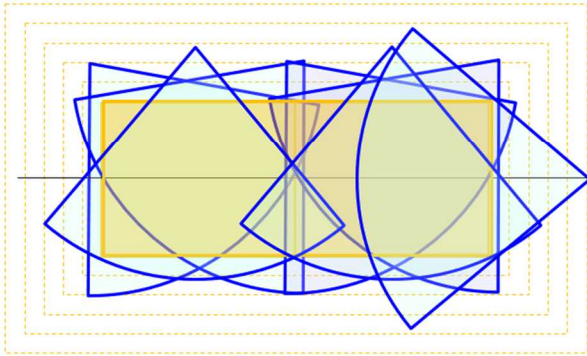


図 3.6.7-6 測位システム カメラ・配線レイアウトの初期設計案

Prime x22
12m - 79°
12台(上半分7台を図示)



Prime x41
15m - 51°
4台(左半分2台を図示)

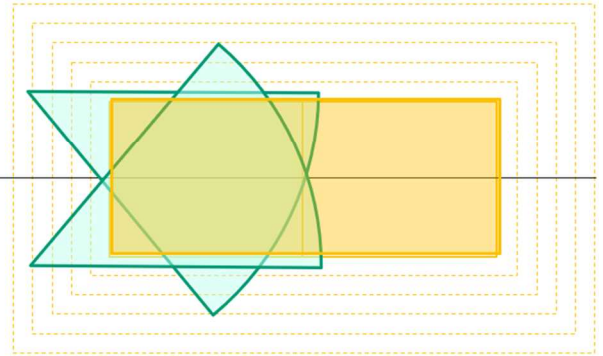
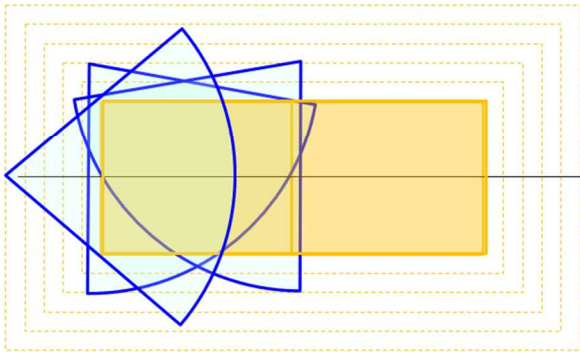


図 3.6.7-7 スウォーム飛行試験 カメラレイアウト検討

Prime x22
12m - 79°
5台(上半分2台+側面1台を図示)



Prime x41
15m - 51°
左半分2台

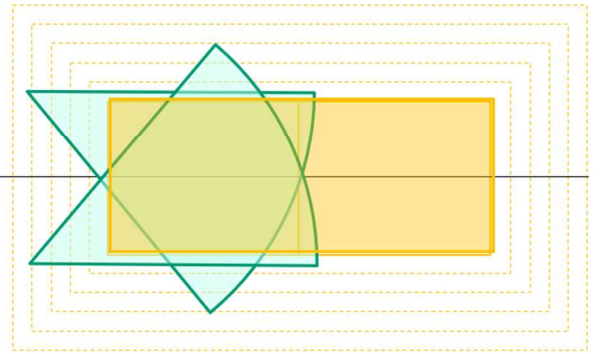


図 3.6.7-8 予備飛行試験 カメラレイアウト

3.6.7.2. R2 測位システムの動作確認試験

以下の要領にて光学式モーションキャプチャ測位システムの動作確認を行った。

その結果、測位システムの設置を行い、手順を確認することができた。また、測位システム性能の確認を、5機分について、マーカーレイアウトを模擬したモデルを用いた。

所期の目的を達成することが出来た。試験エリアは、体育館の半分の面積を占め、想像以上に広く感じる。操縦用アンテナの配置は要検討である。

出張先 : 沼田試験場

一般社団法人利根沼田テクノアカデミー

ドローン技能訓練校 (Dアカデミー関東群馬校)

所在地 : 群馬県沼田市利根町平川 839

出張期間 : 2020年10月29日(木)～11月1日(日)

実施項目 : ①測位システムの設置、手順確認

②ドローン個体識別と測位システムの性能の確認

日程 :

10月29日(木) 移動(東京→沼田)、試験場への機材搬入

10月30日(金) ドローン搭載マーカーホルダー制作、
モーションキャプチャ測位システムの設置と設定

10月31日(土) 技適取得準備ドローン組立、
マーカーレイアウト検証治具製作
モーションキャプチャ測位性能確認

表 3.6.7-1 光学式モーションキャプチャ測位システム動作確認

日程	実施内容
Day1 10/29	<p>レンタカー借用</p> <p>機材積載</p> <p>移動：御茶ノ水オフィスから沼田</p> <p>機材搬入</p> <p>備品管理ラベリング</p>
Day2 10/30	<p>ドローン検品</p> <p>測位システム確認用マーカー搭載ドローン組立 2 機</p> <p>備品管理ラベリング</p> <p>マーカーマウント試作</p> <p>測位システム OptiTrack 設置・設定</p> <p>スパイス社によるトレーニング</p> <p>試験エリアの決定とマーキング</p> <p>カメラレイアウト検討と架台設置とマーキング</p> <p>架台へのカメラ取付</p> <p>LAN ケーブル配線</p> <p>Motion Capture セットアップ</p> <p>マーカーレイアウト剛体認識テスト</p> <p>ドローン組立持ち帰り作業</p>
Day3 10/31	<p>ドローン技適取得準備</p> <p>ラベリング</p> <p>ワイヤレスデザイン宛て梱包</p> <p>測位システム性能確認試験</p> <p>マーカーレイアウト検討と簡易マーカーマウント製作</p> <p>モーションキャプチャ測位システムによる 5 機の剛体認識テスト</p> <p>撤収 2 時間</p>
Day4 11/1	<p>移動：沼田から御茶ノ水オフィス</p> <p>機材搬出</p> <p>レンタカー返却</p>

3.6.7.2.1. 実施項目1：試験エリアの設定

測位システムの試験は、予備飛行試験エリアの面積を想定して行った。

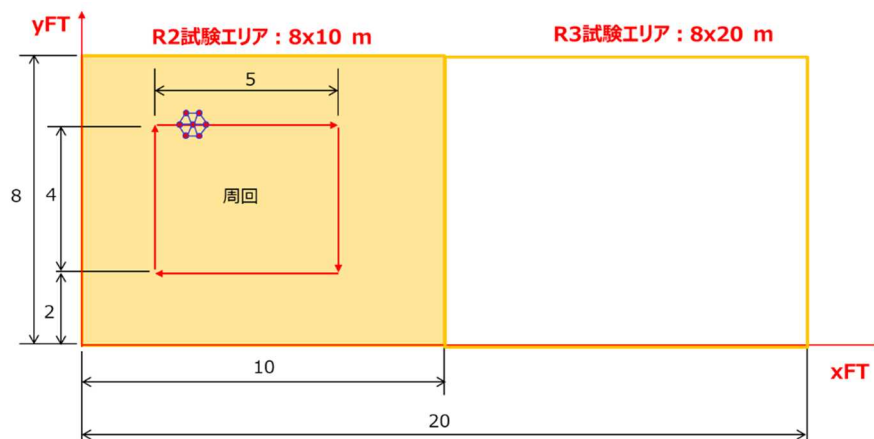


図 3.6.7-9 予備飛行試験エリアの外観

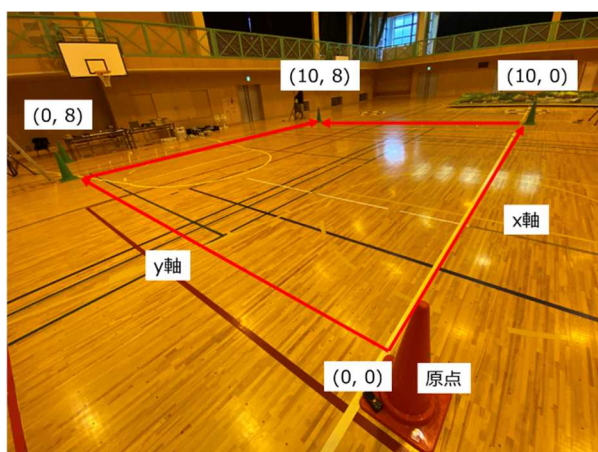
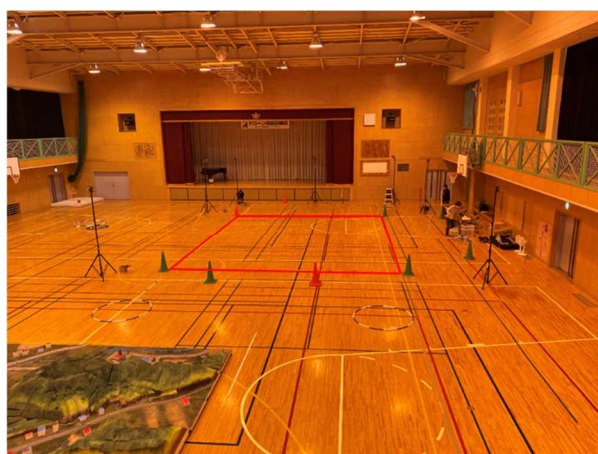


図 3.6.7-10 試験エリア 10m x 8m (赤枠)



図 3.6.7-11 マーキング



図 3.6.7-12 カメラ配置

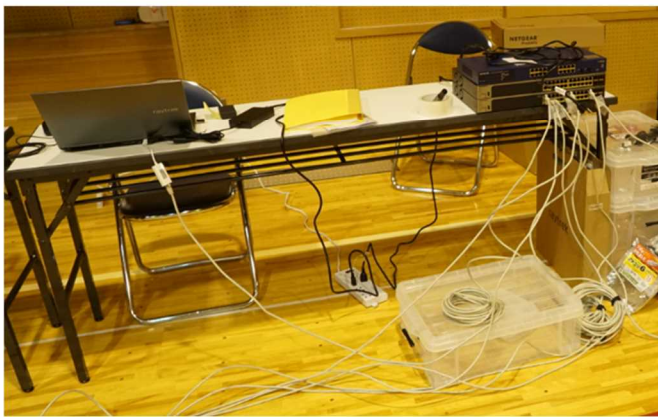


図 3.6.7-13 測位システム制御 PC の配置

3.6.7.2.2. 実施項目2：測位システムの設定

測位システム OptiTrack 設置・設定について、調達先のスパイス社から指導を受け、実施した。

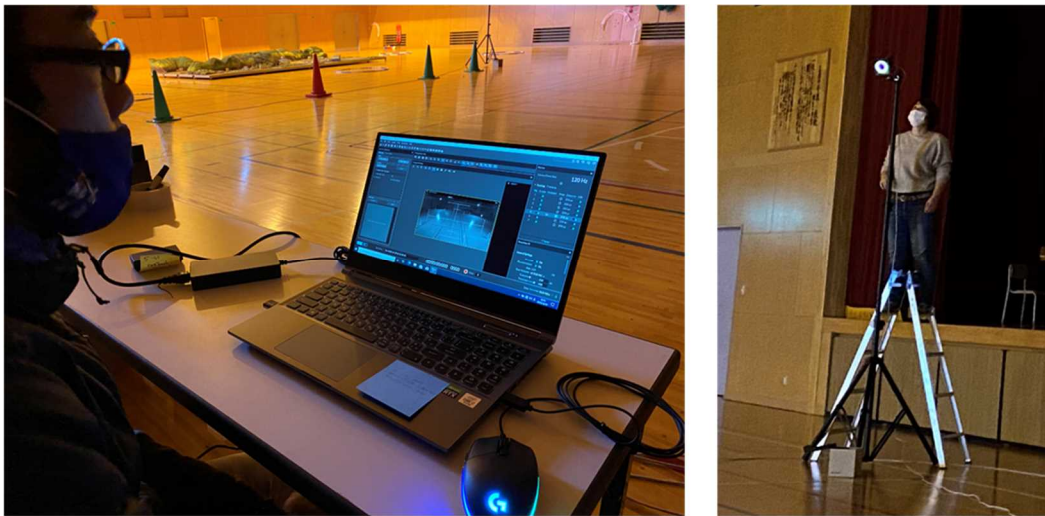


図 3.6.7-14 カメラ画角調整

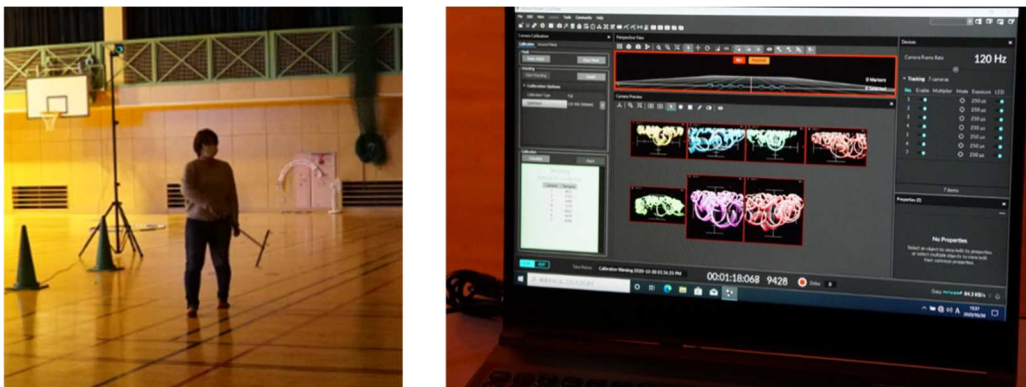


図 3.6.7-15 位置決めキャリブレーション

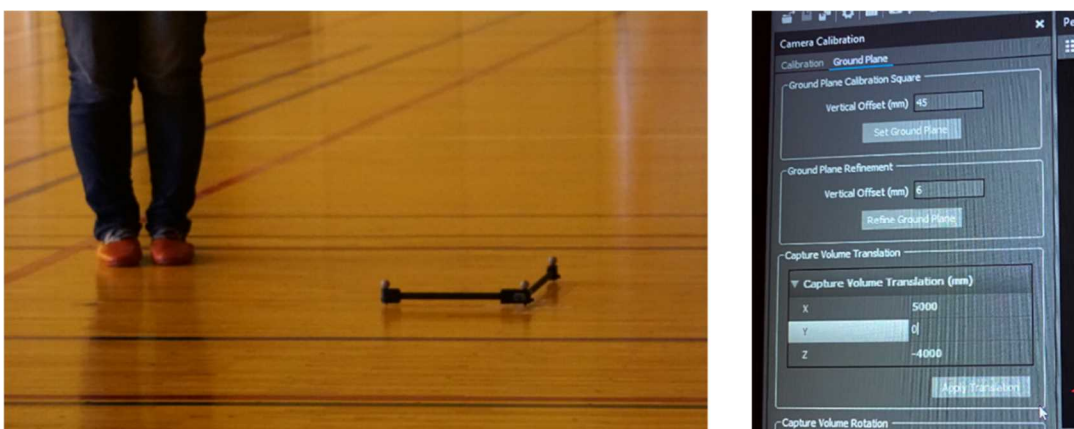


図 3.6.7-16 原点設定

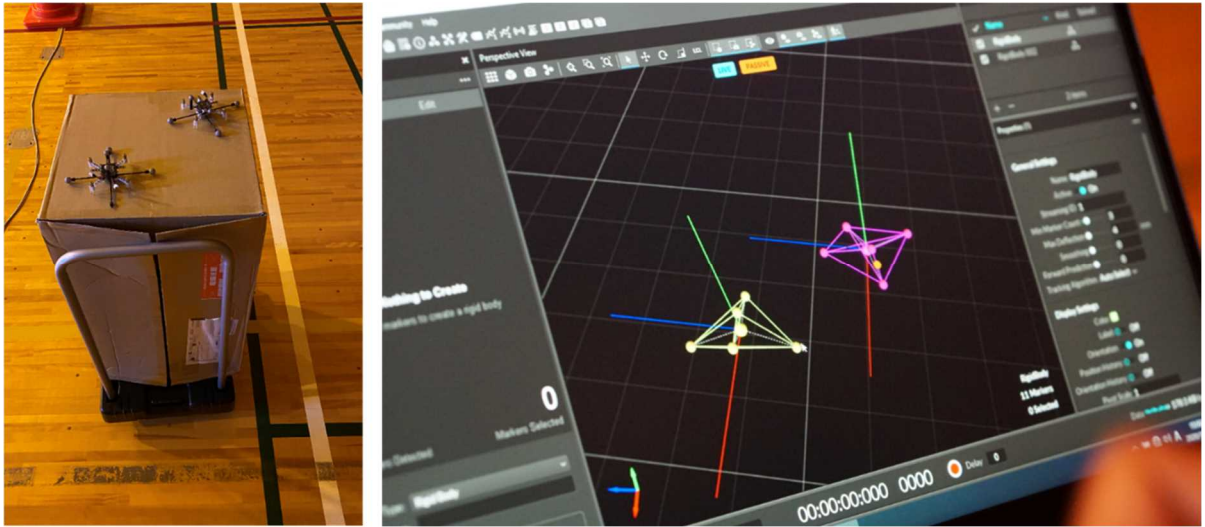


図 3.6.7-17 マーカーグルーピングと剛体認識

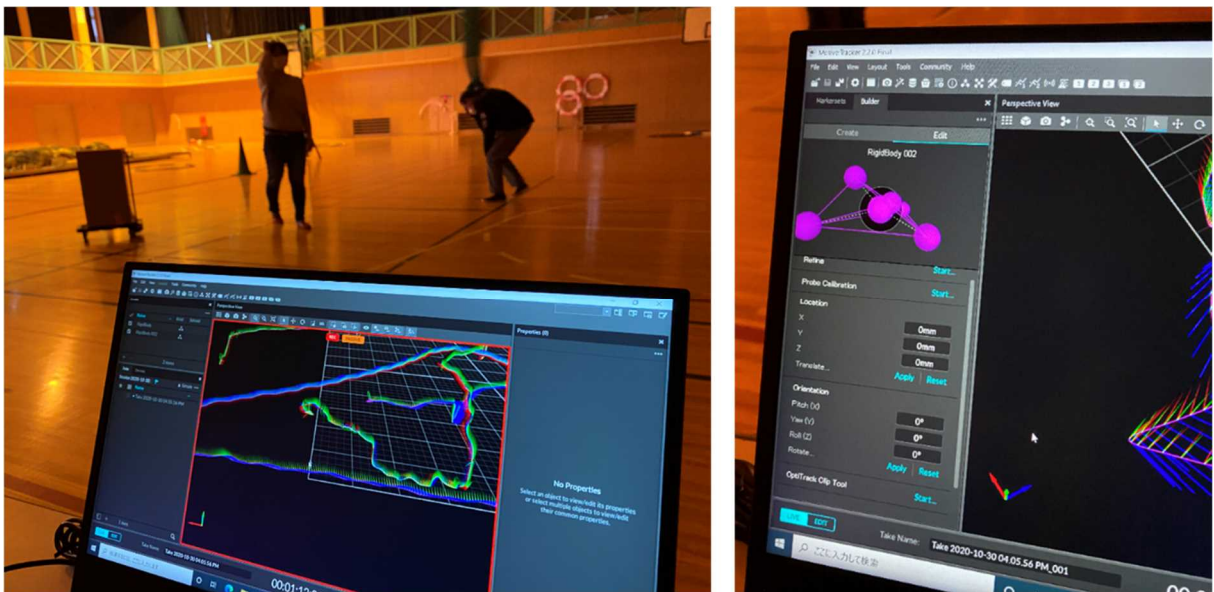


図 3.6.7-18 剛体認識チェック

3.6.7.2.3. 実施項目3：測位性能の確認

マーカレイアウト剛体認識テストを実施した。

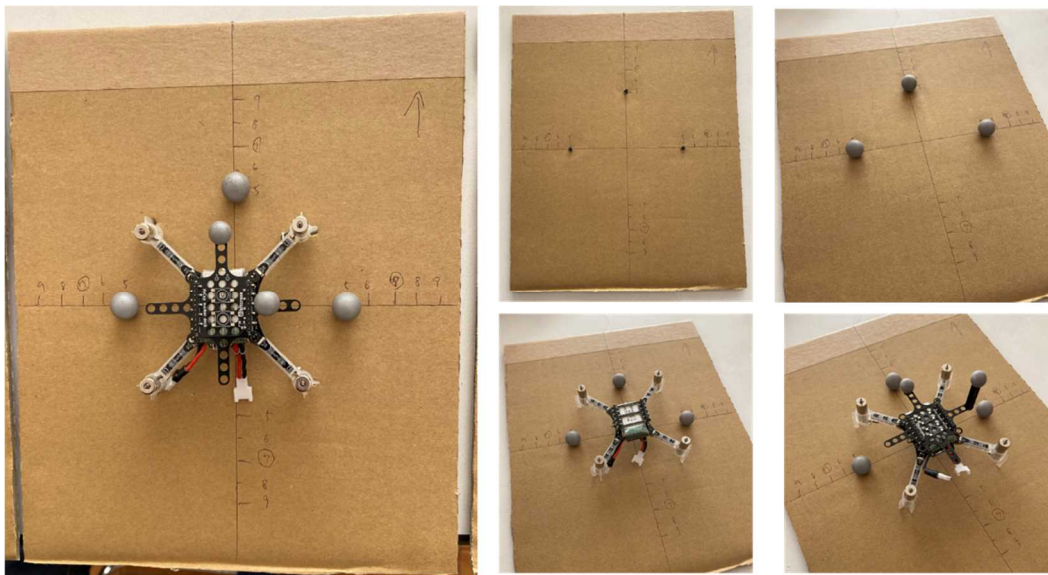
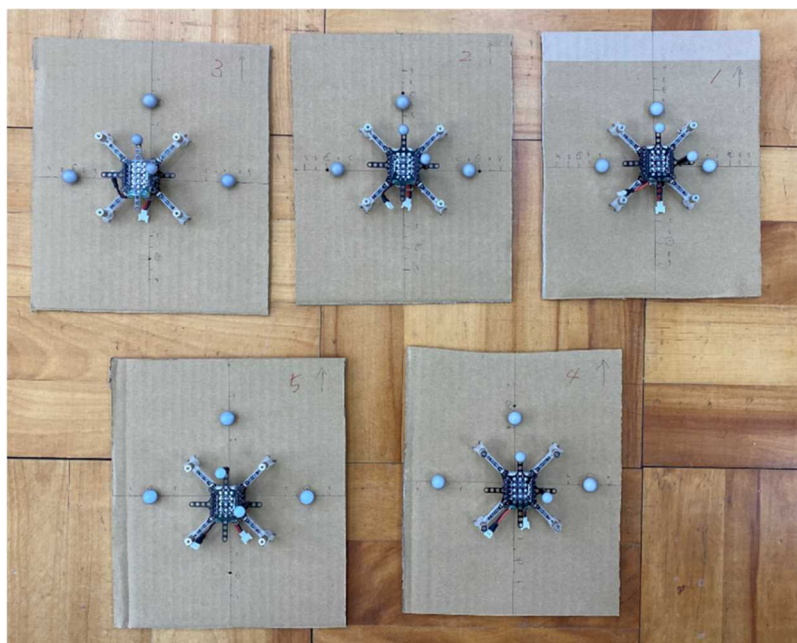


図 3.6.7-19 マーカレイアウト確認用簡易マーカホルダーの制作



No	下部			上部	
	アーム長さ(cm)			スペーサ高さ(mm)	
	前方	右方	左方	前方	右方
1	5	5	5	0	20
2	6	6	6	0	20
3	7	7	7	0	20
4	6	7	7	0	20
5	7	7	7	10	20

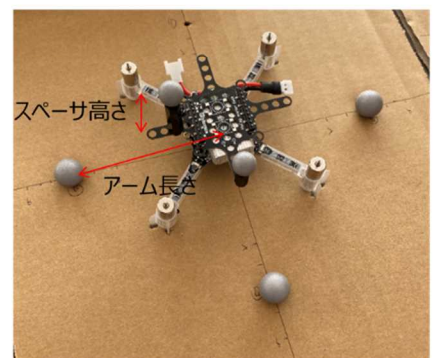


図 3.6.7-20 マーカレイアウト バリエーション 1cm ピッチでレイアウトに変化

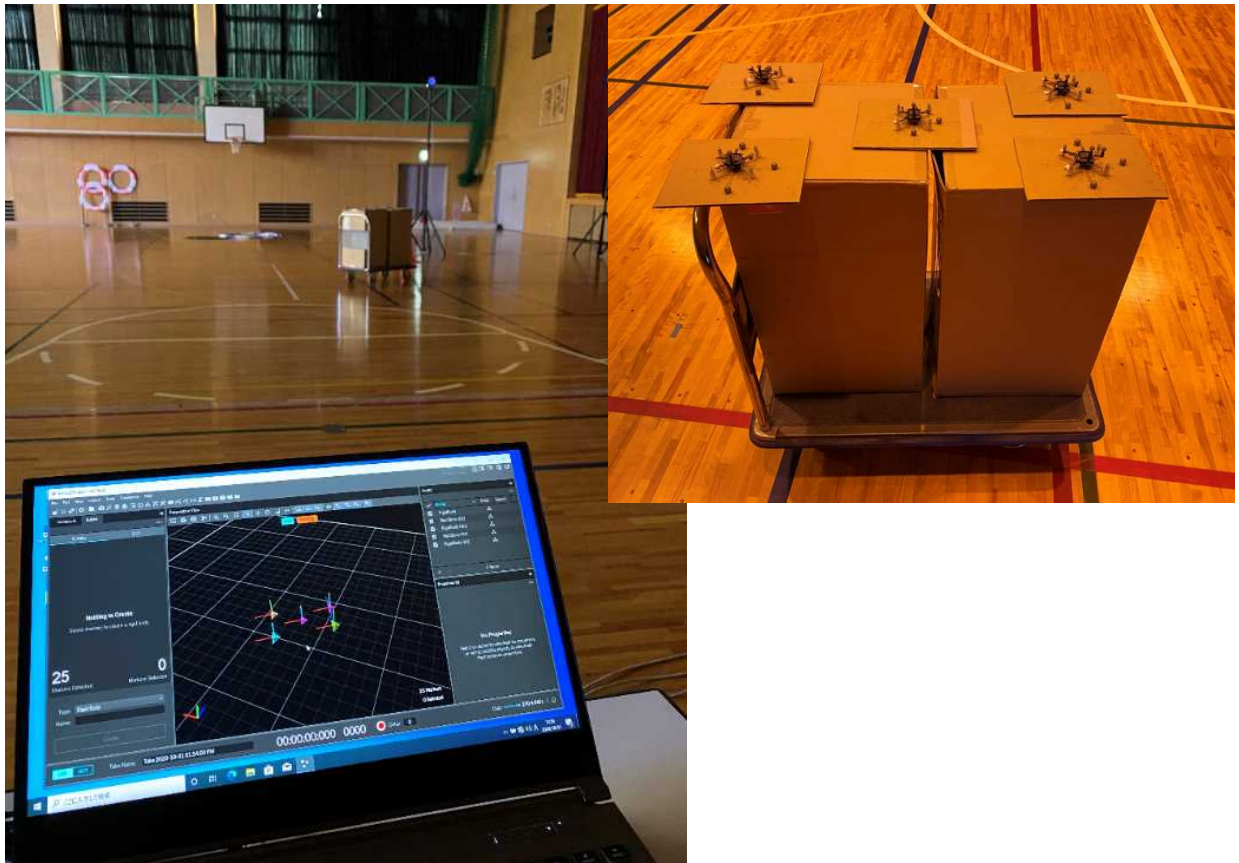


図 3.6.7-21 剛体認識

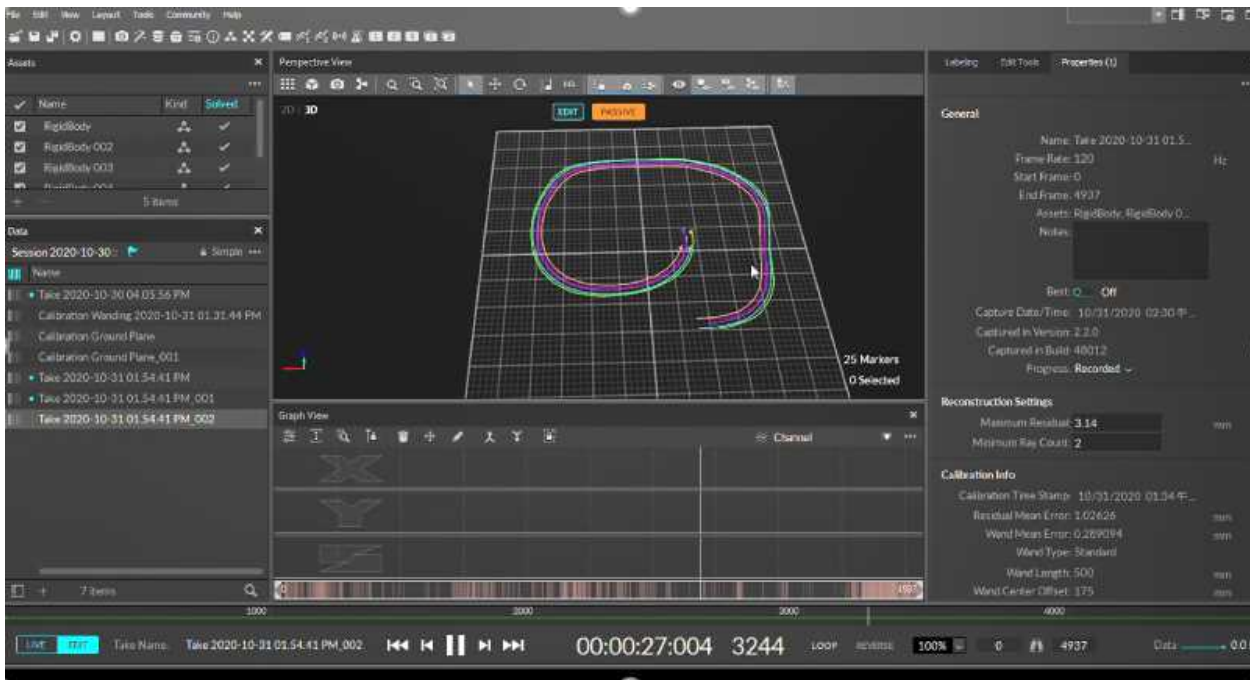
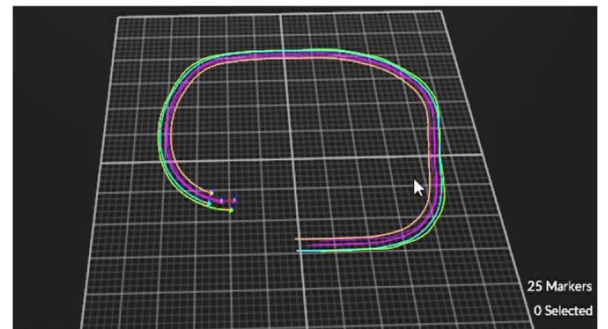
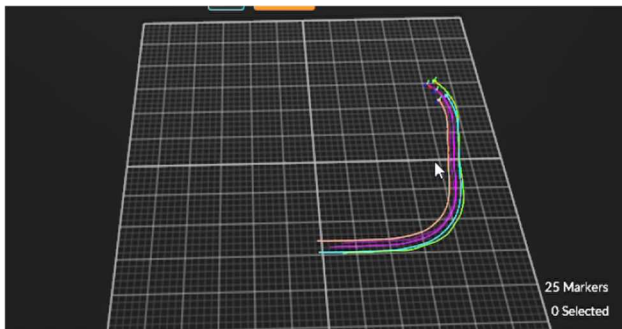
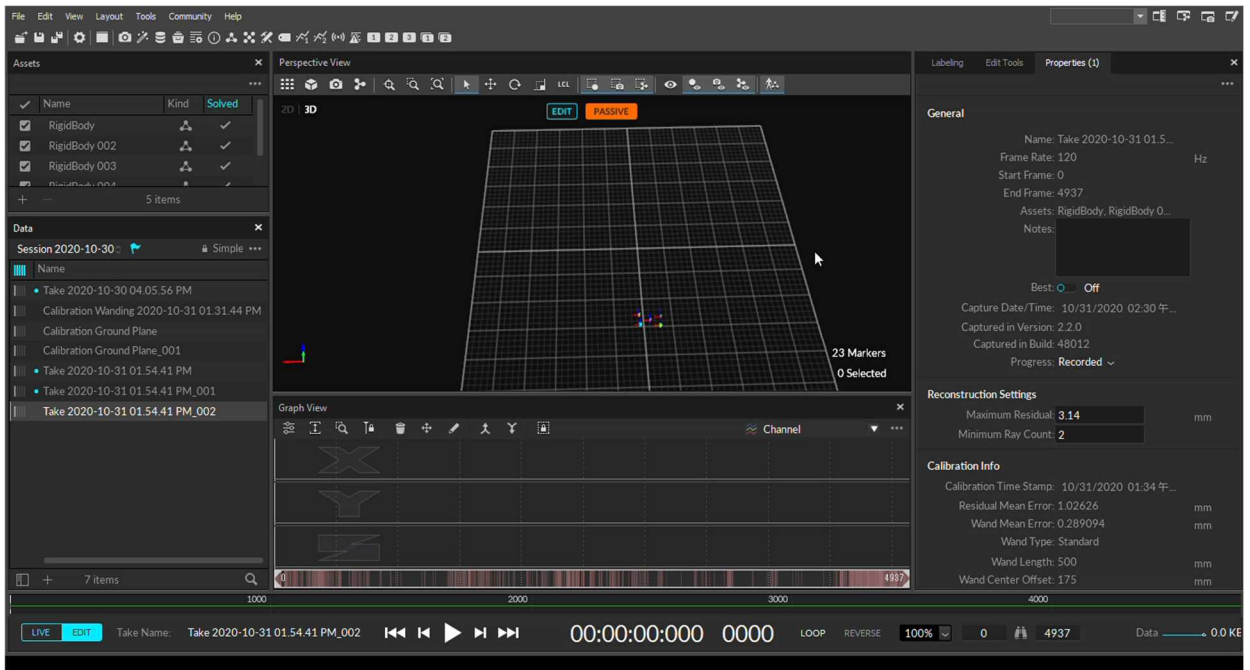


図 3.6.7-22 モーションキャプチャによる測位結果

3.6.7.3. R3 スウォーム飛行エリアの変更に伴う設計変更

R2年度に実施した測位システムの動作確認試験(第3.6.7.2項参照)、及びスウォーム飛行予備試験(第3.7.3項参照)の結果を受けて、R3年度に実施するスウォーム飛行実環境試験のカメラレイアウトを見直した。

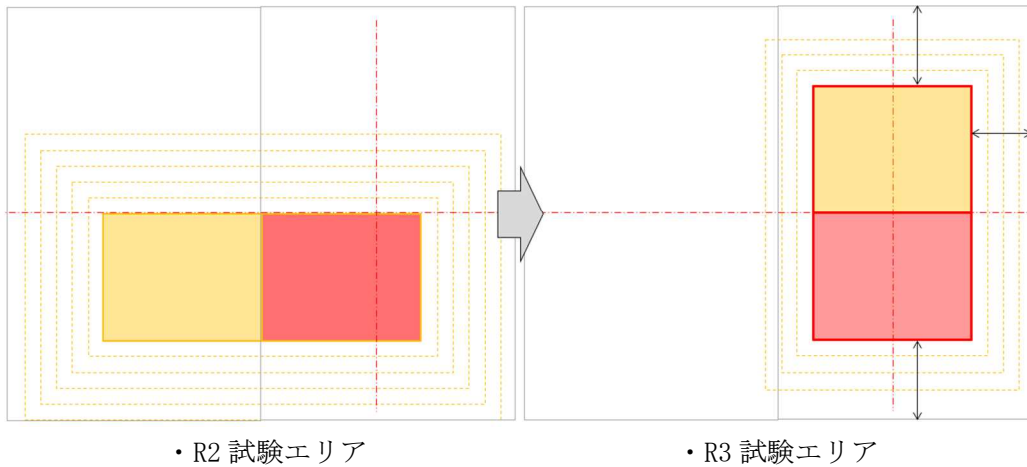


図 3.6.7-23 試験エリアの変更

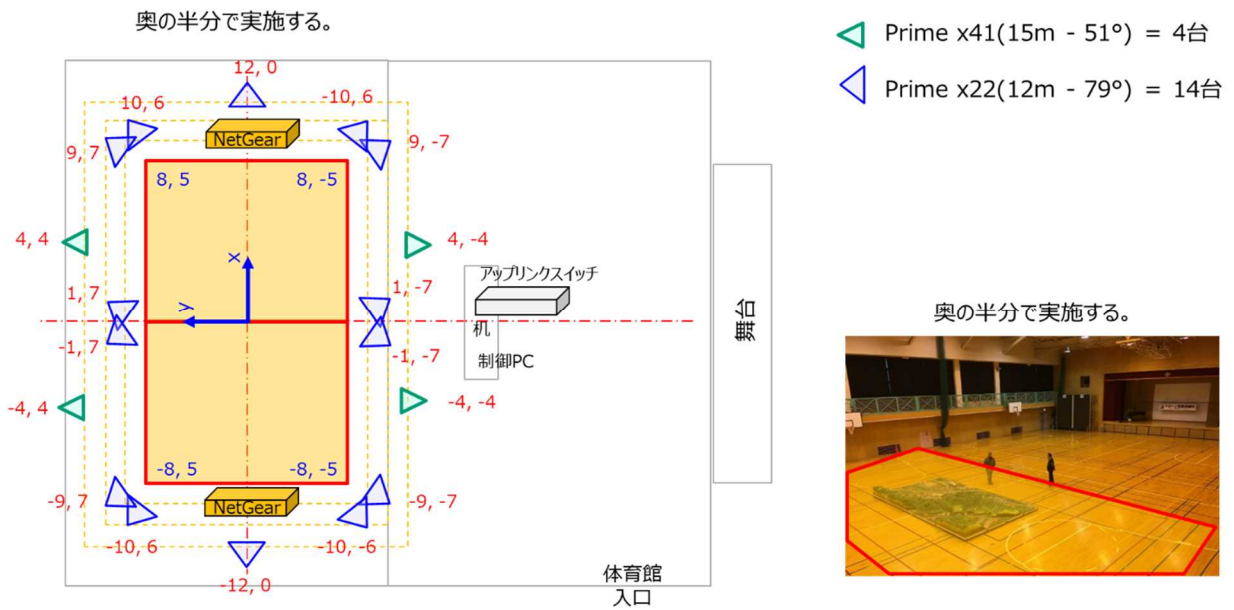


図 3.6.7-24 R3 試験カメラレイアウト 案1

Prime x41(15m - 51°) = 4台 (R2: 2台) R3調達2台
 Prime x22(12m - 79°) = 14台 (R2: 5台) R3調達9台

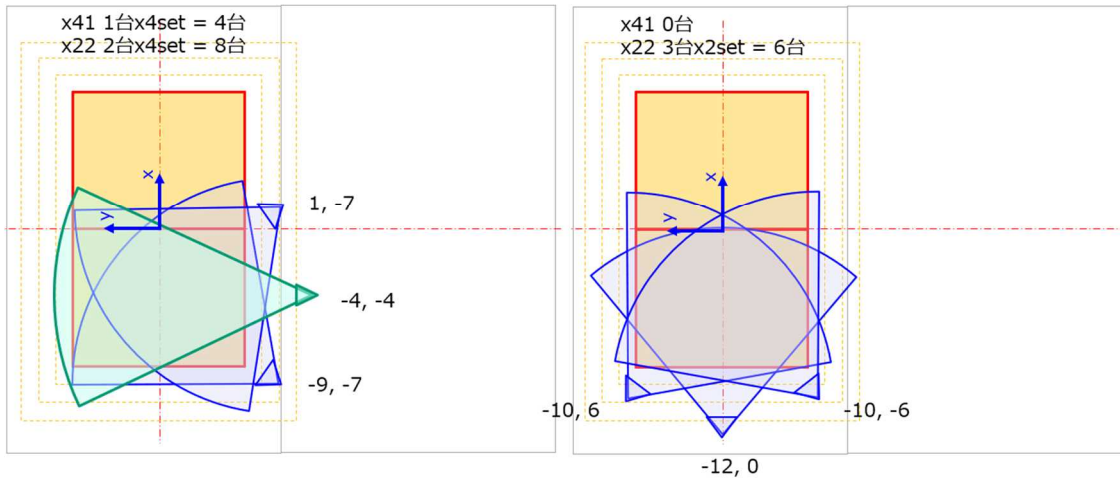


図 3.6.7-25 R3 試験カメラレイアウト測位範囲の検討 案1

Prime x41(15m - 51°) = 4台 (R2: 2台) R3調達2台
 Prime x22(12m - 79°) = 8台+6台 = 14台 (R2: 5台) R3調達9台

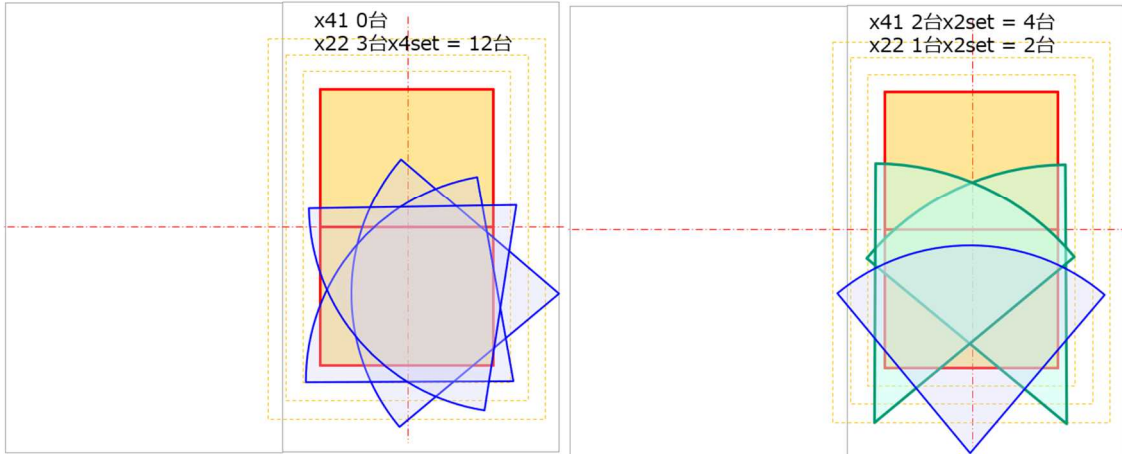


図 3.6.7-26 R3 試験カメラレイアウト測位範囲の検討 案2

Prime x41(15m - 51°) = 2台 (R2: 2台) R3調達0台
 Prime x22(12m - 79°) = 12台+4台 = 16台 (R2: 5台) R3調達11台

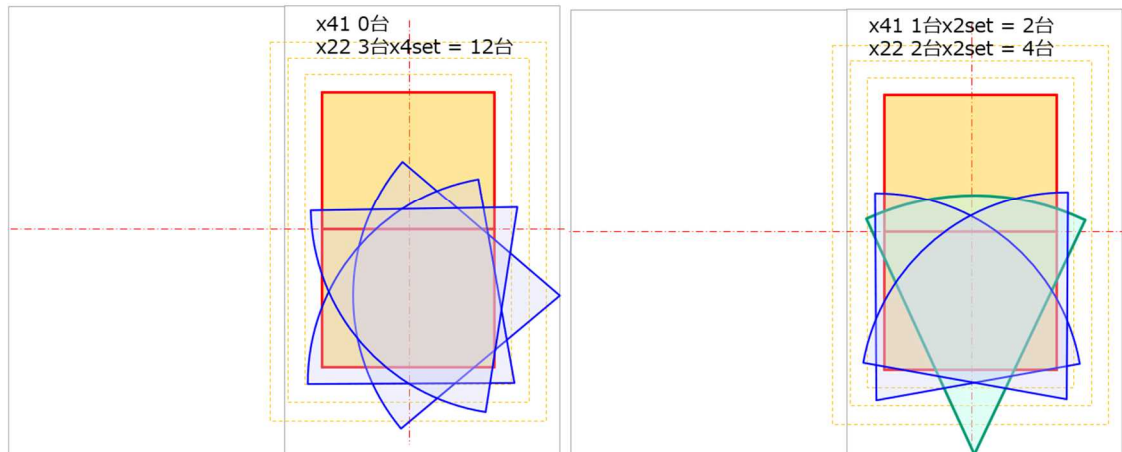


図 3.6.7-27 R3 試験カメラレイアウト測位範囲の検討 案3

3.6.7.4. R3 沼田試験 1 での実地検証

R2 年度から R3 年度では試験エリアが 2 倍に拡大している。また、測位システムのカメラの台数も増加した。改めて、R3 年度の沼田試験 1 において、測位システムの実地検証を行った。その結果を以下に示す。

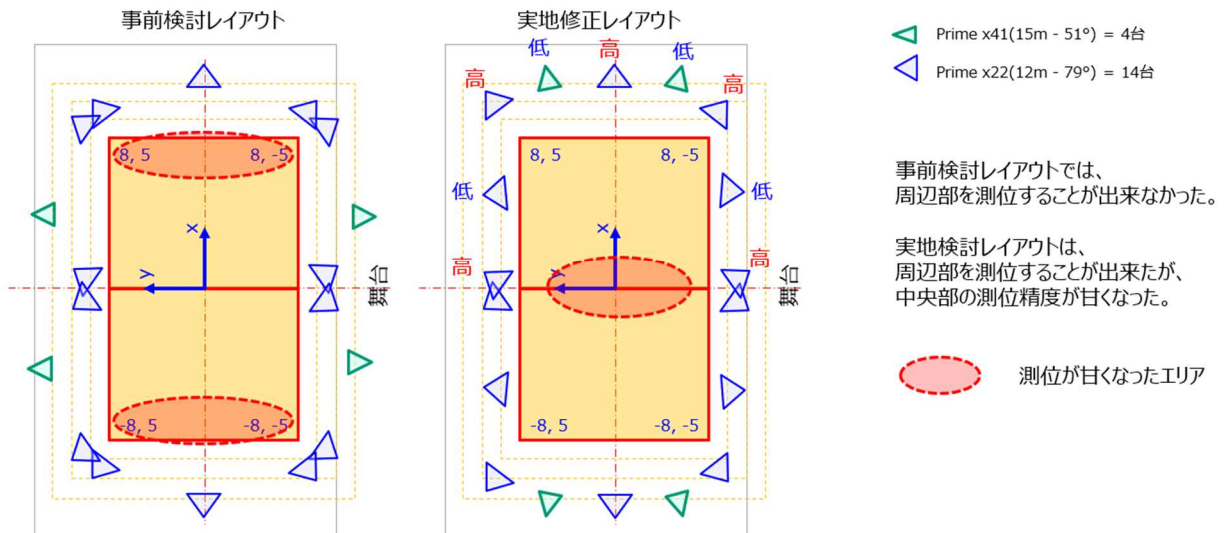


図 3.6.7-28 R4 沼田試験 1 事前検討案と実地修正案の比較

試験の結果を受け、カメラ射程距離の見直しを行った。また、高低差をつけると測位性能が向上した。

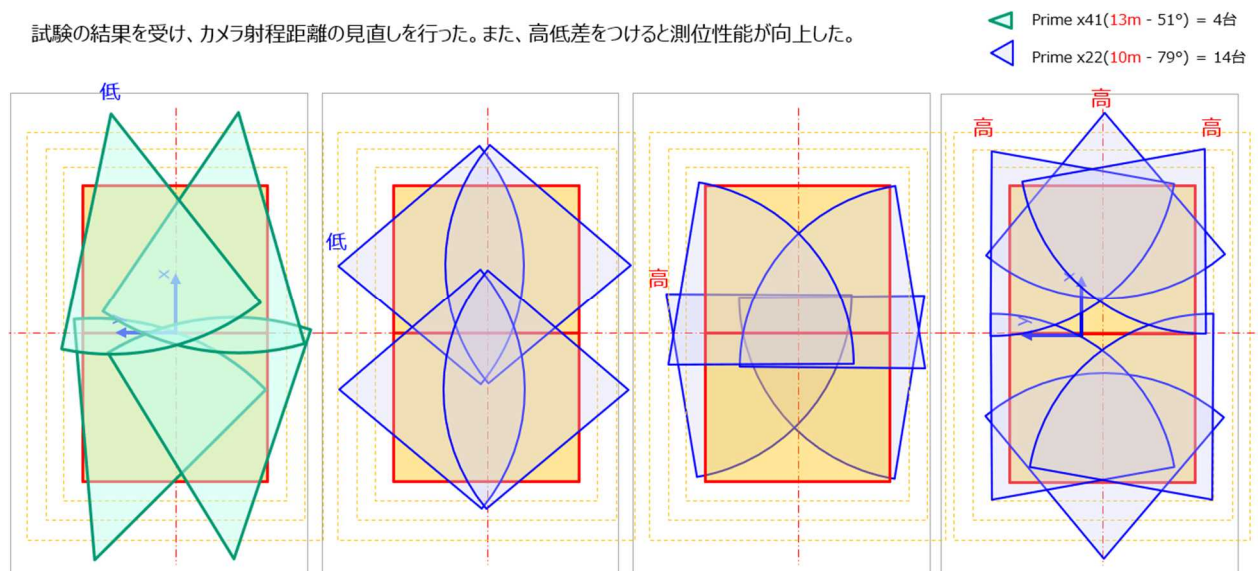


図 3.6.7-29 R4 沼田試験 1 実地修正案のカメラカバー範囲

3.6.7.5. R3 沼田試験2でのカメラレイアウト見直し

カメラレイアウトの前設計は、スウォーム飛行エリア全体について検討を行っていた。その結果、カメラ測位の精度にエリア毎にムラが生じた。

このため、実地検証の結果を受けて、カメラカバー範囲を設定し、そのカバー範囲を分担するカメラを決めて、カメラのレイアウトの設計を行った。その結果、エリア分割数は3分割、レイアウトは案4を採用した。

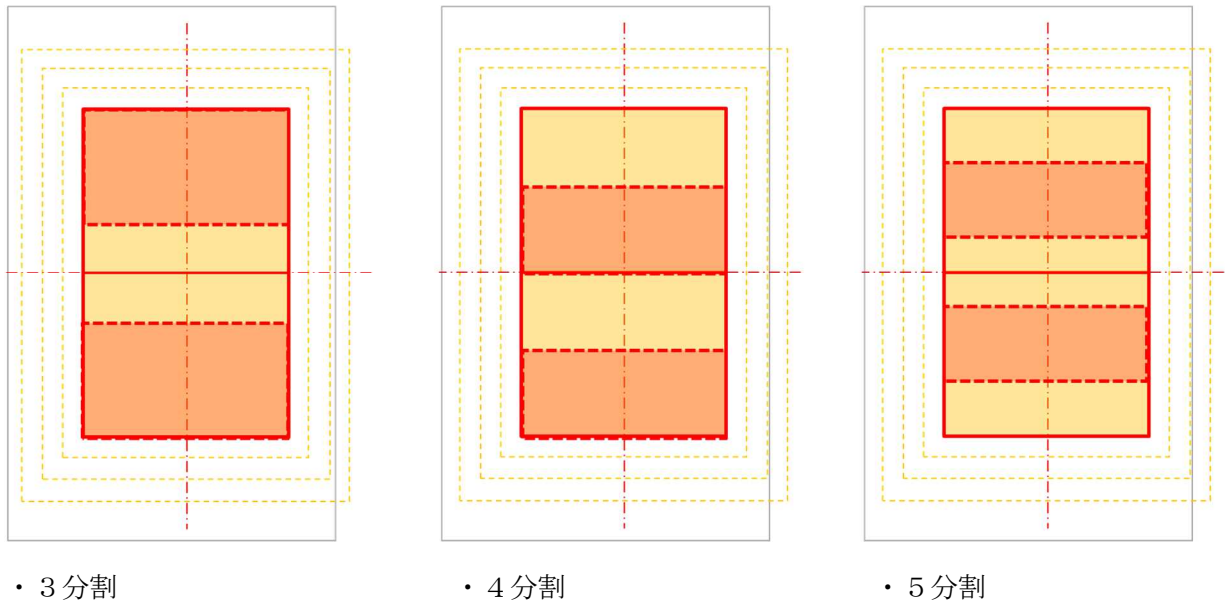


図 3.6.7-30 エリア分割数の検討

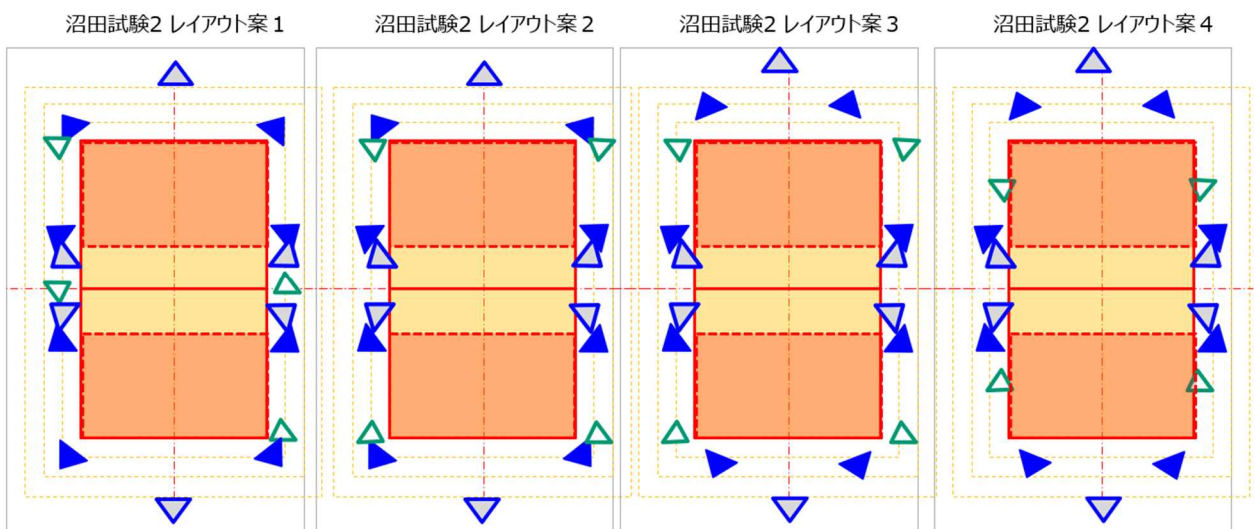


図 3.6.7-31 カメラカバー範囲の検討

3.6.7.5.1. エリア分割数の検討

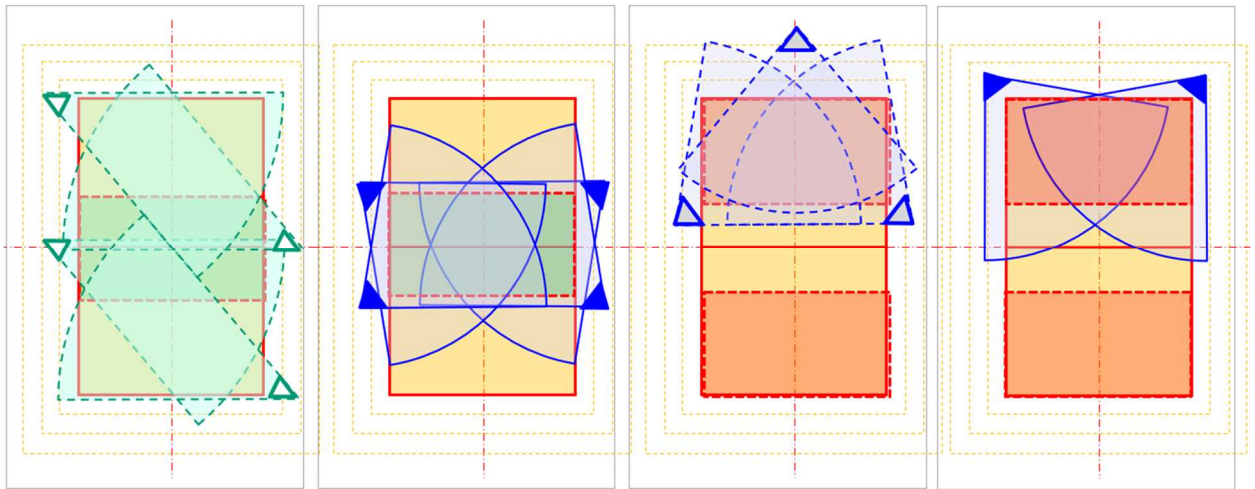


図 3.6.7-32 エリア分割数の検討：3分割（案1）

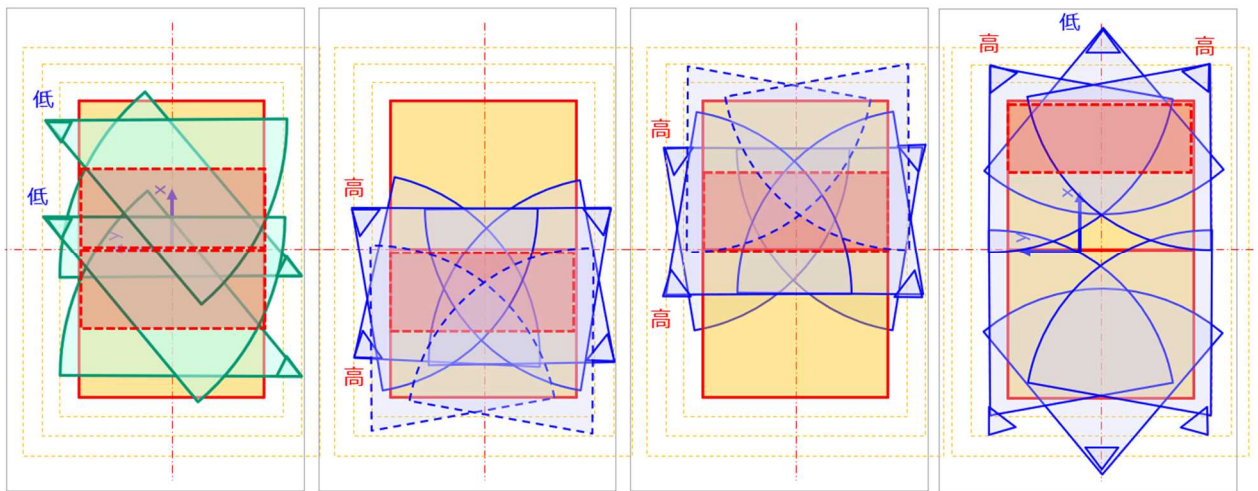


図 3.6.7-33 エリア分割数の検討：4分割

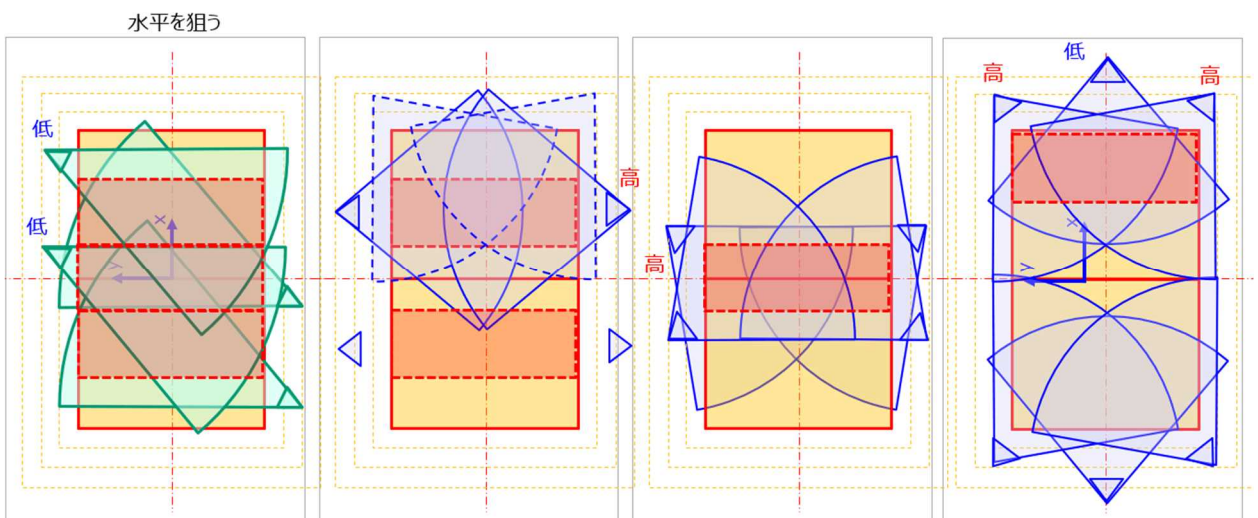


図 3.6.7-34 エリア分割数：5分割

3.6.7.5.2. エリア3分割におけるカメラカバー範囲の検討

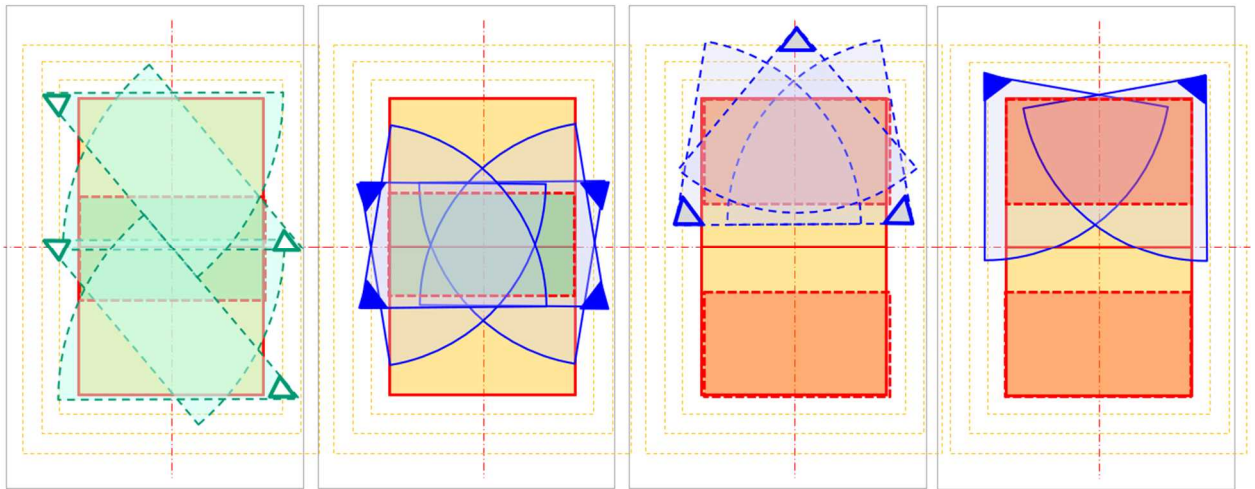


図 3.6.7-35 カメラカバー範囲の検討 案1

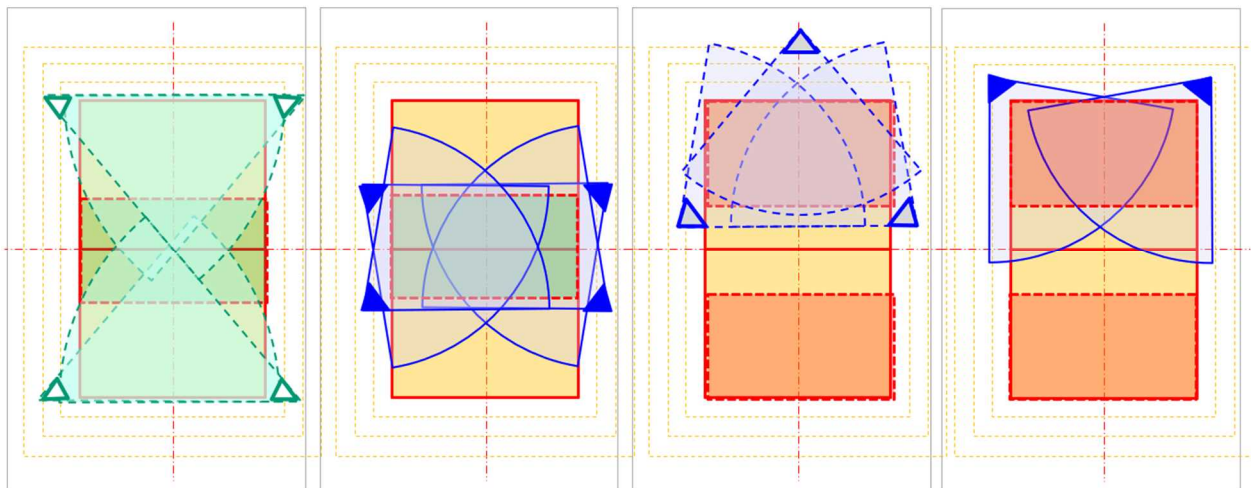


図 3.6.7-36 カメラカバー範囲の検討 案2

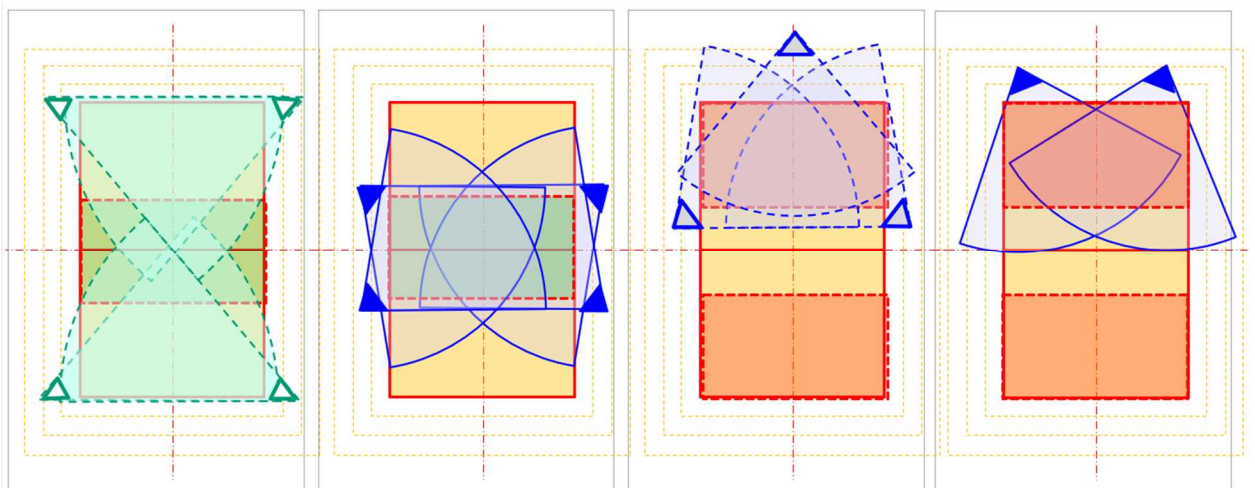


図 3.6.7-37 カメラカバー範囲の検討 案3

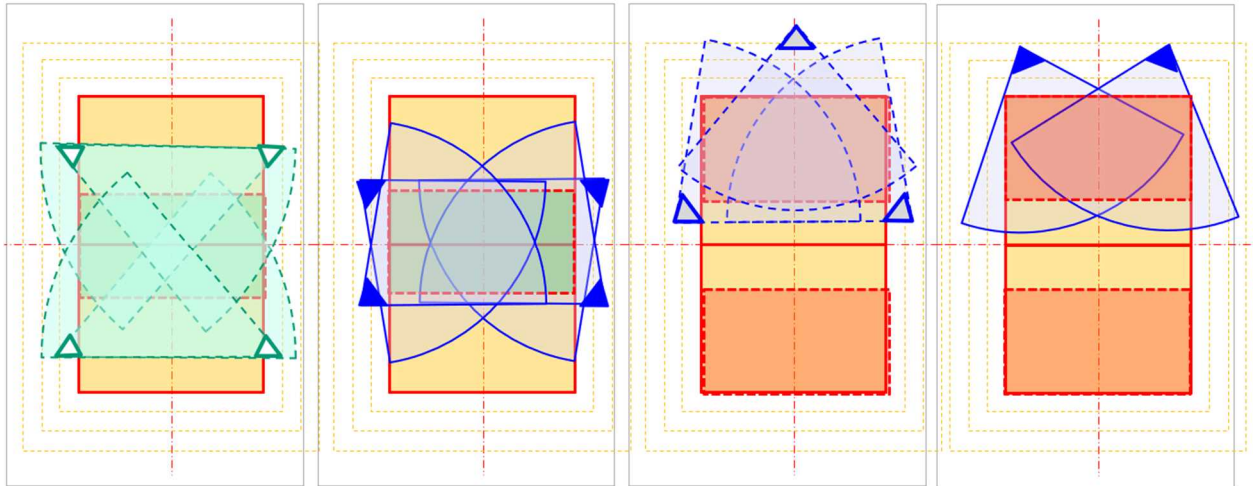


図 3.6.7-38 カメラカバー範囲の検討 案3

3.6.8. カメラの画角設定

本試験研究での試験環境は常設ではなく、試験毎に設営と撤収を行う。すなわち、カメラの向き
の調整を毎回行う必要がある。このため、カメラの設置・調整を行いやすくするため、各エリアに
反射マーカを置き、カメラの画面内の適正な位置に反射マーカが来るように、カメラの画角を
設定した。以下に、各カメラについて、画角内のマーカの位置、対面のカメラの赤外光の位置を
示す。

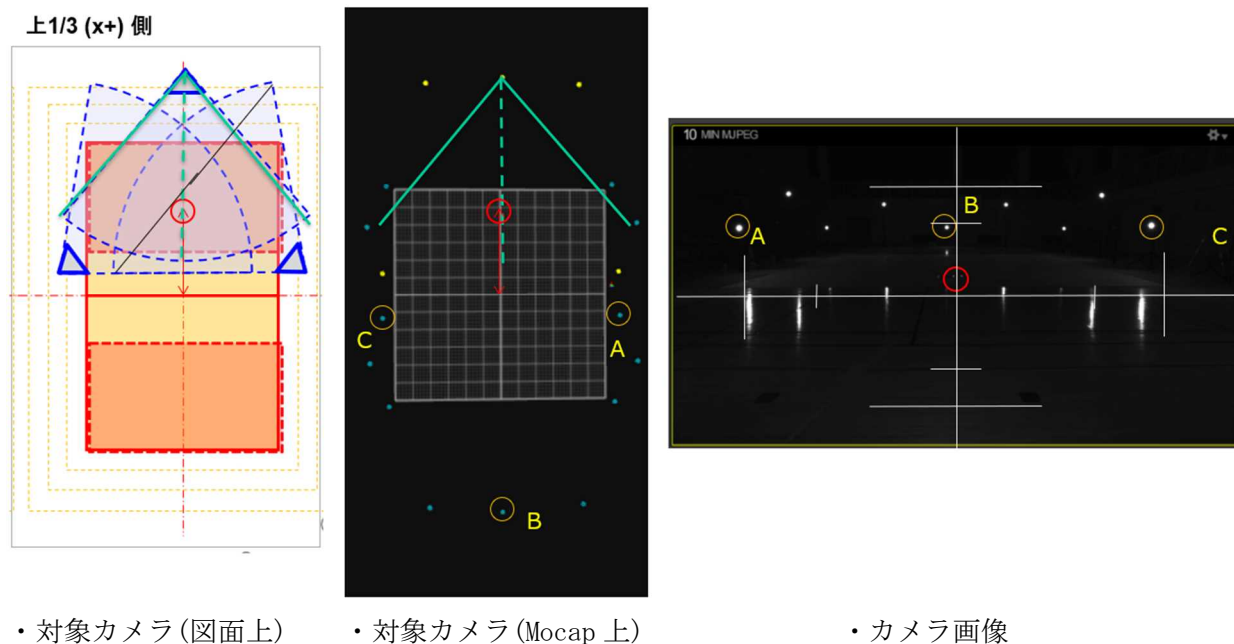


図 3.6.8-1 カメラ画角

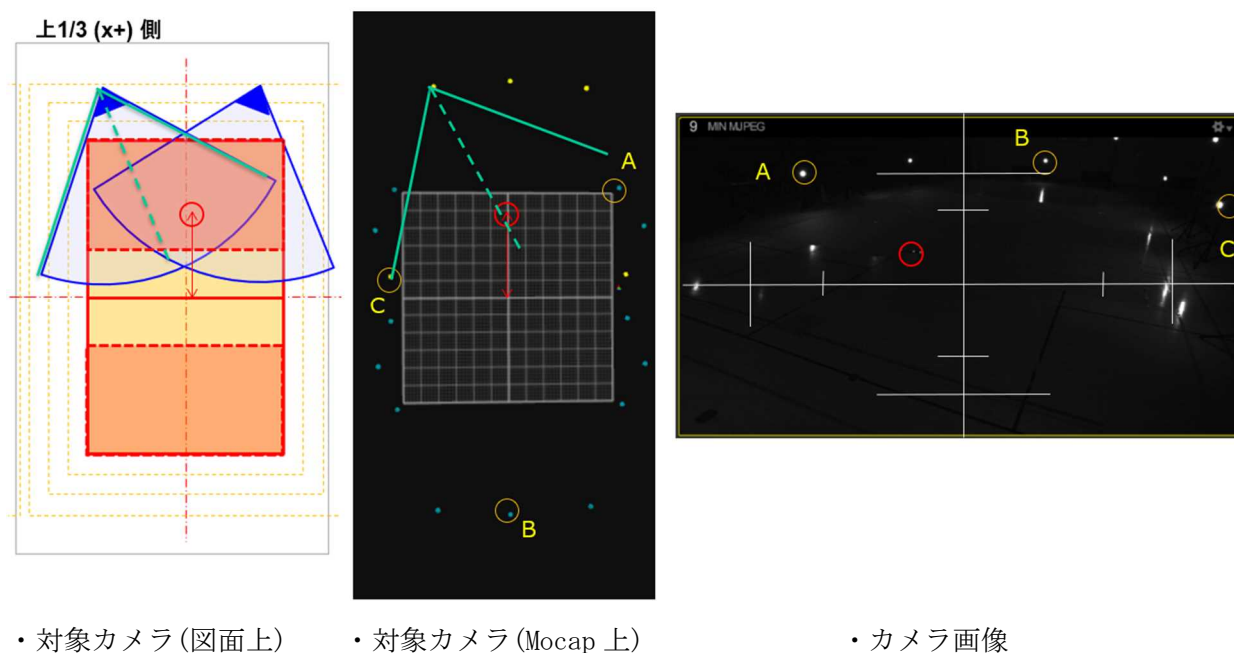


図 3.6.8-2 カメラ画角

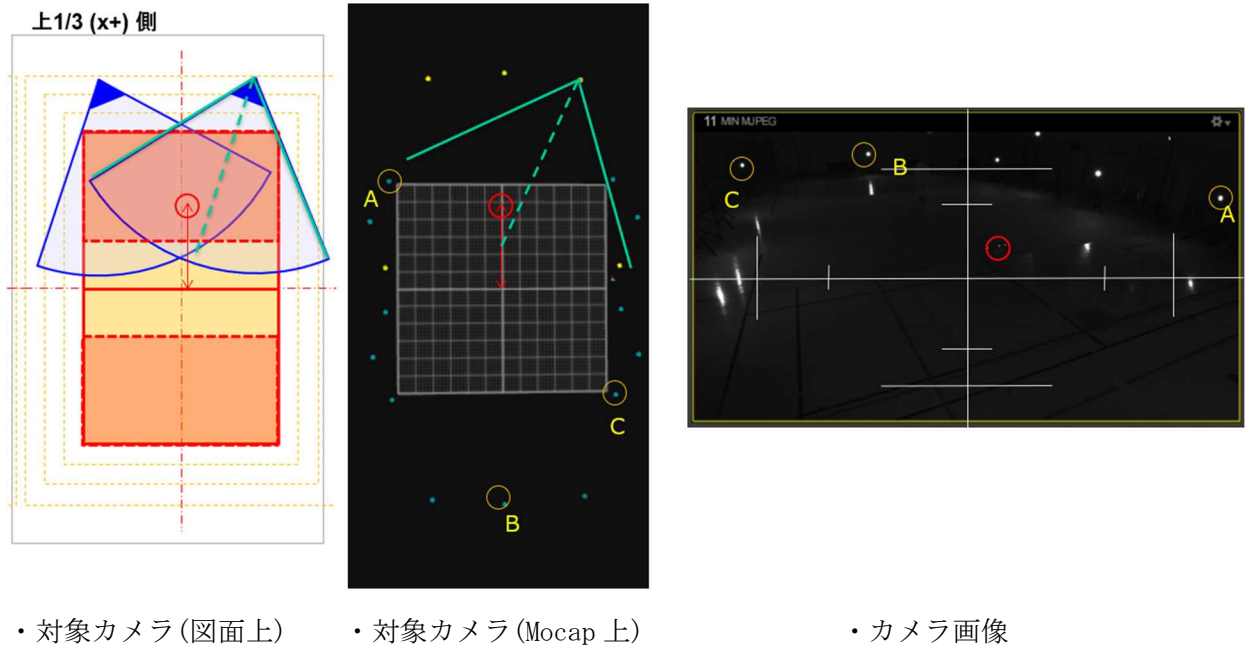


図 3.6.8-3 カメラ画角

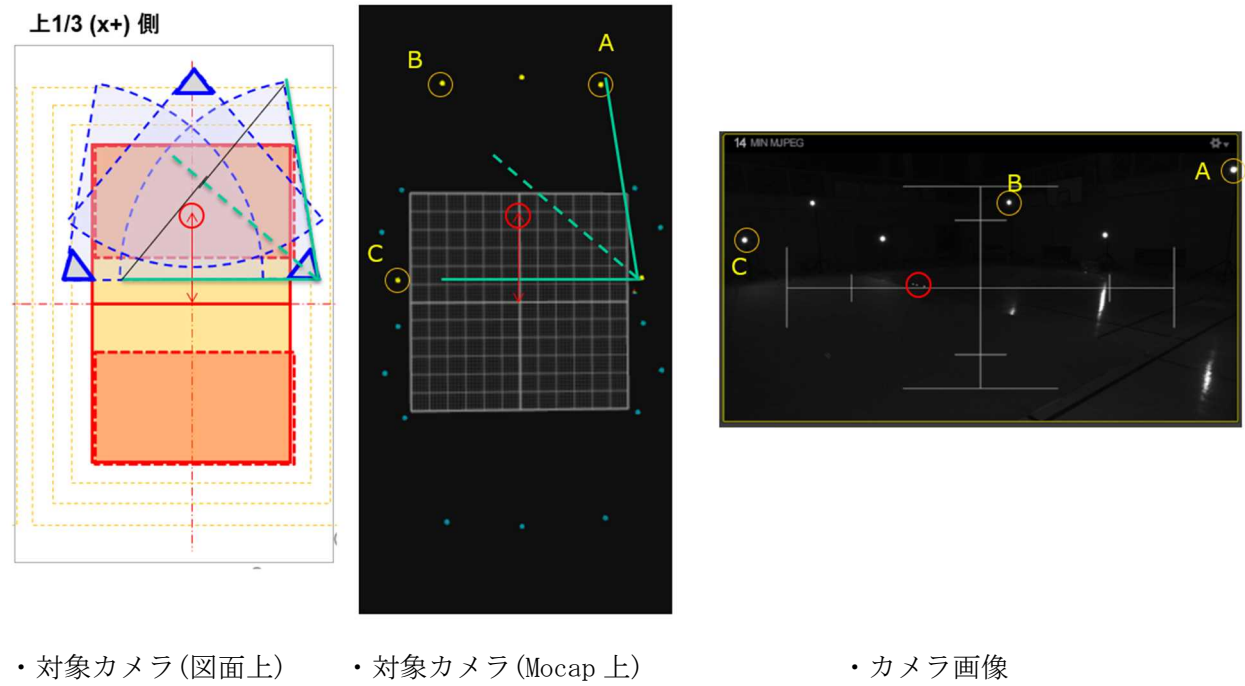
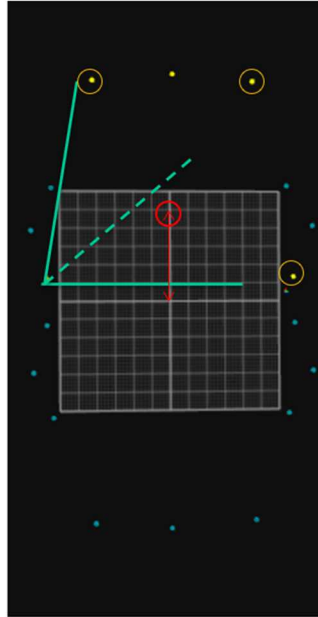
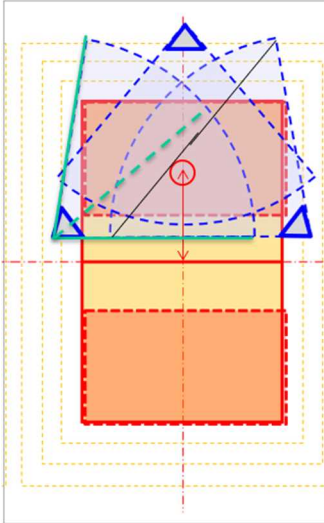


図 3.6.8-4 カメラ画角

上1/3 (x+) 側



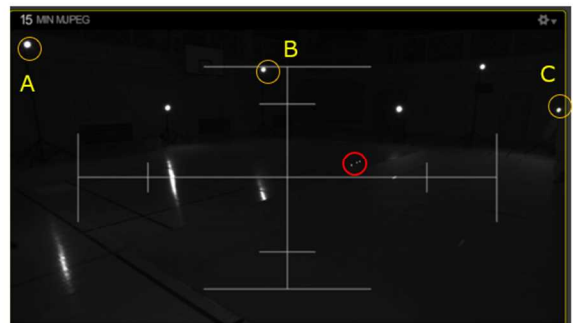
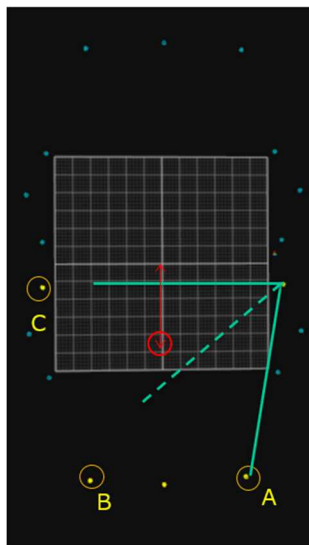
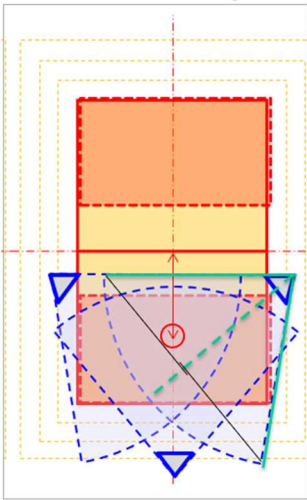
・対象カメラ (図面上)

・対象カメラ (Mocap 上)

・カメラ画像

図 3.6.8-5 カメラ画角

下1/3 (x-) 側



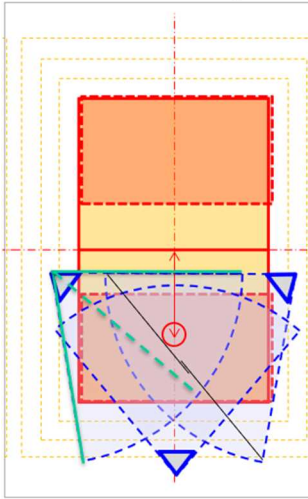
・対象カメラ (図面上)

・対象カメラ (Mocap 上)

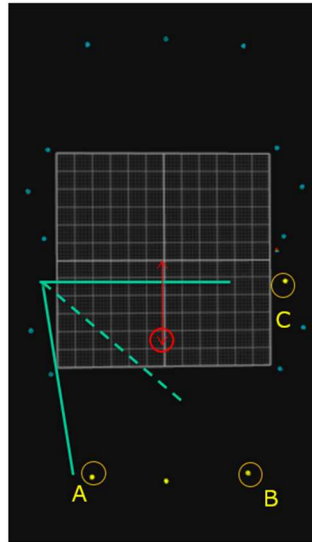
・カメラ画像

図 3.6.8-6 カメラ画角

下1/3 (x-) 側



・対象カメラ (図面上)



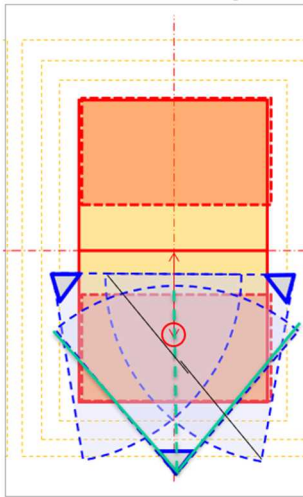
・対象カメラ (Mocap 上)



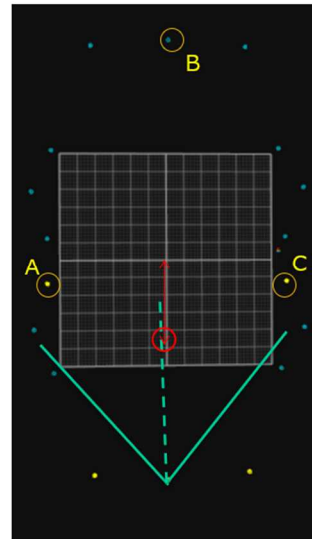
・カメラ画像

図 3.6.8-7 カメラ画角

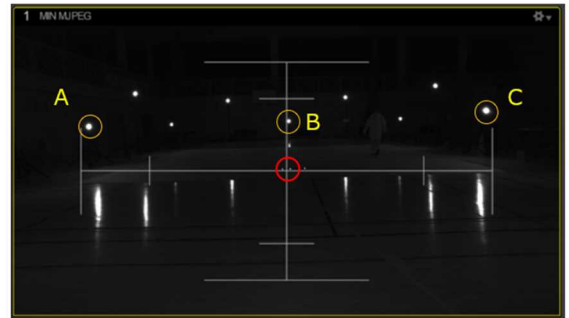
下1/3 (x-) 側



・対象カメラ (図面上)

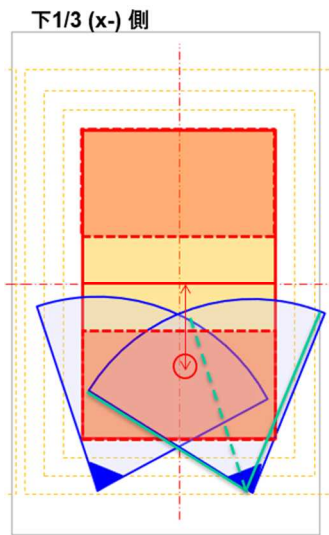


・対象カメラ (Mocap 上)

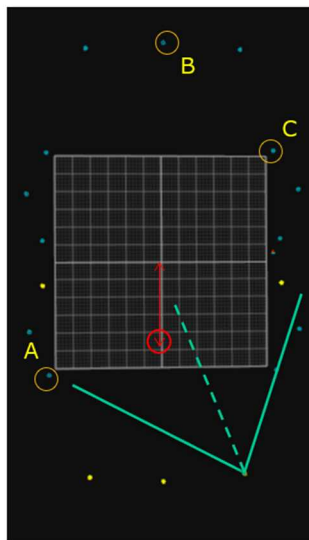


・カメラ画像

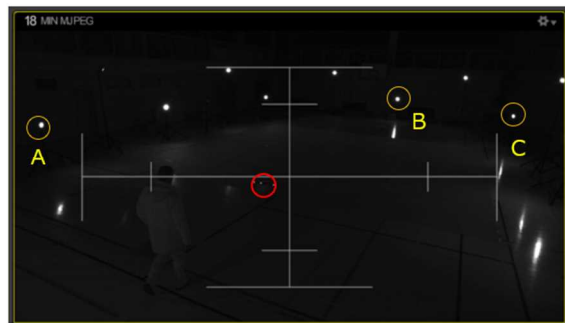
図 3.6.8-8 カメラ画角



・対象カメラ (図面上)

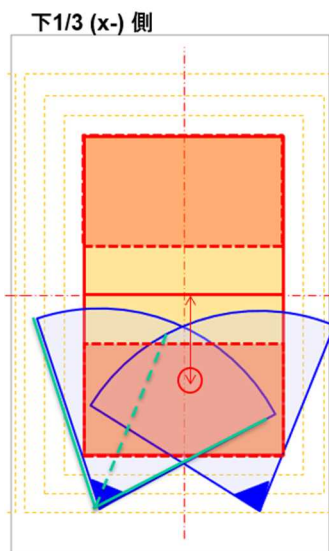


・対象カメラ (Mocap 上)

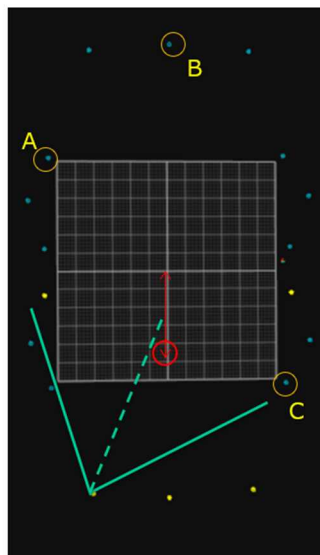


・カメラ画像

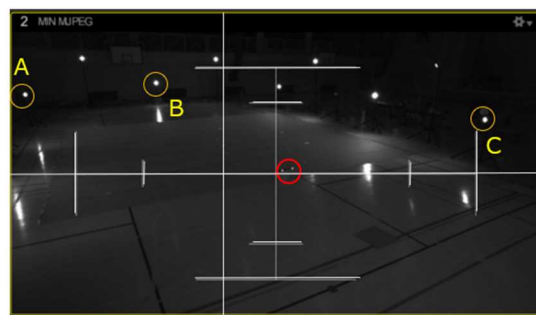
図 3.6.8-9 カメラ画角



・対象カメラ (図面上)



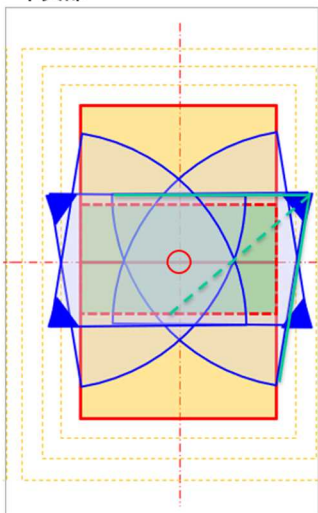
・対象カメラ (Mocap 上)



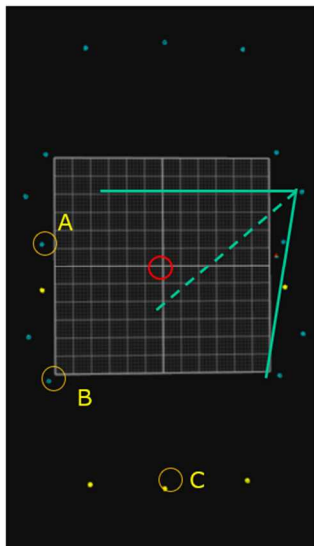
・カメラ画像

図 3.6.8-10 カメラ画角

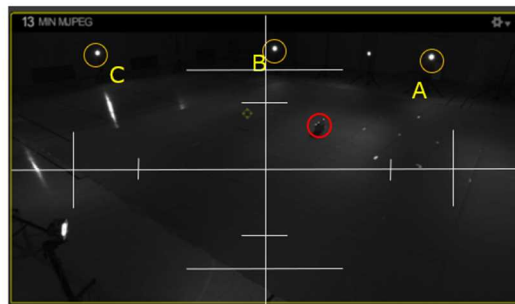
中央部



・対象カメラ (図面上)



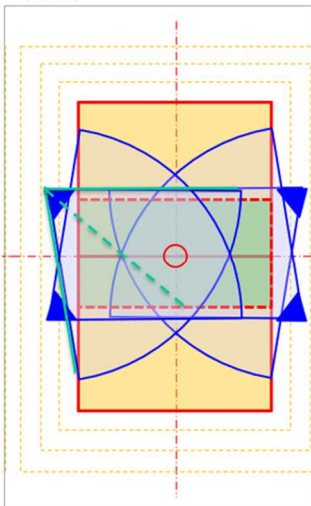
・対象カメラ (Mocap 上)



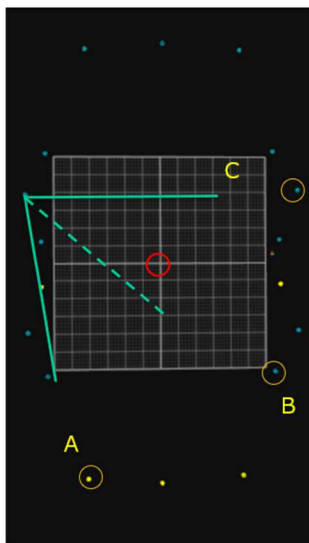
・カメラ画像

図 3.6.8-11 カメラ画角

中央部



・対象カメラ (図面上)



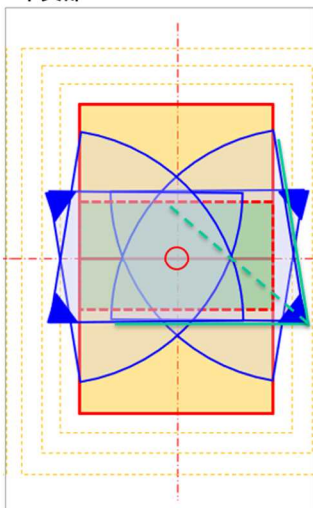
・対象カメラ (Mocap 上)



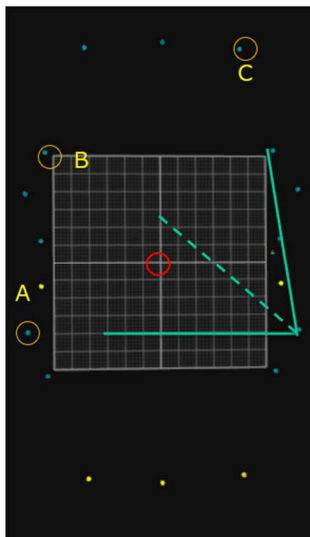
・カメラ画像

図 3.6.8-12 カメラ画角

中央部



・対象カメラ (図面上)



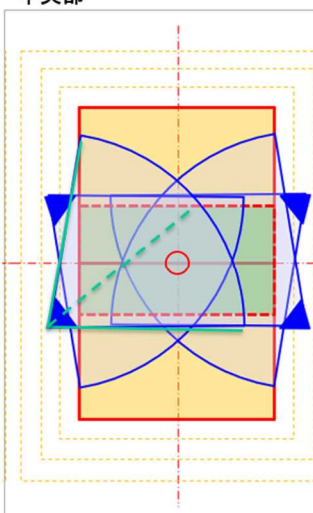
・対象カメラ (Mocap 上)



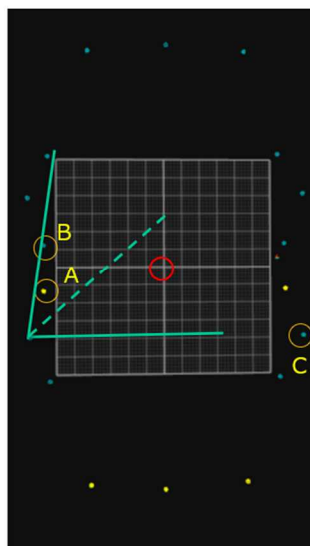
・カメラ画像

図 3.6.8-13 カメラ画角

中央部



・対象カメラ (図面上)



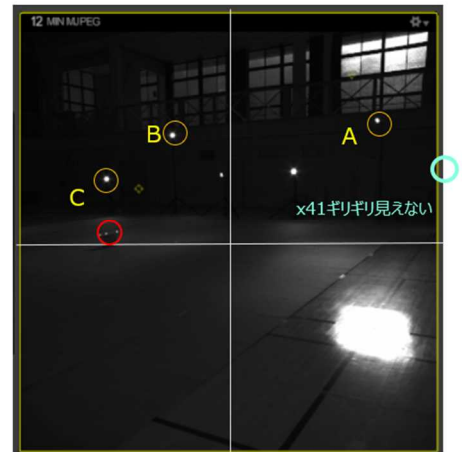
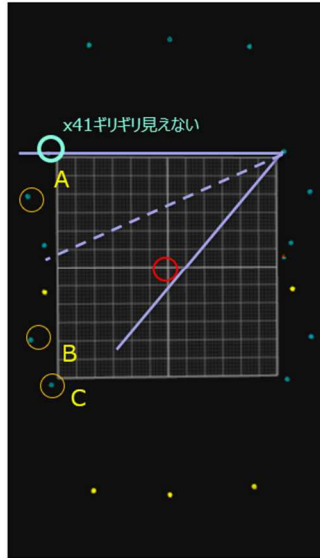
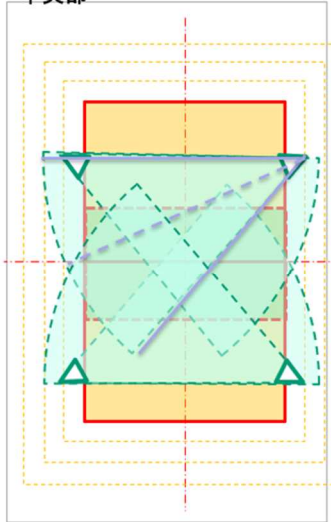
・対象カメラ (Mocap 上)



・カメラ画像

図 3.6.8-14 カメラ画角

中央部



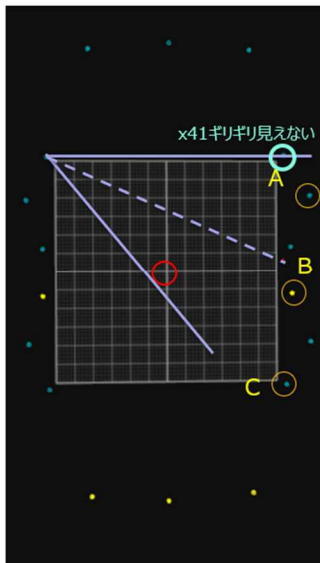
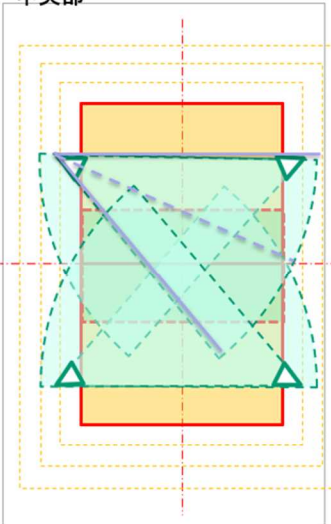
・対象カメラ (図面上)

・対象カメラ (Mocap 上)

・カメラ画像

図 3.6.8-15 カメラ画角

中央部

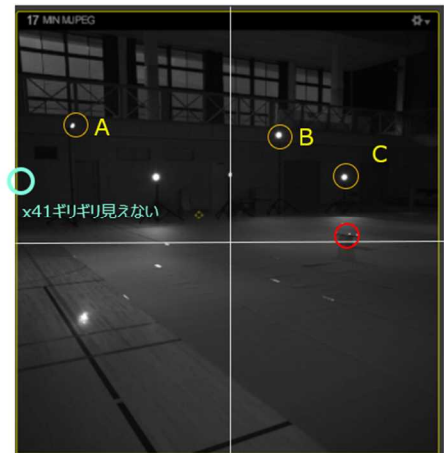
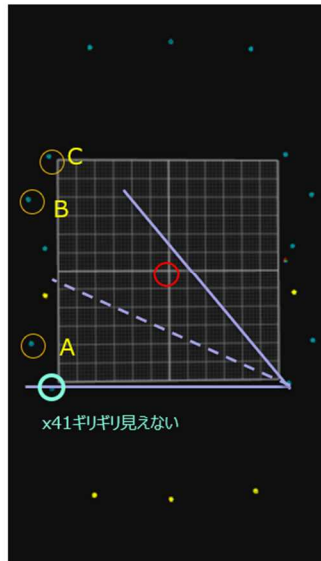
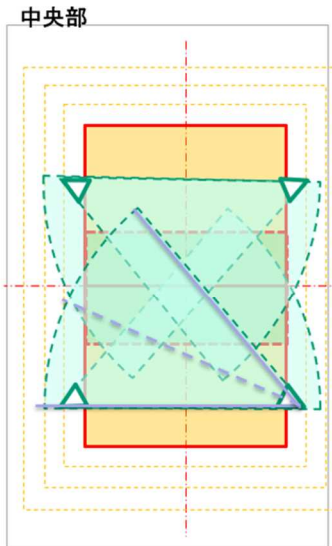


・対象カメラ (図面上)

・対象カメラ (Mocap 上)

・カメラ画像

図 3.6.8-16 カメラ画角

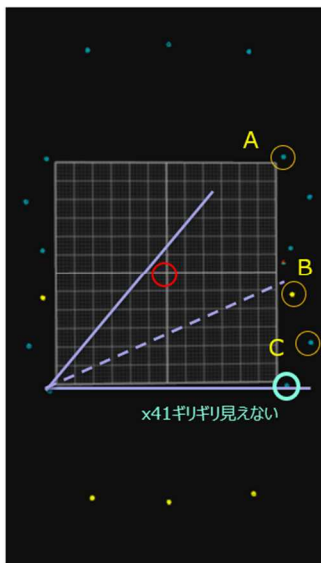
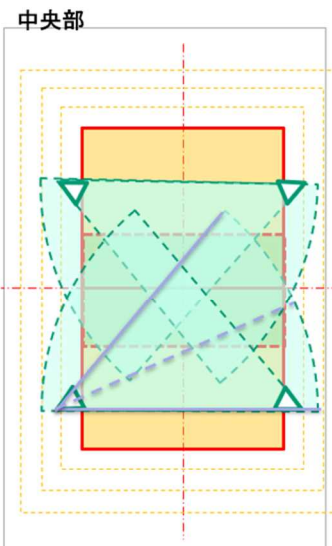


・対象カメラ (図面上)

・対象カメラ (Mocap 上)

・カメラ画像

図 3.6.8-17 カメラ画角



・対象カメラ (図面上)

・対象カメラ (Mocap 上)

・カメラ画像

図 3.6.8-18 カメラ画角

3.7. 実環境での試験研究

3.7.1. 実環境スウォーム飛行テストの概要

UAVの大集団の群制御は、協調制御と誘導制御の要素技術で構成される。試験は、これらの技術を確立するため、図 3.7.1-1 の流れに従って、ユースケースを踏まえた予備飛行試験と試験シナリオ A/B(図 3.7.1-3～図 3.7.1-4 参照)に従って実施した。その結果、必達目標を満足する結果を得た。図 2.1.2-1 表 2.1.2-1 試験研究の実施内容表 3.7.1-1 に実施内容と成果の概要を示す。試験環境と実験用小型 UAV を図 3.7.1-5 と図 3.7.1-6 にそれぞれ示す。実施内容および成果は次項以降に示す。

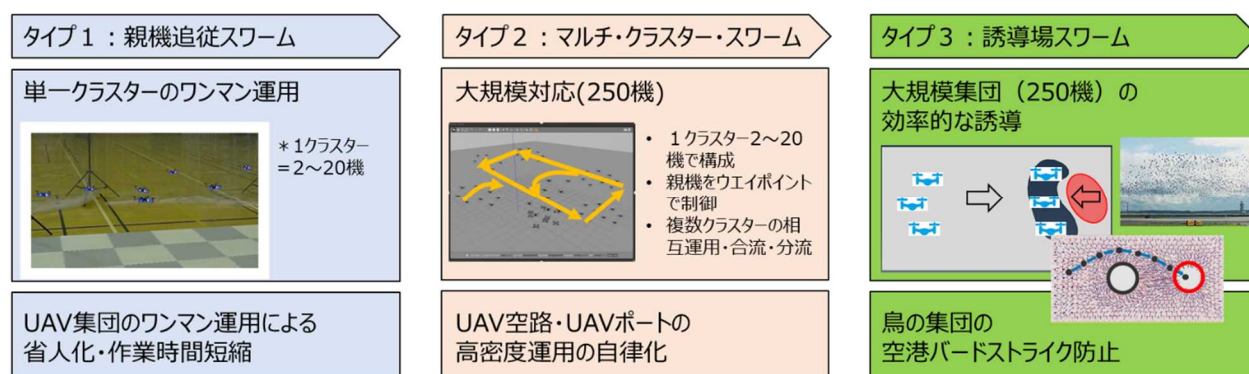


図 3.7.1-1 試験研究の実施手順

表 3.7.1-1 試験研究の実施内容と成果概要

手順	タイプ 1	タイプ 2	タイプ 3
実施時期	R1 年度	R3 年度	R3 年度
想定用途	UAV 集団のワンマン運用による省人化・作業時間短縮	UAV 空路・UAV ポートの高密度運用の自律化	鳥の集団の空港バードストライク防止
試験方法	予備飛行試験	試験シナリオ A、A 拡張	試験シナリオ B
形態	飛行エリア内の自由操縦 ・親機を操縦 ・子機は親機に追従	多重ループ周回 ・親機をウェイポイントで誘導 ・子機は親機に追従	飛行エリア内の流れ場誘導 ・全機を誘導場で誘導
目的	オペレータによる操縦	大規模対応(250機)	大集団運用の効率化
要素技術	複数機ワンマンオペレーション 1 個集団の群協調の確認	群協調アルゴリズム 複数集・大規模対応(250機)	群協調・群誘導の連携 DQN 群協調アルゴリズム
成果概要	オペレータが親機をコントローラで操縦し、子機は親機に追従する。実機 9 機でスウォーム飛行させ、群協調アルゴリズムが動作することを確認した。	スウォーム飛行は、陸上競技場のような周回コースを 2 重にした空路で行った。実機 20 機で小集団同士の群協調ができることを確認した。また 3 重ループで仮想 250 機のうち 20 機を実機としスウォーム飛行し、大規模対応できることを確認した。	誘導場は、運用領域の中にゴールに向かう流れ場を生成し、その中の UAV をゴールに誘導するものである。試験は、実機 20 機で、ゴールからゴールへと流れ場を切り替えてスウォーム飛行を行い、アルゴリズムが動作することを確認した。
概要図	図 3.7.1-2	図 3.7.1-3	図 3.7.1-4
成果	第 3.7.2 項	第 3.7.5 項	第 3.7.6 項

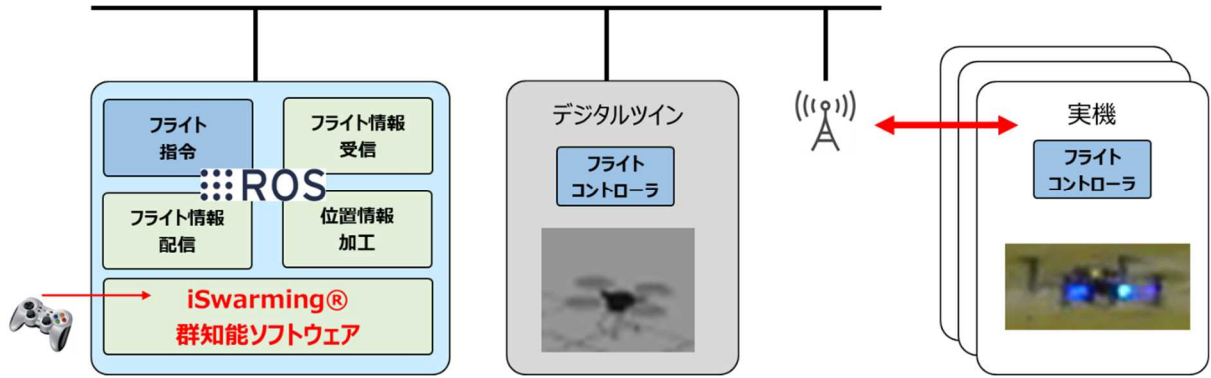


図 3.7.1-2 小型ドローン9機による群協調アルゴリズムの実機検証

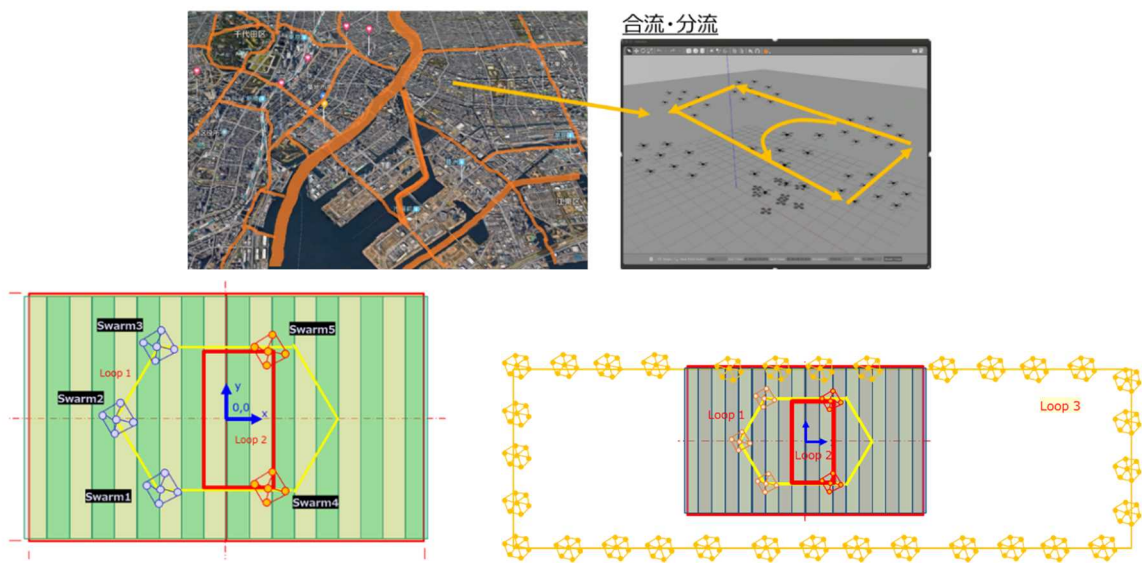


図 3.7.1-3 試験シナリオA：各スウォーム(集団)の合流・分流と大規模(250機)対応の検証



図 3.7.1-4 試験シナリオB：複数スウォーム(集団)の誘導・協調制御の検証

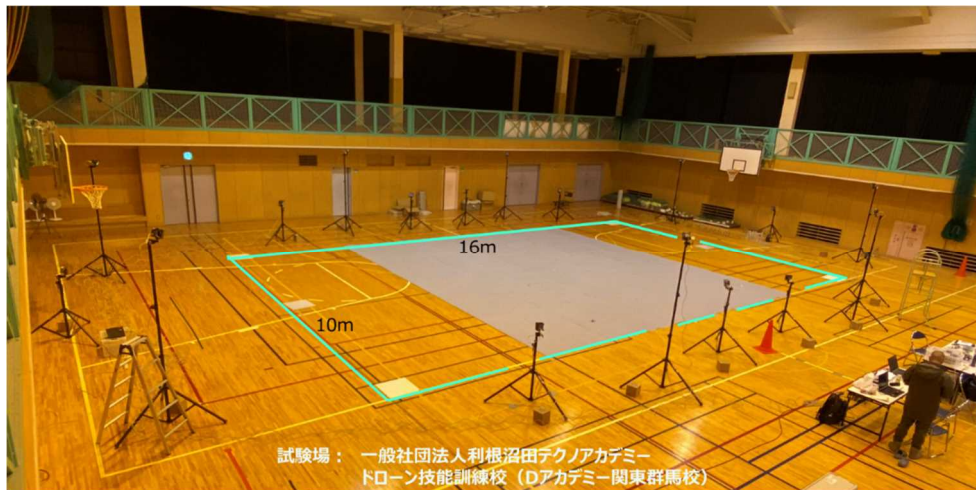


図 3.7.1-5 実機試験環境

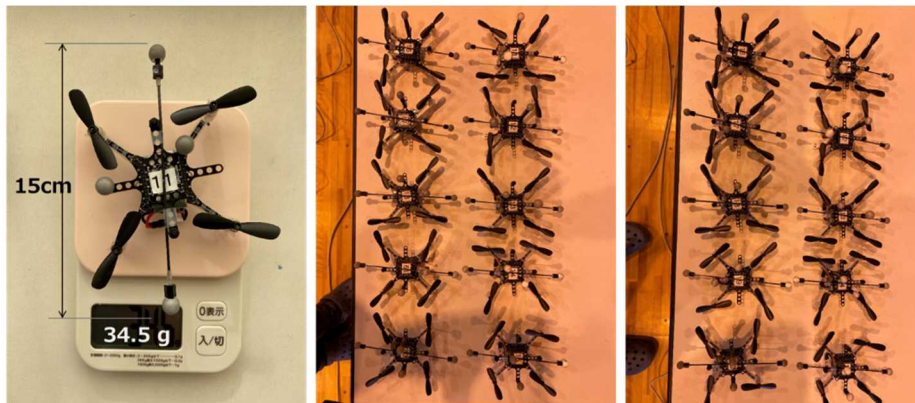


図 3.7.1-6 試験用の小型 UAV

3.7.2. R1 単一グループ・スウォーム・アルゴリズムの実機検証 (R1FY)

小型ドローン9機を用い、SPH法による物理シミュレーションベースの群協調アルゴリズムが、実環境において機能することを確認した。

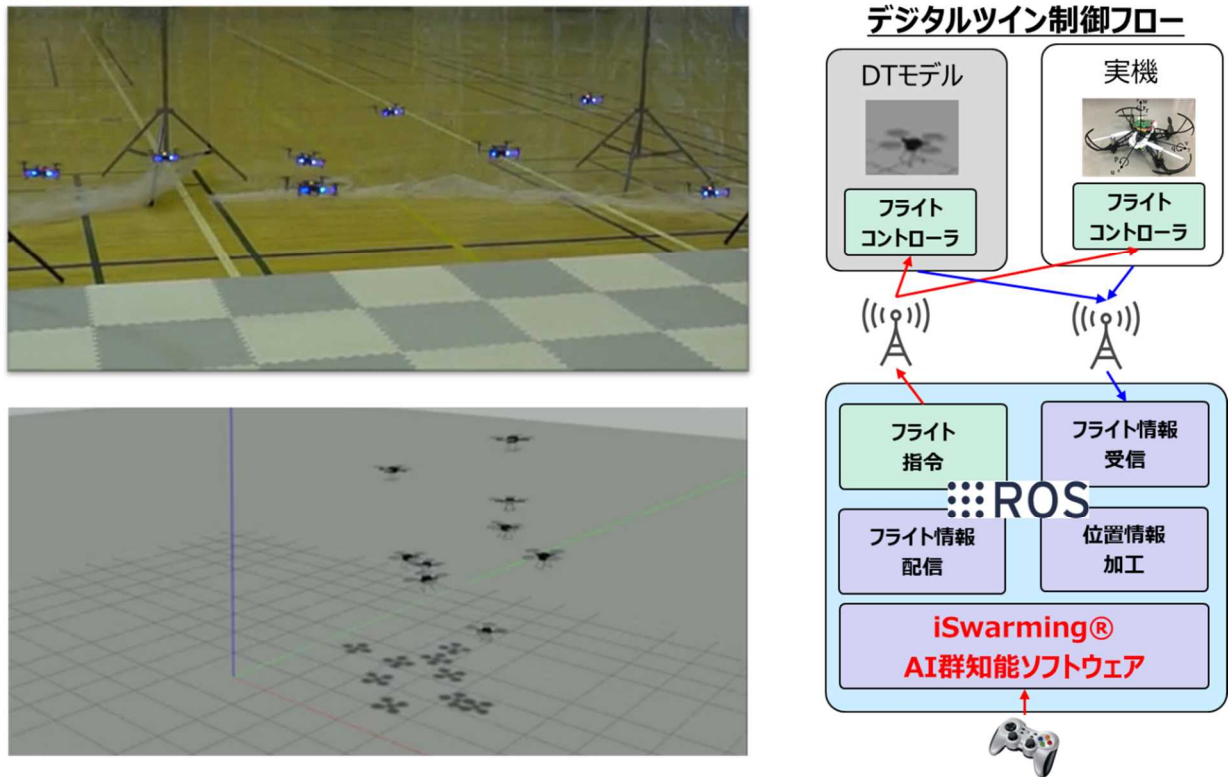


図 3.7.2-1 小型ドローン9機による群協調アルゴリズムの実機検証

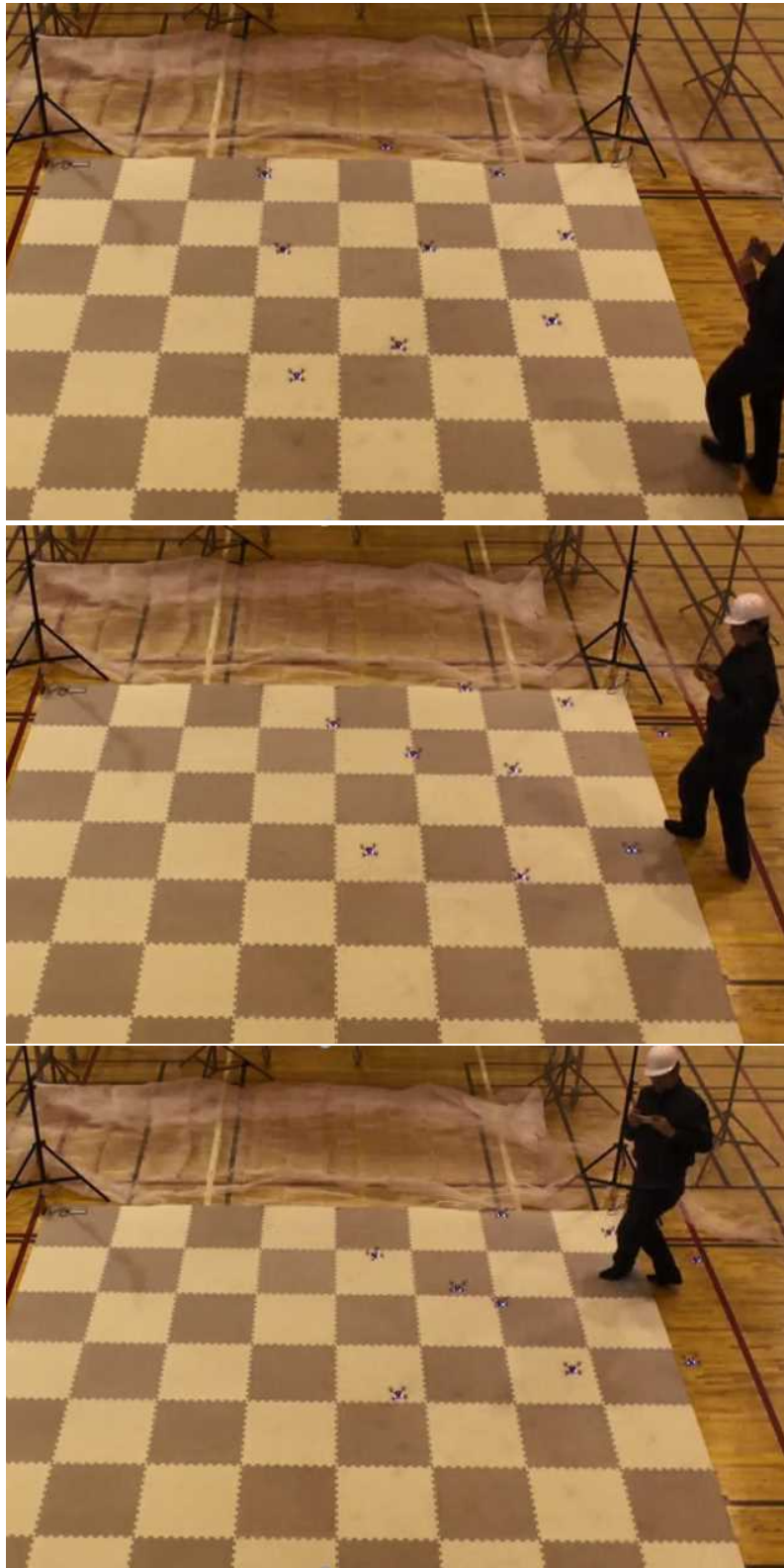


図 3.7.2-2 小型 UAV 9機のワンマンオペレーション (人を追跡)

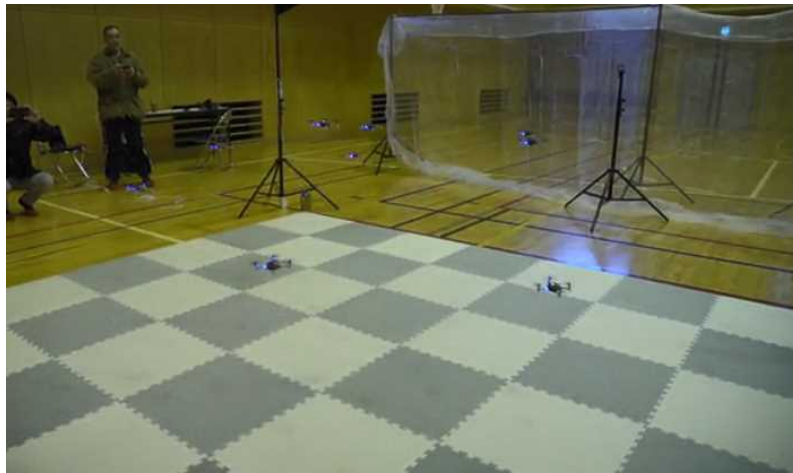
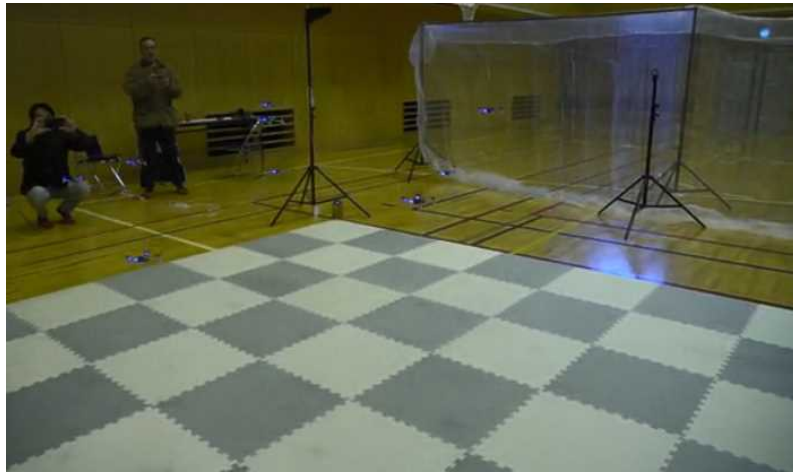


図 3.7.2-3 小型 UAV 9 機のワンマンオペレーション (操縦者 1 名)



図 3.7.2-4 物流ドローンの集団運用を想定したデモンストレーション

3.7.3. R2 スウォーム飛行予備試験

3.7.3.1. 実験用 UAV 動作確認試験（御茶ノ水オフィス）（R2FY）

沼田試験場での試験飛行に先立ち、測位システムと実験用 UAV の動作を確認した。具体的には、以下の項目について動作確認を行い、各機体のファームウェアパラメータ、UAV 制御システムパラメータの確認及び調整を実施した。

- ① UAV 制御システムと測位システムの接続
- ② 測位システム環境による機体識別
- ③ UAV 制御システムによる単機基本制御
- ④ UAV 制御システムによるドローン群制御

以下にその結果を示す。

3.7.3.1.1. UAV 制御システムと測位システムの接続

UAV 制御システムは、OptiTrack 社が提供する即位システムソフトウェア Motive によりストリーミングされる機体座標を利用している。

そこで、Motive 内のネットワークパラメータ、座標系、座標データフォーマット等を適切に設定し、UAV 制御システムが必要とする各機体の位置／姿勢情報が ROS 環境のトランスフォーメーション (/tf) として正しくパブリッシュされて、サブスクリバ経由で取得できることを確認した。

3.7.3.1.2. 測位システム環境による機体識別

即位システム環境下で、異なるマーカーレイアウトを持つ各機体が、誤認せずに制御可能であることを確認した。

3.7.3.1.3. UAV 制御システムによる単機基本制御

機体設定の問題／UAV 制御システムの問題を切り分けやすくするため、まず ROS レベルでの機体制御を行なった。

ROS レベルでモーターが動けば、機体は制御コマンドを受信することができていると見なすことができる。離着陸ができれば、各パーツが正常に動作していると思なすことができる。もし、離着陸ができない場合は、機体のパーツになんらかの不具合があると考えられ、不良パーツ（主にプロペラ、モーター）の交換が必要となる。

続いて、ホバー／移動コマンドにより測位システムとの連携確認を行う。これにより測位システム座標が正確に受信できていることが確認できる。

以下の ROS サービスコマンドで、機体に対して以下のコマンドを発行し、各試験機体（全 2 2 機）の動きを確認した。

- ・ 離陸：/[機体 ID]/takeoff コマンド
- ・ 移動：/[機体 ID]/go_to コマンド
- ・ 着陸：/[機体 ID]/land コマンド

この動作確認で、パーツ不良（主にプロペラ、モーター）の有無を確認できる。実際 2 2 機中 4 機が離陸／ホバーをできず、不良パーツを交換する必要があった。

3.7.3.1.4. UAV 制御システムによるドローン群制御

次に複数機による UAV 群の基本制御を確認する。

制御方法は、群全機を takeoff コマンドで離陸させ、iSwarming モジュールを起動した状態で親機を go_to コマンドで移動させる。iSwarming モジュールは各子機の最適な位置を算出し go_to コマンドを発行し群全体を制御する。

この確認で単機確認では気づかなかった課題が判明した。

機体数が増えると各機のバッテリー残量に偏りが出てきて、不安定になった機体が高度を維持できなくなる。そして、近隣機体との期待する位置関係を維持できなくなり、他機がプロペラによるダウンフォースの影響を受け、不安定さが伝搬する。全機体が最後まで飛行することが難しかった。

本番試験会場はオフィスよりも飛行エリアが広いので、スウォームレイアウトを決める際の機体間隔に余裕を持たせる等の調整を行う必要があると判明した。

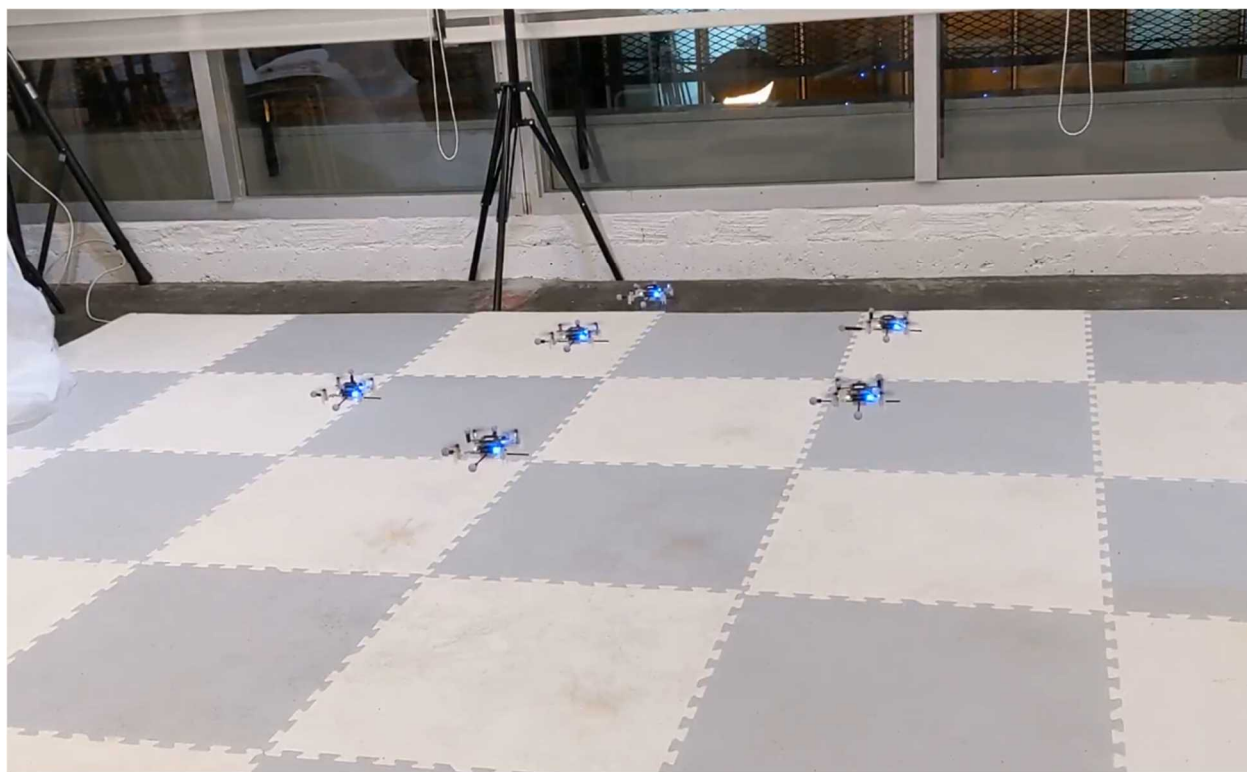


図 3.7.3-1 御茶ノ水オフィスでの予備試験

3.7.3.2. スウォーム飛行予備試験（沼田試験場）

まず、先のお茶の水オフィスでの動作確認で課題としてあげられたマーカーレイアウトを再考し、それらのマーカーレイアウトによる認識テストを行い、試験エリア内で20機を個別に確認、動作制御できることを確認した。

次に、予定していた10機単群をウェイポイントにより群制御を行なった。

ここで、機体位置制御を move_to コマンドで行っていたが、コマンド頻度をあげると移動後の姿勢制御におけるオーバーシュートが影響し機体姿勢が不安定になりやすくなった。その改善案として、move_to よりもホバー状態のように常に現在位置を高頻度で指定し続けることにより、コマンドによる移動/静止時の機体制御を行わず、機体ファームウェアによる姿勢制御に任せることでスムーズな姿勢制御を行うように改修した。

目標である10機単群編隊（親機1機、子機9機）を、親機制御のみで移動させた。親機の移動ウェイポイントは、UAV 制御システムから任意のウェイポイント（ただし高度は0.5m固定）を設定し、子機が親機に追従することを確認した。

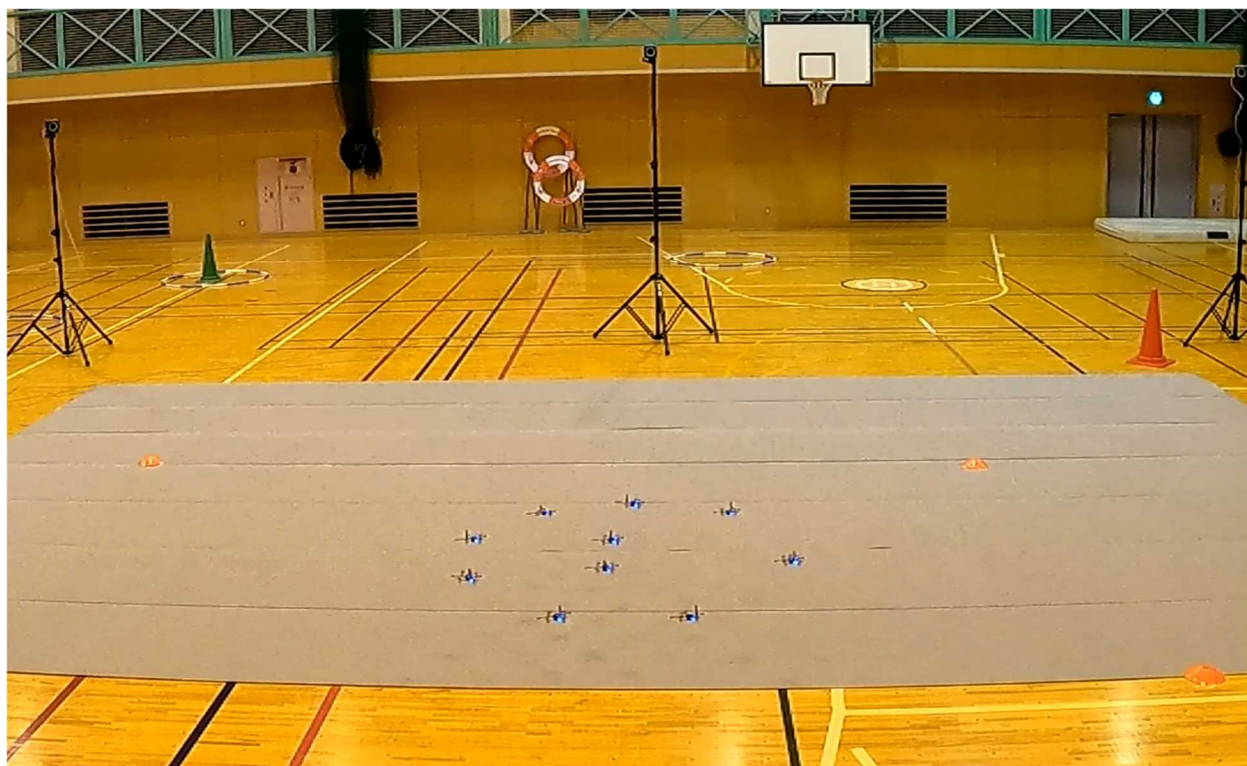


図 3.7.3-2 スウォーム/10機：離陸→移動→着陸

3.7.3.3. 予備試験での技術的な課題

小型 UAV 飛行の安定性、機体姿勢制御の安定性について、御茶ノ水オフィスと沼田試験場で行った実機テストで、技術的な課題が新たに判明した。

技術的な課題：

- (1) 機体飛行不安定 1 バッテリー残量：機体数が増えると各機のバッテリー残量に偏りが出てきて、不安定になった機体が高度を維持できなくなる。そして、近隣機体との期待する位置関係を維持できなくなり、他機がプロペラによるダウンフォースの影響を受け、不安定さが伝搬する。全機体が最後まで飛行することが難しかった。ダウンフォースの影響は、次項②のマーカーマウント重量増大で、ペイロード残に余裕がないためであることが一因として判明した。
- (2) 機体飛行不安定 2 個体識別と機体重量：飛行安定性は測位システムによるマーカーレイアウトの剛体認識性能の影響を受ける。剛体認識に失敗すると小型 UAV は落下する。剛体認識は UAV のマーカーレイアウトをユニークにする必要があるが、付属マーカーマウントでは 20 機の個体識別が難しい。よって自作マーカーマウントを追加する必要があるが、機体重量が増え飛行安定性が悪くなる。個体識別性能を高めるにはマーカーを大きくしマーカー間距離を離す方が良いが、機体重量に余裕がなくなる。逆に軽量化するとマーカーレイアウトに制約を受け、剛体認識性能が低下することが分かった。
- (3) 機体位置制御：予備試験にて 10 機単群をウェイポイントにより群制御を行なった。ここで、機体位置制御を `move_to` コマンドで行っていたが、コマンド頻度をあげると移動後の姿勢制御におけるオーバーシュートが影響し機体姿勢が不安定になりやすいことがわかってきた。
- (4) 親機誘導方法：試験シナリオ A を想定した小集団の群協調のシミュレーションの結果、親機同士がウェイポイントを取り合う場合、すれ違いや合流がスムーズにいかない。親機間の協調制御を考慮する必要があることが分かった。

上記の技術的な課題について、今回、予定していたスウォーム飛行は無事行えたが、試験エリアのサイズおよび同時に識別する機体数により、マーカーレイアウトの組み合わせ及びカメラの設置位置／向きを調整する必要があると考えられる。

R3FY は、複数小集団による試験飛行となりエリア内での機体数も増えるため、群フォーメーション及び飛行プランの再設計等が必要となると思われる。

機体制御に関しては、今回試した移動コマンドの変更で着陸制御も改修する必要がある。この離着陸制御の設計／開発も R3FY に行うこととなる。

以上のように、初年度の計画時では想定していなかった課題が判明した。来年度はこれらへの対応に、作業量の増加や経費の増加が見込まれるため、実施内容の見直しも視野に入れ、研究課題の達成に対策を検討したい。

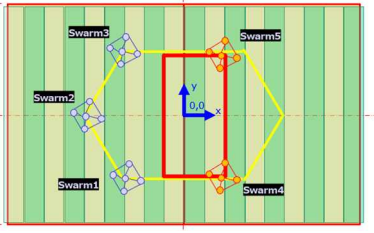
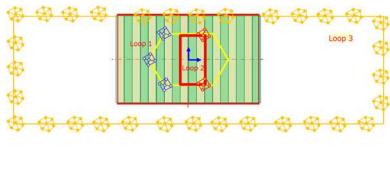
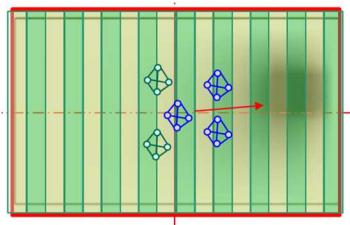
3.7.4. R3 スウォーム飛行の実環境試験の概要 (R3 年度)

本研究の最終目標の検証のため、表 3.7.4-1 に示すスウォーム飛行テストを実施し、検証項目を確認することが出来た。

試験は、1 スウォームの構成は、1 集団 5 機で親機は仮想、子機 4 機が実機とした。スウォームの数は 5 個集団である(図 3.7.4-1 参照)。スウォーム飛行試験エリアは、体育館の奥の半分を使用した(図 3.7.4-2 参照)。スウォーム飛行試験エリアのサイズは、10 m x 16 m である(図 3.7.4-3 参照)。

各試験シナリオの実機試験の結果は、次項以降に示す。

表 3.7.4-1 試験研究の実施内容

試験シナリオ A 2 重ループ	試験シナリオ A 拡張 3 重ループ	試験シナリオ B 流れ場切替誘導
実機 20 機 集団の群制御	仮想 230 機・実機 20 機	実機 20 機 集団の流れ場誘導
複数集団の合流・分離・すれ違いの検証 アルゴリズムの差異の検証	UAV250 機の群制御	誘導場によるスウォーム往復飛行 DQN 協調内力の検証
ウェイポイントによる周回飛行	ウェイポイントによる周回飛行	誘導場切り替えによるスウォーム飛行
		
スウォーム飛行は、陸上競技場のような周回コースを 2 重にした空路で行った。実機 20 機で小集団同士の群協調ができることを確認した。	3 重ループで仮想 250 機のうち 20 機を実機としスウォーム飛行し、大規模対応できることを確認した。	実機 20 機で、ゴールからゴールへと流れ場を切り替えてスウォーム飛行を行い、アルゴリズムが動作することを確認した。また、DQN 協調内力を用いてテストを実施した。
第 3.7.5.1 項参照	第 3.7.5.2 項参照	第 3.7.6.1 項、第 3.7.6.2 項参照 第 3.7.6.3 項参照 第 3.7.7 項参照

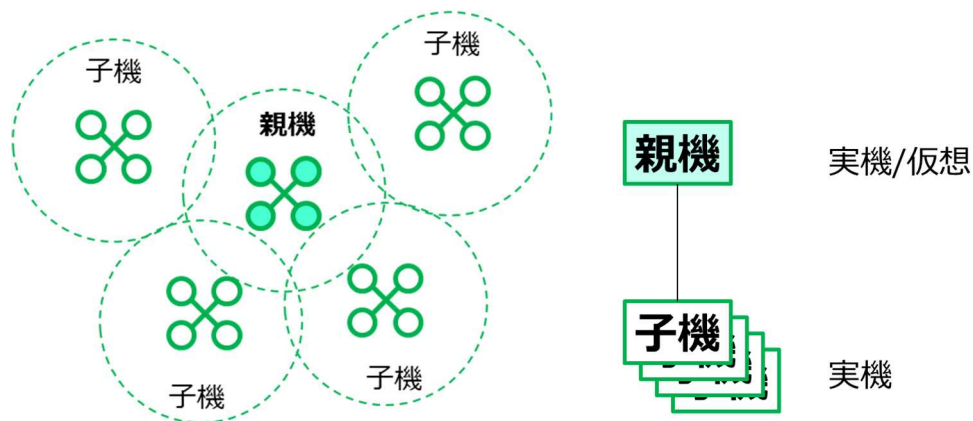


図 3.7.4-1 スウォーム (集団) の構成

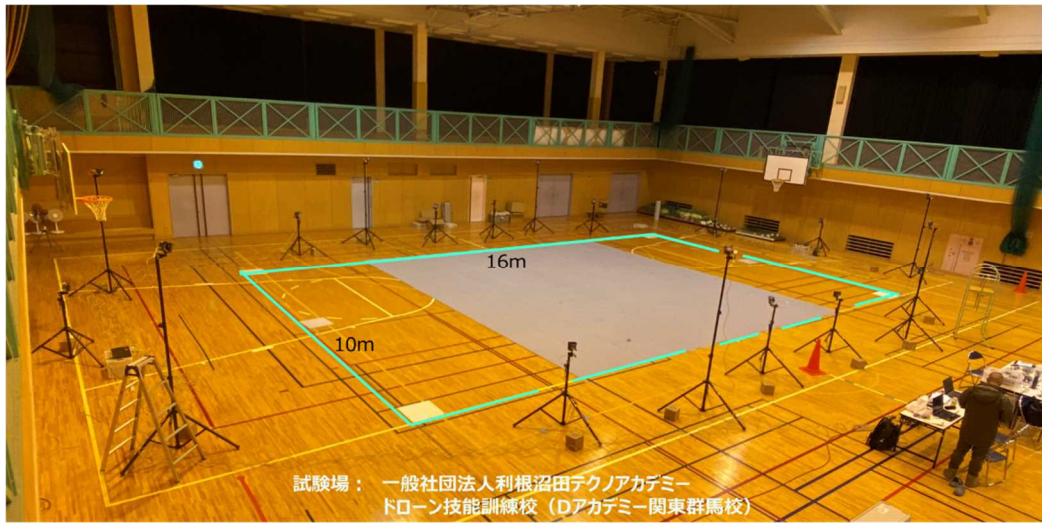


図 3.7.4-2 スウォーム飛行エリア外観

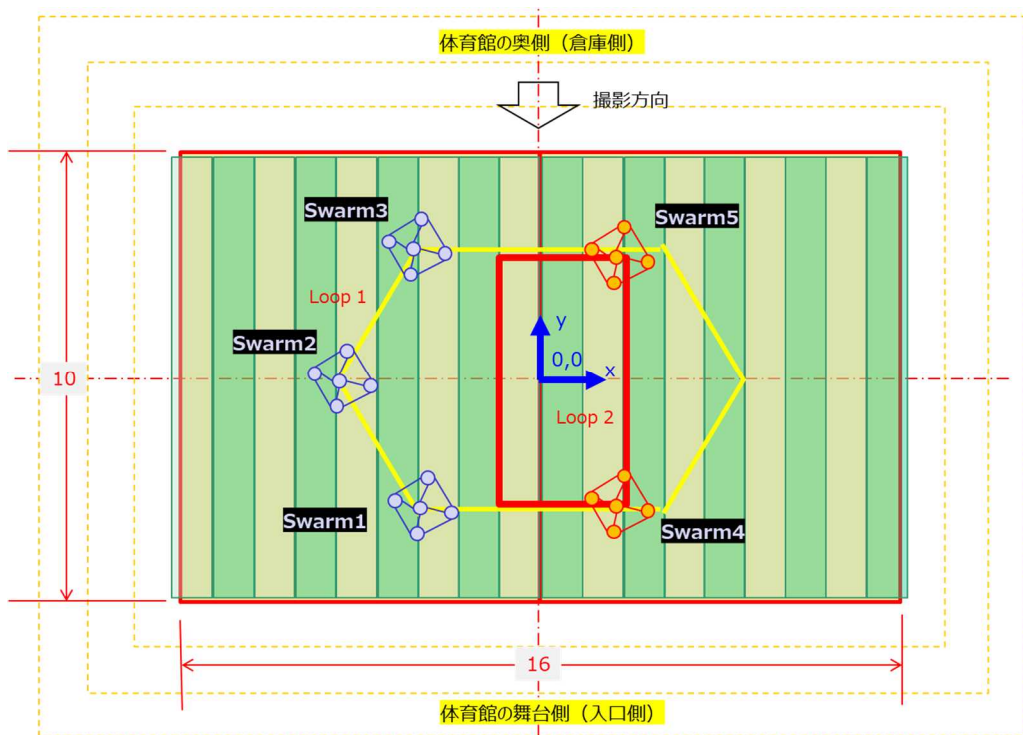


図 3.7.4-3 スウォーム飛行エリア寸法

3.7.5. 試験シナリオ A：2重ループ合流・分流、3重ループ大規模スウォーム飛行試験

3.7.5.1. 試験シナリオ A：2重ループ 仮想5機・実機20機

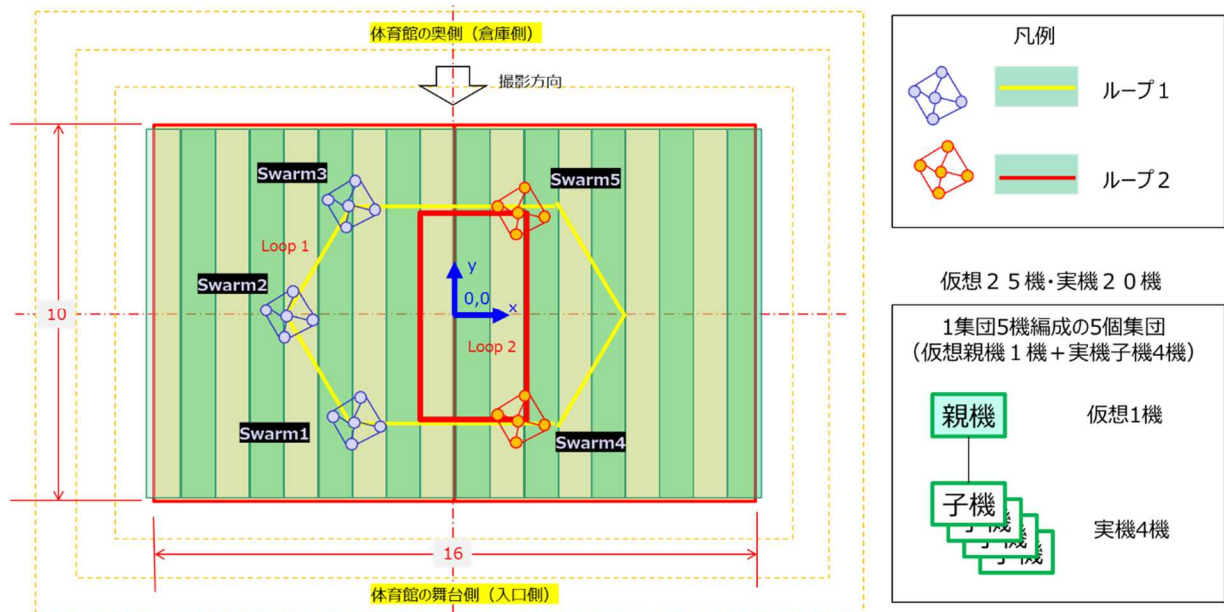


図 3.7.5-1 試験シナリオ A 2重ループの概要図

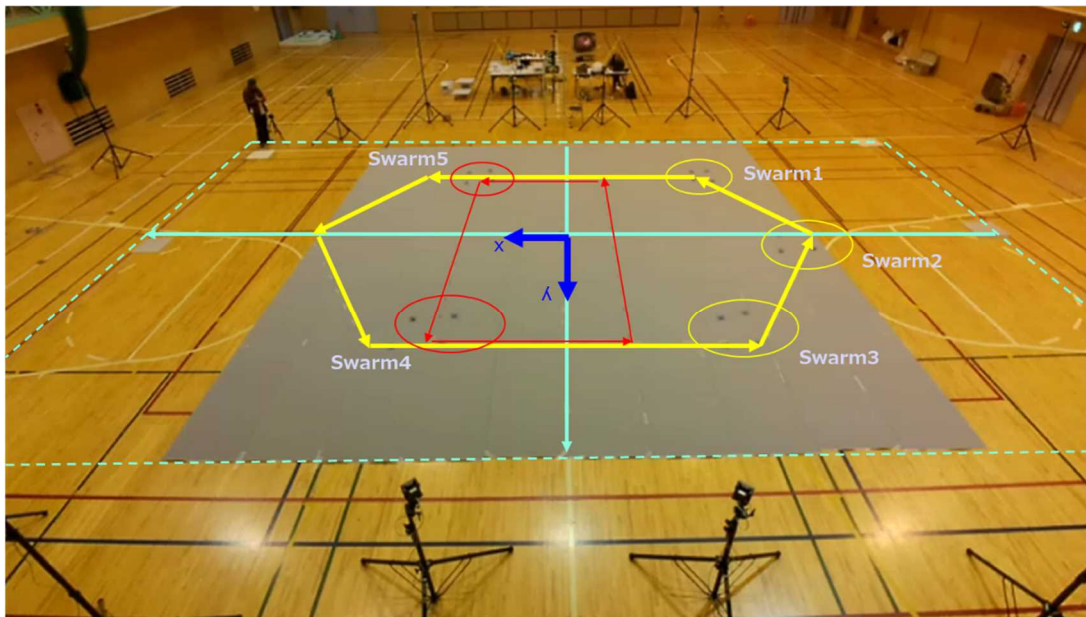


図 3.7.5-2 試験シナリオ A 2重ループの外観

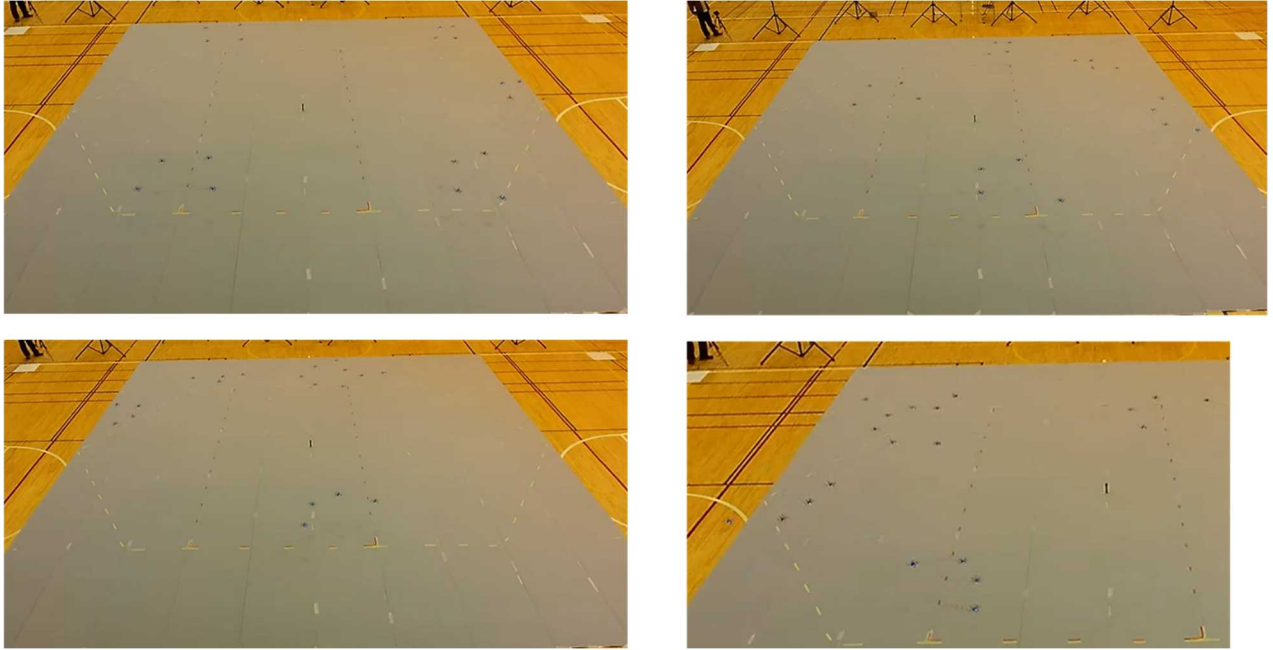


図 3.7.5-3 試験シナリオ A 2重ループ スウォーム飛行試験結果

3.7.5.2. 試験シナリオ A 拡張：3重ループ 仮想 230 機・実機 20 機大規模対応

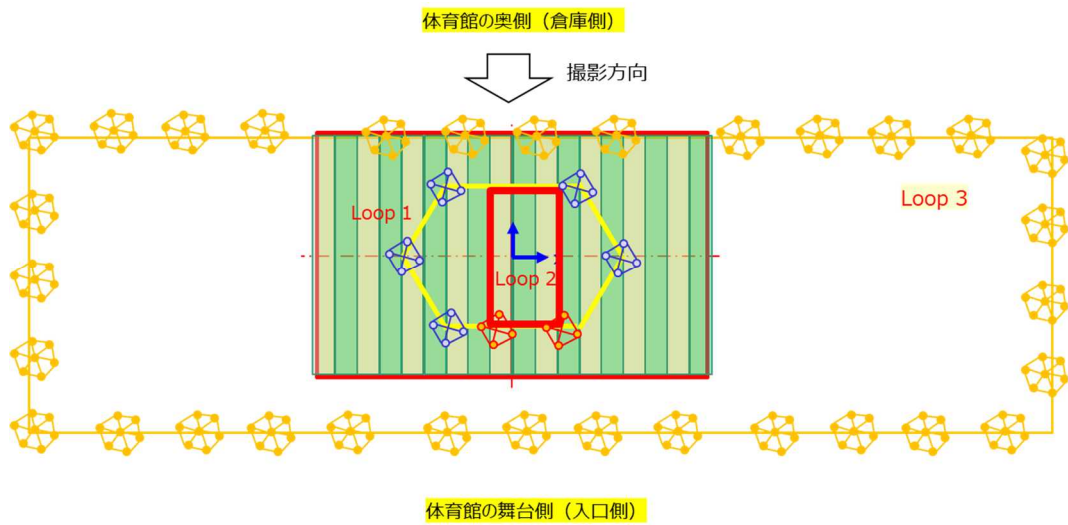


図 3.7.5-4 試験シナリオ A 拡張 3重ループの概要図

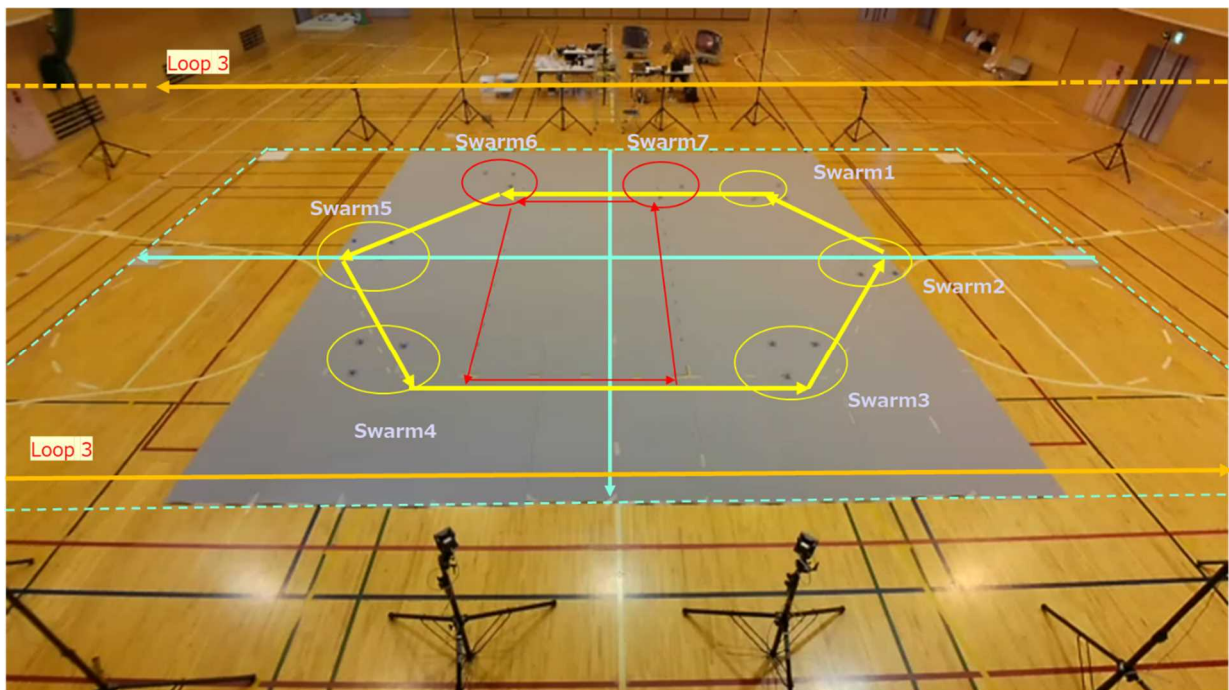
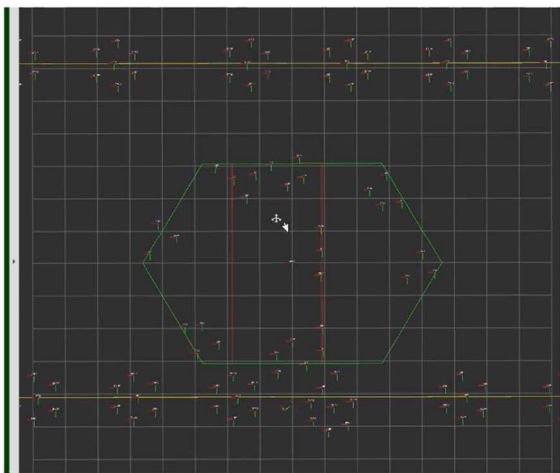
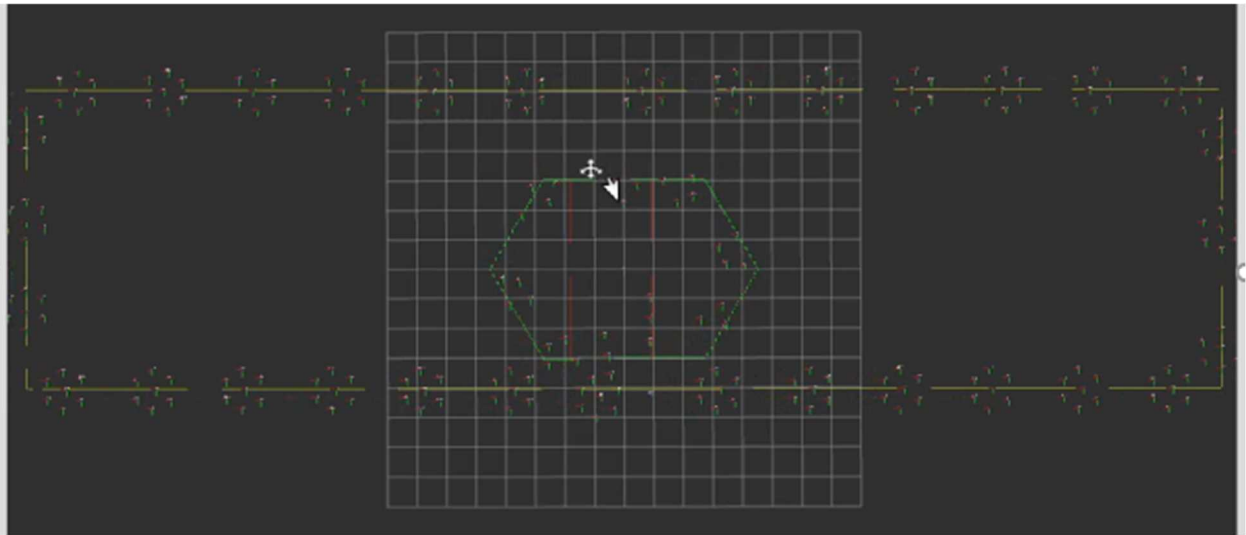


図 3.7.5-5 試験シナリオ A 拡張 3重ループの外観

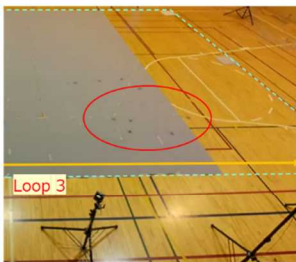


(左) 仮想環境でのシミュレーション

(右) 実環境での飛行テスト

Loop3のスワームに影響

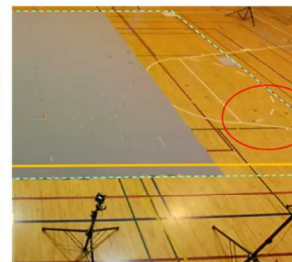
2分15秒



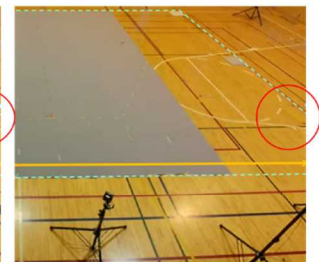
2分20秒



2分25秒



2分30秒



Loop3のスワームに影響を受けてLoop1, 2のスワームがコースを外れる

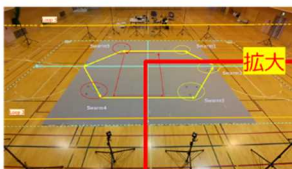


図 3.7.5-6 試験シナリオA 拡張 3重ループ周回の250機(うち実機20機)の群制御

3.7.6. 試験シナリオ B：複数ゴール流れ場誘導スウォーム飛行試験

3.7.6.1. 仮想5機・実機20機 単純ゴール形状スイッチング

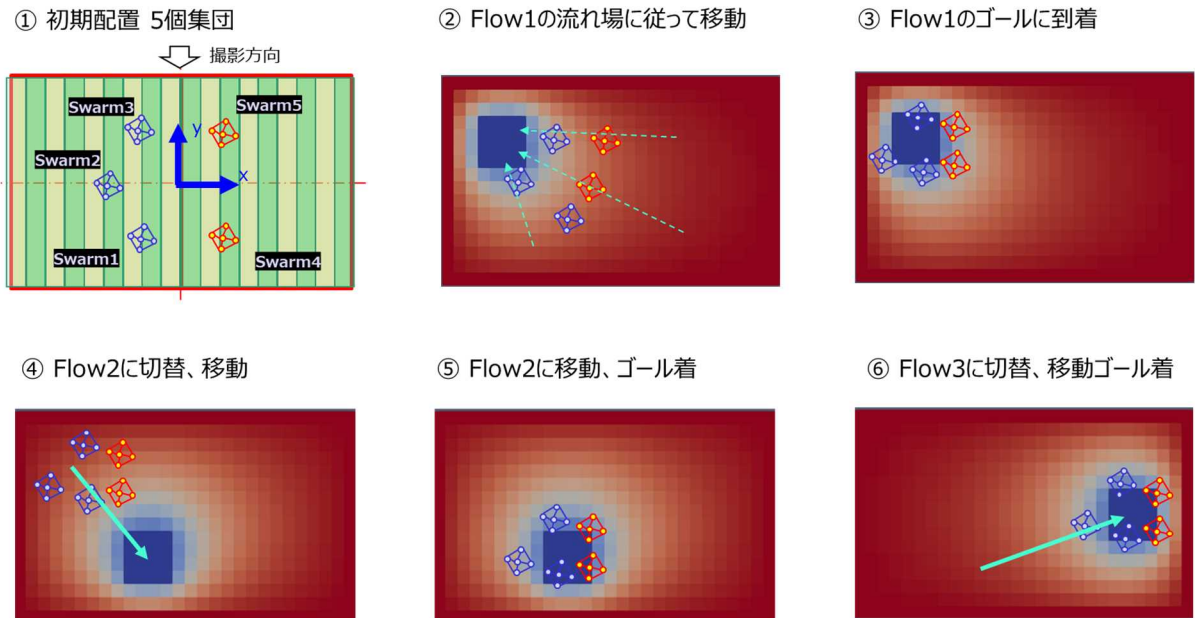


図 3.7.6-1 試験シナリオ B 誘導流れ場外力の切り替え概要図

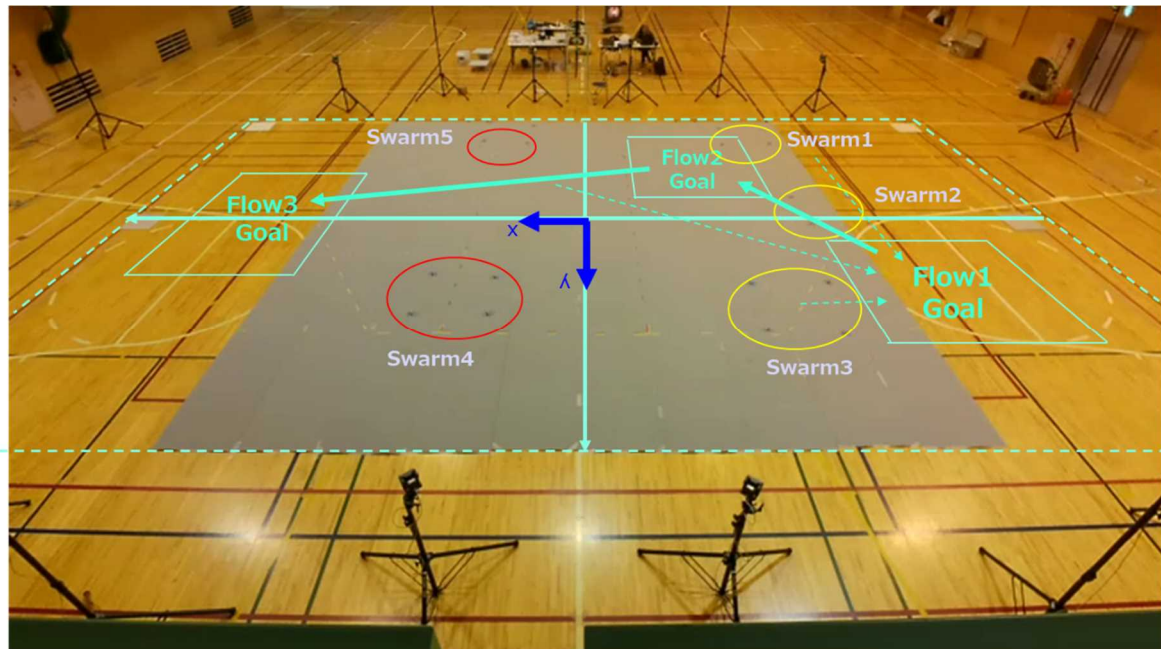


図 3.7.6-2 試験シナリオ B 誘導流れ場外力の切り替え外観

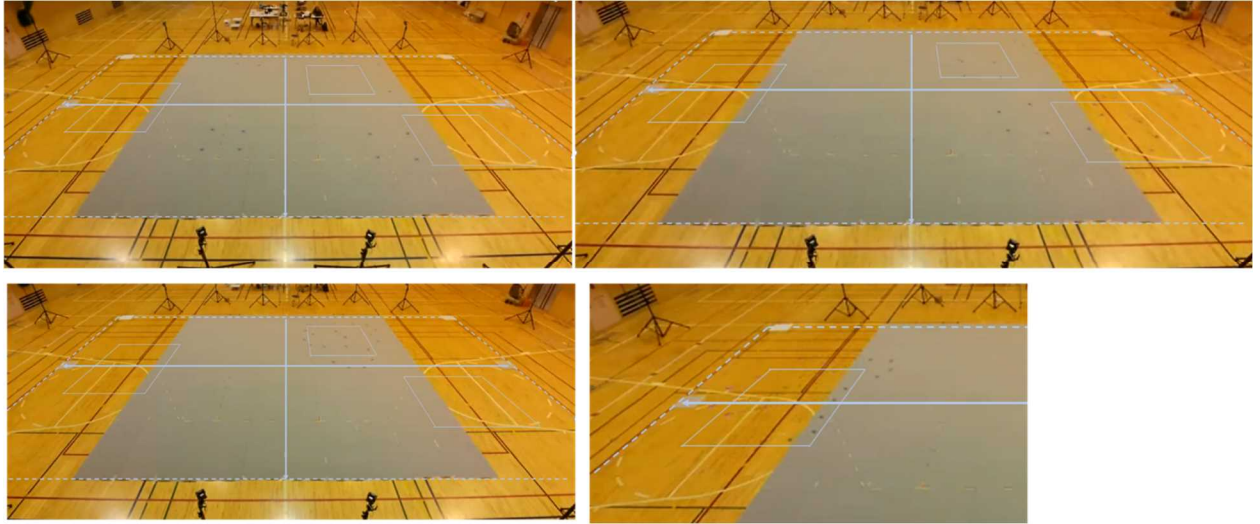


図 3.7.6-3 試験シナリオB 誘導流れ場外力の切り替え スウォーム飛行試験結果

3.7.6.2. 仮想5機・実機20機 複雑ゴール形状スイッチング

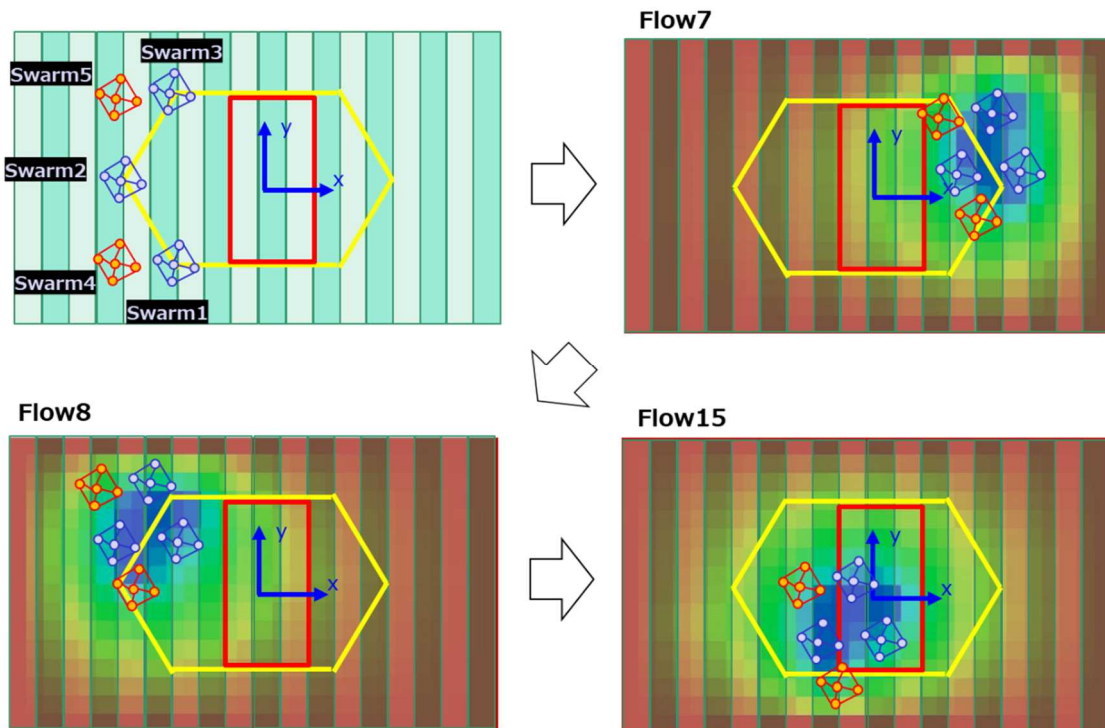


図 3.7.6-4 試験シナリオB 複雑形状ゴールへの群誘導

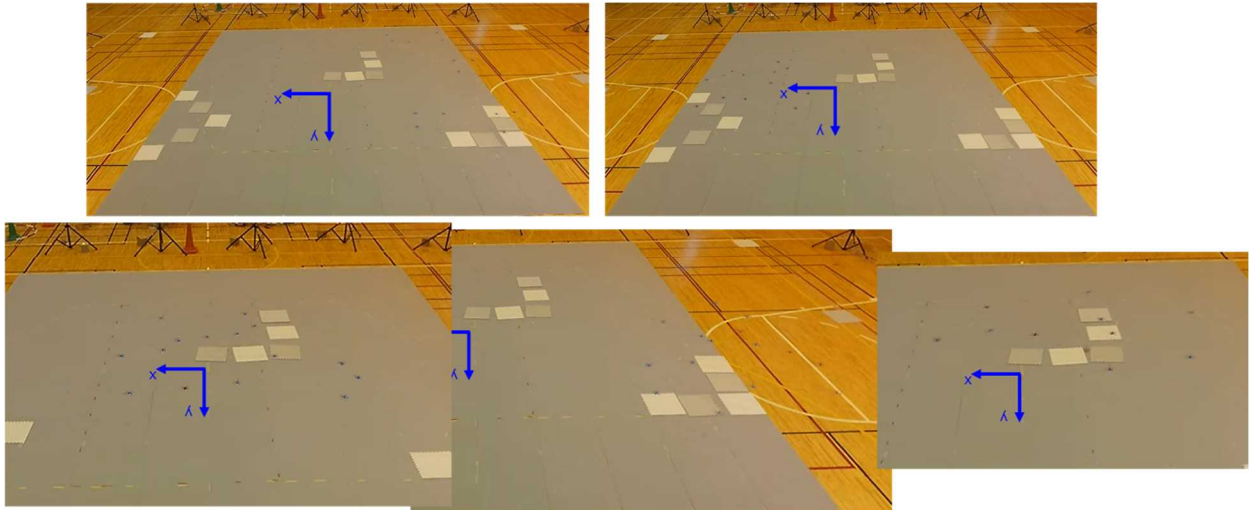


図 3.7.6-5 試験シナリオB 複雑形状ゴールへの群誘導 スウォーム飛行試験結果

3.7.6.3. DQN 協調内力適用試験

試験シナリオ B の単純ゴール形状について、協調内力関数を物理モデル協調内力関数から DQN 協調内力関数に入れ替えて、スウォーム飛行試験を実施した。スウォーム飛行の結果、機数を増やしていくと、物理モデルに比べて、落下する頻度が大幅に増加した。その原因は、群協調アルゴリズムの協調内力(加速度)値について、DQN モデルで求めた値が、物理モデルで求めた値に比べて、大きくなっている。この要因の一つは DQN の行動に由来すると考えられる(第 3.3.1 参照)。

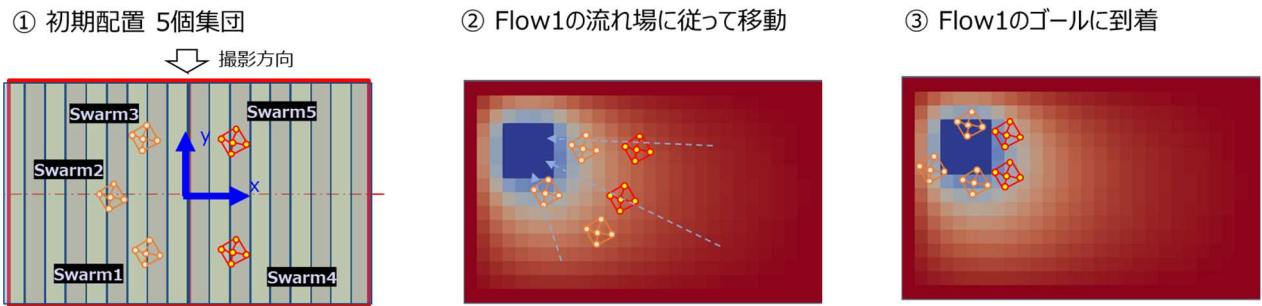


図 3.7.6-6 試験シナリオ B DQN 協調内力による群誘導

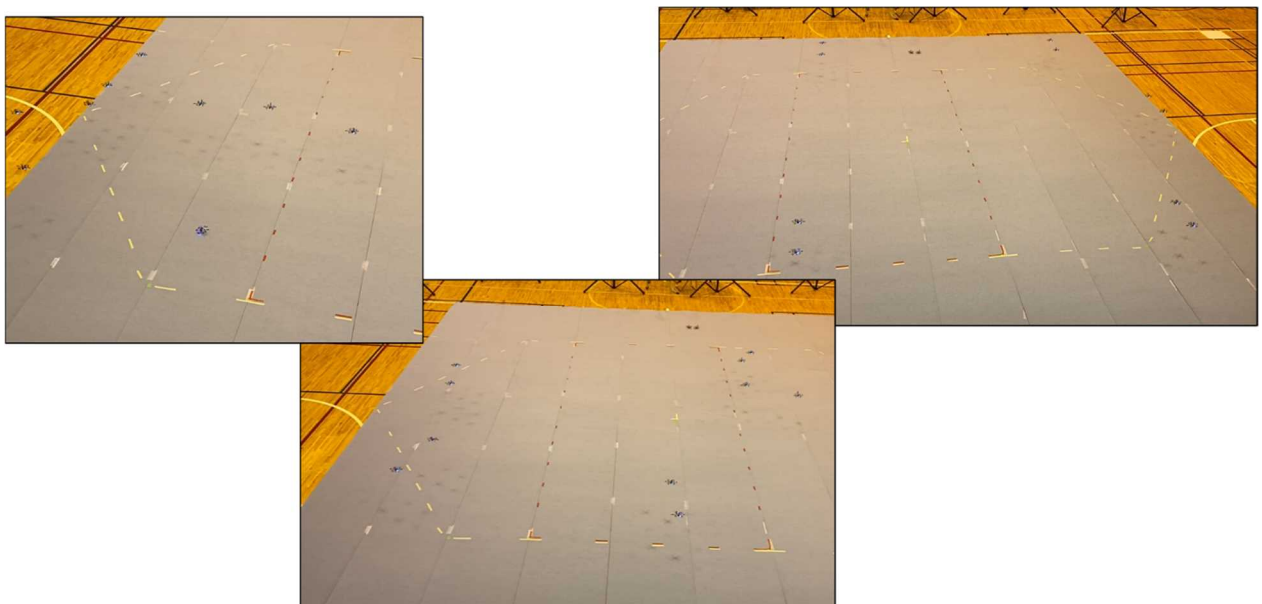


図 3.7.6-7 試験シナリオ B DQN 協調内力による群誘導 スウォーム飛行試験結果

3.7.7. 障害物回避 流れ場誘導スウォーム飛行試験

流れ場誘導については、前項の試験シナリオBにて実証できた。AI CFD の拡張性を見るために、障害物の回避について、AI CFD により流れ場の生成を行った。しかし、流れ場の生成は数値解析結果を再現できなかった。AI CFD による障害物回避の流れ場生成には、追加の学習が必要となる。

このため、将来において障害物回避について追加学習させた AI CFD を想定し、数値解析で求めた流れ場を用いスウォーム飛行テストを行った。その結果、障害物を回避してゴールに向かうことが出来た。

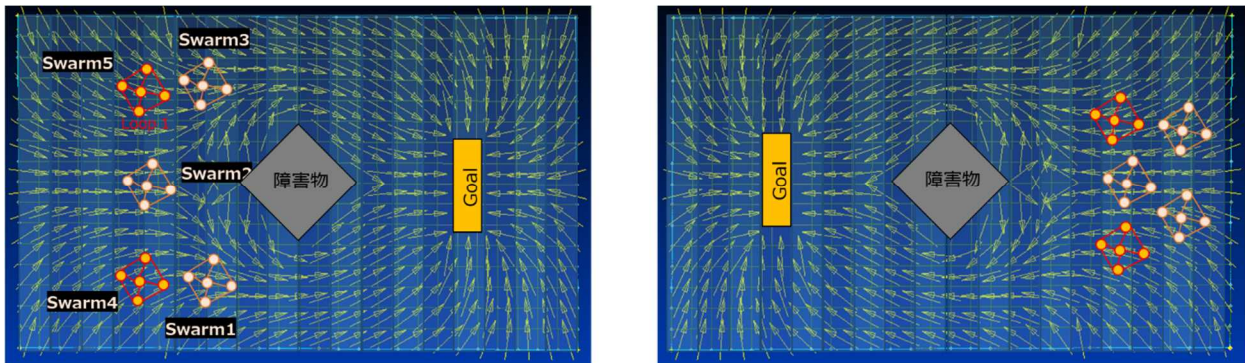


図 3.7.7-1 障害物回避流れ場誘導

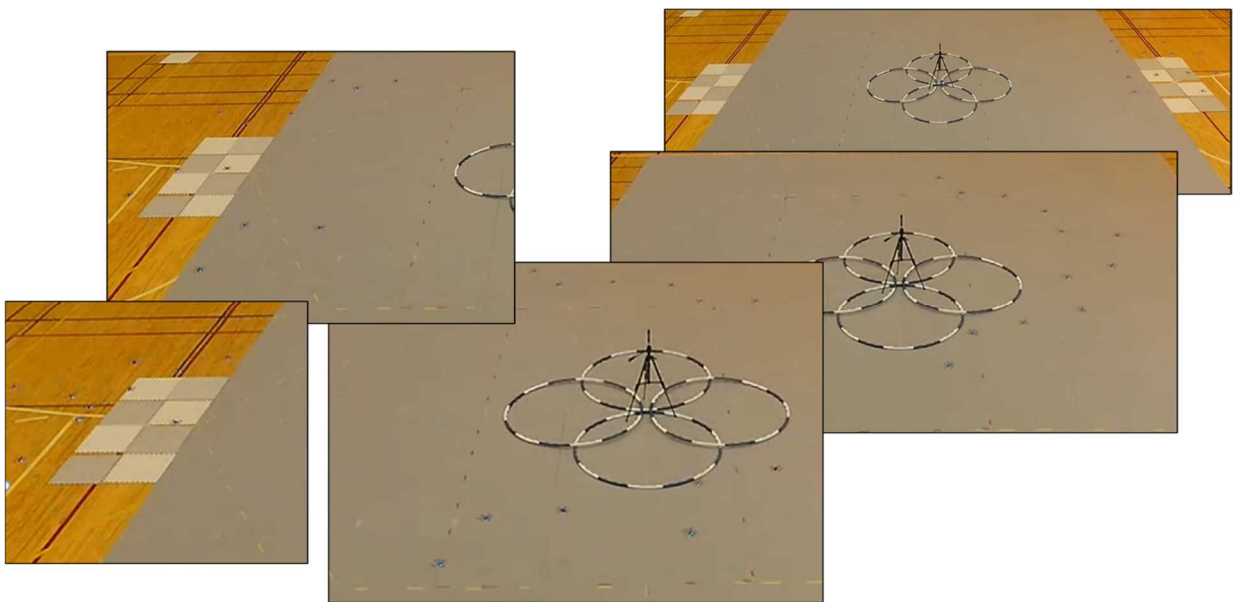


図 3.7.7-2 障害物回避流れ場誘導 スウォーム飛行試験結果

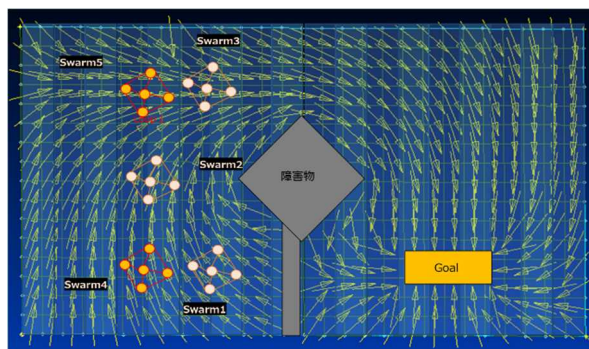


図 3.7.7-3 障害物迂回流れ場誘導

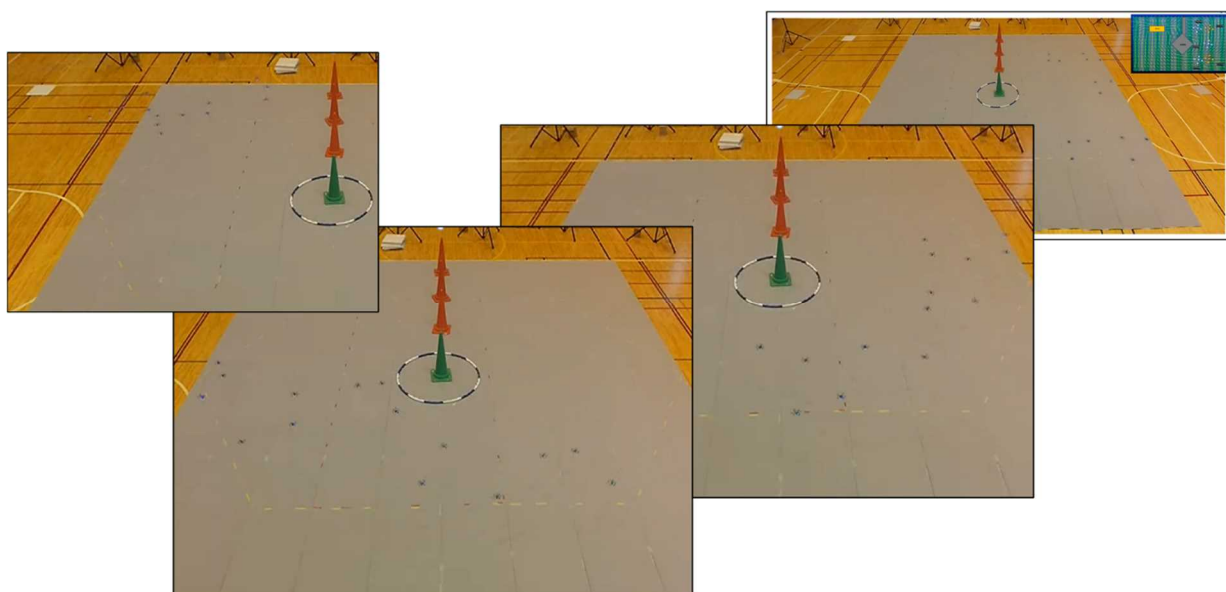


図 3.7.7-4 障害物迂回流れ場誘導 スウォーム飛行試験結果

4. 委託業務全体の成果

4.1. 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

当初予見していなかった展開（副次的成果）、及び本研究に取り組む過程で得られた新たな方法論等の創出（副次的成果）について示す。

4.1.1. 仮想環境と実環境のギャップ（応答遅延）による衝突の危険回避方法

本研究の物理学ベース群知能は、移動体のトラフィック制御やマルチエージェント制御に、CAE/物理シミュレーション技術を応用した制御技術の一種である。その特徴は、制御演算の高速化、移動体の機数・台数の大規模化、集団の連携の柔軟性向上に対応するものである。

しかし、本技術のシミュレーションの行動予測による制御は、仮想空間による制御演算と実運用空間での実機応答のギャップの存在のため、衝突の危険性を内在している(図 4.1.1-1 参照)。

仮想環境と実機環境のギャップ、即ち応答遅延の問題の解決策のひとつに、応答遅延を限りなくゼロに近づける方法がある(図 4.1.1-2 参照)。その手段のひとつに、次世代通信規格である 5G 通信の活用が提案されている(図 4.1.1-3 参照)。本研究の当初、我々も 5G 活用を前提としていた。

しかし、遅延はミリ秒のオーダーであるが、ゼロにはならないため、危険性もゼロにならない。これは、人命に係わる交通用途や産業用途に適用する場合、リスクを評価し適正に運用する必要があり、耐空性の証明のコストが増大する。

そこで、本研究において、航空機の構造設計の手法である損傷許容性設計にヒントを得て、この遅延を許容する制御方式を考案した(図 4.1.1-2、図 4.1.1-4 参照)。そして、シミュレーションによる検証を、IPA が提案する 3D ボクセルによる CPS ドローン制御方式(図 4.1.1-5 参照)を前提に、2D セルによるシミュレーションで、本手法の有用性を確認した(図 4.1.1-6 参照)。また、工場や物流における搬送工程で使われる無人搬送ビークル(AGV)の実機制御に適用し、その安全性を実機で検証した(詳細は第 0 項参照)。

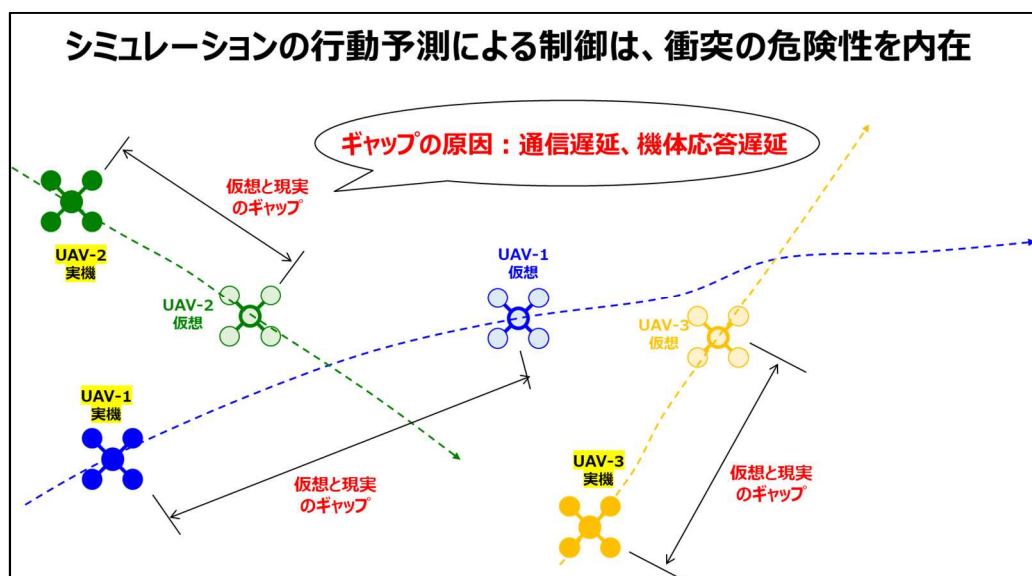


図 4.1.1-1 課題：仮想環境と実環境のギャップによる安全性・信頼性への悪影響

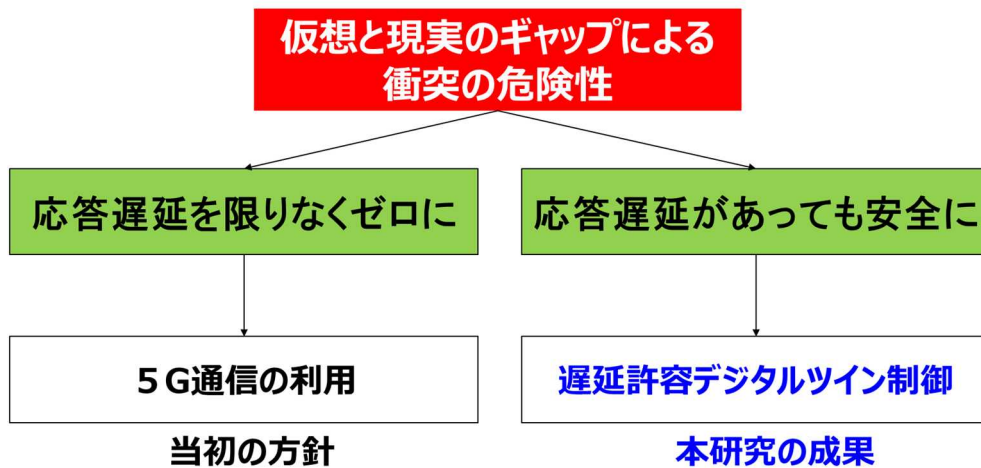


図 4.1.1-2 応答遅延の危険性への解決策

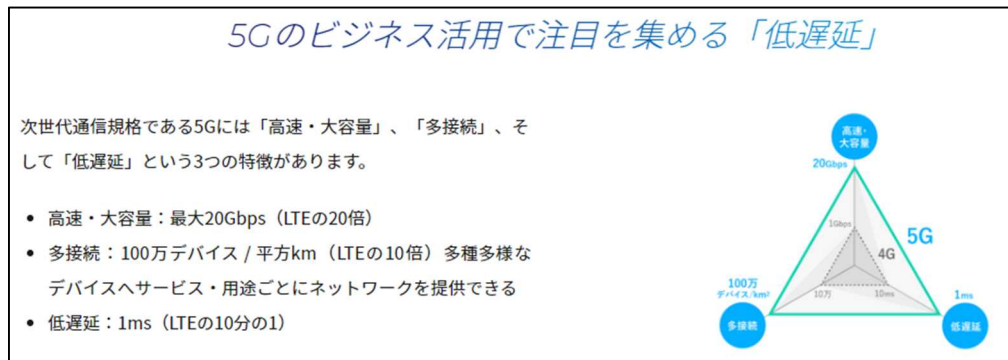


図 4.1.1-3 5G 通信の例(出典: <https://biz.kddi.com/beconnected/feature/2019/190319/>)

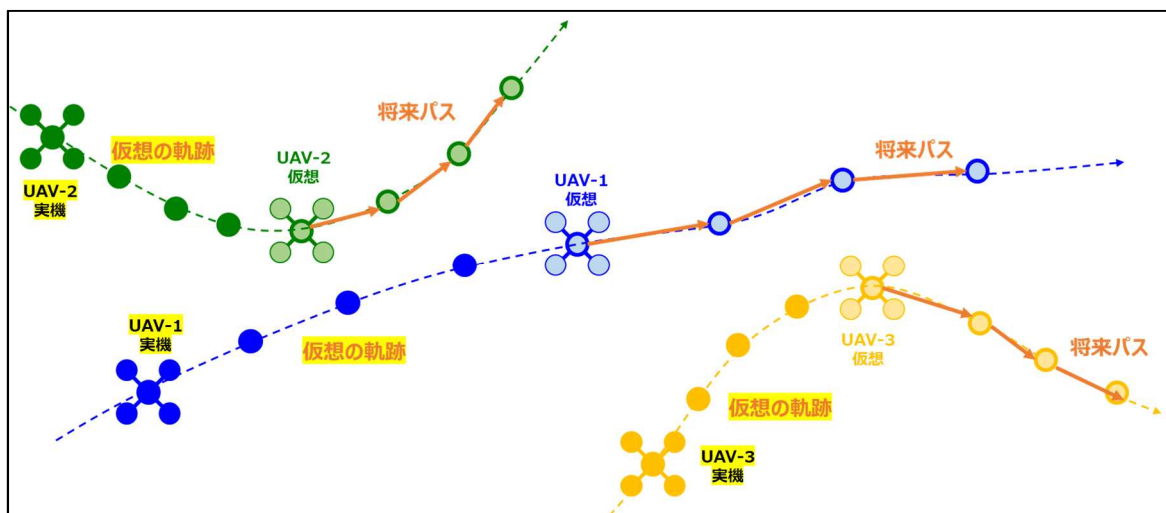


図 4.1.1-4 遅延許容デジタルツイン制御の仕組み

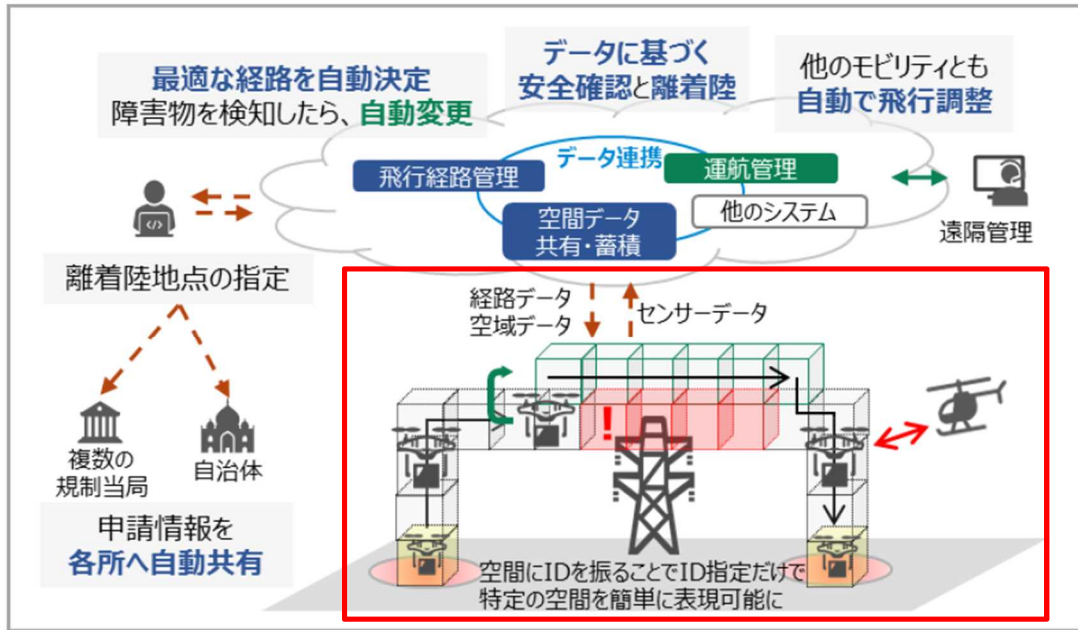


図 2-2 サイバー・フィジカルシステムによるドローンの運用の例

図 4.1.1-5 IPA 提案のサイバー・フィジカルシステムによるドローン制御方式

ドローン利活用のアーキテクチャ設計中間報告書(図 2-2 より)
 独立行政法人 情報処理推進機構 (IPA) デジタルアーキテクチャ・デザインセンター (DADC)
 自律移動ロボットプログラム(2021年7月)

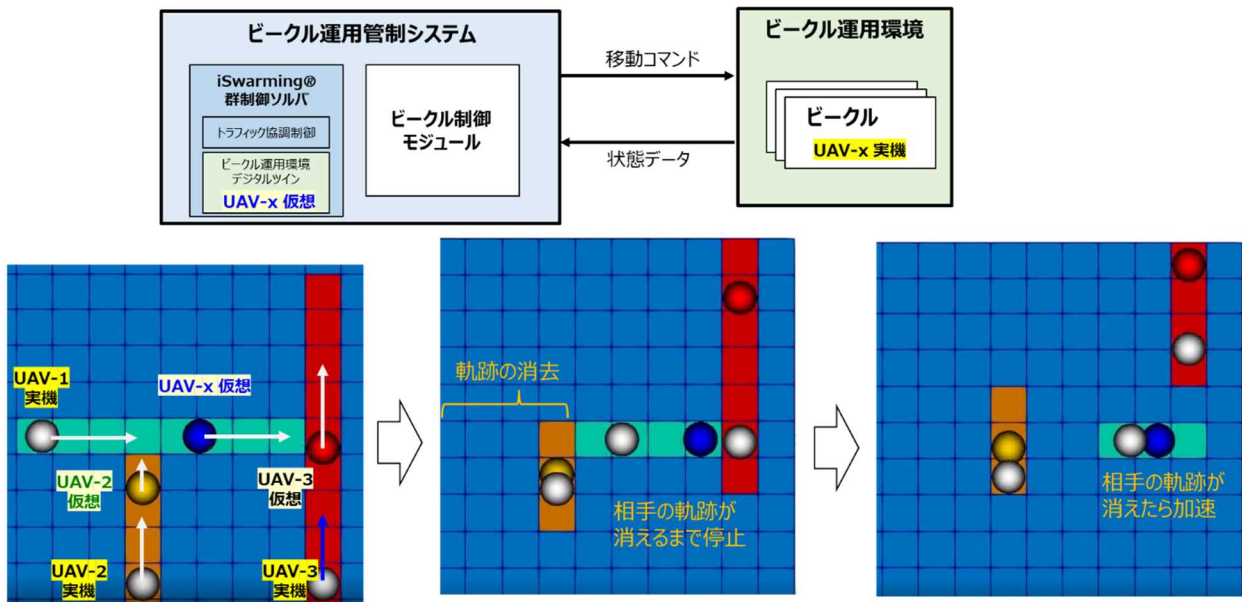


図 4.1.1-6 シミュレーションによる遅延許容デジタルツイン制御の検証

IPA の 3D ボクセル方式を 2D セルで検証

4.1.2. UAV ダウンウォッシュ(プロペラ後流)による墜落の危険回避方法

予備試験として2機のUAVでスウォーム飛行をしていた時、ひとつのUAVのダウンウォッシュ(プロペラ後流)により、相手の飛行姿勢が崩れる事象を観察した。この影響を見るために、外乱影響試験を実施し、ダウンウォッシュにより墜落することが確認された(図 4.1.2-1、図 4.1.2-2 参照)。機体重量が最大離陸重量に近い場合、その危険性が高まる。

本研究の粒子法による群制御は、機体を粒子に見立てて、衝突を回避、協調運動を行っている。

そこで、このダウンウォッシュを粒子で表現することで、UAV粒子は、ダウンウォッシュ粒子を他のUAV粒子と同様に回避することができる(図 4.1.2-3 参照)。

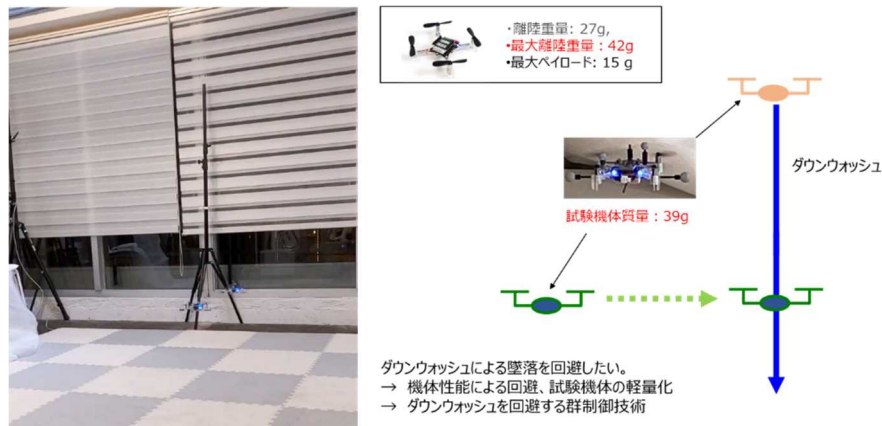


図 4.1.2-1 外乱影響確認試験(R2FY)

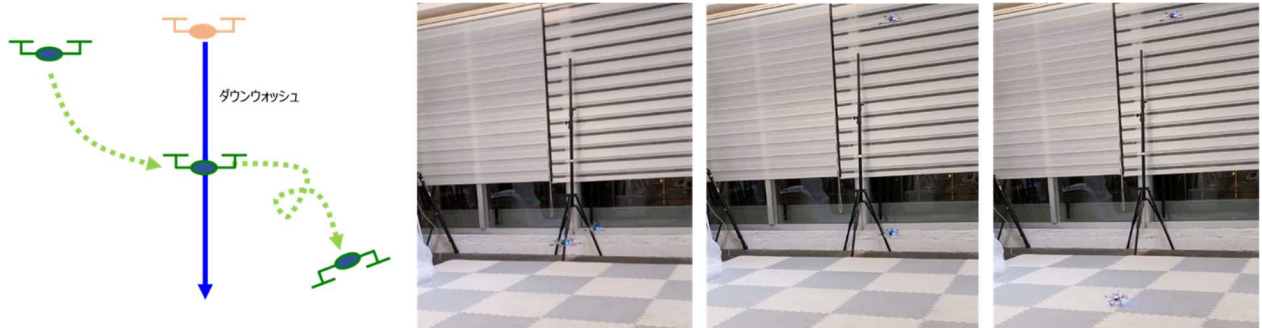


図 4.1.2-2 ダウンウォッシュによる墜落の危険性

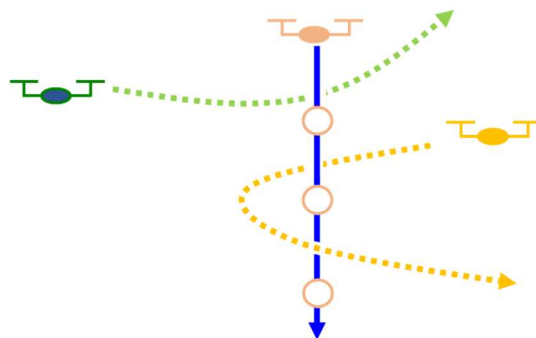


図 4.1.2-3 ダウンウォッシュの粒子化により UAV 粒子は衝突を回避

4.2. 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

研究成果が関連する学術・産業分野の発展に幅広く寄与し得るかの見通し、及び研究成果の発展に向けた取り組みの実例又は計画を示す。また、研究成果の今後の発展や波及にあたり障害となるようなボトルネックや、その解決の見通しに関して本研究で得られた知見を示す。

4.2.1. 研究成果の産業分野発展に向けたロードマップ

本研究成果の産業分野への適用は、物流（工場内物流含む）、交通、エアモビリティの分野に向けて進めている（図 4.2.1-1 参照）。

既に、物流や工場の搬送工程における無人搬送ビークルの群制御に本成果を活用したトラフィック協調制御モジュール「iSwarming@群制御ソルバ」を開発し、AGV 搬送システムへ適用している。また、上記の技術は、IPA が提案する「CPS による高密度ドローン運行の将来像」のアーキテクチャ設計に適合するので、エアモビリティのトラフィック協調制御への適用を行う予定である。

次項以降に詳細を示す。

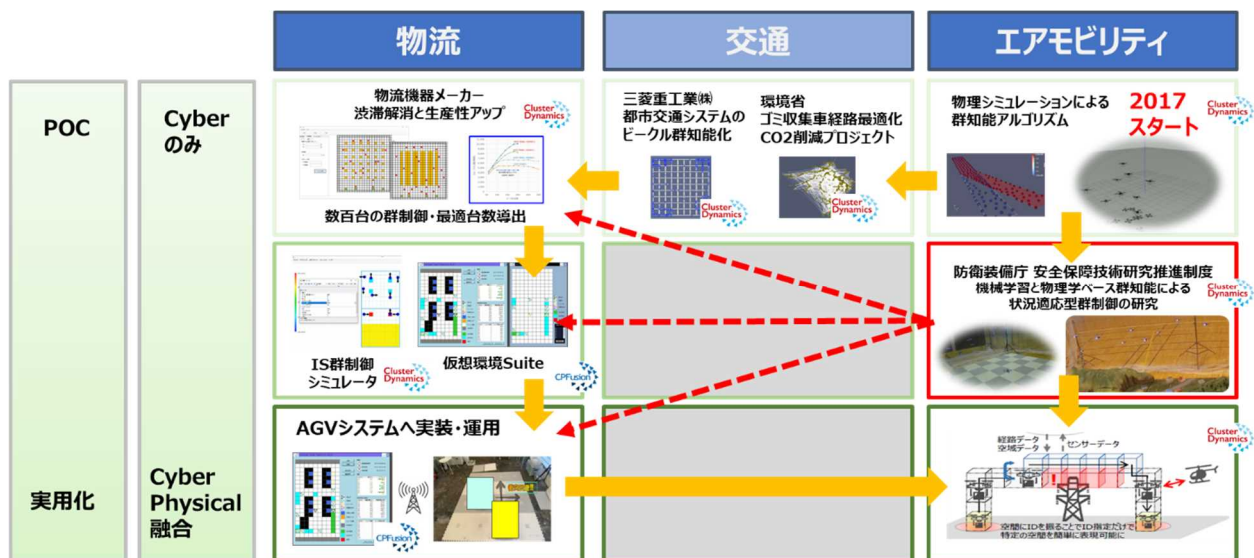


図 4.2.1-1 研究成果の社会実装に向けたロードマップ

4.2.2. 【産業】 物流・工場の搬送工程における無人搬送ビークル制御への適用

本研究の成果である「粒子法シミュレーションによる制御方式」及び「遅延許容デジタルツイン制御」を、地上で運用される無人搬送ビークルの群制御に適用した。これらの制御方式を3D空間の適用から2D空間（AGV視点で1D空間）へ展開した(図 4.2.2-1 参照)。

これらの制御方式は、iSwarming@群制御ソルバモジュールに実装している(図 4.2.2-2 参照)。このソフトウェアモジュールは、顧客の倉庫や工場の搬送システムへの組み込み(図 4.2.2-3 参照)、制御検証シミュレータへの組み込み(図 4.2.2-4 参照)、及び搬送工程設計シミュレータへの組み込み(図 4.2.2-5 参照)を進めている。

また、iSwarming@群制御ソルバを組み込んだ、制御検証シミュレータ及び搬送工程設計シミュレータは、ソフトウェアアプリケーションとして提供している(図 4.2.2-6、図 4.2.2-7 参照)。

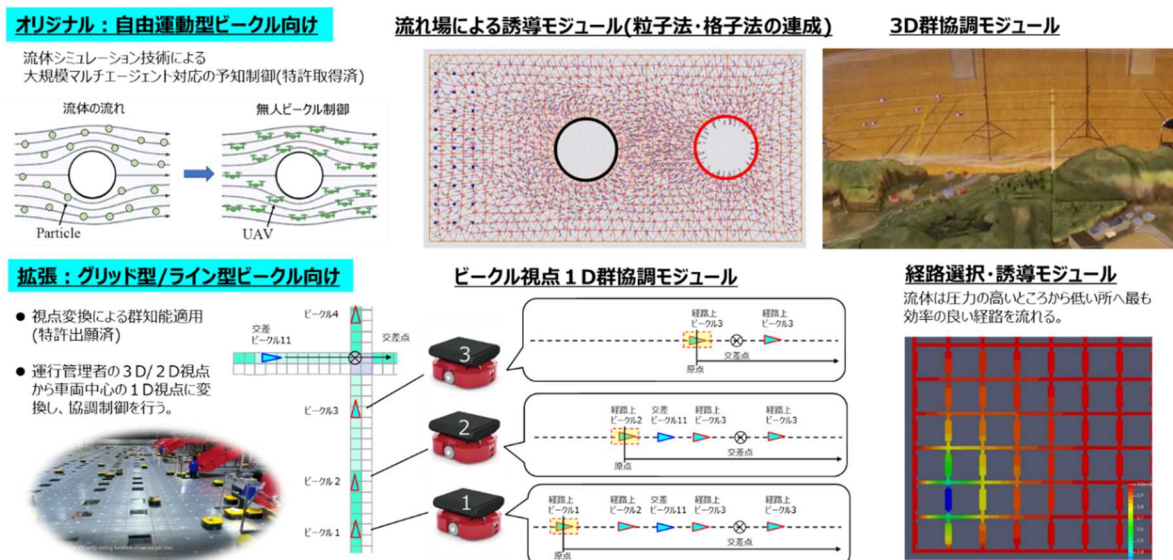


図 4.2.2-1 グリッド型・ライン追従型 地上ビークル向けソリューションへの応用

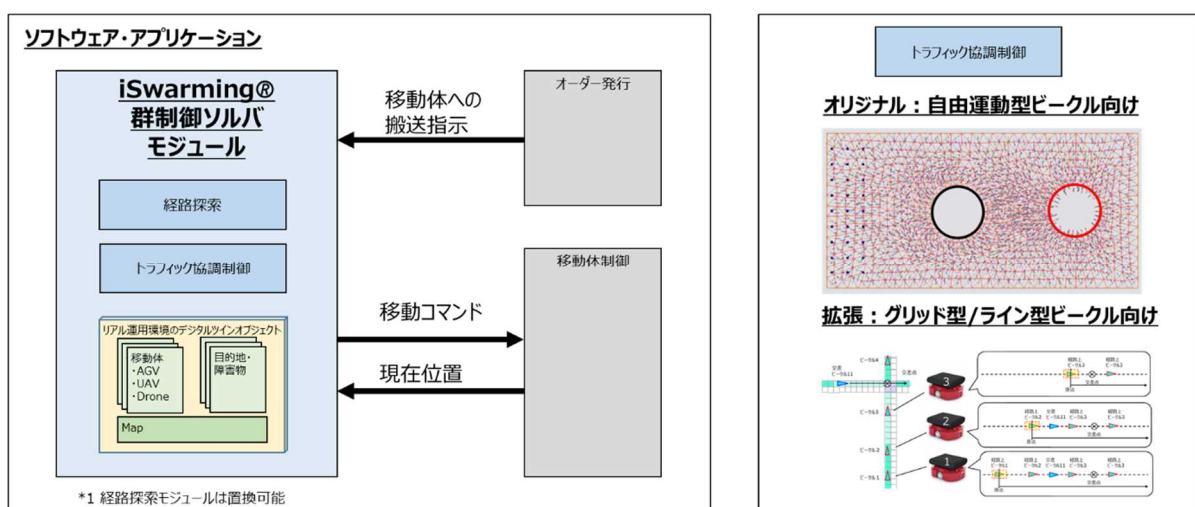


図 4.2.2-2 群知能アルゴリズムのソフトウェアへの実装

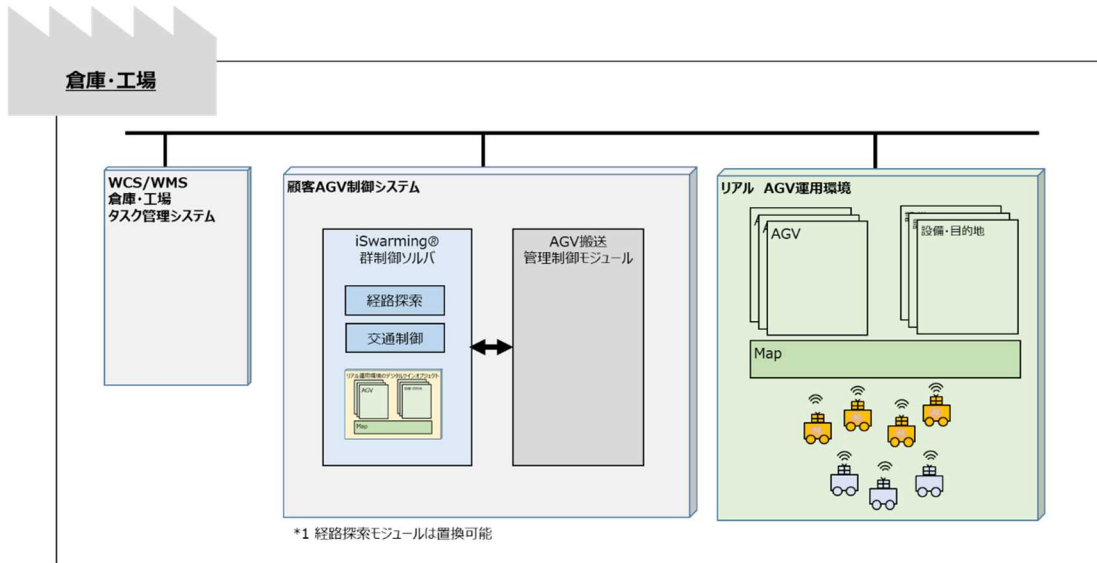


図 4.2.2-3 顧客システムへの組み込み

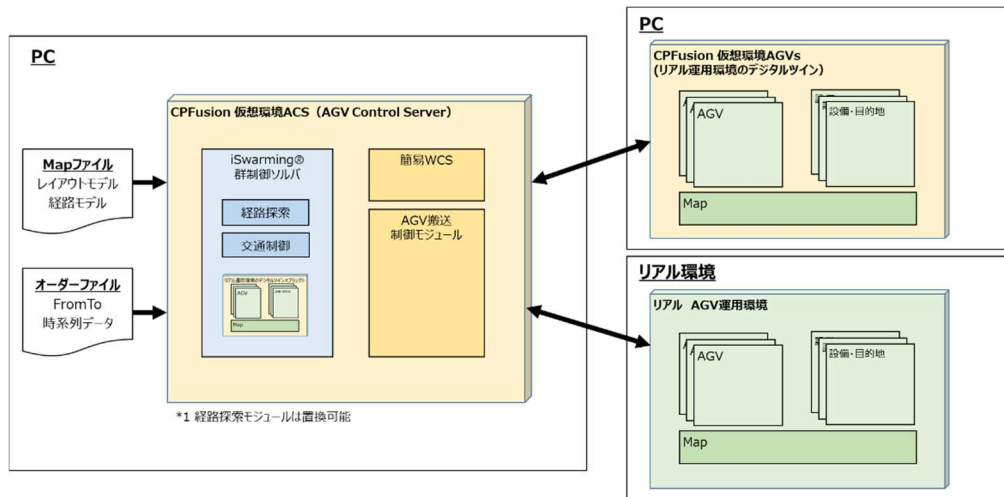


図 4.2.2-4 制御検証シミュレータ(仮想テスト環境)への組み込み

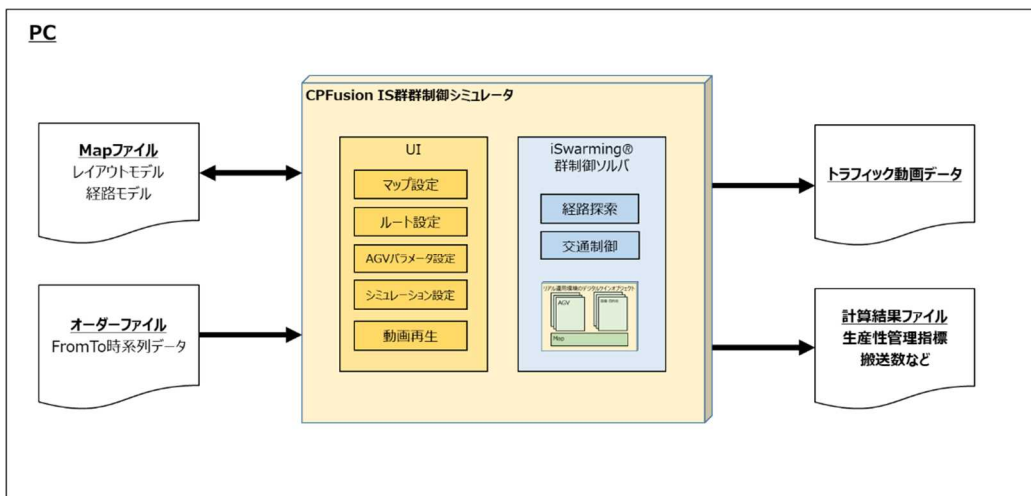


図 4.2.2-5 搬送工程設計シミュレータへの組み込み

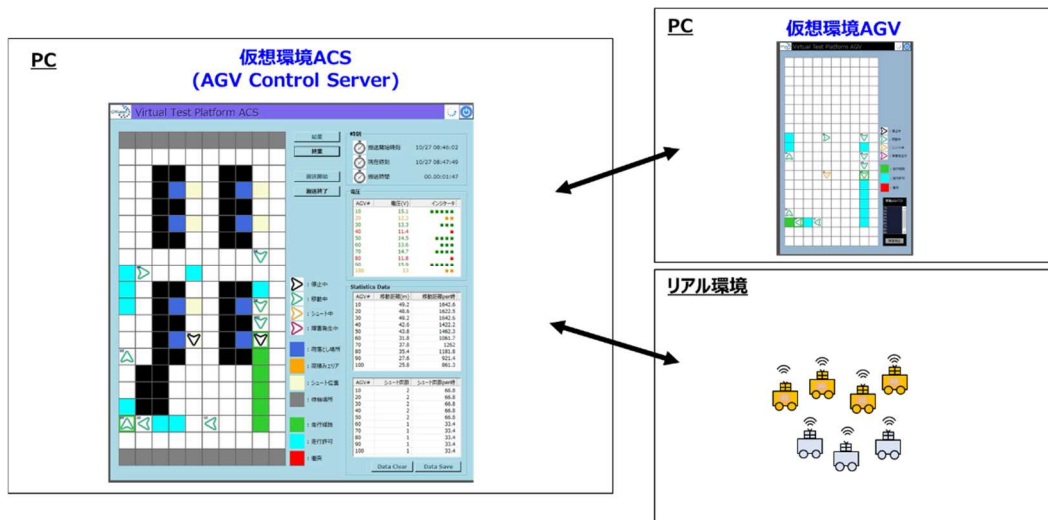


図 4.2.2-6 制御検証シミュレータ：CPFusion 仮想テスト環境 ACS-AGVs

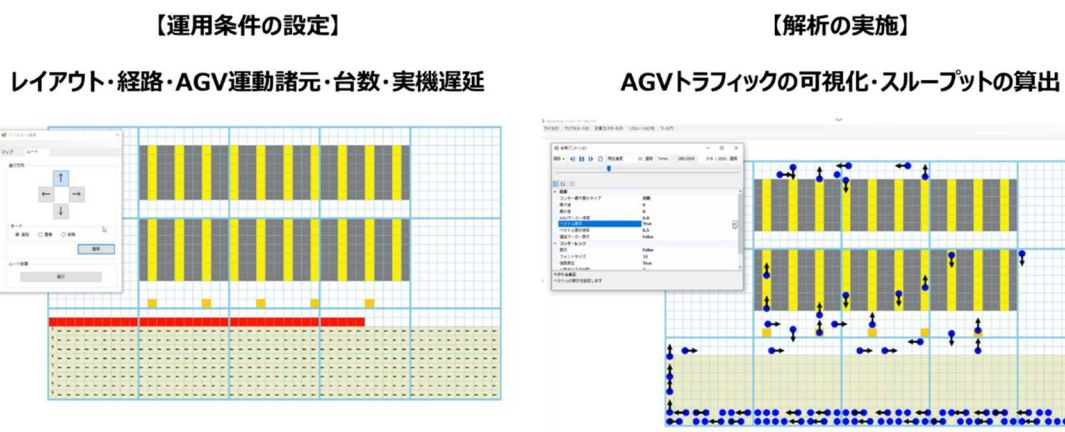


図 4.2.2-7 搬送工程設計シミュレータ：CPFusion IS 群制御シミュレータ

4.2.3. 【産業】 IPA ドローン高密度運用サイバー・フィジカルシステムへの適用

空飛ぶクルマの実現に向けて進む研究開発・実証実験・制度整備が加速している。そのひとつとして、独立行政法人 情報処理推進機構 (IPA) のデジタルアーキテクチャ・デザインセンター (DADC) は、ドローン利活用のアーキテクチャ設計 中間報告書(2021年7月)にて、ドローン利活用の将来ビジョン(図 4.2.3-2 参照)を構築し、ドローンの高密度運用のためのサイバー・フィジカルシステムとして、空間ボクセル ID 方式による CPS 運行管制方式を提案した(図 4.2.3-2 参照)。

一方、我々は、本研究にて物理シミュレーション技術を用いたビークル集団のダイナミクスを考慮した制御デジタルツインを構築し、小集団群制御技術(Swarm of Swarm)により、UAV について、仮想空間で 250 機、実機で 10 機の安定的な群制御に成功した。また、遅延許容デジタルツイン制御を IPA のセル方式を前提にシミュレーションで検証を行い(第 4.1.1 項参照)、地上無人ビークルについて、仮想空間で 300 台、実機で 4 台の集団運用に成功した。

そして、IPA の空間ボクセル ID の群制御方式は、前出のグリッド型 AGV の群制御方式と類似性が高い。遅延許容デジタルツイン制御技術により、応答遅延を織り込んだ飛行安全を実現し、小集団群制御技術を適用することで、更なる高密度・高効率・省人化の運行が可能となる。(図 4.2.3-3、図 4.2.3-4 参照)。

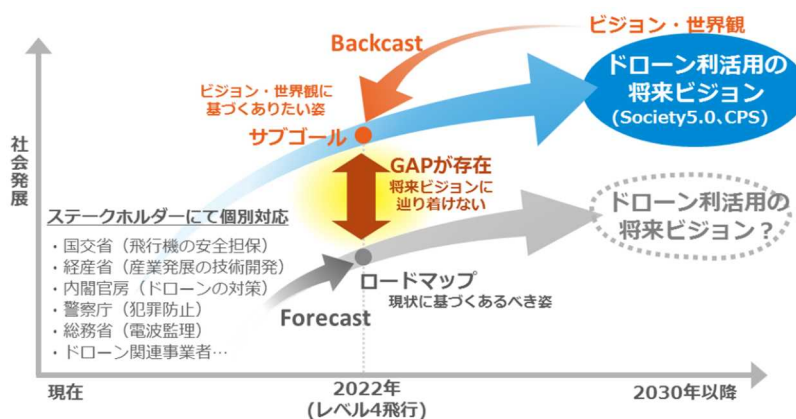


図 1-2 ドローン利活用の将来ビジョン実現の方向性

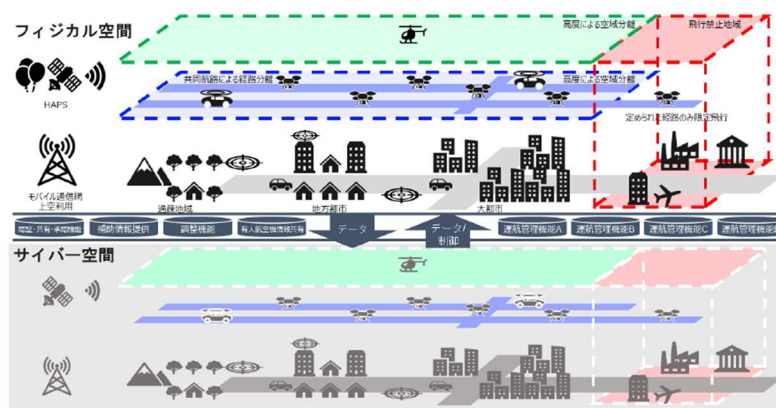


図 2-1 Society5.0 でのドローンの運用イメージ

図 4.2.3-1 IPA ドローンの利活用の将来ビジョンとドローン運用イメージ

独立行政法人 情報処理推進機構 (IPA) デジタルアーキテクチャ・デザインセンター (DADC) 自律移動ロボットプログラム(2021年7月) より

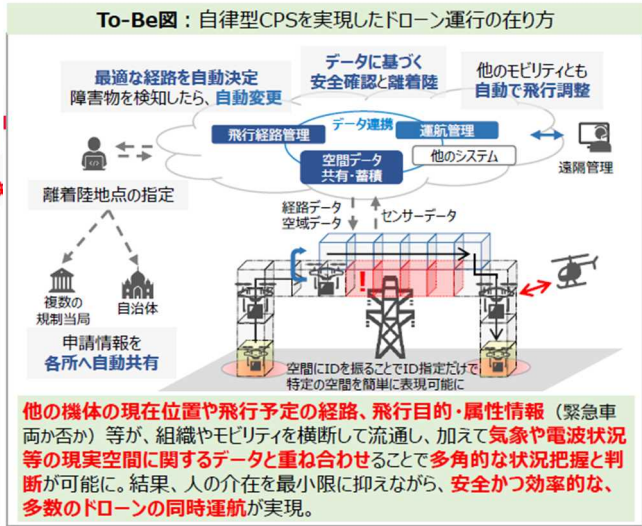
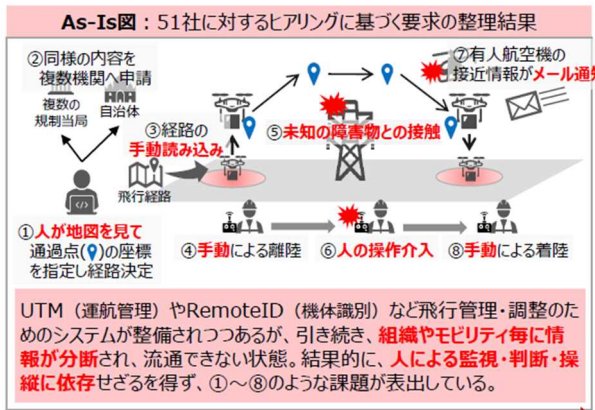


図 4.2.3-2 IPA 自律型CPS を実現したドローン運行の在り方

独立行政法人 情報処理推進機構 (IPA) デジタルアーキテクチャ・デザインセンター (DADC)
自律移動ロボットプログラム(2021年7月) より

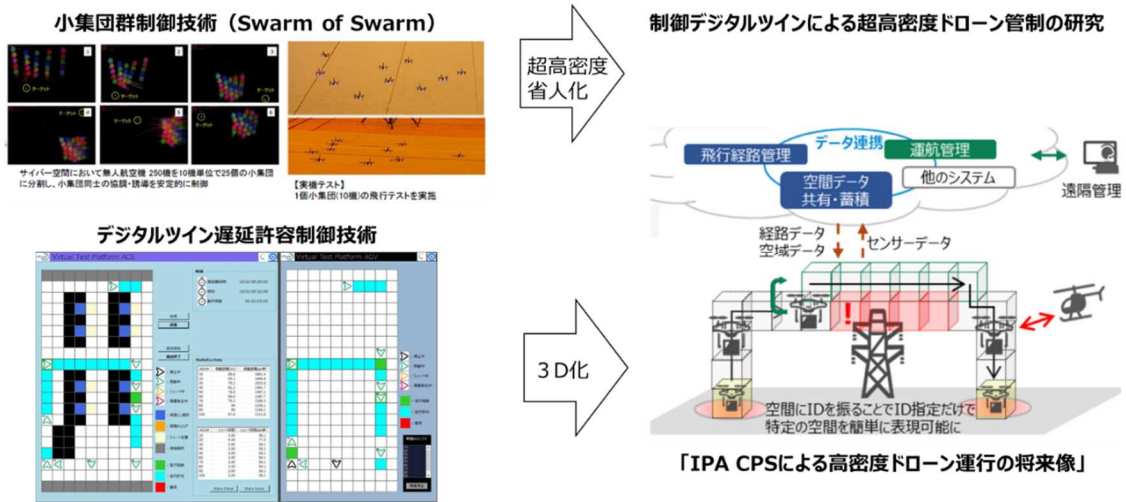


図 4.2.3-3 本研究の成果と派生成果のエアモビリティ産業への適用案

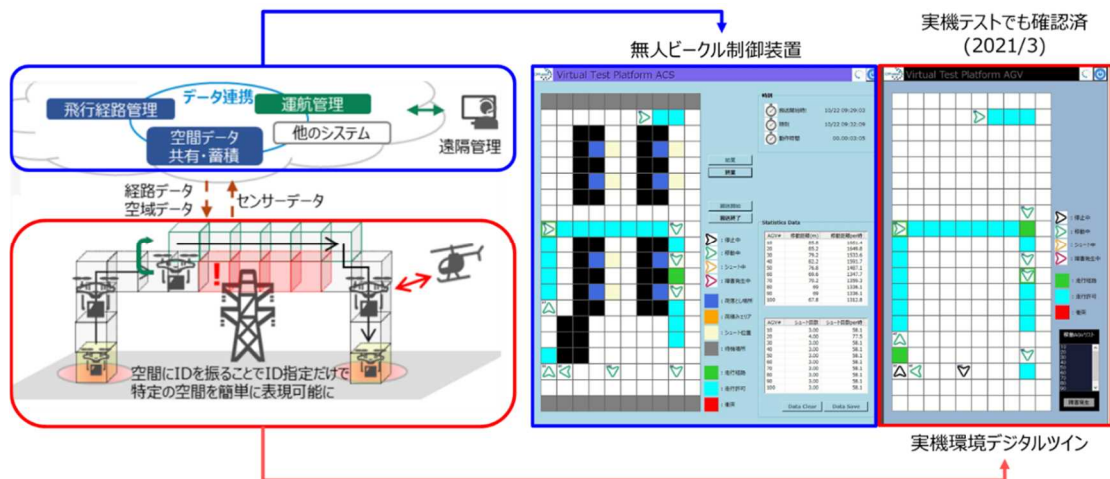


図 4.2.3-4 2次元CPSから3次元CPSに拡張

4.2.4. 【学術・産業】CAE シミュレーション技術を応用した制御演算の高速化

CAE シミュレーション技術を用いることで、制御演算の高速化が実現できる。即ち、無人ビークルの台数の増加に対応できることを意味する。

従来の制御演算方式(図 4.2.4-1 参照)は、スケーラビリティが AGV 台数や運用面積の規模の累乗で増加する(図 4.2.4-2 左図参照)。これは、搬送工程設計や任務設計のシミュレーション活用や、制御対象の無人機の機数増加を阻害する要因となる。

一方、本研究の群知能アルゴリズムを AGV 搬送シミュレーションに適用したところ、そのスケーラビリティが線形であることが確認できた(図 4.2.4-2 右図、図 4.2.4-3 参照)。当初の目論見通り、制御と CAE シミュレーションの類似性(図 4.2.4-4 参照)があることから、本研究当初において、期待していた通り、制御演算の高速化・制御対象規模の拡大ができることが示された。

今後は、学術的な研究が必要であると考えている。特に、数値シミュレーション安定性と制御安定がどのように関連するか理論的に学術的に明らかにしたい。

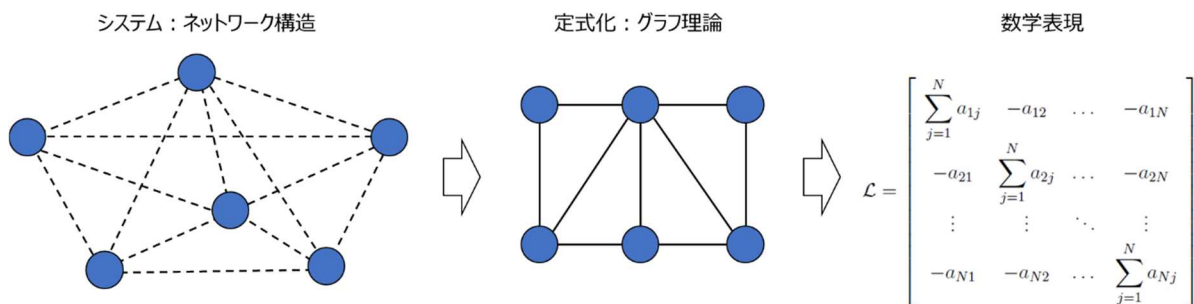


図 4.2.4-1 従来の制御演算方式

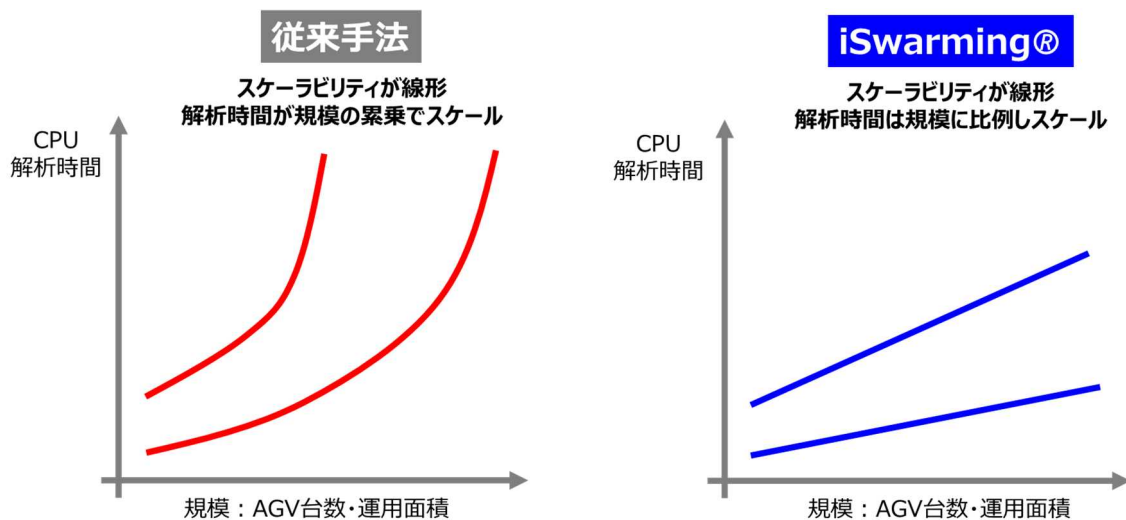


図 4.2.4-2 スケーラビリティの線形性：制御演算の高速化・制御対象の大規模化に対応

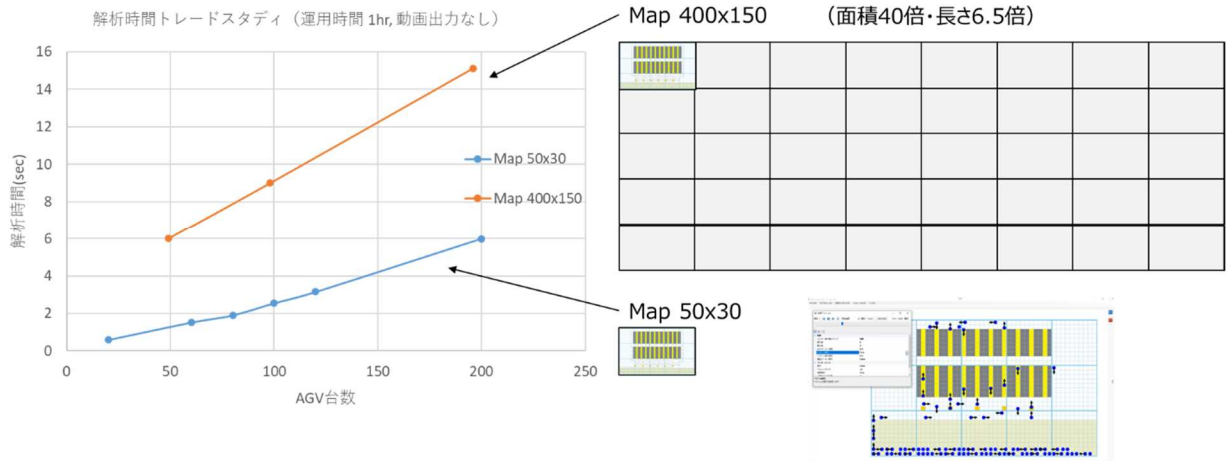


図 4.2.4-3 実績：iSwarming®群制御ソルバによる搬送シミュレーション



図 4.2.4-4 制御と CAE シミュレーションの類似性

4.2.5. 【学術・産業】デジタルツイン、サイバー・フィジカルシステムのグリーン化

本研究のひとつのテーマであるデジタルツインは、GEがジェットエンジンで言い始めた頃は、リアルタイム計測データに連動した大規模詳細CAEモデルのことであった(表4.2.5-1参照)。現在のデジタルツインは、データ収集・分析・現象の3D可視化まで範囲が広がりを見せている。仮想空間で街並みや倉庫や工場などの施設を再現しつつ、シミュレーションや実験、プレゼンテーションでの活用が始まっている。これらのデジタルツインがクラウド上に構築され、データセンターやIoTなどのコンピューティングリソースが大量に消費される方向である(図4.2.5-1参照)。

現在、データセンターに係わる電力消費量を調べたところ、原子炉100個分の出力に相当することが分かった(図4.2.5-2)。さらに、バーチャル都市やバーチャル工場など増えていくと、通信トラフィックやクラウド上のデータセンターの利用は増加する。今後、データセンターの電力消費が、CO2排出量削減の必要性に迫られ問題になる。

この解決策の一つに、本研究の成果の活用が期待できる。本手法では、CAEシミュレーション技術を制御に应用することで、制御演算の高速化ができることを示した(第4.2.4項参照)。データの軽量化と制御演算の高速化は、コンピューティングリソースの消費が少ない、即ち電力消費量も少なく、CO2排出量も低減できる。また、米国DARPA OFFSESTプログラムの報告でも、リアリティ追及か大規模対応か、目的に応じたデジタルモデルの利用が示されている(図4.2.5-3参照)。

表 4.2.5-1 デジタルツインの種類

種類	要素技術	データ規模	概要
Before デジタルツイン	CAE・シミュレーション	詳細モデル	実験データをベースとした設計の評価
初期のデジタルツイン	IoT	詳細モデル+データ	リアルタイム計測データに連動した大規模詳細CAEモデルで設備の故障を予測する。米GEがジェットエンジンで予防保全を提唱したのが始まり。
現在のデジタルツイン	クラウド	詳細モデル+データ	仮想空間で街並みや施設を再現しつつ、シミュレーションや実験、プレゼンテーションに活用。倉庫運用、バーチャル工場、建築や災害現場、人流想定などで実用化されつつある。
デジタルツイングリーン化	リアルタイム制御	軽量モデル+データ	仮想空間に移動体のダイナミクスとトラフィックを再現した軽量のCAEモデルで短周期のシミュレーションを行い、移動体の全体の動きを予測し、実機を制御する。

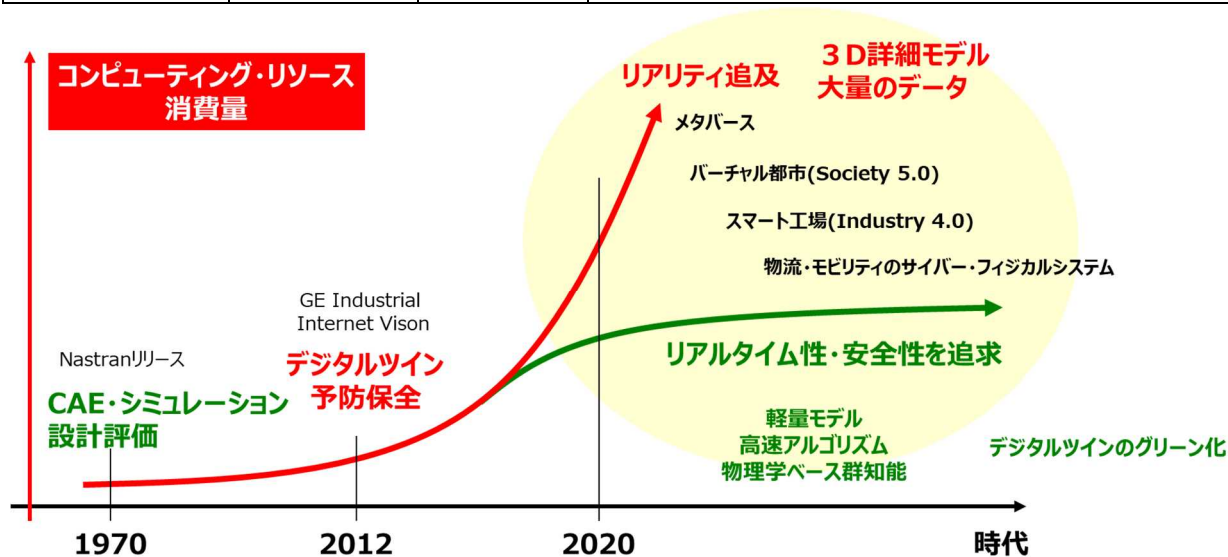


図 4.2.5-1 コンピューティングリソースの大量消費とグリーン・デジタルツイン

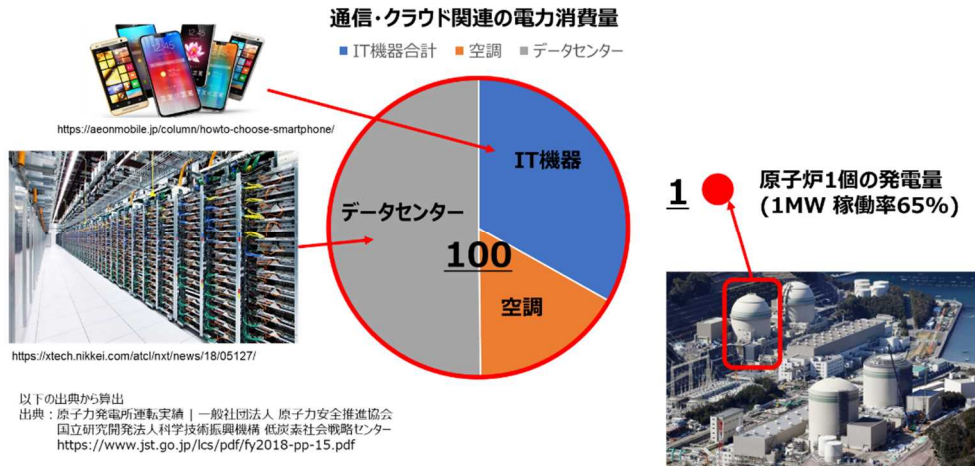


図 4.2.5-2 データセンターに係わる電力消費量

Swarm tactics-enabling **Scalable Swarm Simulators**

TACTICAL TECHNOLOGY OFFICE

Swarm Tactics
Swarm Systems Architectures
Scalable Swarm Simulators
Modular Swarm Testbeds

higher fidelity
accelerate transfer to physical systems; increased confidence in and robustness of swarm tactics

higher scalability
100s+ agents for swarm tactics prototyping; machine learning and simulation analysis applications

Level 3
• full sensor models
• full-rotor physics
• full environment
Heavyweight

Level 2
• cameras only
• approx. collisions
Lightweight

Level 1
• simplified sensors
• simplified agents
Featherweight

scalability

OFFSET Virtual Environments

Raytheon BBN

OFFSET Impact: Two extensible virtual environments for integrated autonomous systems simulation + development + testing

Briefing for the Naval Counter-Improvised Threat Knowledge Network 2021/3/18
<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1125864.pdf>

図 4.2.5-3 米国 DARPA OFFSET プログラム報告スライド抜粋

4.3. 研究成果の発表・発信に関する活動

論文や学会発表の実績を表 4.2.5-1 対外発表の実績に示す。受賞など特筆すべき成果は得られなかった。知的財産権については、「7. 研究発表、知的財産権等の状況」に記載する。

表 4.2.5-1 対外発表の実績

種別	題目	発表者名	学会名、学会誌名（巻号頁）	発表年月日	備考
学会発表	機械学習と物理学ベース群知能による状況適応型群制御の研究	高岡秀年 クラスターダイナミクス株式会社	第64回 自動制御連合講演会	2021年11月13日	
展示・講演	物理学ベース群知能 iSwarming®によるマルチビークル運用ブレイクスルー	高岡秀年、花坂弘之、福澤大輔、大谷修造 クラスターダイナミクス株式会社	航空自衛隊幹部学校高級幹部課程研修	2021年6月22日	
展示・講演	物理学ベース群知能・デジタルツイン制御によるマルチビークル運用ブレイクスルー	高岡秀年 クラスターダイナミクス株式会社	Ansys INNOVATION CONFERENCE 2021	2021年9月8日	

5. プロジェクトの総合的推進

5.1. 研究実施体制とプロジェクトマネジメント

効率的な研究実施体制（責任体制、人的充足、研究機関の役割分担、研究環境等）の確保及び研究マネジメントについて、研究期間中に実施した取り組みを以下に示す。

5.1.1. 運営上の課題への対処

研究運営上の課題としては、COVID-19による渡航制限への対応がある。COVID-19の影響を受け、実権用 UAV の調達が困難になり追加作業が増え、海外在住日本人研究者の来日時に隔離期間が2週間必要となり、出張旅費が2倍となった。出張回数の見直しや研究実施内容の見直しによりコスト削減を実施した。

(1) COVID-19 の影響：

- (ア) R1 年度に選定した実験用 UAV の部品調達が困難になった。
- (イ) 実験用 UAV 及び試験環境の検討及び変更手続きが追加作業となった。
- (ウ) 海外在住日本人研究者の来日作業時、隔離時間が必要となった。

(2) COVID-19 影響への対応：

- (ア) 実験用 UAV の機種、通信システム及び測位システムを変更した。
 - ① 実験用 UAV は、オープンスタック型 UAV から Bitcraze 社小型 UAV へ変更した。
 - ② 通信システムは、Bitcraze 社提供のものを使用するため、技適を取得した。
 - ③ 測位システムは、電波式測位システムから光学式測位システム OptiTrack に変更した。
- (イ) 実施内容の精査を行い、測位システムのカメラ配置の合理化により、コスト削減を行った。
- (ウ) 隔離期間でも研究ができるように、滞在先のホテルに試験機材を持ち込み、ドローンや測位システムの動作確認を実施した。

5.1.2. 経費の効率的執行

試験機材は高額であるため、研究の進捗を受けて、適正に見直すこととしていた。そして、実環境試験に用いた測位システムについて調達コストを低減することが出来た。R2 年度の現地確認試験の結果を受けて、一部の高性能なカメラからグレードを落としても問題無いことを確認した。その結果、当初ベンダーから提案を受けたカメラ構成を変更し、コストダウンを行うことが出来た。

5.2. 対外発表

5.2.1. 研究発表の学会等の調査

令和2年度は、コロナの影響により、外部への成果発表は行わなかった。
本研究の成果を発表する場として、以下に示す学会や研究会における講演会等から選択するのが妥当であるとする。

表2.3.4.3-1 2020年度講演会一覧

主催	イベント名・該当 OS 名	場所	開催日程	申込締切
日本機械学会	2020年度 年次大会 OS 交通・物流機械の自動運転	オンライン	9/13-16	4/6
〃	第29回 交通・物流部門大会 (TRANSLOG2020)	オンライン	11/18- 11/20	
〃	第26回ロボティクスシンポジア (日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門、日本ロボット学会、計測自動制御学会システムインテグレーション部門の主催)	オンライン	'21/3/1 6-17	9/18
計測自動制御学会	第63回 自動制御連合講演会 OS21：制御・情報理論に基づく生物・機械知能の理解と工学的応用 OS22：機械学習と調和する制御理論	オンライン	11/21- 22	9/25
人工知能学会	全国大会（第34回） OS-3 自律・創発・汎用 AI アーキテクチャ	オンライン	6/9-12	1/22
日本ソフトウェア科学会	第37回大会 (JSSST2020)	オンライン	9/8-10	8/17
〃	マルチエージェントと協調計算 (MACC) 研究会	未定	未定	未定

5.2.1.1. 日本機械学会

- (1) 日本機械学会2020年度年次大会 (No. 20-1) テーマが合致

https://jsmempd.com/conference/jsme_annual/2020/

2020年9月13日(日)～16日(水)

交通・物流機械の自動運転

16:00-17:00 J181 交通・物流機械の自動運転(5) [座長 中村 弘毅 (JARI)]

J18119 輸送密度を応用したタクシー型 AGV 搬送システムの評価と搬送効率の検討/○仲谷 拓真 (同志社大), 森川 大揮, 廣垣 俊樹, 青山 栄一

J18120 トラック隊列走行システムへのモデルベース開発の適用に関する研究/○庄司 聡志 (都市大), 杉町 敏之, 櫻井 俊彰, 槇 徹雄, 酒井 浩考

スケジュール

講演申込受付開始 2020年(令和2年) 3月上旬

講演申込締切 2020年(令和2年) 4月6日(月)

発表採用通知 2020年(令和2年) 6月29日(月)

講演原稿提出締切 2020年(令和2年) 8月3日(月)

- (2) 第29回 交通・物流部門大会 (TRANSLOG2020) テーマが違う。

<https://www.jsme.or.jp/conference/tldconf20/index.html>

2020年11月18日(水)～11月20日(金)

- (3) 第26回ロボティクスシンポジウム

<http://www.robotics-symposia.org/26th/index.html>

http://www.robotics-symposia.org/26th/26th_files/CFP_26-hiroshima_ver20200729.pdf

期日: 2021年3月16日(火)～17日(水)

今後の予定※: 2020年9月18日(金) 講演申込み〆切

2020年10月16日(金) 論文投稿提出〆切

2020年12月11日(金) 査読結果通知

2021年01月15日(金) 最終原稿提出〆切

ロボティクスシンポジウムは、従来、個々に開催されていた、「知能移動ロボットシンポジウム (RSJ, JSME, SICE 共同共催)」、「ロボティクス自動化システムシンポジウム (SICE 主催)」、「ロボットシンポジウム (RSJ 主催)」、「ロボットセンサシンポジウム (RSJ, JSME, SICE 共同共催)」が統合されたシンポジウムです。

5.2.1.2. 計測自動制御学会

- (1) 第63回 自動制御連合講演会 テーマに合致

<https://sice.jp/rengo63/doc/program.html#OS29>

2020年11月21日～11月22日 Online

OS21: 制御・情報理論に基づく生物・機械知能の理解と工学的応用

OS22: 機械学習と調和する制御理論

原稿提出 2020年9月25日(金) 締切 (9月7日(月) 開始)

早割参加登録 2020年11月6日(金) 締切 (9月7日(月) 開始)

5.2.1.3. 人工知能学会

(1) 人工知能学会 全国大会 (第34回)

OS-3 自律・創発・汎用AIアーキテクチャ

日程：2020年6月9日(火)～6月12日(金)

発表申込 2019年12月26日(木)～2020年1月22日(水)14:00

原稿提出 2020年1月30日(木)～3月4日(水)14:00

採択通知 2020年3月24日(火)

5.2.1.4. 日本ソフトウェア科学会

(1) 日本ソフトウェア科学会第37回大会(JSSST2020)

日程：2020年9月8日(火)～10日(木)

登壇発表申込締切：2020年7月9日(木)

講演論文原稿締切：2020年8月17日(月)

デモ・ポスター発表申込締切：2020年8月18日(火)

(2) マルチエージェントと協調計算(MACC)研究会 日程未定

<https://sites.google.com/view/sig-macc/>

5.2.2. 対外発表の実績

論文や学会発表の実績を以下に示す。

表 5.2.2-1 対外発表の実績

種別	題目	発表者名	学会名、学会誌名(巻号頁)	発表年月日	備考
学会発表	機械学習と物理学ベース群知能による状況適応型群制御の研究	高岡秀年 クラスターダイナミクス株式会社	第64回 自動制御連合講演会	2021年11月13日	
展示・講演	物理学ベース群知能 iSwarming®によるマルチビークル運用ブレイクスルー	高岡秀年、花坂弘之、福澤大輔、大谷修造 クラスターダイナミクス株式会社	航空自衛隊幹部学校高級幹部課程研修	2021年6月22日	
展示・講演	物理学ベース群知能・デジタルツイン制御によるマルチビークル運用ブレイクスルー	高岡秀年 クラスターダイナミクス株式会社	Ansys INNOVATION CONFERENCE 2021	2021年9月8日	

5.3. 特許出願

R2年度の研究成果について、3件の特許化の見通しの調査検討を特許事務所に依頼して行った。調査方法は、特許庁のデータベース(J-PlatPat)で簡易調査を行っている。

- (1) 群協調のAI適用
- (2) サイバーフィジカルギャップ対応 遅延許容デジタルツイン制御
- (3) ダウンウォッシュ回避制御

その結果、同じような従来技術は3件とも見つからず、特許化の可能性は十分にあるとの報告を受けた。R2年度は、上記のうち2件について、特許出願を行った。

6. まとめ、今後の予定

6.1. 報告書全体のまとめ

本研究の目的「250機のスウォーム性能を確認し、数百機レベルの大規模マルチエージェント制御に対応できる技術を獲得すること」は、達成できた。本研究の成果の適用先である適用シナリオを踏まえた、予備飛行試験、試験シナリオによるスウォーム飛行試験を、仮想環境及び実環境で実施した。各研究テーマ詳細については以下に示す。

6.1.1. 物理学ベース群知能アルゴリズムの研究開発

群協調アルゴリズムについて、Q学習・DQNの検討及び評価を行い、群協調AIモデルの基礎研究を行った。3機以上のUAV集団についてDQNの検討及び評価を実施し、複数機に対する群協調AIモデルの性能を明らかにした。群協調AIモデルを実装し、仮想環境および実環境において制御特性を確認した。

群誘導アルゴリズムについて、ゴールへの群誘導について、「CNN (Convolutional Neural Networks)」の教師有り学習 (パターン認識) 技術及び、画像生成アルゴリズム pix2pix による画像生成技術を用い、未学習の位置に対して、誘導場コンターの生成を試みた。その結果、誘導場コンターの生成を行うことができた。仮想環境へ実装し、実環境で試験を行った。

研究内容の概要を表 6.1.1-1 まとめる。

表 6.1.1-1 群協調・群誘導アルゴリズムの研究成果まとめ

-	群協調		群誘導	
	物理モデル	Q 学習・DQN	AI CFD	pix2pix
研究結果	仮想環境・実機環境へ実装した。物理シミュレーション技術で制御できることを、初めて実機で実証した。	仮想環境で物理モデルと同等の協調特性を得ることが出来た。	単純ゴール形状では学習回数を減らせたが、複雑ゴール形状では学習回数を増やす必要があった。	少ない学習回数で、単純ゴール形状や複雑ゴール形状の推定ができた。但し、輪郭はぼやける。
実環境試験	試験シナリオ A、A 拡張、B について実施した。実機 20 機と仮想 230 機でスウォーム飛行できた。	試験シナリオ B で実施した。しかし、機数が増えると落下頻度が増大。安定的に飛行させることが困難であった。	単純ゴール形状、複雑ゴール形状への誘導を試験シナリオ B として実施した。	(省略) AI CFD と得られた圧力場コンター図に大差が無いため。
課題	物理モデルのパラメータチューニングに手間がかかる。	On Off 制御(バンバン制御)の加速減速の 2 者択一ではなく、設計パラメータに比例的な行動ができるように選択肢を増やす必要がある。	追加で確認したエリア内に障害物を置いたケースは、誘導場が期待通り生成できなかった(*2)。学習データがコンター図であったため、モジュールを追加して圧力場からベクトル場生成を行った。圧力場生成、ベクトル場生成の要素技術はそろったので、一連の作業の自動化が必要である。	
備考	競合との比較：NICT が 4 機編成 1 個集団でスウォーム飛行(群飛行)を行った(*1)。本研究では、R1FY に 9 機編成 1 個集団でのスウォーム飛行を行い、R3FY には 5 個集団(1 集団 2-5 機編成)まで増やし、合流・分流のスウォーム飛行を実施した。日本にて、事前プログラミング・編隊飛行ではない群制御は初めての事例と思われる。		(*2) トポロジーが変わると適用できない。 ・例 1 ゴールが二つになる。 ・例 2 エリア内部に障害物がある。 再学習が必要となる。 誘導場生成は、圧力場生成の上流工程である境界条件生成の自動化も重要である。実務的な内容のため今回は研究の範囲外としたが、最も手間がかかる工程であり、自動化は有益である。	

(*1) 競合事例：NICT 情報通信研究機構 2022 年 4 月 11 日プレスリリース「世界初、ドローン同士の直接通信で自動追従群飛行と自律接近回避に成功」では、4 機 1 集団の群飛行の実証の事例を発表した。NICT の事例では、無人機の通信技術について優れた研究開発がなされている。これらの技術を参照しながら、スウォーム飛行の技術発展に取り組んでいきたい。(https://www.nict.go.jp/press/2022/04/11-1.html)

(*2) トポロジー (位相幾何学)：図形すなわち位相空間の位相的に不変な性質や概念を研究する幾何学のこと。X と Y とが位相空間であるとき、X より Y の上への対一写像 $f: X \rightarrow Y$ があり、 f およびその逆写像 $f^{-1}: Y \rightarrow X$ とがともに連続であるとき、X と Y とは同位相であるといい、 f を同位相写像 homeomorphism という。同位相な位相空間が共通にもつ性質や概念は位相的に不変であるという。曲面でいえば、球面と楕円(だえん)面とは、それらが理想的なゴム膜からできているとすると、破ったり貼(は)ったりしないで互いに変形できるので同位相である。また、鉄道の路線において、地図上の路線の位相と、切符売り場の路線図の位相は同位相とみなせる。

6.1.2. 仮想環境（シミュレータ）での試験研究

群誘導・群協調・実環境適応技術などの要素技術を検討し、250機のスウォームは、250機を複数の集団（親機1機と子機複数機で構成）に分けて制御する複数集団の群制御（スウォーム・オブ・スウォーム）の手法で行うこととした。また、実環境における部分実機試験の研究も踏まえ、試験シナリオを策定した。また、スウォーム・オブ・スウォームへの対応のための群協調アルゴリズムの検討を行い、仮想環境のシミュレータで250機のスウォームを行えることを確認した。また、デジタルツイン制御のため、仮想環境シミュレータと実環境を連携し、小型UAV単機及び複数機での飛行試験、1スウォームでの飛行試験を行った。

仮想環境のシミュレーション結果に基づいた移動コマンドにより実環境において実機UAVスウォーム飛行の制御を行った。本研究の試験環境では、制御コマンドと実環境データの応答遅延は微小で、スウォーム飛行は問題無く行えた。応答遅延の解決策は二つある。ひとつ目は5Gなどによる低遅延技術を利用すること。もう一つは、今回本研究の成果として考案した遅延許容デジタルツイン制御である。シミュレーションにてその有用性を確認した。

6.1.3. 実環境における部分実機試験

デジタルツイン制御環境構築のため、測位システム技術及び通信技術の調査・検討・選定を行った。また、実験用UAVの調査・選定を行い、飛行試験を実施して単機での機能性能を確認した。COVID-19の影響により研究1年目に選定したオープンスタック型の実験用UAVの調達が難しくなった。このため、実験用UAV及び屋内測位システムの再調査を行い、試験シナリオの検討を行った。その結果、Bitcraze社の小型ドローンCrazyflieと光学式測位システムOptiTrackにより高い位置精度で群制御ができることを確認できたため、業務委託変更承認の申請を行い、承認を受けた。

試験シナリオに従った実機スウォーム飛行試験により群知能アルゴリズムの検証を行った。試験シナリオAとして複数集団による2重ループの周回飛行で実機20機を複数の集団に分けて、スウォーム・オブ・スウォームによる合流・分離について試験を実施し評価した。また、試験シナリオAを拡張し3重ループとし、仮想環境シミュレータで制御された250機のうち20機を実機と連携し、大規模制御に対応できることを確認した。試験シナリオBでは、矩形の運用エリアの中に流れ場誘導外力を生成し、域内のUAV全体をゴールに向けて移動できることを確認した。

6.2. 今後の発展に向けた取り組み

6.2.1. 研究成果の産業分野への展開

本研究成果の産業分野への適用は、物流(工場内物流含む)、交通、エアモビリティの分野に向けて進めている。既に、物流や工場の搬送工程における無人搬送ビークルの群制御に本成果を活用したトラフィック協調制御モジュール「iSwarming®群制御ソルバ」を開発し、AGV搬送システムへ適用している。また、上記の技術は、IPAが提案する「CPSによる高密度ドローン運行の将来像」のアーキテクチャ設計に適合するので、エアモビリティのトラフィック協調制御への適用を行う予定である。

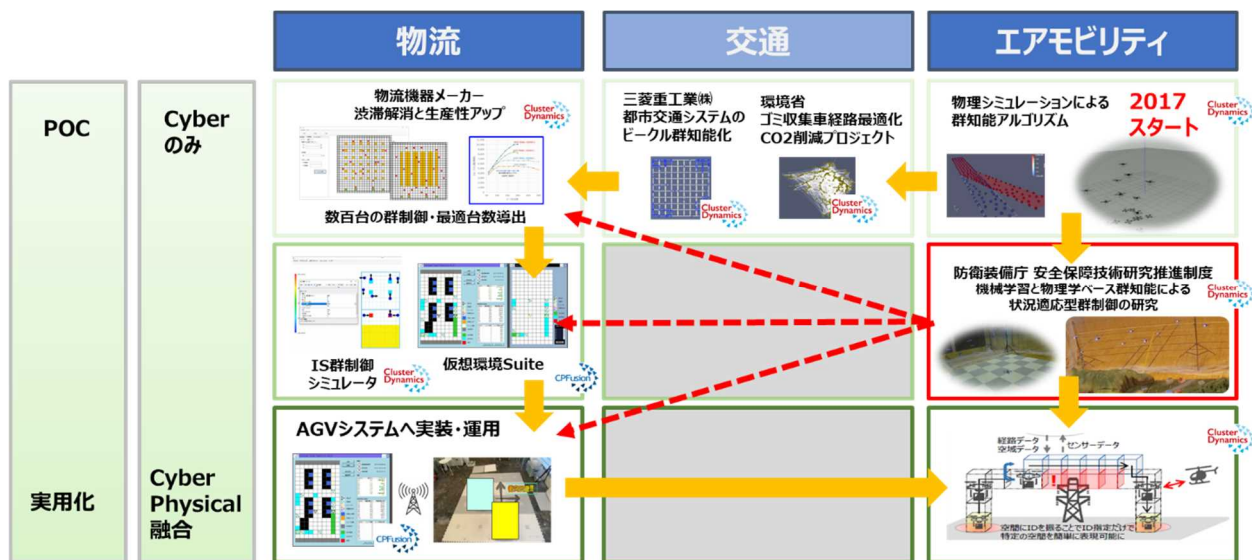


図 6.2.1-1 研究成果の社会実装に向けたロードマップ

6.2.2. 【産業】物流・工場の搬送工程における無人搬送ビークル制御への適用

本研究の成果である「粒子法シミュレーションによる制御方式」及び「遅延許容デジタルツイン制御」を、地上で運用される無人搬送ビークルの群制御に適用した。これらの制御方式を3D空間の適用から2D空間(AGV視点で1D空間)へ展開した。

6.2.3. 【産業】IPAドローン高密度運用サイバー・フィジカルシステムへの適用

空飛ぶクルマの実現に向けて進む研究開発・実証実験・制度整備が加速している。そのひとつとして、独立行政法人 情報処理推進機構(IPA)のデジタルアーキテクチャ・デザインセンター(DADC)は、ドローン利活用のアーキテクチャ設計 中間報告書(2021年7月)にて、ドローンの高密度運用のためのサイバー・フィジカルシステムとして、空間ボクセルID方式によるCPS運行管制方式を提案した。IPAの空間ボクセルIDの群制御方式は、遅延許容デジタルツイン制御技術により、応答遅延を織り込んだ飛行安全を実現し、小集団群制御技術を適用することで、更なる高密度・高効率・省人化の運行が可能となる。

6.2.4. 【学術・産業】CAE シミュレーション技術を応用した制御演算の高速化

CAE シミュレーション技術を用いることで、制御演算の高速化が実現できる。即ち、無人ビークルの台数の増加に対応できることを意味する。本研究の群知能アルゴリズムは、そのスケーラビリティが線形である。AGV 搬送工程の設計シミュレーションによりスケーラビリティの線形性が示された。また、粒子法解法の応用により、演算そのものも高速である。これにより、任務設計や搬送工程設計でのシミュレーションの高速化、及び運用に際しては制御対象の大規模化に対応することが可能となる。

6.2.5. 【学術・産業】グリーン・デジタルツイン

本研究のひとつのテーマであるデジタルツインは、GE がジェットエンジンで言い始めた頃は、リアルタイム計測データに連動した大規模詳細 CAE モデルのことであった。現在のデジタルツインは、データ収集・分析・現象の 3D 可視化まで範囲が広がりを見せている。仮想空間で街並みや倉庫や工場などの施設を再現しつつ、シミュレーションや実験、プレゼンテーションでの活用が始まっている。これらのデジタルツインがクラウド上に構築され、データセンターや IoT などのコンピューティングリソースが大量に消費される方向である。今後、データセンターの電力消費が、CO2 排出量削減の必要性に迫られ問題になる。

この解決策の一つに、本研究の成果の活用が期待できる。本手法では、CAE シミュレーション技術を制御に応用することで、制御演算の高速化ができることを示した(第 4.2.4 項参照)。データの軽量化と制御演算の高速化は、コンピューティングリソースの消費が少ない、即ち電力消費量も少なく、CO2 排出量も低減できる。これを、グリーン・デジタルツインと呼ぶ。今後普及させたい。

7. 研究発表、知的財産権等の状況

(1) 研究発表等の状況

研究開始から終了までの全期間の研究発表等の状況を下記の表にまとめる。

種別	件数
学術論文	該当なし
学会発表	1件
展示・講演	2件
雑誌・図書	該当なし
プレス	該当なし
その他	該当なし

(2) 知的財産権等の状況

研究開始から終了までの全期間の知的財産権等は、特許を2件出願した。

(3) その他特記事項

「該当なし」

以上

クラスターダイナミクス株式会社 Cluster Dynamics Inc.

〒101-0052 東京都千代田区神田小川町3丁目28番5 axle 御茶ノ水3階(307)

URL: <http://www.cluster-dynamics.com/>