

生物の群運動を規範とした飛翔体の群制御シミュレーション

稲田 喜信*, 時田 拓明**, 二上 将直**, 堀江 数馬**, 高信 英明**

*宇宙航空研究開発機構, **工学院大学

Simulation Study of Formation Flight of Air Vehicles Based on the Collective Motion of Organisms

by

Yoshinobu Inada (JAXA), Hiroaki Tokita, Masanao Futakami, Kazuma Horie,
Hideaki Takanobu (Kogakuin University)

ABSTRACT

Unmanned air vehicle (UAV) is a probable tool for disaster monitoring or meteorological observation, etc. This study focuses on the formation flight control of multiple micro air vehicles (MAV) as a kind of UAV operation, and proposes a simple rule-based control model by referring to the collective motion of organisms. Some kinds of organisms, such as bird or fish, make an aggregation for achieving high protection and foraging abilities. Their collective motion is realized by simple interaction rules among individuals, such as “approach”, “parallel orientation”, and “repulsion” rules. Referring to these simple rules, MAV formation flight control model is developed, where each MAV has a reaction field around it and choose one of the motions from “approach”, “parallel orientation”, “repulsion”, and “search” according to the position of its neighbors in the reaction field. Three dimensional equation of motion is incorporated to describe the motion of MAV. As a result, formation flight with numbers of MAVs is realized and various motion controls are examined by altering mutual interaction parameters. In moving direction control, part of controlled-members in a formation can navigate non-controlled remainders. In 3-dimensional shape control, the shape of interaction field has a strong correlation with the shape of formation, providing a simple and effective method for controlling the formation shape. Thus, the applicability of simple rule-based control for MAV formation flight is demonstrated.

1. はじめに

近年、上空からの気象観測や災害時の情報収集を目的とした無人機の利用が注目されている¹⁾。火災や有毒ガスなどの危険に曝される火災現場の上空において、有人の航空機に代わって情報収集の役割を担う無人機の必要性は高い。ただし、都市などの人口密集地では、大型の無人機は墜落による二次災害の危険が伴うため利用が困難である。そこで、よりリスクの少ない小型飛翔体 (Micro Air Vehicle= MAV; Fig. 1参照)の活用が考えられる。MAVは墜落時の人的被害が少ないことに加えて、運用が容易で低コストというメリットも持つ。しかしながら、ペイロードの制限や外乱の影響を受けやすいとい

う問題があり実用化の障害となっている。そこで、これらの問題を解決する方法として、多数のMAVを一つの集団として運用する「MAVの群制御」が挙げられる。群制御のメリットには、多数の機体で同時多点計測を行うことによって、短時間に3次的に広がりのある空間の情報を収集できること、故障や外乱等によって少数機体が失われても残りの機体によって機能を維持できること、各種センサを持つ機体を組み合わせることで、群



Fig. 1 Example of MAV (body length=24.8cm, weight=105g, developed at Notre Dame University, USA)

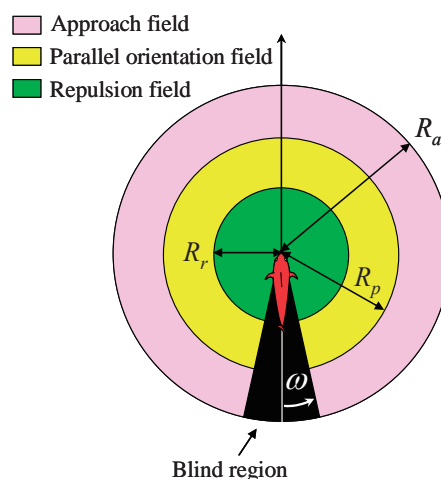


Fig. 2 Two-dimensional interaction field model

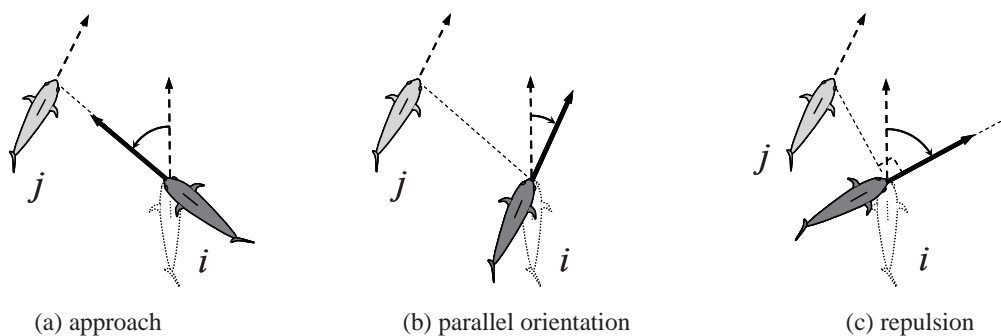
Fig. 3 Three reactions of individual (*i*) towards its neighbor (*j*)

Fig. 4 Calculated schooling motion of fish

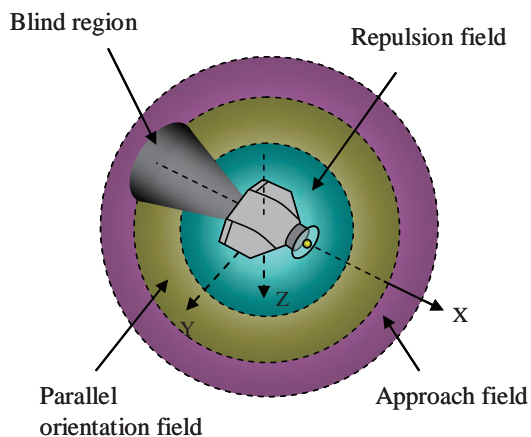


Fig. 5 Three-dimensional interaction field model

全体として多彩な機能を実現できることなどが挙げられる。ただし、MAVに搭載可能な軽量の制御系でこれを実現する必要があるため、なるべく単純なアルゴリズムを用いて群制御を実現する必要がある。そこで、本研究では生物が行なう群運動を参考にして、単純なルールに基づいて多数のMAVを群制御する方法を提案した。以下にその詳細を述べる。

2. 生物の群運動モデル

生物に見られる群運動の代表的な例に鳥や魚の群があるが、これらの生物の群運動は比較的単純なメカニズムで実現されていることが知られている²⁾。運動の観察データに基づいていくつかの群モデルが提案されており、Fig. 2はAoki²⁾やHuth&Wissel³⁾が提案したモデルをもとに稲田ら⁴⁾が提案した魚群運動の2次元相互作用モデルである。個体周辺にはFig. 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他の個体が存在するかによって、簡単なルールを適用して中心個体の移動方向を決めている。例えば、他の個体が接近領域(approach field)に存在すればその個体に向かって移動し(Fig. 3(a))、平行領域(parallel orientation field)に存在すればその個体と同じ向きに移動し(Fig. 3(b))、反発領域(repulsion field)に存在すればその個体との衝突を避ける方向に移動する(Fig. 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、それらの方向のベクトル和の向きに移動する。また、いずれの領域にも他の個体が存在しない場合は、ランダムに向きを変えて周辺を探索する。群を構成する全ての個体が上記のルールに従うことによって、全体としてFig. 4に示すような群運動が実現されることが、2次元モデルによって確認されている⁴⁾。

3. 飛翔体の群制御モデル

本研究では前述した2次元モデルの結果を踏まえて、これを拡張する形で飛翔体用の3次元群制御モデルの作成を試みた。主な変更点は相互作用の機構を3次元化すること、及び、機体の運動を3次元の運動方程式によって記述することである。2次元モデルの場合は、生物の群運動の観察データを参考にして相互作用領域を作成したが、3次元モデルの相互作用領域の作成においては、参考となる生物の観察データが存在しないため、便宜的にFig. 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、Fig. 5に示すような相互作用領域を作成した。内部には接近領域、平行領域、反発領域を設

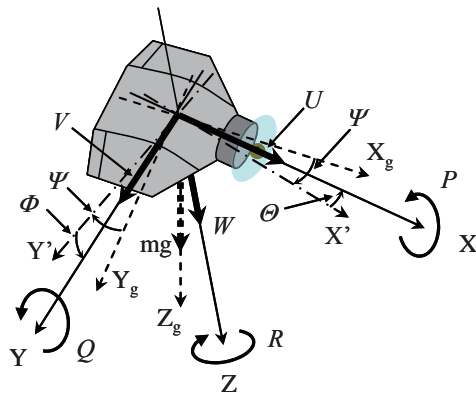


Fig. 6 Definition of variables

け、これらの領域内に他の機体が存在する場合は、2次元モデルと同様にそれぞれ接近、平行、反発のルールを適用して移動方向を決定した。領域内に複数の機体が存在する場合や、全ての領域に他の機体が存在しない場合の移動方向の決定も2次元モデルと同様に行なった（移動方向ベクトルが3次元成分を持つことが2次元モデルと異なる）。2次元モデルでは、魚の後方で両眼の視野からはずれる領域を不可視領域(blind region)として設定したが、3次元モデルでも機体が後方視野を持たない場合を想定して同様に設けた。

続いて、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)

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

姿勢角 (Φ, Θ, Ψ)

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

式中の速度、角速度はFig. 6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Fig. 6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適宜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5)を参考にし、慣性率や慣性乗積、推力の値は実際のMAVの諸元⁶⁾を参考にして与えた。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で機体の運動を求めた。

4. 結果と考察

4. 1 群制御パラメータの影響

シミュレーションにおいては、群制御に影響を与える可能性を持ついくつかのパラメータを選んで、運動の安定性等に与える影響を評価した。以下に評価した項目とその内容を述べる。

a) 群を構成する機体数

群を構成する最小の機体数を2機とし、徐々に機体数(N)を増やしながらシミュレーションを行なった。その結果をFig. 7に示す。いずれも同じ群制御アルゴリズムとパラメータを用いて群運動に成功しており、機体数の変化によって制御の特性を変える必要が無いことがわかった。これは本研究で用いている群制御アルゴリズムが機体周囲の局所的な情報のみを必要とし、群全体の状態の変化を直接参照しないことから来る利点と考えられる。この利点は飛行中の機体数の変化においても見られ、故障を想定して飛行中に機体数を減少させても、残りの機体でそのまま群運動を続けることができた。ただし、一般的な傾向として機体数が少ない時は、外乱や機体数の増減の影響を受けて群の運動が不安定となりやすく、機体数が多いほど安定化することが確認された。これは第2節で述べたように、周辺機体との相互作用によって決まる移動方向のベクトル和の向きを新しい移動方向としているため、少数機体の場合は他の機体の変動の影響を直接受けて移動方向が変化しやすいが、機体数が増すと平均化の効果が強く現れて、他の機体の変動の影響がキャンセルされるためと考えられる。

b) 相互作用する機体数

一度に相互作用可能な機体の数が群の運動に及ぼす影響を調べるため、各機体が同時に相互作用できる機体数の最大値($N_{b,max}$)を変化させながらシミュレーションを行なった。Fig. 8は50機の群に対して $N_{b,max}$ を1, 4, 10機と増加させた時の結果である。これらは全て、計算開始から十分に時間が経過した後の群の状況を示している。 $N_{b,max} = 1$ の群では安定な群運動を実現することができず、機体の脱落や群の分裂が見られた。 $N_{b,max} = 4$ や $N_{b,max} = 10$ の群では安定な群運動が実現できた。ただし、安定性の高さは $N_{b,max} = 10$ の方が若干優れてはいたが、 $N_{b,max} = 4$ の

場合と大きな差が見られなかった。つまり、安定な群運動を実現するためには4機程度の機体と相互作用すれば十分であり、必ずしも多くの機体と相互作用をする必要はないことがわかった。

相互作用する機体の数が多いほど安定な群運動が実現されるという結果は、a)でも述べた平均化による効果と考えられるが、4機程度の機体と相互作用すれば十分な効果が得られるという結果は大きな意味を持つ。なぜなら、実際の機体では搭載できるセンサや通信装置に性能の限界があり、さらに外乱の影響もあって一度に多数の機体と相互作用することは難しいと考えられるため

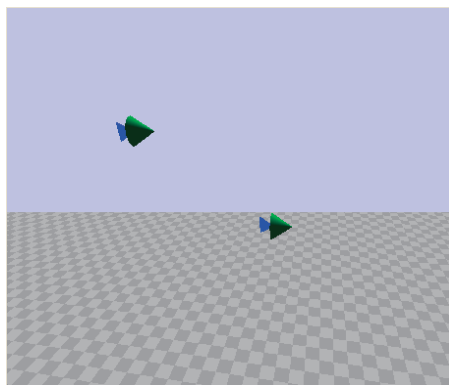
である。

本研究ではこの結果を踏まえて、先のa)の計算も含め、以下の全ての計算の中で $N_{b,max}=4$ を用いている。

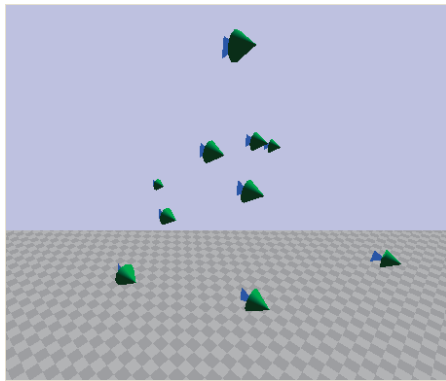
4. 2 群の移動方向と形状の制御

a) 群の移動方向の制御

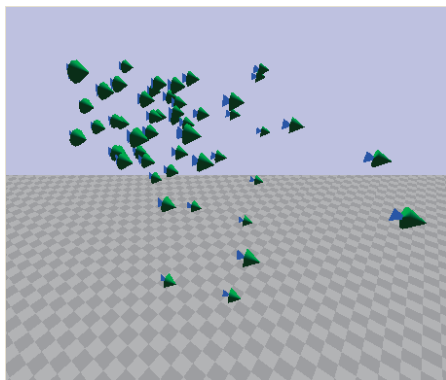
飛翔体の群制御を何らかの目的で使用する場合、群の移動方向を目的地へと向って誘導する制御（経路制御）が必要になる。経路制御では、全ての機体の移動方向を外部から指令するか、あるいは航法装置等を用いて自律制御する方法が考えられるが、状況によっては全ての機



(a) $N = 2$



(b) $N = 10$

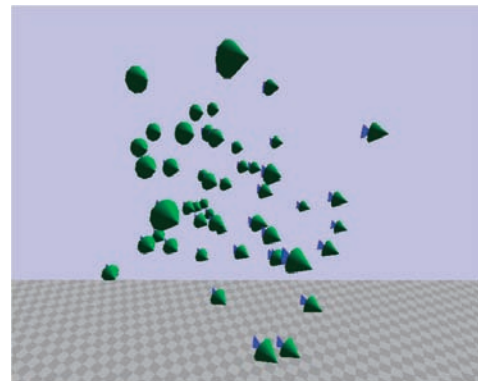


(c) $N = 50$

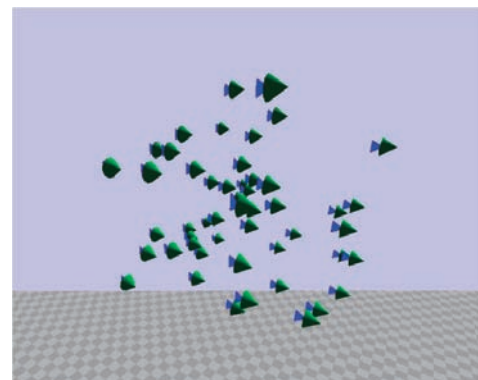
Fig. 7 Simulation results for formation flight with different numbers of MAVs (N)



(a) $N_{b,max} = 1$



(b) $N_{b,max} = 4$

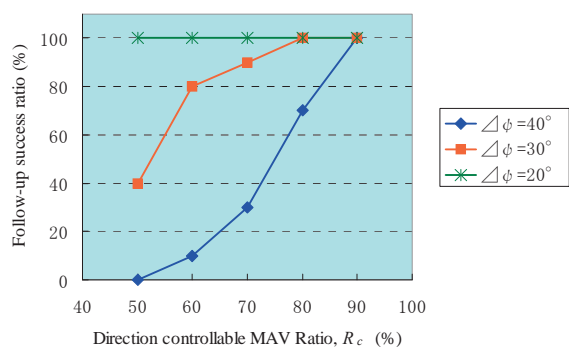


(c) $N_{b,max} = 10$

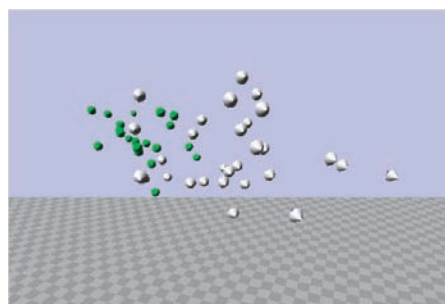
Fig. 8 Simulation results for different numbers of interacting neighbors ($N_{b,max}$).

体に指令が届かなかったり、一部の機体の航法装置が故障して使えないことがある。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調べた。Fig. 9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 $\angle\phi$ だけ強制的に変更して方向転換し、残りの機体がそれに追従できるかどうかを調べた。Fig. 9(a)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数の比率(R_c)で、縦軸は追従成功率を示している。追従成功率とは同じ R_c と $\angle\phi$ のもとで初期条件を変えながら10回の計算を行ない、計算終了まで全ての機体が追従できた割合を示すものである。Fig. 9(b)は $R_c=60\%$ 、 $\angle\phi=40^\circ$ でのシミュレーションの様子を示している。Fig. 9(a)を見ると、 R_c の値が大きいく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は、大きな角度で経路変更を行なっても群は一体となって飛行することができる。また、同図は $\angle\phi$ が小さいほど追従成功率が増加することも示しており、経路制御可能な機体の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群の分裂を防ぎ、一体となった飛行が可能であることを示している。つまり、多くの機体で航法装置が故障したり、経路



(a) Follow-up success ratio



(b) Follow-up motion of uncontrollable MAVs (yellow-green colored) towards controllable MAVs (white colored)

Fig. 9 Simulation results for moving direction control

変更の指令が届かないような状況下では、経路制御可能な機体の制御量を抑えて、小さな経路変更を繰り返し行なうことで対応が可能であることを示している。

この結果は通信装置や航法装置の故障といった緊急時の対応だけではなく、コスト削減にも有効である。即ち、数多くの機体に高価な航法装置を装備できない場合に、一部の機体にこれを装備して残りの機体を誘導させるような運用が可能である。

b) 群形状の制御

飛行中の群は様々な障害物に遭遇する可能性があるため、これを安全に避けるためには群の形状を必要に応じて変更できた方が良い。また使用目的に合わせて群内の機体の配置を変えられれば、運用の可能性も広がる。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分析した。群の形状を制御するためには、全体の形状に合わせて個々の機体の位置を直接指定すれば良いが、外乱によって位置が変動する中で、多数の機体の位置をリアルタイムに指定することは非常に困難である。そこで、できるだけ簡単にこれを実現する方法を検討した。

本研究における群制御アルゴリズムでは、機体の運動や位置は局所的な相互作用によって決まり、その結果として群全体の形状が決まっている。そこで、Fig. 5に示した相互作用領域の形状を操作することによって、群の形状を制御する試みを行なった。Fig. 10に相互作用領域の形状と、それを用いて実際にシミュレーションを行なった結果を示す。図より明らかなように、相互作用領域の形状と群全体の形状との間には強い相関があり、相互作用領域とほぼ相似な形の群形状が実現されることがわかった。この理由としては、任意の機体に対して周辺の機体が相互作用領域の形に沿うように配置し、それが複数の機体間で繰り返されて群が形成されるため、結果として局所的な幾何学的配置が群においても保存されたためと考えられる。

相互作用領域の形状は、各軸方向の拡大率といった少ない自由度で指定できるため、この方法を用いれば、個々の機体の位置を直接制御する場合と比べて、非常に少ない自由度で群形状の制御が可能であると考えられる。

5. おわりに

以上のように、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モデルにより、多数のMAVを群として飛行させる研究を行った。以下にその内容をまとめる。

- 1) 魚群の行動観察から得られた2次元の群制御モデルを参考にして、3次元の相互作用領域と運動方程式を用いた飛翔体用の群制御モデルを作成した。
- 2) MAVの実機を参考にして作成した飛翔体のモデルを

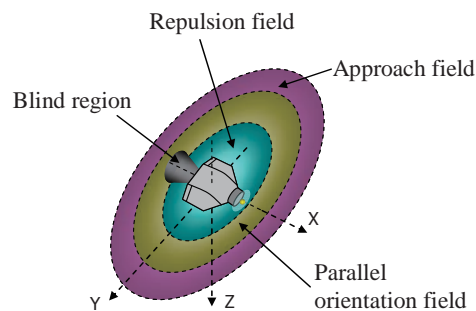
用いて、複数の飛翔体が群を作って移動する編隊飛行（＝群制御）を実現することができた。群を構成する機体の数が増減しても、同じ制御パラメータで群制御が実現できることを確認した。

- 3) 一度に相互作用できる機体の数が多いほど、群制御の安定性が増すことがわかった。ただし、4機程度と相互作用すれば安定な群制御が可能であり、それ以上機体数を多くしても顕著な効果が現れないことがわかった。
- 4) 群の一部の機体の移動方向を制御することで、群全体の経路制御が可能であることがわかった。移動方向を制御する機体の比率が高ければ大きな角度で、低ければ小さな角度で変更するによって、群を分裂させることなく経路制御できることがわかった。
- 5) 機体周辺の相互作用領域の形状と、群の3次元的な形状との間には強い相関があり、ほぼ相似な形状となることがわかった。この性質を利用して、相互作用領域の形を操作することによって、少ない自由度で群形状の制御が可能であることを示した。

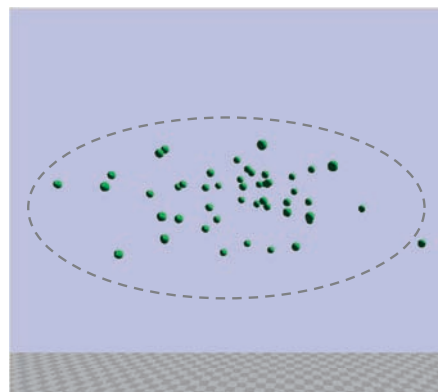
これらの結果は、小型飛翔体の群制御を実現する上で、単純なルールに基づく生物型の群制御の有効性を示すものであり、さらに、移動方向や群形状の制御といったミッション対応に必要とされる機能を実現する上でも有効であることを示すものである。今後は、様々なミッションを想定したシミュレーションを行うための機能を追加していくとともに、そこで得られた結果を参考にして、実際の飛翔体を用いた群制御の実現を目指していきたいと考えている。

参考文献

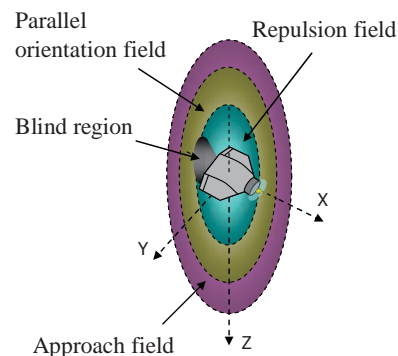
- 1) Sasa, S., Research on UAV Systems for Disaster Rescue Operation, The 4th International Symposium on Innovative Aerial/Space Flyer Systems, 41-44 (2008).
- 2) Aoki, I., A simulation study on the schooling mechanism in fish. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.* **48**, 1081-1088 (1982).
- 3) Huth, A. and Wissel, C., The simulation of the movement of fish schools. *J. Theor. Biol.* **156**, 365-385 (1992).
- 4) Inada, Y and Kawachi, K., Order and Flexibility in the Motion of Fish Schools. *J. Theor. Biol.* **214**(3), 371-387 (2002).
- 5) 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).
- 6) 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).



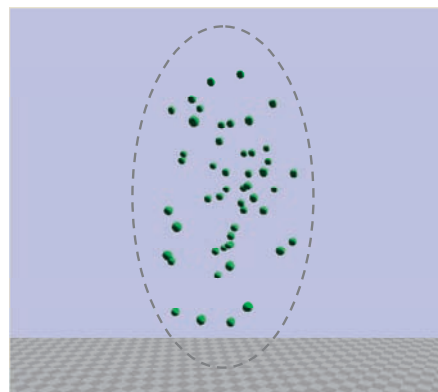
(a) reaction field enlarged along Y-axis



(b) simulation result with (a)-type reaction field



(c) reaction field enlarged along Z-axis



(d) simulation result with (c)-type reaction field

Fig. 10 Interaction field shape and corresponding formation shape