

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360382

研究課題名(和文) 飛翔体と地上ロボットの群制御を用いた多次元情報収集システムの開発

研究課題名(英文) Development of multi-dimensional information gathering system by using a collective motion control of aerial and ground vehicles

研究代表者

稲田 喜信 (INADA, YOSHINOBU)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：60302791

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円、(間接経費) 4,230,000円

研究成果の概要(和文)：小型の飛翔体や地上移動型ロボットを用いた情報収集をより高機能にすることを目的として多数の機体を連携させる群制御の研究を行った。自然界における鳥や魚の群運動を参考にして、接近、反発、平行移動の3つの制御を組み合わせた群制御モデルを作成し、これを用いて地上移動型ロボットや各種飛翔体を用いた群制御を試みた。その結果、これらのハードウェア上で3つの制御の全て、あるいは一部が正しく機能することを確認し、飛行船と地上移動ロボットという異種の機体間での連携制御にも成功した。また、魚群行動を分析して個体の成長段階に応じた群形成パラメータの変化を確認し、群移動時のエネルギー消費を低減できる個体配置を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Biologically-inspired collective motion control was investigated to enhance the availability of mini-size air vehicles or ground vehicles for information gathering. The control model consists of three components, i.e. attraction, repulsion, and parallel orientation, which are based on the motion of fish school or bird flock. The effectiveness of the model was tested on the various types of vehicles, e.g. ground vehicles, airship, fixed and rotary wing type airplanes. In consequence, all or a part of the three components of collective motion control were successfully functioned on these vehicles. Furthermore, the cooperation between heterogeneous vehicles, i.e. airship and ground vehicles, was succeeded. The characteristics of fish school were also investigated and the change of group formation parameters with the stage of growth and the optimal positioning of individuals in the school to reduce the energy consumption were clarified.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：群制御 局所相互作用制御 相互作用領域 小型飛翔体 地上移動型ロボット 飛行船 魚群 移動エネルギーの低減

### 1. 研究開始当初の背景

地震や火災発生時に迅速に情報収集を行なうことを目的として、空からの情報収集を行なう無人の飛行体や、地上で倒壊した建物等の状況を調べるレスキューロボットの開発が進められている。このような無人システムは、操縦者の安全を確保しつつ危険地帯での情報収集を迅速に行なうために有効な手段であり、特に地震などの自然災害が多い我が国において必要性が高い。しかしながら、大型の無人航空機や地上ロボットの配備には多大な導入コストがかかり、飛行場や格納庫の確保、騒音対策等の運用コストも必要になる。また、大型の航空機は墜落による2次災害の危険性が高いため、人口密集地の上空で利用することは難しい。例えば、現在最も無人機の活用が進んでいる米国でさえ、大型の無人機の利用は安全性や騒音等が問題とならない戦場や森林地帯等に限定されている。これらの問題を解決するためには、低コストで低騒音、かつ墜落時の危険性が少ない小型の無人機を利用することが有効と考えられるが、小型機には機能の制限や信頼性の不足という問題がある。そこで、本研究では小型無人機を多数利用して、機能の組合せや冗長性の高さを利用して、システム全体の機能と信頼性を向上させる「群制御」に注目している。研究代表者は過去に生物の群運動を解析し、その運動が比較的単純なルールによって成立していることを確認した。そして、そのルールを参考にした群制御モデルを開発して、多数の飛行体からなる群の複雑な運動制御を数値シミュレーション上で実現した。さらに、研究分担者は小型の群ロボットを開発して、その群制御モデルが実世界においても有効に機能することを確認した。本研究はそれらの成果を踏まえて行なうものである。

### 2. 研究の目的

本研究は、空や地上からの情報収集システムとして、複数の飛行体や地上ロボットを互いに連携させながら情報を収集する「群制御」の概念に基づく情報収集システムを実現することを目的としている。複数の機体の機能を組み合わせることによってシステム全体の機能や冗長性を高め、高機能で耐故障性の高い情報収集システムの実現を目指す。さらに、群制御に新たな機能を付加することを目的として、自然界における群運動を分析し、安定な群形成やエネルギー効率を高めるためのパラメータを明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 群制御アルゴリズムの開発

本研究では、大規模かつ耐故障性の高い群制御を可能とする制御方法として、自然界において大規模な群を作る生物のアルゴリズムを参考にした群制御を用いる。モデルは地上ロボット用のモデル1と飛行体用のモデル2があり、それぞれ以下に解説する。

#### 【モデル1】

モデル1は魚群の運動を参考にしたもので、遠方の個体に対しては群を作るために接近し、近傍の個体に対しては衝突を避けるために反発し、中間距離の個体に対しては互いの向きを揃えて同一方向へ移動するという性質を参考としている。本研究ではこの仕組みを飛行体や地上ロボットの群制御に応用するために、個々の機体の周りに図1に示すような相互作用領域を設定し、内部を接近、反発、平行移動の3つの領域に分け、それぞれの領域の半径を $R_a$ 、 $R_r$ 、 $R_p$ とする。続いて、領域の中心に存在する機体の移動方向を、①他の機体が接近領域に存在する場合はその機体の方向に、②平行移動領域に存在する場合はその機体と同じ移動方向に、③反発領域に存在する場合は、その機体から離れる方向に設定する。さらに④領域内に複数の機体が存在する場合は、それらの移動方向ベクトルを足し合わせて平均ベクトルを計算し、その方向へ移動する。これらの処理を定式化したものが以下のものである。

$$\textcircled{1} \alpha_{ij} = \mathbf{r}_{ij} / |\mathbf{r}_{ij}| \quad (R_p < |\mathbf{r}_{ij}| \leq R_a)$$

$$\textcircled{2} \alpha_{ij} = \mathbf{v}_j / |\mathbf{v}_j| \quad (R_r < |\mathbf{r}_{ij}| \leq R_p)$$

$$\textcircled{3} \alpha_{ij} = \mathbf{R} / |\mathbf{R}| \quad (|\mathbf{r}_{ij}| \leq R_r)$$

$$\mathbf{R} = -a \mathbf{r}_{ij} / |\mathbf{r}_{ij}| + b \mathbf{v}_i / |\mathbf{v}_i|$$

$$\textcircled{4} \alpha_{ic} = \sum_j^{N_b} \alpha_{ij} / \left| \sum_j^{N_b} \alpha_{ij} \right| \quad (N_b \leq N_{b,max})$$

ここで、 $\alpha_{ij}$ は周辺機体( $j$ 機体)に対する中心機体( $i$ 機体)の移動方向で、 $\mathbf{r}_{ij}$ は $i$ 機体から見た $j$ 機体の位置ベクトル、 $\mathbf{v}_i$ 、 $\mathbf{v}_j$ はそれぞれ $i$ 、 $j$ 機体の速度ベクトル、 $a$ 、 $b$ は反発方向を決めるための重み係数(初期値はいずれも1.0)、 $N_b$ は相互作用領域内の周辺機体数、 $N_{b,max}$ はその上限値、 $\alpha_{ic}$ は $i$ 機体の最終的な移動方向ベクトルである。 $N_b$ に上限を設けた理由は、相互作用センサが検知できる機体の数に上限があることを考慮するためである。

上記のアルゴリズムは比較的容易に群運動を実現できることを数値シミュレーションで確認しており、本研究では主に地上ロボット用の群制御アルゴリズムとして利用す

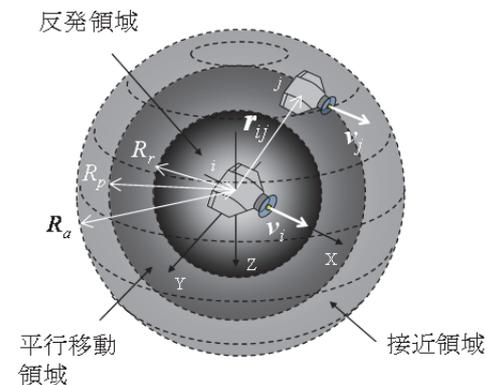


図1 モデル1の相互作用領域

る。一方で、上記アルゴリズムでは、領域の境界において移動方向ベクトルが不連続に変化するため、飛翔体の制御に用いると不安定な挙動を引き起こすという問題があった。そこで、飛翔体用には以下に述べるモデル2を用いる。

### 【モデル2】

モデル2は、領域の境界で移動方向が連続的に変化するようにした連続モデルである。本モデルでは、図2に示すように相互作用領域を接近領域と反発領域の2つの領域に分け、以下のようにして中心機体( $i$ 機体)の移動方向を決める。

- ①  $\mathbf{A}_{ij} = A(|\mathbf{r}_{ij}| - r_n) \mathbf{r}_{ij} / |\mathbf{r}_{ij}|$
- ②  $\mathbf{P}_{ij} = P \mathbf{v}_j / |\mathbf{v}_j|$
- ③  $\boldsymbol{\alpha}_{ij} = \mathbf{A}_{ij} + \mathbf{P}_{ij}$
- ④  $\boldsymbol{\alpha}_{ic} = \sum_j^{N_b} \boldsymbol{\alpha}_{ij} / \left| \sum_j^{N_b} \boldsymbol{\alpha}_{ij} \right| \quad (N_b \leq N_{b,max})$

ここで、 $\mathbf{A}_{ij}$ ,  $\mathbf{P}_{ij}$  はそれぞれ接近・反発ベクトルと平行移動ベクトル、 $r_n$  は中立距離、 $A$ ,  $P$  はそれぞれ接近・反発ゲインと平行ゲインである。また、 $\boldsymbol{\alpha}_{ij}$ ,  $\mathbf{r}_{ij}$ ,  $\boldsymbol{\alpha}_{ic}$ ,  $\mathbf{v}_j$ ,  $N_b$ ,  $N_{b,max}$  の定義はモデル1と同じである。

モデル1、2で決定された移動方向ベクトル $\boldsymbol{\alpha}_{ic}$ は、図3に示すフィードバック制御系の目標値となり、機体の現在の移動方向ベクトル $\boldsymbol{\alpha}_i$ との偏差 $e$ をゼロとするように制御される。

### (2) 群制御ハードウェアの開発

アルゴリズムの開発と並行して、飛翔体型と地上移動型の2種類のロボットの開発を行う。以下、それぞれの開発について解説する。

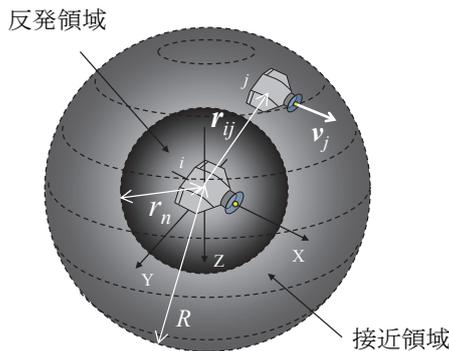


図2 モデル2の相互作用領域

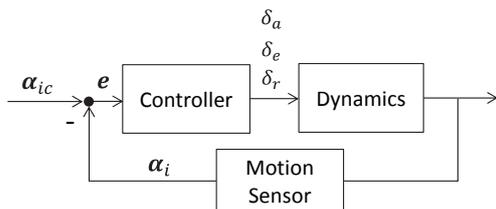


図3 フィードバック制御

### 【地上移動型ロボット】

本研究では、図4に示す全方位移動が可能な株式会社オムニロボットのオムニロボットをベースとした地上移動型群ロボットの開発を行う。オムニロボットは特殊な車輪により機体の向きを変えずに全方位に移動が可能で、方向転換の必要が無いために機動性が高い。これをベースとして相互作用に必要な超音波センサ等を搭載し、群制御実験を行う。

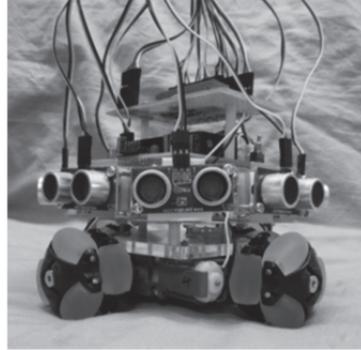


図4 オムニロボットをベースとする地上移動型ロボット

### 【飛翔体型ロボット】

本研究では、飛翔体型ロボットとして飛行船型、固定翼型、回転翼型の3種類の飛翔体を開発する。

#### ① 飛行船型

飛翔体が地上移動型ロボットと連携する場合、お互いの移動速度の相違が問題となる。このため、地上ロボットと同程度の速度で移動できる飛翔体として飛行船を用いる。飛行船は図5に示すようなもので、前後長が2.4[m]、推進用に左右一対のプロペラを胴体下部に備える。制御装置としてマイコンを搭載し、プロペラの推進軸の向きや回転数を変えることにより、前後進、上昇下降、旋回などの運動が可能である。また、高度センサや通信装置を備え、地上ロボットとの間で高度情報を交換することができる。

#### ② 固定翼型

飛翔体群制御用として、高速移動しながら長距離、広範囲の情報収集を行うことを目的とした固定翼型の飛翔体の開発を行う。

機体は図6に示すHitec Multiplex社製のFun Cubで、翼幅1.4m、機体重量1130g、巡航時の飛行速度12.0m/sである。この機体にゼノクロス社製の飛行制御ボードAP-CUB-DIYLITE、モーションセンサAP-SENS、GPS装置ANN-MS-0-005、機体間通信用の通信装置XBee Pro Series2を搭載する。群制御用のアルゴリズムとしては、制御ボード上のマイコンの性能が十分ではないことから、3-(1)節で紹介した2つのモデルのうち、より単純なプログラムで動作できるモデル1を搭載



図5 小型飛行船

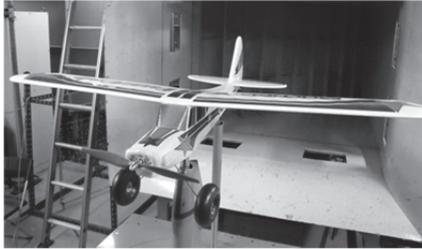


図6 Fun Cub

する。モデル2については、モデル1の性能を確認した上で搭載を検討する。

Fun Cub は比較的取扱いの容易な機体であるが、飛行速度が低速で翼面荷重が小さいことから、突風等の外乱に弱いという問題がある。このため、最終的には、フジ・インバックス社製の D-II 無人機を用いて群制御実験を行う。D-II 無人機は翼幅 2.0m、機体重量 4kg、巡航時の飛行速度 80~100km/s という機体で、翼面荷重も飛行速度も Fun-Cub よりも大きいことから、外乱の影響を受けにくい安定な飛行が可能と考えられる。

### ③回転翼型

回転翼型の飛翔体としては、図7に示すような複数のロータを持つマルチコプタを用いる。マルチコプタは個々のロータの回転数を制御するだけで、上昇下降や前後進、左右移動、旋回などの多彩な飛行が可能であり、小型で扱いやすく、室内での実験が容易に行えるというメリットを持つ。本研究では、DJI社製の F330 をベースとして、姿勢制御用のマイコンに Arduino Pro Mini、あるいは通信装置である XBee を搭載可能な Arduino Fio を用い、モーションセンサとして Sparkfun社製の 9 Degrees of Freedom - Sensor Stick、機体間の距離測定用の超音波センサとして Speedstudio 社製の超音波センサを用いる。

### (3) 生物群運動の解析

これらの研究に加えて、新たな生物規範型モデルを実現するための基礎データの取得を目的として、生物の群運動の解析を行う。具体的には、成長段階の異なる魚群の運動を観察し、3次元の運動解析を行って個々の個体の位置や速度を計測し、成長段階の違いに応じた群形成パラメータを分析する。また、運動中の魚群の酸素消費量を測定し、個体の



図7 マルチコプタ

配置とエネルギー消費の関係を調べて、エネルギー消費を抑える上で最適な個体配置の解析を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 地上ロボットによる群制御

3-(2)節で紹介したオムニロボットをベースとした3台のロボットに、3-(1)節のモデル1を搭載して群制御実験を行った結果を図8に示す。この図は個々のロボット間の距離の時間変動を表示したもので、当初 500mm 程度の距離で離れていた3台のロボットが接近して、互いの距離を 300~450[mm]の範囲に維持している様子がわかる。

続いて、接近と反発制御を応用した追従制御の結果を図9に示す。これは2台のロボットの片方を一定速度で移動させ、もう1台のロボットが接近と反発制御によりそのロボットに追従するものである。図に示された2台のロボット間の間隔は、常時 350~500[mm]の間の値に維持されており、追従に成功していることがわかる。

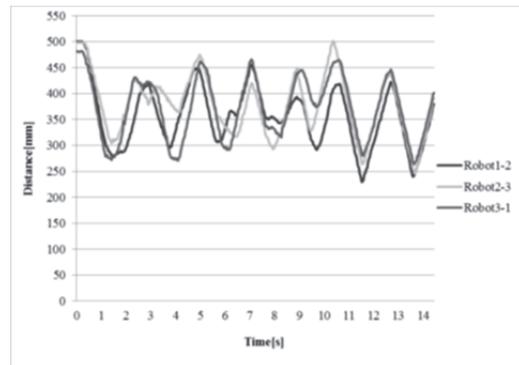


図8 ロボット間の距離の変化 (3台)

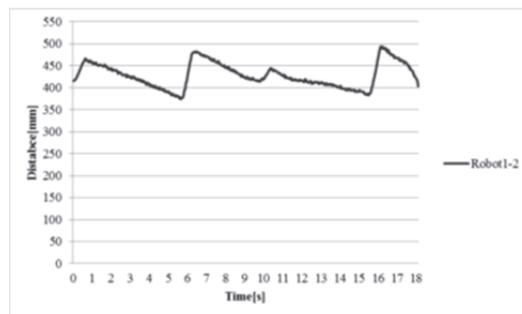


図9 追従制御の結果

## (2) 飛翔体による群制御

### ①飛行船型

飛行船型ロボットと地上移動型ロボットを使用して、地上と空中の機体が連携し合う3次元の群制御を試みた。飛行船が搭載する高度センサによって得られた高度情報を、通信装置によって地上ロボットに送信し、地上ロボットは飛行船の高度が基準高度よりも低い場合は接近制御を実行し、基準高度よりも高い場合は反発制御を実行するという実験を行った。その結果、飛行船の高度が基準高度よりも低い場合は、地上ロボット群は接近制御を実行して集合し、基準高度よりも高い場合は、反発制御を実行して広がる事が確認できた。

### ②固定翼型

固定翼型では、3-(2)節で紹介した Fun Cub を2機用いて、機体間の距離に応じた接近と反発、および平行移動制御の実験を試みた。機体間の距離の計測は、各機体が搭載するGPSにより得られた機体位置を通信装置によって他の機体に送り、位置の差を取る事によって行った。機体の向きも同様に、搭載する方位センサが計測した機体の方位を通信装置によって他の機体に送り、方位の差を取る事によって行った。

平行移動制御では、2機の方位差が $\pm 15^\circ$ を超えると、方位を揃えるように方向舵を操舵した。その結果を図10に示す。図10(a)は2機の方位差が $0^\circ$ の時の操舵で、向きが揃っているために操舵が行われず、図10(b)は2機の方位差が $+90^\circ$ の時の操舵で、向きを揃えるために舵を左に切っており、図10(c)は2機の方位差が $-90^\circ$ の時の操舵で、図10(b)とは逆方向に舵を切っている様子がわかる。以上より、方位差に応じて適切な操舵が行われている事が確認できた。

続いて、接近・反発制御を試みた結果、機体間の距離が短い場合は、反発制御が働いて互いに離れるように方向舵を操舵し、機体間の距離が長い場合は、接近制御が働いて互いに近づくように操舵し、その中間の距離では平行移動制御が働いて操舵は行わず、そのまま平行移動するように制御している事が確認できた。

### ③回転翼型

回転翼型では、3-(2)節で紹介したマルチコプタを用いて群制御を試みた。機体に4個の超音波センサを搭載して、周辺の機体や障害物までの距離を測定できるようにし、周辺物体までの距離が10cm以上かつ1m以内であれば反発制御が働くようにして実験した結果を図11(a)に示す。図では機体の左側から手を近づけると、機体はこれを感じて右にバンクをかけて遠ざかろうとしている事がわかる。

続いて、機体に通信装置 XBee を搭載し、片方の機体が感知した方位を XBee を用いてもう片方の機体に送信し、その機体が向きを揃えるという平行移動制御の実験を行った。

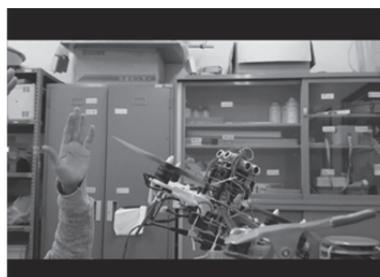


(a) 方位差がゼロ (b) 方位差が $+90^\circ$

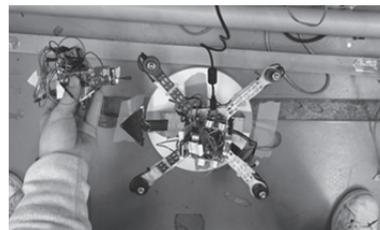


(c) 方位差が $-90^\circ$

図10 方位差と操舵との関係



(a) 手に反応して機体がバンクしている様子



(b) 手に持った装置に機体の向きが揃う様子

図11 回転翼型飛翔体の群制御実験

2機のうち片方の機体は本体が無いが、制御系や通信系は同一であり、これを手を持って方位を変えて、もう片方の機体が向きを揃えるかどうかを確認した。その結果を図11(b)に示す。図では手に持っている装置の向き(左向き)と機体の向き(矢印で表示)が一致している様子がわかる。手に持った装置の向きを変えてもこの状態が常に維持されていたことから、平行移動制御が正しく機能していた事が確認できた

## (3) 群形成パラメータの解析

個体の成長段階の違いによる群形成パラメータの調整を分析するために、マサバの幼魚を用いて、群行動の発現の過程とその特徴を、成長段階を追いながら3次元計測技術を用いて分析した。群の発現初期(45日令)では、個体間距離が成長とともに次第に短くなり、他個体との運動速度の同調性が調整しやすくなる傾向を示した。その後の成長段階(4ヶ月令)では、個体同士の遊泳ベクトルを揃

える行動が発現することによって、閉鎖空間で個体密度が増加しても発散することなく群としての同調性が高まることが示唆された。

また、群のエネルギー消費を抑える個体配置の分析では、マサバ幼魚を用いて評価した結果、複数個体が群を形成せずに遊泳した時の消費エネルギーが  $10\text{Jkg}^{-1}\text{m}^{-1}$  程度であったのに対し、群を形成した時は  $1\sim 3\text{BL/s}$  (BL は個体の体長) の幅広い速度レンジで消費エネルギーが  $5.0\text{Jkg}^{-1}\text{m}^{-1}$  となり、単独で遊泳する場合に比べて半減することがわかった。また、遊泳する際の群形状の厚みが  $1.0\text{BL}$  以下になると、後方個体の尾鰭振動数が約 30%以上低減し、群内の個体配置と移動コストとの関係が明らかとなった。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 3 件)

- 1) 稲田喜信, 生物型群制御を用いた飛翔体の編隊飛行制御, 設計工学, 査読無, 46, P7-15, 2011.
- 2) Tsutomu Takagi, Shizuka Ito, Shinsuke Torisawa, Yoshinobu Inada, Energy-saving Effect of Fish Schooling in the Japanese Mackerel, *Scomber japonicas*, Mathematical and Physical Fisheries Science, 査読有, 10, 2-13, ISSN 1348-6802, 2013.
- 3) 稲田喜信, 高信英明, 魚や鳥の群行動に学ぶ分散型センサーネットワーク, 日本機械学会誌, 査読無, 117, p.26-29, 2014.

〔学会発表〕 (計 1 1 件)

- 1) Y. Inada, Y. Morimoto, Analysis of Guidance Success Rate in the Migration of Flying Swarm, Annual Main Meeting of the Society for Experimental Biology (SEB Meeting Glasgow 2011), 2011.7, Glasgow, UK..
- 2) 高橋良輔, 稲田喜信, フィードバック制御を用いた飛翔体の群形状制御について, 第 49 回飛行機シンポジウム, 2011.10, 金沢市.
- 3) 飯田真澄, 高信英明, 鈴木健司, 三浦宏文, 大塚尚丸, 稲田喜信, 群知能ロボットの研究, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 2011.9, 東京都.
- 4) Y. Inada, K. Ohta, H. Tananobu, Gust Response Analysis in the Flight Formation of Unmanned Air Vehicles, The 28th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS 2012), 2012.9, Brisbane, Australia.
- 5) R. Takahashi, Y. Inada, Formation Shape Control of Unmanned Air Vehicles, The 28th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS 2012), 2012.9, Brisbane, Australia.
- 6) Y. Inada, H. Uriu, Stability Analysis of Mill Formation in an Organisms Swarm, Annual Main Meeting of the Society for Experimental

Biology (SEB Meeting Salzburg 2012), 2012.7, Salzburg, Austria.

- 7) 稲田喜信, 高橋良輔, 鈴木記章, 濱崎優輔, 高信英明, 飛翔体の群制御シミュレーションと実機への応用の試み, 第 50 回飛行機シンポジウム, 2012.11, 新潟市.
- 8) 高信英明, 飯田真澄, 鈴木健司, 三浦宏文, 稲田喜信, 群知能ロボットの研究-飛行船と地上移動ロボットを用いた 3D 群行動-, 第 50 回飛行機シンポジウム, 2012.11, 新潟市.
- 9) 伊藤静香・高木 力・鳥澤真介・稲田喜信, 魚群内の個体の相対位置と遊泳時のエネルギー, 日本水産学会春季大会, 2012.3, 東京都.
- 10) Y. Inada, R. Takahashi, Stability Analysis of Formation Shape Control Based on the Local Interaction among Air Vehicles, The 2013 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT2013), 2013.11, 高松市.
- 11) T. Takagi, S. Ito, T. Takagi, S. Torisawa, Y. Inada, Function of fish schooling from the perspective of saving kinetic energy, Annual Main Meeting of the Society for Experimental Biology (SEB Meeting Valencia 2013), 2013.7, Valencia, Spain.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

とよたエコフルタウン

(<http://toyota-ecofultown.com/>)

「発見の森」システム紹介映像作成協力

ホームページ等

- 1) <http://www.ea.u-tokai.ac.jp/inada/Biomimetics.html>
- 2) <http://t.mech.kogakuin.ac.jp/gunchi.html>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

稲田 喜信 (INADA, Yoshinobu)  
東海大学・工学部航空宇宙学科航空宇宙学  
専攻・教授  
研究者番号: 60302791

(2) 研究分担者

高信 英明 (TAKANOBU, Hideaki)  
工学院大学・工学部・准教授  
研究者番号: 40308177

高木 力 (TAKAGI, Tsutomu)  
近畿大学・農学部・教授  
研究者番号: 80319657

(3) 連携研究者 無し