

# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告

## JAXA Research and Development Report

---

### 生物型群制御を用いた小型飛翔体の 編隊飛行シミュレーション

稲田 喜信, 時田 拓明, 二上 将直, 堀江 数馬, 高信 英明

2009年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

## 目 次

概 要	1
1. はじめに	2
2. 生物型群制御のモデル	2
3. 飛翔体の群制御モデル	3
3. 1 相互作用領域の形状と相互作用のルール	3
3. 2 複数の周辺機体の扱い	4
3. 3 相互作用の指向性	4
3. 4 運動の記述	4
3. 5 相互作用のロジック	5
3. 6 推力の制御	6
4. 結果と考察	6
4. 1 機体数を変えながらの群制御	7
4. 2 群の移動方向の制御(経路制御)	9
4. 3 旋回飛行制御	9
4. 4 群形状の制御	10
5. まとめ	15
参考文献	16

# 生物型群制御を用いた小型飛翔体の編隊飛行シミュレーション\*

稲田 喜信<sup>\*1</sup>, 時田 拓明<sup>\*2</sup>, 二上 将直<sup>\*2</sup>, 堀江 数馬<sup>\*2</sup>, 高信 英明<sup>\*2</sup>

## Simulation Study of Formation Flight of Micro Air Vehicles Based on the Collective Motion Control of Organisms\*

Yoshinobu INADA<sup>\*1</sup>, Hiroaki TOKITA<sup>\*2</sup>, Masanao FUTAKAMI<sup>\*2</sup>,  
Kazuma HORIE<sup>\*2</sup> and Hideaki TAKANOBU<sup>\*2</sup>

### ABSTRACT

Unmanned air vehicles (UAV) have been developed for the purpose of information gathering from the air, and micro air vehicle (MAV) is a feasible candidate for this purpose because of the low cost, high portability, and low risk of injury by crash. MAV, however, has an inevitable limit of performance owing to the insufficient payload or susceptibility to aerial turbulences. The application of collective motion control to MAV is proposed here to solve this problem. The biological collective motion control is relevant because it is realized by simple interaction rules among individuals such as “approach”, “parallel orientation”, and “repulsion” rules. Referring to these rules, simulation model of collective MAVs is developed and a formation flight of collective MAVs is successfully demonstrated under various conditions. The robustness to the change of number of MAVs is evident where the different numbers of MAVs can make stable formation flights without altering control parameters. The navigation control of collective MAVs under an unstable command transmission condition is realized by the non-commanded members following to the commanded members. The loitering of collective MAVs is realized by changing the directivity of interaction among MAV members. Furthermore, the control of formation shape is realized by changing the shape of interaction field around each member of collective MAVs. These results represent the availability of biological collective motion control for the operation of collective MAV system.

**Key Words:** Collective Motion Control, Rule-based Interaction Model, Formation Flight, Micro Air Vehicle

### 概 要

防災や偵察、気象観測等の情報収集システムとして無人航空機(UAV)の開発が進められているが、Micro Air Vehicle (MAV)と呼ばれる小型軽量の飛翔体は、大型機に比べて低コストで可搬性に優れ、墜落による人的被害の危険性が小さいなどの利点を持っている。ただし、MAVにはペイロードの制限や外乱に対する脆弱性などの問題があり、実用上の障害となっていることから、本研究ではこれらの問題を改善するための方法として多数のMAVを同時使用する「MAVの群制御」を検討した。この際、機能制限のあるMAVの群制御に適した方法として、単純なルールに基づく生物の群運動を参考にし、「接近」、「平行」、「反発」という3つのルールに基づく群制御モデルを開発した。これを用いて各種の条件下でシミュレーションを行った結果、故障や外乱等により一部の機体が失われても、残りの機体が影響を受けずに群飛行を維持できるというロバスト性を確認したほか、一部の機体の移動方向のみを指令することによる経路制御、相互作用の指向性を利用した旋回飛行制御、および相互作用領域の形状を操作することによる群の形状制御などに成功した。これらの結果から、生物の群制御を参考とした単純なルールに基づく群制御アルゴリズムの有効性を確認することができた。

\* 平成 21 年 2 月 10 日 受付 (Received 10 February, 2009)

\*1 研究開発本部 数値解析グループ (Numerical Analysis Group, Aerospace Research and Development Directorate)

\*2 工学院大学 機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering, Kogakuin University)

## 1. はじめに

近年、防災や偵察、気象観測等を目的とした無人の飛行体の開発が進められている。特に、地震災害が多い日本では、大都市における直下型地震発生時の初動調査において、上空から短時間に広範囲の情報を入手できる飛行体の有効性は高い<sup>1)</sup>。ただし、大型の機体では墜落時の人的被害の危険性が高いため、都市上空での使用に制約があるほか、離着陸に飛行場を必要とすることや、機体価格が高価で多数機を装備できない等の制約が伴う。これに対して、図1に示すようなMAVと呼ばれる小型の機体は、大型機と比べて墜落時の危険性が少なく、離着陸に飛行場を必要としないほか、可搬性に優れていて低価格といった利点を持つ。

ただし、このような小型の機体はペイロードが限られていて搭載できる装備に制約があり、また外乱に対して脆弱である等の理由から、実用性の面で問題を抱えている。MAVが単体で用いられる限り避けられないこれらの問題を改善する方法として、多数のMAVを一つの集団として運用する「MAVの群制御」が考えられる。群制御の長所は、複数の機体の機能を組み合わせることによる機能の向上や、故障や外乱によって機体が失われた場合でも、残りの機体によって機能を維持できる耐故障性の高さが挙げられるほか、通信ネットワークを用いて機体同士や機体と地上基地との間で情報を交換すれば、単機では得られない多次元情報を得られるという利点がある。例えば、各機体が取得した画像や温度、湿度などの情報と取得した地点の位置、取得時間を通信ネットワークを用いて統合すれば、これらの情報の時間・空間的なマッピングが可能であり、火災の発生状況や、都市上空の局地的な気象状況等を、詳細かつリアルタイムに取得することが可能になる。

このような、通信ネットワークを用いて多数のユニットが集めた情報を統合する技術は「センサネットワーク」と呼ばれており<sup>2)</sup>、MAVを用いたセンサネット

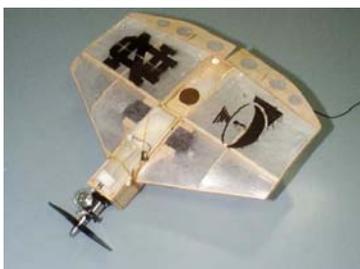


図1 小型飛行体 (MAV) の一例 (胴長24.8cm, 重量105g, 米国Notre Dame大学にて開発されたもの)

ワークを実現することが本研究の到達目標の一つである。ただし、小型の機体に搭載可能な制御系は大型機のそれに比べて機能が限られるため、複雑な制御を必要とする群制御は実現が困難と考えられる。そこで、本研究では、単純なアルゴリズムを用いて群制御を実現する方法として、生物が行なう群運動を参考にした群制御を検討する。以下にその詳細を述べるが、本文中で用いる「群制御」は、飛行体が対象である場合には「編隊飛行制御」と同義であり、混乱を避けるために以降は「群制御」という表記に統一する。

## 2. 生物型群制御のモデル

生物に見られる群運動の代表的な例として、鳥や魚の群運動があげられるが、これらの運動は過去に多くの研究事例があり、群が持つ生物学的な利点や群形成のメカニズム等が明らかにされている<sup>3)</sup>。その中で本研究では魚の群に見られる、「接近」、「平行」、「反発」という3つの単純な行動を組み合わせた群運動に注目する<sup>4)</sup>。これらの行動は個体同士の距離に依存して選択され、互いに離れている時は接近、近づいた時は反発、その中間の距離では向きを揃えて同じ方向に移動する平行行動が選択される。この性質を参考にした制御モデルがいくつか提案されているが、その中で図2に示したモデルは、Aoki<sup>4)</sup>やHuth&Wissel<sup>5)</sup>が提案したモデルをもとに稲田ら<sup>6)</sup>が提案した「ルール規範型」と呼ばれるモデルである。個体周辺には図2に示すような相互作用領域が存在し、領域内のどの位置に周辺個体が存在するかによって、対象個体が行う行動を決めている。例えば、他の個体が接近領域に存在すれば、その個体に向かって接近し(図3(a))、平行領域に存在すれば、その個体と同じ向きを向いて移動し(図3(b))、反発領域に存在すれば、その個体との衝突を避ける方向に移動す

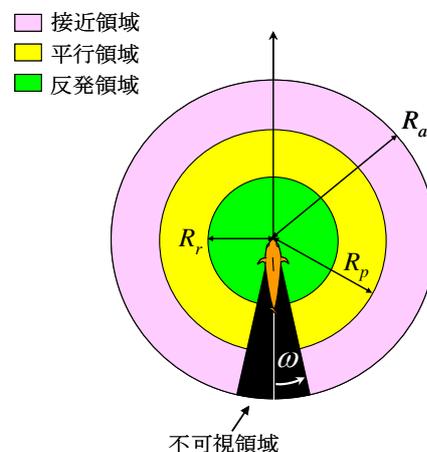


図2 2次元相互作用モデル

る(図3(c)). 相互作用領域内に複数の個体が存在する場合には, 各個体に対して上記のルールを適用して移動方向を決定し, それらの移動方向の平均の向きに移動する. また, いずれの領域にも周辺個体が存在しない場合は, ランダムに向きを変えて周辺個体を探索する. 群を構成する複数の個体が上に述べた共通のルールに従うことによって, 全体として図4に示すような群運動が実現されることが, シミュレーションによって確認されている<sup>9)</sup>.

### 3. 飛翔体の群制御モデル

#### 3.1 相互作用領域の形状と相互作用のルール

飛翔体の群制御を実現する場合には, 前節で紹介した2次元平面上の魚群モデルではなく, 3次元空間を対象とするモデルが必要となる. ここでは最も単純な方法として, 図2の2次元の相互作用領域を機体の前後軸(X軸)周りに一回転させて, 図5に示すような球形の相互作用領域を持つモデルを用いることとした. この際, 接近領域, 平行領域, 反発領域もそれぞれ球形となり, これらの領域内に周辺の機体が存在する場合は,

魚群モデルと同様のルールを適用して移動方向を決定した. 即ち, 図6に示すように周辺機体の位置によって(a)接近, (b)平行, (c)反発の各制御を行い, それぞれ図中に示した $\alpha_{app}$ ,  $\alpha_{para}$ ,  $\alpha_{repul}$ を移動方向ベクトルとして選択した. この中で, (a)と(b)の場合は移動方向が一意に定まるが, (c)の反発の場合には遠ざかる方向に任意性があるため, 本研究では図7に示した方向を $\alpha_{repul}$ の方向として選択することとした. 即ち, 対象機体(=相互作用領域の中心に位置する機体)から見た周辺機体の位置ベクトル $\mathbf{a}$ と, 対象機体の移動方向ベクトル $\mathbf{b}$ が張る平面内で,  $\mathbf{a}$ と同じ基点を持ち $\mathbf{a}$ に垂直な2つのベクトル $\mathbf{c1}$ ,  $\mathbf{c2}$ のうち,  $\mathbf{b}$ との角度が小さいベクトル(図7では $\mathbf{c1}$ )の方向を $\alpha_{repul}$ の方向とした.

図2のモデルでは, 魚の後方で両眼の視野からはずれる領域を不可視領域としたが, 飛翔体モデルでも機体が後方にセンサを持たない場合を想定して同様に設けた. この領域の広さは機体の後方軸からの角度 $\omega$ で指定し(図5), 後方にセンサを持つ場合は $\omega=0^\circ$ , それ以外の場合は必要に応じて角度を指定することとした.

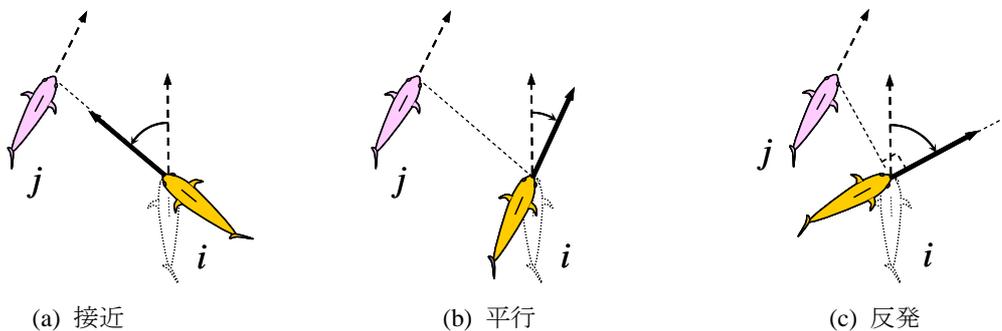


図3 相互作用ルール

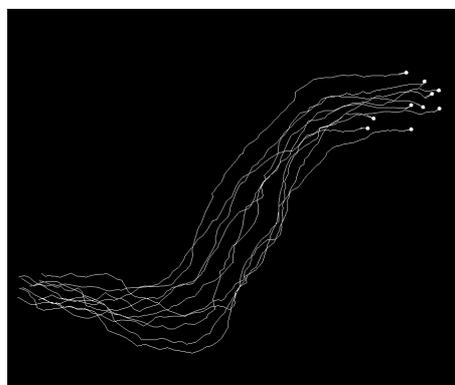


図4 ルール規範型モデルによる魚群のシミュレーション

### 3.2 複数の周辺機体の扱い

機体周辺の相互作用領域内には通常、複数の機体が存在すると考えられるが、センサの指向性や機体の処理能力の限界のために全ての機体と相互作用できない場合が考えられる。そこで、本研究では相互作用の対象となる機体数の最大値を $N_{b,max}$ とし、これ以上の数の機体との相互作用を制限することとした。これより多い数の機体が相互作用領域の中に存在する場合には、次節で述べる相互作用の指向性を適用して、優先方向に近い順に $N_{b,max}$ だけの機体を選択した。また、相互作用領域内の機体数が $N_{b,max}$ 以下の場合には、全ての機体を選択することとした。選択された機体にはそれぞれ3.1節で述べたルールが適用され、機体ごとに移動方向ベクトルが決定されて、それらの合ベクトルが向く方向を対象機体の最終的な移動方向とした。

### 3.3 相互作用の指向性

本研究では、相互作用領域の内部に存在する複数の周辺機体の中から、ある特定の方向に近い機体を優先的に選択して相互作用することとし、これを「相互作用の指向性」と定義した。このような指向性を考慮する目的は、前節でも述べたセンサの指向性（超音波センサや赤外線センサなどが持つ方向による感度の違い）を考慮するためと、相互作用の対象の選び方を外部から操作することによって、群の運動を制御できるかどうかを調べるためである。この方向は図5のベクトル $\delta$ の向きとして指定し、その向きは任意に設定できるとした。ただし、通常は機体前方のX軸方向を向くとした。

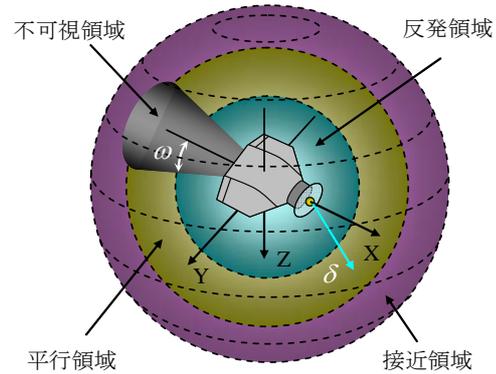


図5 3次元相互作用モデル

### 3.4 運動の記述

機体の運動は次の3次元の運動方程式を用いて記述した。

速度 ( $U, V, W$ )

$$\begin{cases} m(\dot{U} + QW - RV) = -mg \sin \Theta + X_a \\ m(\dot{V} + RU - PW) = mg \cos \Theta \sin \Phi + Y_a \\ m(\dot{W} + PV - QU) = mg \cos \Theta \cos \Phi + Z_a \end{cases} \quad (1)$$

角速度 ( $P, Q, R$ )

$$\begin{cases} I_{xx}\dot{P} - I_{xz}\dot{R} + (I_{zz} - I_{yy})QR - I_{xz}PQ = L \\ I_{yy}\dot{Q} + (I_{xx} - I_{zz})RP + I_{xz}(P^2 - R^2) = M \\ -I_{xz}\dot{P} + I_{zz}\dot{R} + (I_{yy} - I_{xx})PQ + I_{xz}QR = N \end{cases} \quad (2)$$

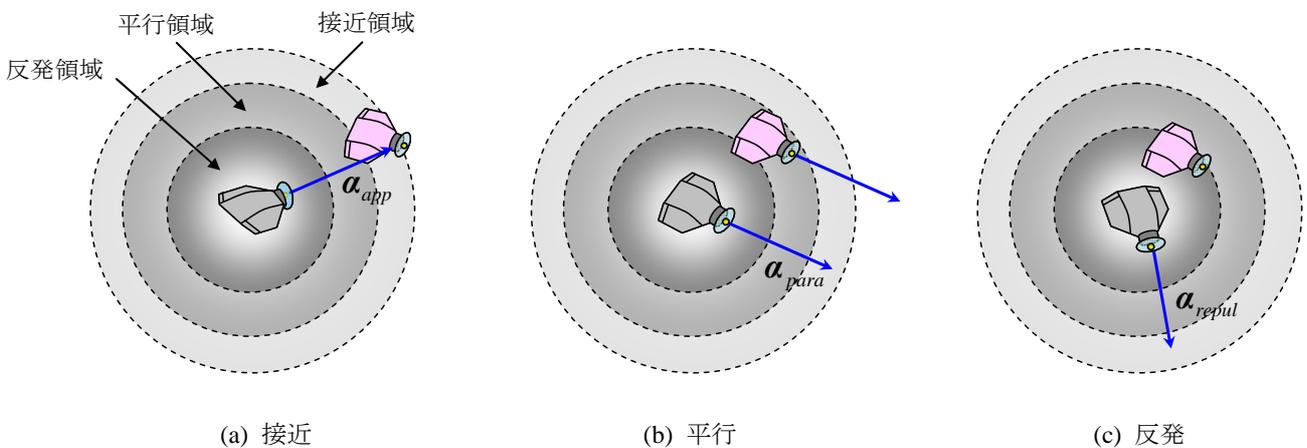


図6 3次元モデルの相互作用ルール

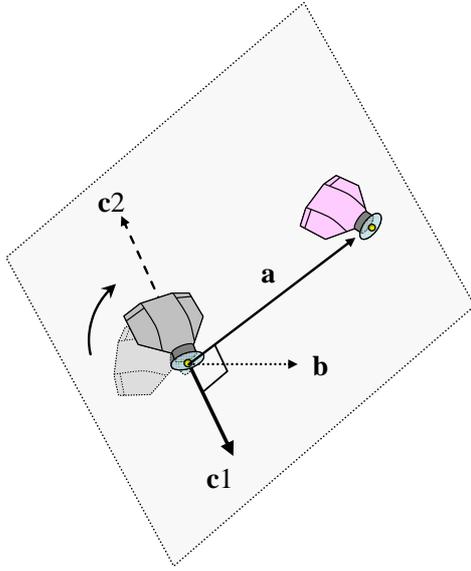


図7 反発時の移動方向

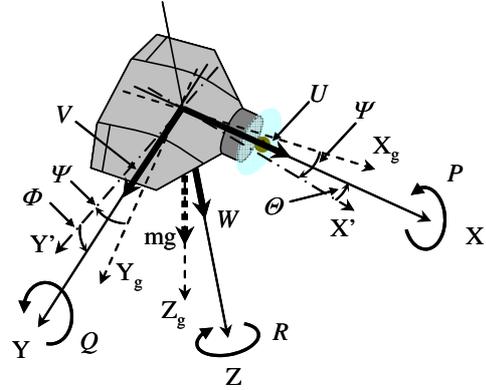


図8 座標系と変数の定義

姿勢角 ( $\Phi, \Theta, \Psi$ )

$$\begin{cases} \dot{\Phi} = P + Q \sin \Phi \tan \Theta + R \cos \Phi \tan \Theta \\ \dot{\Theta} = Q \cos \Phi - R \sin \Phi \\ \dot{\Psi} = Q \sin \Phi \sec \Theta + R \cos \Phi \sec \Theta \end{cases} \quad (3)$$

式中の速度，角速度は図8の機体固定座標系(X, Y, Z)での値であり，姿勢角は地面固定座標系( $X_g, Y_g, Z_g$ )に対する機体固定座標系のオイラ角である．変数と座標軸との対応や正負の向きは図8の定義に従う．( $X_a, Y_a, Z_a$ ), ( $L, M, N$ )はそれぞれ空気力+推力，空気力によるモーメントのX, Y, Z軸成分であり， $I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$  はそれぞれX, Y, Z軸に対する機体の慣性能率， $I_{xz}$ はXZ面に対する機体の慣性乗積である．機体の方向転換は，(2)式のモーメント( $L, M, N$ )に対して，機体の向きを変えるための制御モーメントを加えることによって行なう．空気力や空気力のモーメントの計算は文献7)を参考にし，慣性能率や慣性乗積，推力の値は，実際のMAVの諸元<sup>8)</sup>を参考に与えた．これら9つの連立微分方程式の解をRunge-Kutta法によって数値的に解くことによって機体の運動を求めた．

### 3.5 相互作用のロジック

それぞれの機体従う相互作用のロジックを図9に示す．図9(a)のSensor部においては，各機体が自身の相互作用領域内を探索し，周辺機体が見つければその機体の相対位置( $r_j$ )，および移動方向( $\psi_j$ ) (図9(b))を出力する．実際の機体では，相対位置は検知した距離セン

サが向く方向と計測された距離から得るか，あるいはGPSを搭載して，その位置情報を互いに交換して差をとることによって得られると考えられる．また，移動方向は磁気方位センサを搭載して，その情報を交換することによって得ることができると考えられる．従って，Sensor部には情報交換用の通信機能も含まれる．続く処理では，得られた位置に基づいて，指向性の向きである $\delta_i$ と $r_j$ が作る角度の小さいものから順に $N_{b,max}$ だけの機体を選択するSelectionと，選択された機体との相互作用を決定するInteractionの処理が行われる．Interactionでは，位置情報から得た距離 $r_{ij}$ に応じて，接近(approach)，平行(parallel orientation, or parallel)，反発(repulsion)のルールを適用し，その機体に対する移動方向ベクトルを出力する．移動方向ベクトルは，接近，平行，反発に対してそれぞれ図6における $\alpha_{app}$ ， $\alpha_{para}$ ， $\alpha_{repu}$ で与えられる．複数の機体が存在する場合は，それぞれの機体に対して決められた移動方向ベクトルを足し合わせ，その合ベクトルの向きを新しい移動方向 $\psi_i^*$ として出力する．相互作用機体が存在しない場合は，周辺機体を探索するためにランダムな移動方向 $\alpha_{search}$ を出力する (図9(c))．Interactionによって移動方向 $\psi_i^*$ が決まれば，現時点での移動方向 $\psi_i$ との誤差を求めて移動方向の修正を行なう．本研究では，PID制御を用いて移動方向の誤差を修正するための制御モーメント ( $\Delta L, \Delta M, \Delta N$ ) を出力した．また，図9(a)におけるnoise1, noise2はそれぞれ制御系における不確かさ，突風等の外乱を想定しており，今回の計算ではnoise1のみを考慮し，各機体には互いに相関の無い外乱を付加した．

### 3.6 推力の制御

本研究では計算開始時点において、与えられた初速度( $V_0=9.7\text{m/s}$ )で水平飛行が可能な機体の迎角を計算し、その際に発生する抵抗成分と釣り合うだけの推力( $T$ )を一定値( $T_h$ )として与えた。従って、各機体は計算開始時点では定常な水平飛行を行うが、時間が経過するにつれて相互作用による制御が加わり、速度が変化して群から遅れる機体が生じる。機体が群から遅れて、全ての周辺機体が相互作用領域の外に出てしまうと、それ以降の追従が不可能になるため、本計算では次の規則に従って推力を調節し、先行機体に追いつくための制御を行った。即ち、各機体の相互作用領域内の周辺機体の平均距離 $\bar{d}$ を求め、この値がある閾値 $d_{th}$ を越えた場合には、次のように推力を調整した。

$$T = T_h \quad (\bar{d} \leq d_{th}) \quad (4)$$

$$T = T_h (\bar{d}/d_{th}) \quad (\bar{d} > d_{th}) \quad (5)$$

ここで $d_{th}$ は機体が群から遅れた状態を示す平均距離を意味するが、群から遅れた場合には他の機体の多くが

接近領域内に集中すると考えられるため、それらの平均距離は図9(b)における平行領域の半径 $R_p$ よりも大きくなると考えられる。従って、 $d_{th}$ には平行領域の半径 $R_p$ を用いることとし( $d_{th}=R_p$ )、 $\bar{d}$ が $d_{th}$ に対してどの程度大きいかによって(4)、(5)式に従って推力を定めた。

### 4. 結果と考察

シミュレーションで用いた機体の諸元と相互作用パラメータを、それぞれ表1、表2に載せる。機体の諸元は仮想的な小型飛行体を想定したものであるが、諸元の一部は実際に飛行している小型飛行体の値を参考にして与えている<sup>8)</sup>。また、この諸元をもとに文献7)を参考にして機体の安定微係数の推算を行ない、空気力やモーメントの評価に用いた。

シミュレーションでは、実際の運用を想定して、1)機体数を変えながらの群制御、2)群の移動方向の制御(経路制御)、3)旋回飛行制御、4)群形状の制御、の4種類の計算を行なった。以下にその結果と考察を述べる。

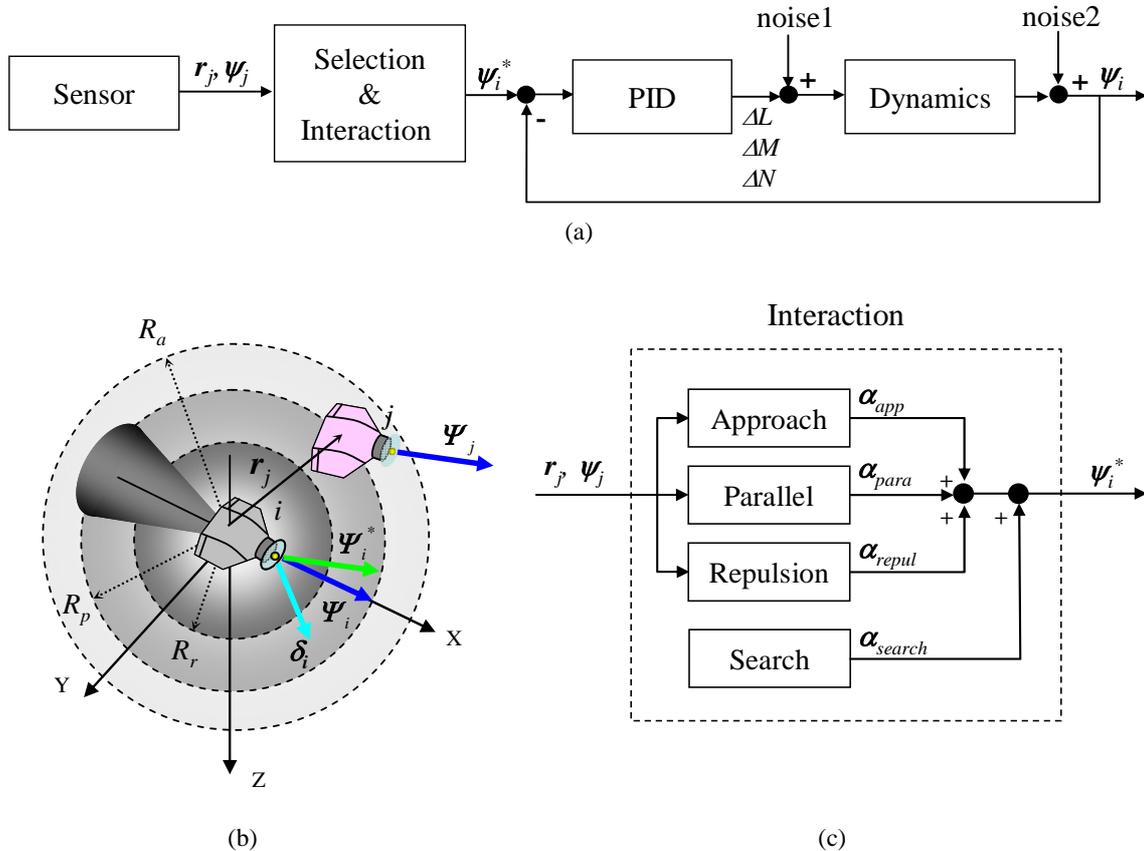


図9 相互作用のロジック

表1 機体の諸元

主翼	面積	$S$ (m <sup>2</sup> )	0.135
	スパン	$b$ (m)	0.6
	平均空力翼弦	$c$ (m)	0.2
	空力中心位置	$h_{mv}$ (mac)	0.25
	アスペクト比	$AR$	2.667
	有効アスペクト比	$AR_e$	2.133
	テーパー比	$\lambda$	1
	後退角	$\Lambda$ (deg)	0
	上反角	$\Gamma$ (deg)	10
	揚力傾斜	$a_w$	3.243
水平尾翼	面積	$S_h$ (m <sup>2</sup> )	0.02
	スパン	$b_h$ (m)	0.2
	アスペクト比	$AR_h$	2
	有効アスペクト比	$AR_{e,h}$	1.6
	後退角	$\Lambda_h$ (deg)	0
	揚力傾斜	$a_h$	2.793
	水平尾翼位置	$l_h$ (m)	0.45
	水平尾翼容積	$V_h$ (m <sup>3</sup> )	0.333
垂直尾翼	面積	$S_v$ (m <sup>2</sup> )	0.01
	スパン	$b_v$ (m)	0.1
	アスペクト比	$AR_v$	1.55
	有効アスペクト比	$AR_{e,v}$	1.24
	後退角	$\Lambda_v$ (deg)	0
	揚力傾斜	$a_v$	2.405
	垂直尾翼位置	$l_v$ (m)	0.45
	X軸から空力作用点までの距離	$z_v$ (m)	0.05
	垂直尾翼容積	$V_v$ (m <sup>3</sup> )	0.056
	胴体	容積	$V_f$ (m <sup>3</sup> )
全長	$L$ (m)	0.33	
重量	$W$ (kgf)	0.27	
慣性モーメント	$I_{xx}$ (m <sup>2</sup> kg)	0.011	
	$I_{yy}$ (m <sup>2</sup> kg)	0.013	
	$I_{zz}$ (m <sup>2</sup> kg)	0.007	
	$I_{xz}$ (m <sup>2</sup> kg)	0.0006	
重心位置	$h_{CG}$ (mac)	0.15	
全機抵抗係数	$C_{D0}$	0.1	

表2 相互作用パラメータ

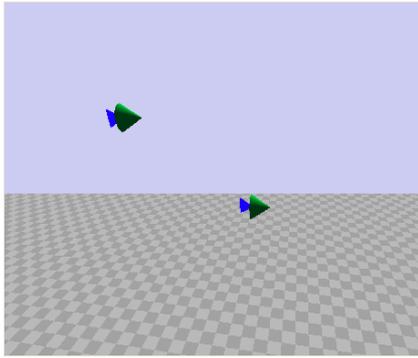
反発領域半径	$R_a$ (L)	2
平行領域半径	$R_p$ (L)	10
接近領域半径	$R_r$ (L)	15
機体後方の不可視領域角度	$\omega$ (deg)	30
相互作用可能な機体の最大数	$N_{b,max}$	4

#### 4.1 機体数を変えながらの群制御

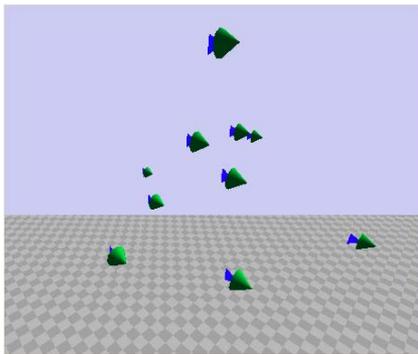
実際の運用では、現場の状況に応じて使用可能な機体数が異なったり、外乱や故障などで飛行中に一部の機体が失われたりするなど、機体数が一定しない状況での運用が考えられる。そこで機体数を変えながら群制御を行なった結果を図10に示す。いずれも同じ制御アルゴリズムとパラメータを用いた上で、機体数のみを変えたものである。図10(a)~(c)は計算開始から十分に時間が経過した後 (>30秒) の2機, 10機, 50機の飛行状態を示す。いずれのケースにおいても群の分裂や機体の脱落などは見られず、安定した群飛行が実現された。ただし、影響が全くないわけではなく、図10(d)に見られるように、機体数の増加とともに機体の移動方向のずれが増加する傾向を示した。これは機体数の増加によって機体の密度が増し、機体間の相互作用の頻度が増えて移動方向が変動しやすくなることが原因と考えられる。しかしながら、100機まで増加してもずれの増加は緩やかであり、全体として秩序のある群制御が実現できていると言える。

続いて、飛行中に機体が失われる計算を行なった結果を図11に示す。ここでは当初50機から計算を開始し、100ステップ (=10秒) ごとに全体の約10%の機体に故障が生じたと仮定して、故障機体の推力を停止させて群から脱落させた。この際、故障機体の選択はランダムに行ない、推力を停止した機体は図11に示すように群から後方に遅れ、その後地面に墜落した。全体で5回の故障を発生させた結果、当初の機体数から23機まで機体が減少したが、残存機体は大きな影響を受けることなく群飛行の継続に成功した。

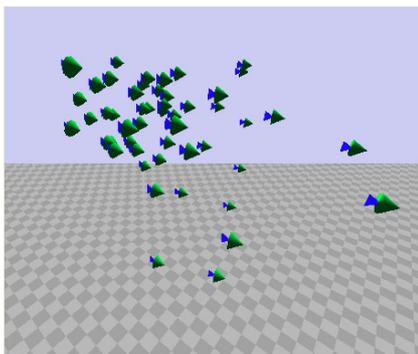
以上のように機体数が変動しても群制御への影響が軽微である理由は、本研究の制御モデルが相互作用領域の内部の機体とのみ相互作用をする局所相互作用モデルであることと、相互作用可能な機体数を  $N_{b,max}$  (=4機) で制限していることに関係がある。相互作用を領域の内部に制限していれば、領域外部での機体数の変動の影響を直接受けることはなく、また領域内で機体数が増加した場合でも、 $N_{b,max}$  を上限として増加の影響を抑えられるほか、減少の影響も次の理由で抑えることができる。即ち、 $N_{b,max}=4$ 機とした場合、相互作用をしている4機の中から少なくとも1機が故障によって失われる確率は  $1-0.9^4=0.3439$  であり、2倍の  $N_{b,max}=8$ 機と相互作用する場合の  $1-0.9^8 \cong 0.5695$  と比べて約3/5、全機 (49機) と相互作用する場合の  $1-0.9^{49} \cong 0.994$  と比べて約1/3となって故障の影響が抑えられている。以上のように本研究のモデルは、局所相互作用が持つ特性を利用することによって機体数の変動に対してロバストな



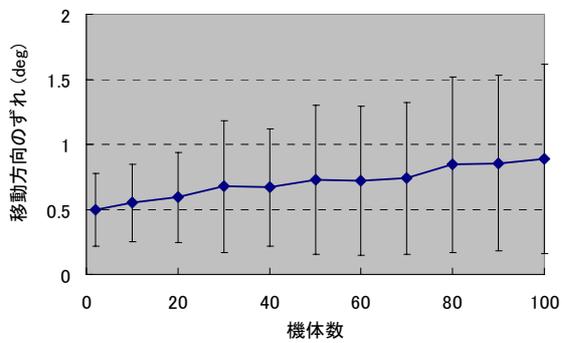
(a) 2機



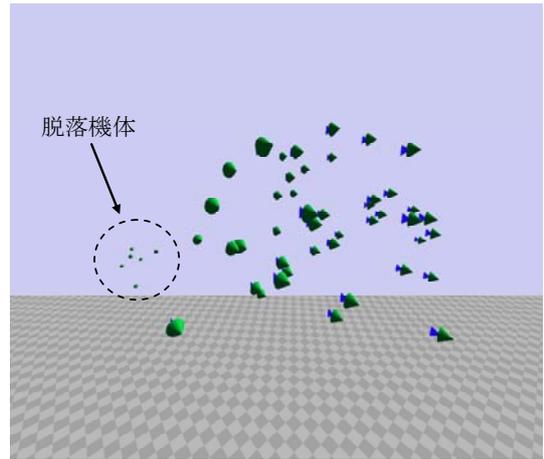
(b) 10機



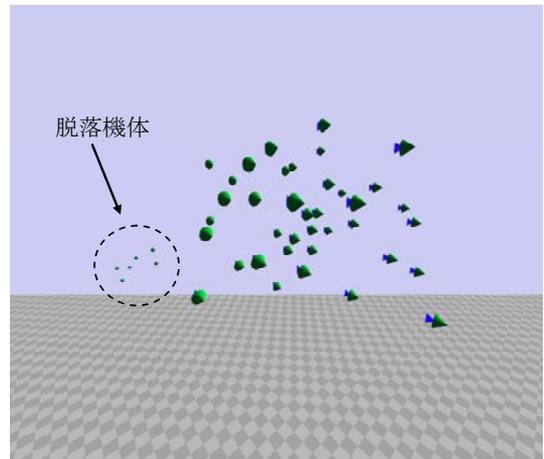
(c) 50機



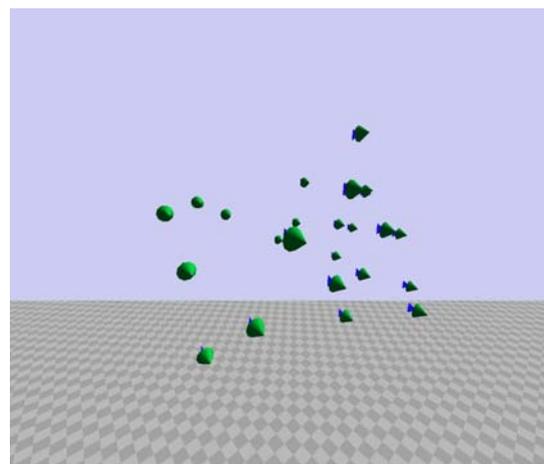
(d) 機体の移動方向のずれと変動幅  
 図 10 異なる機体数でのシミュレーション



(a) 1回目



(b) 2回目



(c) 5回目以降

図 11 飛行中の機体数を変動させたシミュレーション

制御を実現している。

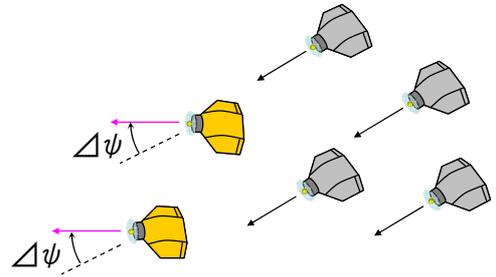
#### 4.2 群の移動方向の制御(経路制御)

群を目的地へ移動させるための経路制御では、全ての機体の移動方向を外部から指令するか、航法装置等を用いて自律制御する方法があるが、状況によっては全ての機体に指令が届かなかったり、航法装置が故障して全ての機体を制御できないような場合が考えられる。そこで本研究では、経路制御可能な機体を一部の機体に制限した場合に、群全体の経路制御が可能であるかどうかを分析した。図12はその結果である。シミュレーションでは、群の一部の機体に対して一定の時間間隔で水平面内の移動方向を $\Delta\phi$ だけ強制的に変更し(図12(a))、残りの機体がそれに追従できるかどうかを調べた。図12(b)の横軸は全機体数(50機)に対して強制的に経路を変更した機体、すなわち経路制御可能な機体の割合( $R_c$ )で、縦軸は残りの機体が追従に成功した割合(=追従成功率)を示している。追従成功率とは、同じ $R_c$ と $\Delta\phi$ のもとで初期条件を変えながら10回の試行を行ない、計算終了まで残りの機体が追従できた回数の割合を示す値である。計算時間は100秒間で、経路の変更は5秒ごとに行なった。図12(c)は $R_c=60\%$ 、 $\Delta\phi=30^\circ$ でのシミュレーションの様子を示す。図12(b)を見ると、 $R_c$ の値が大きいほど、あるいは $\Delta\phi$ が小さいほど追従成功率が増加していることがわかる。つまり、経路制御可能な機体の割合が高い時には、大きな角度で経路変更を行なっても残りの機体は追従が可能であり、割合が低い場合でも、経路変更の角度を小さく抑えることによって追従が可能であることを示している。即ち、経路変更の角度設定を適切に行なえば、全機に指令が届かないような状況下でも群の誘導が可能であり、状況に応じたロバストな経路制御が可能であることを示している。

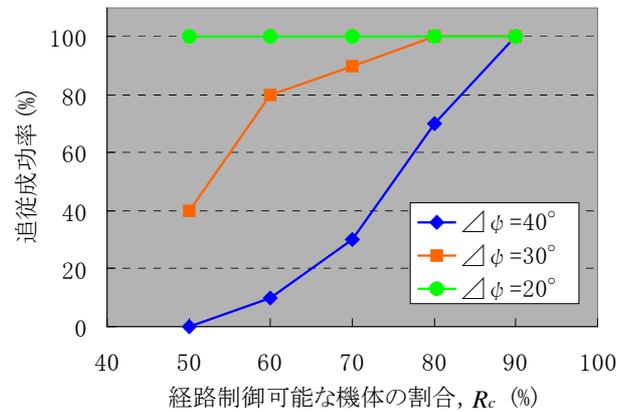
#### 4.3 旋回飛行制御

旋回飛行は、飛翔体がある地点の上空で地上の目標物を継続的に観察する場合や、一定時間空中で待機する場合などに行なわれる飛行である。単機では適当な半径を定めて基準点の周囲を旋回すれば良いが、多数の機体でこれを行うと衝突の危険性があるため、機体ごとに旋回半径を変えたり、飛行高度を変えるなどの煩雑な制御が必要となる。そこで、本研究では機体間の相互作用の性質を利用して、できるだけ簡単に旋回飛行を実現する方法を検討した。

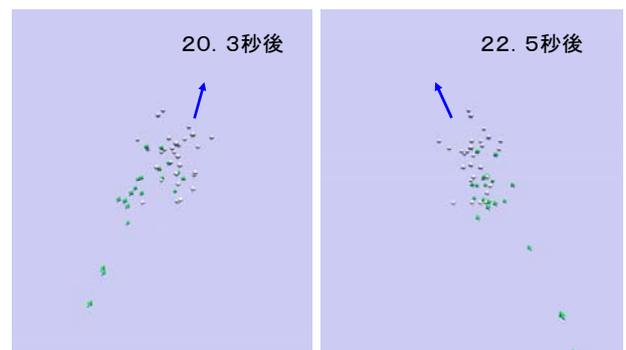
3.3節の相互作用の指向性で述べたように、各機体は特定の方向の機体と優先的に相互作用を行う指向性を



(a) 一部の機体(橙色)のみを経路制御

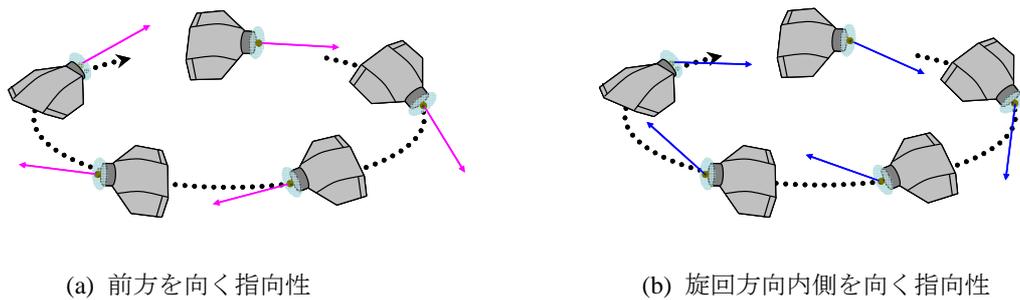


(b) 追従成功率



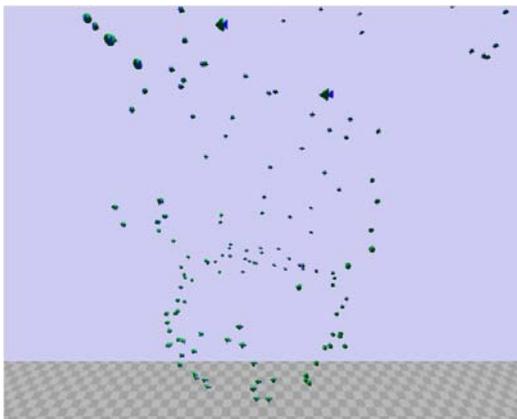
(c) 経路制御可能な機体(白色)に対して残りの機体(黄緑色)が追従する様子。白色機体が経路を変更する前後の状況を示し、青い矢印は白色機体の進行方向を示す(時間は計算開始からの経過時間で、 $R_c=60\%$ 、 $\Delta\phi=30^\circ$ で計算)。

図12 一部の機体に対する経路制御

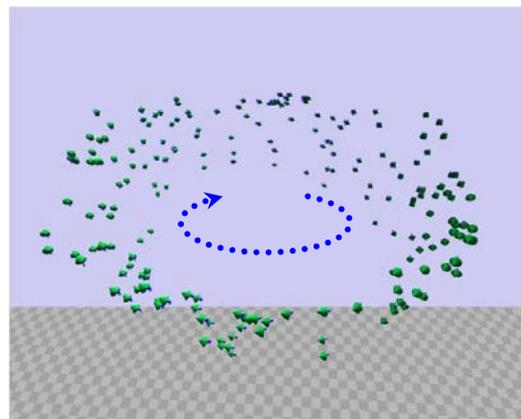


(a) 前方を向く指向性

(b) 旋回方向内側を向く指向性



(c) 前方へ指向性を持つ場合のシミュレーション結果 (斜め上方から見た画像)



(d) 旋回方向内側に指向性を持つ場合のシミュレーション結果 (斜め上方から見た画像)

図 13 定点旋回飛行のシミュレーション

持っている。通常は機体前方を向いているが、センサの向きを変える等の方法で、適当な方向に自由に設定することができるかと仮定している。そこで、この指向性の向きを旋回飛行制御に利用することとし、図13(a)、13(b)に示すような機体前方を向いた指向性と、旋回方向の内側を向いた指向性を用いて旋回飛行を試みた。シミュレーションでは、最初に200機の機体をリング状に配置し、機体の向きを右旋回に揃えた状態から計算を開始して、その後の経過を観察した。図13(c)は前方を向いた指向性、図13(d)は旋回方向の内側を向いた指向性の結果を示す。これらを見ると、機体前方を向く指向性の場合には旋回飛行が持続せず、リング構造が短時間に崩れてしまうという結果が得られたが、旋回方向内側の指向性を持つ場合にはリング構造が崩れず、安定に旋回飛行が持続する結果が得られた。

この理由としては、指向性が内側を向く場合には、斜め前方内側の機体を相互作用の対象として選択する頻度が増えるため、その機体に対する接近制御が働いて機体が内側を向き、推進力の内側成分が生成されて、

それが向心力として作用することによって旋回飛行が持続できたと考えられる。また、斜め前方の機体は自機よりも先に旋回してより内側を向いており、これに対して平行制御が働くことによっても機体を内側へ向ける効果が生じたと考えられる。一方、指向性が前方を向く場合には、前方の機体を相互作用の対象として選ぶ頻度が増えるため、接近制御による内側への推進力が発生せず、平行制御の寄与のみとなって、リング構造が壊れやすくなったと考えられる。

この制御は機体間の相互作用をそのまま利用したものであり、旋回中の機体の間隔は接近、平行、反発の各制御によって適切に維持され、機体ごとに旋回半径や飛行高度を指定する必要はない。指向性の向きのみを制御すれば良いため、簡単かつ有効な制御方法と言える。

#### 4.4 群形状の制御

群制御では多数の機体が空間に広がって飛行するため、単機で飛行する場合に比べて障害物に遭遇する可

能性が高く、これを安全に避けるための制御が必要になる。このような障害物回避の制御では、障害物を避けやすい形にあらかじめ群の形状を変更しておく方法が有効である。また、群形状の変更は運用目的に応じた機体の配置を行う場合にも有効で、例えば、上空から地表面を観測する場合には、平面的に広がった配置が良く、高度方向の温度や湿度の分布を観測する場合には、上下方向に広がった配置が良い。このような目的に応じた機体の配置を行なう場合にも、群形状の制御は必要になる。そこで本研究では、群の3次元的な形状を制御するための方法を検討した。

群の形状を指定する一般的な方法は、群を構成する各機体の座標を形状に合わせて個別に指定する方法であるが、飛行中の外乱等によってリアルタイムに位置が変動する状況の中で、多数の機体の座標を正確に維持することは困難であるほか、群の形状を変更するたびに全ての機体の座標を計算し直す必要があり、制御

系に対する負荷が大きい。そこで、できるだけ簡単な方法でこれを実現する方法として、相互作用領域の形状を操作する方法を検討した。

群が安定に飛行している時、相互作用領域内部の機体の配置は、図14(a)に示すように反発領域を除く接近、平行の各領域に機体が一様に分布している状態になっていると考えられる。その理由を以下に述べると、図14(a)の状態において中心の機体（オレンジ色の機体）が接近領域の機体に対して持つ移動方向ベクトルは、図の赤色のベクトルのように放射状に配置しているため、和を求める段階で互いにキャンセルされて接近制御の寄与は小さくなる。その一方で、平行領域に存在する機体に対する移動方向ベクトルは、図の青色のベクトルのように与えられ、和を求める段階で向きの違いがキャンセルされて安定に前方を向くベクトルとなる。その結果、中心の機体は安定に前方を向いて飛行することができるが、外乱によってこのような状態から位置が

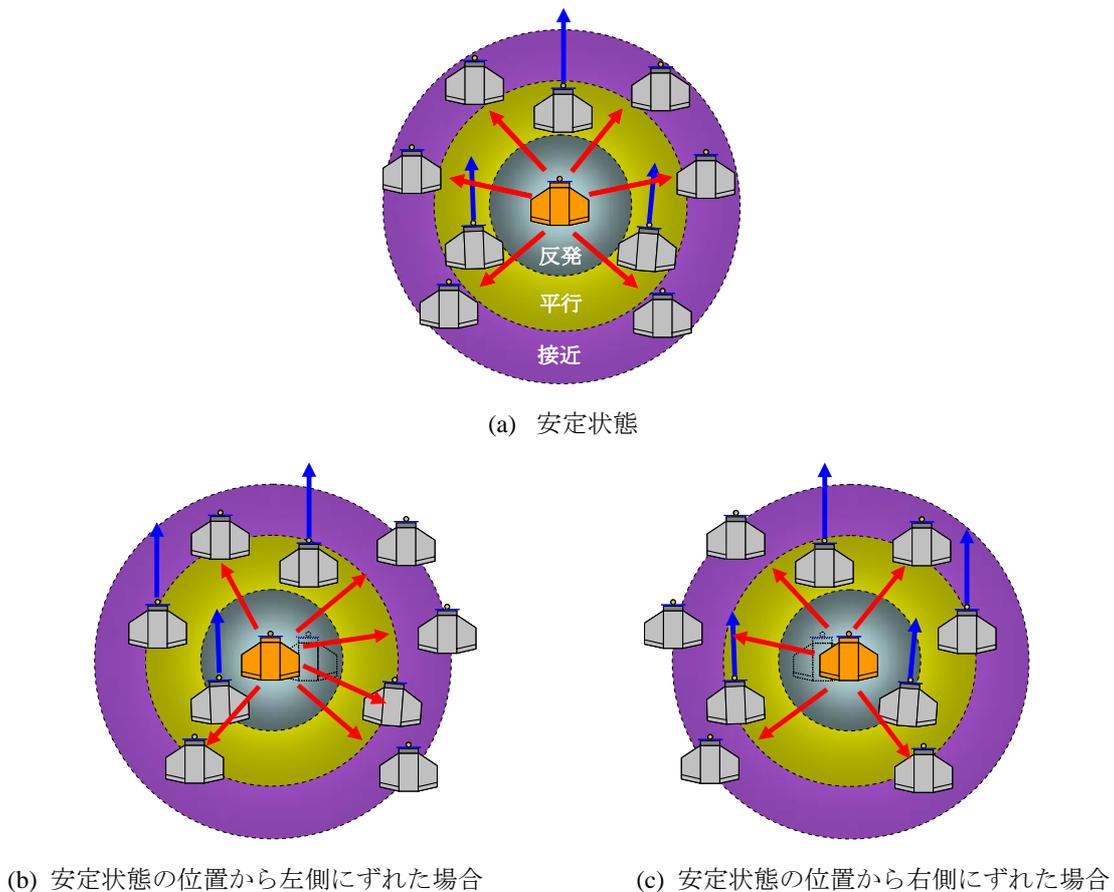


図14 群制御における安定な位置関係  
(赤、青のベクトルはそれぞれ接近、平行領域の機体に対する移動方向ベクトル)

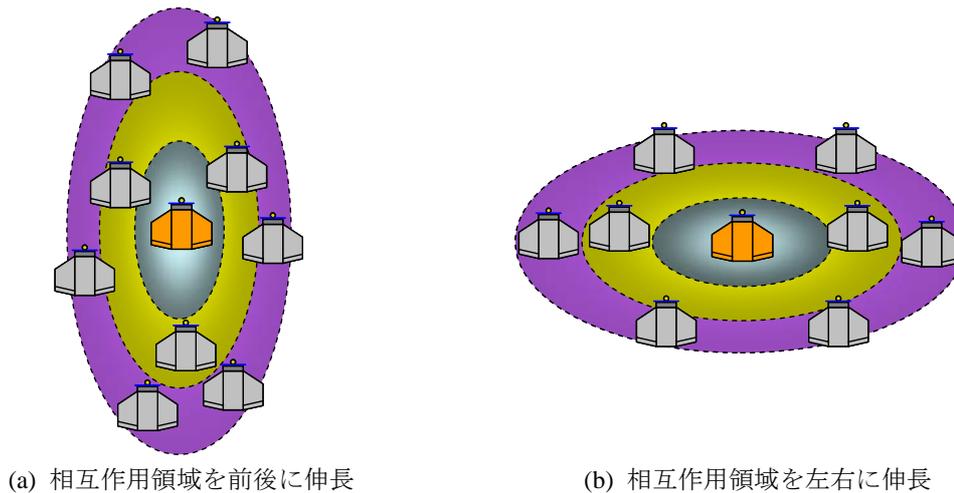


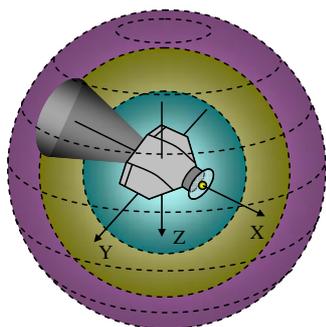
図15 相互作用領域の変形

ずれた時、例えば図14(b)のように中心機体の位置が左側にずれた場合、機体の右側では平行領域にいた機体の一部が接近領域へ移り、機体の左側では接近領域にいた機体の一部が平行領域へ移る。その結果、中心機体の右側の接近領域に存在する機体の数が相対的に増加し、右側を向く接近ベクトルが優勢となって、中心機体を元の位置に戻そうとする作用が働く。同様に、図14(c)のように右側にずれた場合にも、左側を向く接近ベクトルが優勢となって機体を元の位置にもどそうとする作用が働く。上下方向、前後方向に位置がずれた場合でも同様な状況が生じるので、図14(a)のような状態が安定状態であると考えられる。機体の後方に不可視領域がある場合には、前後方向の位置のずれに対する安定性は低下すると考えられるが、左右や上下方向については同様な安定性が存在すると考えられる。

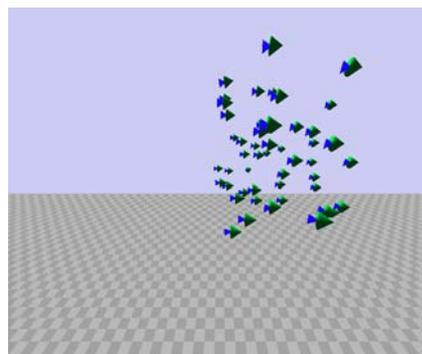
以上の議論から、相互作用領域内の機体の配置は図14(a)に示すように反発領域を除く全領域に均等に分布する状態に近づくと考えられ、この性質を利用すれば、図15に示すように相互作用領域の形状を変更することによって周辺機体の配置が変化し、その影響を受けて群全体の形状が変化することが期待できる。そこで、相互作用領域の形状を変化させながらシミュレーションを行なった結果を図16～図19に示す。いずれも同じ初期条件（機体の位置、速度）、相互作用パラメータ（ $N_{b,max}=4$ ,  $\omega=30^\circ$ , 前方優先）、機体数( $N=50$ )のもとでシミュレーションを開始し、開始から50秒以上経過した安定状態での飛行を示す。また図20には、群形状の指標として群の進行方向をX軸、左右方向をY軸、上下方向をZ軸とした場合の、全機体の各軸方向の座標の分散値を計算した結果を示す。この値が大きければ、群

はその軸方向に伸びた形状をしていることを意味する。

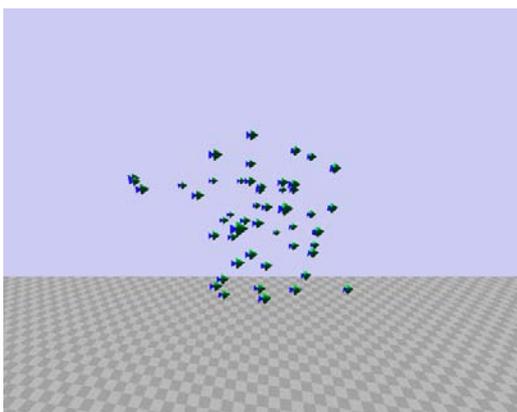
図16はオリジナルの球状の相互作用領域を使用した場合の結果で、初期状態での機体の配置（図16(b)）、および安定状態での側面（図16(c)）と前面（図16(d)）から見た機体の配置を示す。球状の相互作用を持つ場合は、機体の配置は初期状態からあまり大きく変化せず球状に固まったまま飛行しており、図20よりX軸、Y軸方向の分散が同程度で、Z軸方向の分散が他軸に比べて小さいことから、上下方向に若干圧縮された球状の配置をしていることがわかる。図17は、相互作用領域の形状を前後方向に伸長した場合の結果で、初期状態では図16(b)と同じ配置をしているが、時間の経過とともに形が変化して、図17(b)の側面図を見てもわかるように、オリジナルに比べて進行方向に伸びた配置をしている。図20からもオリジナルに比べてX軸、Y軸方向の分散が大きいきことが示されており、特にX軸方向の分散が大ききことから進行方向に長い形状であることがわかる。また、図18は相互作用領域を左右に伸長した場合の結果であるが、こちらも図16(a)と同じ初期状態から飛行を始めて、安定状態では図18(c)に示されているように、左右方向に細長い配置になっていることがわかる。図20を見てもオリジナルに比べてX軸、Y軸方向の分散が増加していることが示されているが、特にY軸方向への分散の増加が大きいため、オリジナルに比べて左右方向に長い形状になっていることがわかる。最後に、図19は相互作用領域を上下に伸長した場合の結果である。図19(b)の側面図はオリジナル（図16(c)）とあまり差は無いが、図19(c)の前面図を見ると明らかに上下に細長くなっており、図20でも同様にZ軸方向の分散の増加が著しいことから、上下に長い形状になっ



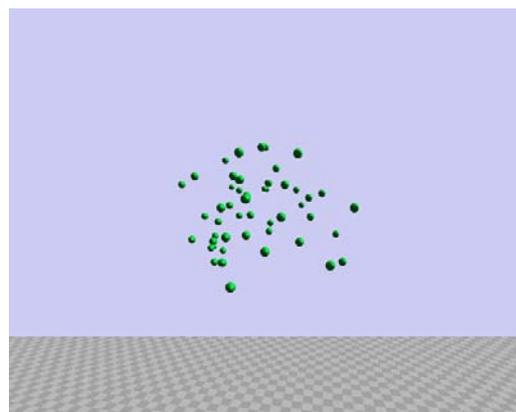
(a) オリジナル (=球形) の相互作用領域



(b) 計算開始時の機体の配置

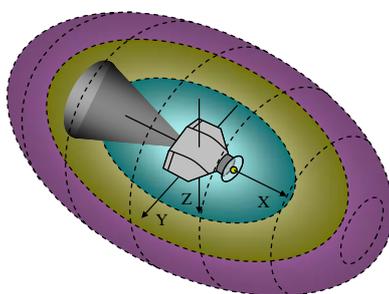


(c) 側面 (Y軸方向) から見た機体の配置

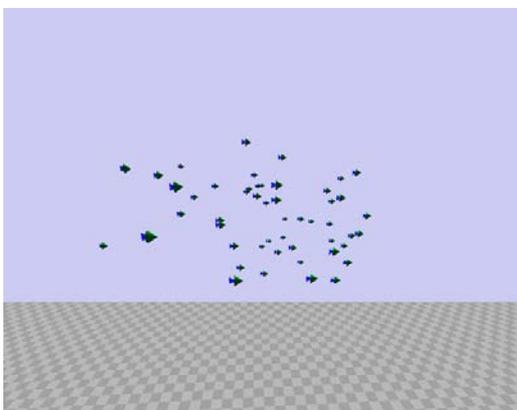


(d) 前面 (X軸方向) から見た機体の配置

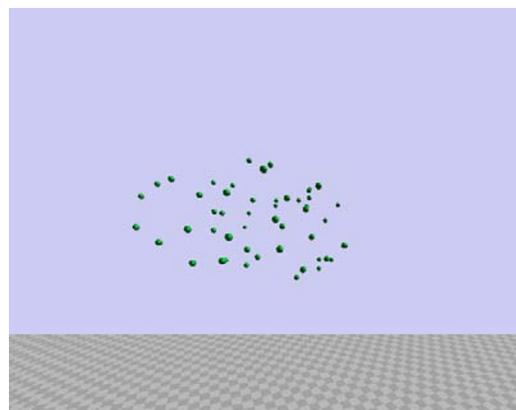
図 1 6 相互作用領域の形と群の形状 (オリジナル=球形)



(a) 前後方向に伸長した相互作用領域

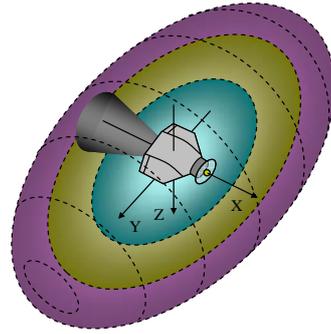


(b) 側面 (Y軸方向) から見た機体の配置

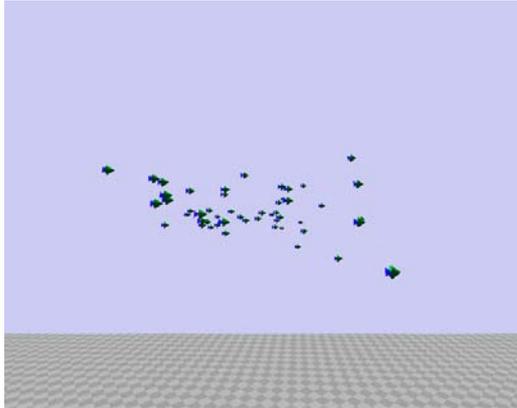


(c) 前面 (X軸方向) から見た機体の配置

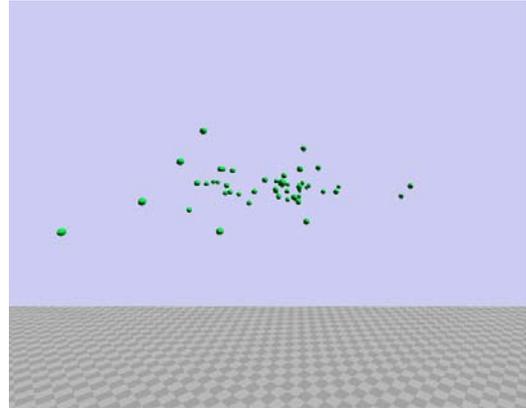
図 1 7 相互作用領域の形と群の形状 (前後方向に伸長)



(a) 左右方向に伸長した相互作用領域

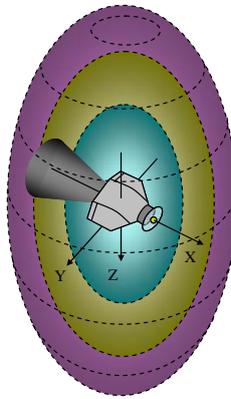


(b) 側面 (Y軸方向) から見た機体の配置

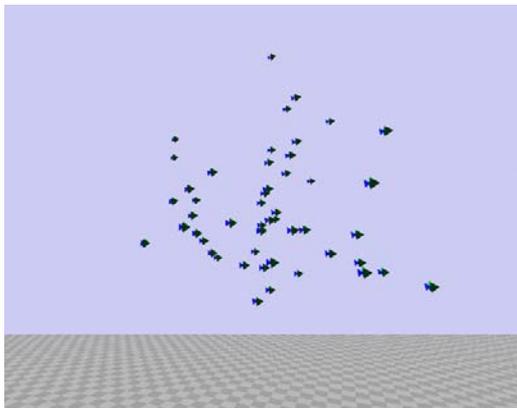


(c) 前面 (X軸方向) から見た機体の配置

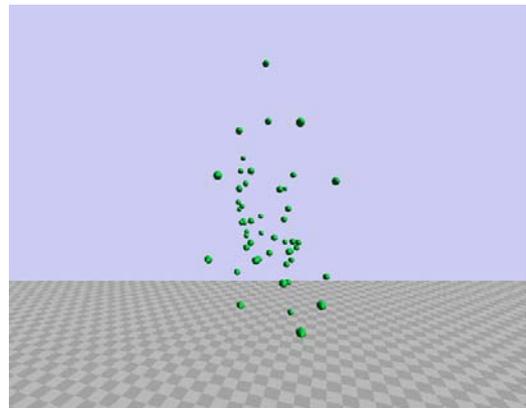
図 1 8 相互作用領域の形と群の形状 (左右方向に伸長)



(a) 上下方向に伸長した相互作用領域



(b) 側面 (Y軸方向) から見た機体の配置



(c) 前面 (X軸方向) から見た機体の配置

図 1 9 相互作用領域の形と群の形状 (上下方向に伸長)

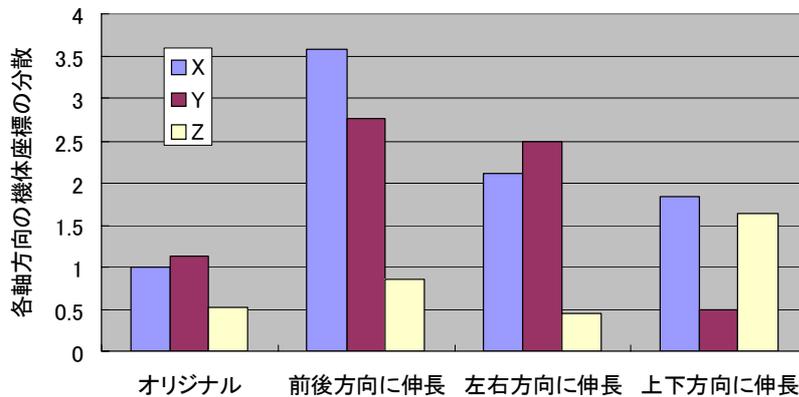


図20 相互作用領域の形状を変えた場合の機体座標の分散  
(機体の配置が安定した状態での60秒間の平均値で、各値はオリジナルのX軸方向の分散を1とした場合の相対値を示す。)

ていることがわかる。以上のことから、群の形状は相互作用領域の形状と強い相関を持ち、相互作用領域を特定の方向に引き伸ばすと、同じ方向に引き伸ばされた群形状が形成されることが明確に示された。

この理由は次のように考えられる。全ての機体の相互作用領域が同じ方向（例えば前後方向）に伸長された時、ある機体の周囲には図21(a)のように相互作用領域の形状に合わせて周辺の機体が配置するが、それぞれの周辺機体も同様に前後に伸長した相互作用領域を持っているため、その機体の周辺機体もまた前後方向に伸びた配置をする。この配置の繰り返しが全機体で行なわれると、結果として図21(b)に示すように群全体の形状も前後に伸びた形になると考えられる。言い方を換えれば、局所的な相互作用によって決まる幾何学的な機体の配置が繰り返しの過程で保存され、類似した形状を持つ集団構造が形成される。これを仮に「動的な類似構造の形成」と呼ぶことにすれば、この形成の過程において機体同士の関係は静的に固定されておらず、相手がどの機体であっても同じ繰り返しの関係が形成され、結果として同じ形状が群全体の形として作られることになる。さらに、群の形を作っている相互作用は、機体周辺の局所的な関係のみを規定しており、各機体が群全体のどこにいるかに関わりなく形状の制御が実現される。これは制御を容易にするだけでなく、故障等によって一部の機体が失われても、残りの機体はほとんど影響を受けずに新しい相手と相互作用を行って、同じ形状を維持できるというロバスト性を持つことも意味している。

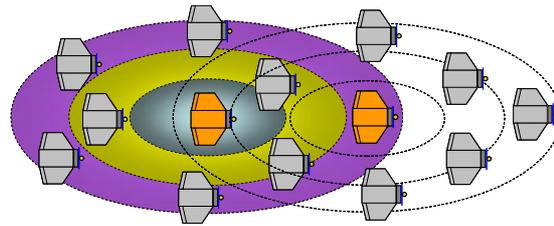
本研究では、現在のところ球形の相互作用領域を特

定の軸方向に伸長した形でのみ、動的な類似構造の形成に成功しているが、伸長という単純な変換以外にも、球を変換してできる形であれば、さらに複雑な形状を実現できる可能性がある。また、全ての機体と同じ相互作用領域を持つのではなく、異なる形状を持たせた場合にどのような集団構造が形成されるかについても、今後取り組んでいく予定である。

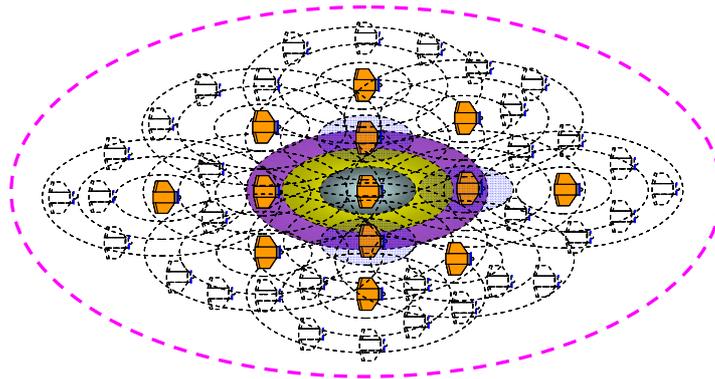
## 5. まとめ

本研究では生物の群運動を規範とした単純なルールに基づく群制御により、小型飛翔体の群制御モデルを提案し、各種の条件のもとでシミュレーションを行なった。それによって以下のような結果が得られた。

- 1) 運用条件や故障等による機体数の変動を想定したシミュレーションを行なった結果、機体数が増減しても、制御パラメータの変更を行なうことなく安定な群制御が実現できることを示した（＝機体数の変動に対するロバスト性の実現）。
- 2) 飛行経路の制御が可能な機体が一部の機体に限られる場合でも、制御可能な機体の比率に応じて経路の変更量を適切に調整することで、残りの機体の追従を可能にし、群全体を誘導できることを示した（＝経路制御におけるロバスト性の実現）。
- 3) 群全体が旋回飛行を行う際、相互作用の指向性を飛行経路の内側へ向けるという方法により、旋回中心に向かう向心力が発生し、安定な旋回飛行が実現されることを示した（＝少ない制御量による旋回飛行の実現）。
- 4) 群の形状を変化させる際、機体周辺の相互作用領域



(a) 前後方向に伸長した相互作用領域を持つ機体の配置



(b) 複数の機体が相互作用領域の形状に沿って配置する様子

図 2 1 相互作用領域の形状と機体の配置

の形状と群形状との間には強い相関が存在し、相互作用領域の形状を操作することによって群形状を制御できることを示した (=少ない制御量による群形状の制御の実現)。

本研究は平成19年度～20年度の先端萌芽研究（一般枠）として取り組んだものであり、研究テーマとして数値シミュレーションによる群制御の実現と、シミュレーションの検証を行なうための群ロボット開発の2点に取り組んだ。本報告書は、このうちのシミュレーションの成果についてまとめたものであるが、群ロボット開発の研究成果についても改めて報告する予定である。

### 参考文献

- 1) Sasa, S., Research on UAV Systems for Disaster Rescue Operation, The 4<sup>th</sup> International Symposium on Innovative Aerial/Space Flyer Systems, 41-44 (2008).
- 2) Iyengar, S. S. and Brooks, R. R. Ed., *Distributed sensor networks*, Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL (2004)
- 3) Pitcher, T. J., and Parrish, J. K. Functions of shoaling behavior in teleosts. In: *Behavior of Teleost Fishes* (Pitcher, T.J. ed), 363-440. London:Chapman and Hall (1993).
- 4) Aoki, I., A simulation study on the schooling mechanism in fish. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.* **48**, 1081-1088 (1982).
- 5) Huth, A. and Wissel, C., The simulation of the movement of fish schools. *J. Theor. Biol.* **156**, 365-385 (1992).
- 6) Inada, Y and Kawachi, K., Order and Flexibility in the Motion of Fish Schools. *J. Theor. Biol.* **214**(3), 371-387 (2002).
- 7) 加藤寛一郎, 大屋昭男, 柄沢研治, 航空機力学入門, 東京大学出版会 (1982).
- 8) 藤永 仁, 小型無人航空機の開発および飛行制御系設計, 大阪府立大学大学院 工学研究科 航空宇宙海洋系専攻 修士論文 (2008).

