

## 三次元座標系における魚の群れの行動モデル

東 恒人・馬場章吾\*・角田勇人\*\*

岡山理科大学工学部情報工学科

\*株式会社 ソフトウェアサービス

\*\*日本コムシス株式会社

(2004年 9月 3日 受付、2004年11月 5日 受理)

### 1. まえがき

魚の群れの行動については、古くから研究されている。三宮ら<sup>(1),(2)</sup>は、水槽内の魚の群れ(これを、以下、魚群という)の行動を実験的に研究し、その結果をもとに、ニュートンの運動法則を考慮することにより、運動要因を仮想的な力で表現したモデルを提案している。このモデルでは、魚は自律分散的に行動する。青木<sup>(3)</sup>は、魚群の行動を表すために、運動決定領域を基にしたモデル(以下、これを青木モデルという)を提案している。運動決定領域は、衝突回避領域、並進行動領域、求心行動領域、自由運動領域(探索行動領域と死角領域)に分類され、魚はこれらの領域で定められた行動をすることになっている。その結果、魚は集団運動することになる。これらの研究では、魚の行動は2次元平面上に限られているので、現実感に欠けている。そこで、本論文では、青木モデルとBoids理論<sup>(5)</sup>を融合することによって、三次元空間における魚群の行動モデルを提案するとともに、モデル化された魚群の行動特性を表すパラメータを提案する。

### 2. 青木モデルを拡張した3次元運動モデル

#### 2.1 魚の位置の表示法

##### 2.1.1 魚の位置の表示法

青木モデルを三次元空間のモデルに拡張するために、図1に示すように、魚の位置 $(x, y, z)$ を球座標 $(R, \theta, \phi)$ で表す。魚は図2に示すような領域内 $(x \leq |x_{\max}|, y \leq |y_{\max}|, z \leq |z_{\max}|)$ で運動する。ある時刻 $t$ における魚

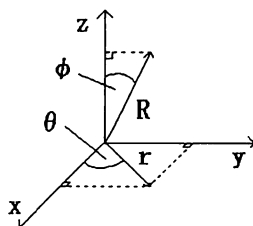


図1 球座標系

$F_i (i=0 \sim N-1)$ の頭の位置 $P_i(t)$ の座標を $(x_i(t), y_i(t),$

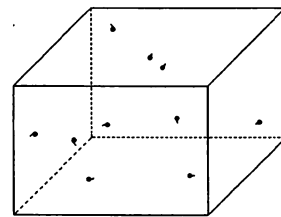


図2 運動領域

$z_i(t))$ として、時刻 $t + \Delta t$ における位置 $P_i(t + \Delta t)$ を $(x_i(t + \Delta t), y_i(t + \Delta t), z_i(t + \Delta t))$ とする。

魚 $F_i$ の時刻 $t$ における速度を $v_i(t)$ とし、 $\Delta t$ の間に移動する距離 $v_i(t) \Delta t$ を考慮すると、上記の座標間で式(1)が成立する。

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + v_i(t) \Delta t \cdot \cos \theta_i \cos \phi_i \quad (1-1)$$

$$y_i(t + \Delta t) = y_i(t) + v_i(t) \Delta t \cdot \sin \theta_i \cos \phi_i \quad (1-2)$$

$$z_i(t + \Delta t) = z_i(t) + v_i(t) \Delta t \cdot \sin \phi_i \quad (1-3)$$

なお、 $\theta_i(t)$ および $\phi_i(t)$ は時刻 $t$ における魚 $F_i$ の進行方向を表す角度である。

#### 2.1.2 魚の速さと移動方向

魚の速さ $v_i(t)$ としては、式(2)を用いて、ガンマ乱数を与える<sup>(6)</sup>。

$$P(v_i) = \frac{A^k}{(k-1)!} v_i^{k-1} \exp(-Av_i) \quad (2)$$

ただし、 $A, k$ はガンマ分布における定数である。

移動方向は、特別な場合を除いて、正規乱数で与えられ、移動方向の平均値は近傍の魚の位置とその移動方向に依存して決められる。

#### 2.2 運動決定領域の定義

青木モデルを三次元空間のモデルに拡張するために、図3に示すように、三次元空間における5つの運動決定領域を定義し、この領域において、瞬間毎に各魚の運動の仕方を決定する。運動領域における行動アルゴリズムについて、文献(4)に詳しく記載されているので、

この内容を三次元空間モデル用に拡張する。

魚 $F_i$ と魚 $F_j$ の相対距離を $R$ とする。運動決定領域の定義に不可欠な三種類の半径 $R_s, R_h, R_k$ の意味を以下に示す。

- $R_s$  : 衝突回避領域 ( $0 < R \leq R_s$ ) の最大値。
- $R_h$  : 平行運動領域 ( $R_s < R \leq R_h$ ) の最大値。
- $R_k$  : 求心運動領域 ( $R_h < R \leq R_k$ ) の最大値。

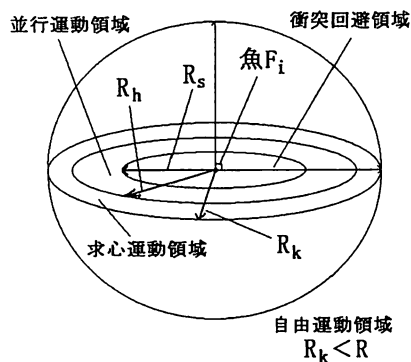


図3. 運動決定領域

### 2.2.1 衝突回避領域 ( $0 < R \leq R_s$ )

衝突回避領域では、ある魚 $F_i$ が相手の魚 $F_j$ に衝突しそうになると、相手の魚 $F_j$ から離れるように、方向転換する。他の魚が魚 $F_i$ の体長の約半分の距離以下に接近しないように、魚 $F_i$ は近くの魚との間合いを見て泳ぐ。

魚 $F_i$ が衝突回避領域にいる場合、相手の魚 $F_j$ が進む方向に対して、魚 $F_i$ が離れるように、 $\theta_{ij}(t)$ および $\phi_{ij}(t)$ の値が決められる。

この行動のアルゴリズムは以下ようになる。

①魚 $F_j$ の角度 $\theta_j$ 及び $\phi_j$ と、魚 $F_i$ の角度 $\theta_i$ 及び $\phi_i$ を用いて、角度 $\theta_{ij}$ 及び $\phi_{ij}$ が式(3)に従って決められる。

$$\theta_{ij}(t) = \theta_j(t) - \theta_i(t), \quad \phi_{ij}(t) = \phi_j(t) - \phi_i(t) \quad (3)$$

②角度 $\theta_{ij} > 0^\circ$ の時

$$\theta_{ij}(t) = \theta_{ij}(t) + 90^\circ, \quad \phi_{ij}(t) = \phi_{ij}(t) + 45^\circ \quad (4-1)$$

角度 $\theta_{ij} < 0^\circ$ の時

$$\theta_{ij}(t) = \theta_{ij}(t) - 90^\circ, \quad \phi_{ij}(t) = \phi_{ij}(t) - 45^\circ \quad (4-2)$$

③魚 $F_i$ の角度 $\theta_i(t)$ および $\phi_i(t)$ は式(5)に従って決定される。

$$\theta_i(t) = \theta_i(t) + \kappa \theta_{ij}(t) \quad (5-1)$$

$$\phi_i(t) = \phi_i(t) + \kappa \phi_{ij}(t) \quad (5-2)$$

なお、 $\kappa$ は定数である。ここでは、 $\kappa = 0.3$ とする。

④角度 $\theta_i(t)$ 及び $\phi_i(t)$ に、式(6)に従って、ゆらぎが付与される。

$c$ は魚のゆらぎの大きさを決める定数である。

$$\theta_i(t) = \theta_i(t) + c2^{1/2} \text{ (ガウス分布乱数)} \quad (6-1)$$

$$\phi_i(t) = \phi_i(t) + c2^{1/2} \text{ (ガウス分布乱数)} \quad (6-2)$$

この領域では、 $c=5$  (小さい値)とする。

⑤求めた角度 $\theta_i(t)$ 及び $\phi_i(t)$ は式(1)に適用されて、

移動先の座標が決定される。

### 2.2.2 並行運動領域 ( $R_s < R \leq R_h$ )

並行運動領域では、ある魚 $F_i$ が相手の魚 $F_j$ と並行して泳ごうとする。この領域では、ある魚 $F_i$ は、最も近い魚 $F_j$ までの距離をなるべく一定の適度な距離を保ちながら泳ぐ。適度な距離にいる魚は、ほぼ並行して進むように体軸の角度を保とうとする。

行動のアルゴリズムは以下ようになる。

①魚 $F_j$ の角度 $\theta_{ij}$ 及び $\phi_{ij}$ が、式(3)に従って、決定される。

②魚 $F_i$ の角度 $\theta_i$ 及び $\phi_i$ が、(5)に従って、更新される。

③角度 $\theta_i$ 及び $\phi_i$ に、式(6)に従って、ゆらぎが付与される。魚 $F_j$ に関する角度のゆらぎは、他の領域より大きくするために、 $c=10$  (大きい値)とする。

④求めた角度 $\theta_i$ 及び $\phi_i$ が式(1)に適用されて、移動先の座標が決定される。

### 2.2.3 求心運動領域 ( $R_h < R \leq R_k$ )

求心運動領域では、ある魚 $F_i$ が相手の魚 $F_j$ から離れすぎれば、相手の魚 $F_j$ の方向へ向かおうとする。

魚 $F_i$ が求心運動領域にいる場合、 $\theta_{ij}$ 及び $\phi_{ij}$ は、魚 $F_i$ は魚 $F_j$ の方向へ向かおうとする角度である。

行動のアルゴリズムは以下ようになる。

①魚 $F_i$ の角度 $\theta_i$ 及び $\phi_i$ は、式(5)に従って更新される。

②角度 $\theta_i$ 及び $\phi_i$ に、式(6)に従って、ゆらぎが付与される。なお、この領域では、 $c=5$  (小さい値)とする。

③求めた角度 $\theta_i$ 及び $\phi_i$ に式(1)が適用されて、移動先の座標が決定される。

### 2.2.4 探索領域 ( $R_k < R$ )

この領域では、魚 $F_i$ の視界内に他の魚がないので、魚 $F_i$ は他の魚とは無関係にランダムに泳ぐ。

行動アルゴリズムは以下ようになる。

①魚 $F_i$ の角度 $\theta_i(t)$ および $\phi_i(t)$ に、式(7)に従って、ランダム性が付与される。

$$\theta_i(t) = \theta_i(t) + \theta_r, \quad \phi_i(t) = \phi_i(t) + \phi_r \quad (7)$$

なお、角度 $\theta_r$ および $\phi_r$ はそれぞれ $|\theta_r| < 45$ および $|\phi_r| < 22.5$ の範囲内にあるランダムな値である。

②求めた角度 $\theta_i$ 及び $\phi_i$ に式(1)が適用されて、移動先の座標が決定される。

### 2.2.5 死角領域 ( $R_k < R$ )

この領域 (自分の後方30度、左右に30度の範囲) では、魚 $F_i$ は他の魚を見つけないことができないので、魚 $F_i$ はランダムに方向を変えながら進む。

その行動のアルゴリズムは以下ようになる。

- ① 相対距離  $R$  が  $R < R_k$  を満たすような魚  $F_i$  が選択される。
- ② 魚  $F_i$  の魚  $F_j$  に対する角度  $\theta_{ij}(t)$  及び  $\phi_{ij}(t)$  が、死角領域を除く角度  $|\theta_{ij}(t)| \leq 150$ ,  $|\phi_{ij}(t)| \leq 150$  であれば、魚  $F_i$  は死角領域の魚と判定される。
- ③ 探索領域と同様に、式(7)が適用される。
- ④ 求めた角度  $\theta_i$  及び  $\phi_i$  に式(1)が適用されて、移動先の座標が決定される。

なお、探索領域及び死角領域をまとめて、自由運動領域とする。

### 2.3 注目する魚の決め方

魚が集団運動を形成するために、各魚は注目する魚を以下の方法で決める<sup>(3)</sup>。

死角領域を除いた全方向を平等にながめ、相対距離に反比例する確率で、注目する魚が一匹選び出される。このような方法では、すべての魚を眺めて、注目する魚を探すので、すべての魚でグループを作ろうとする。

### 2.4 拡張されたモデルの欠点

拡張モデルについて、三次元空間内での魚群の行動を調べると、以下のような欠点が明らかとなった。

#### 2.4.1 自由運動領域における行動

求心運動領域、並行運動領域、及び衝突回避領域中に魚がいない場合、魚は、自由運動領域（進行方向をランダムに決定する状態）に自動的に位置することになるので、魚  $F_i$  の角度  $\theta_i$  および  $\phi_i$  に、式(7)に従って、ランダム性が付与される。その結果、次のような行動が観察される。① 魚が運動できる空間が小さいと、相手の魚  $F_j$  に出会える確率が増え、時間の経過とともに他の集団運動に加わることができる。② 魚が運動できる空間が大きいと、例えば、集団運動している魚群がすぐそばにいるのに、全く逆の方向に向かって進んでしまうようなことが起こる。そのため、すべての魚が、ひとかたまりとなって、集団運動することが難しくなる。

#### 2.4.2 魚の速度の決定法

魚の速度は、その魚が次の場所に移動する距離を決めるための重要な値である。拡張されたモデルでは、魚は、運動決定領域における条件に基づいて運動するため、魚の速度は、例えば、初期速度に対して、衝突回避領域では2.0倍、並行運動領域では1.5倍、求心運動領域では1.5倍のように、領域毎に速度が決定されている。実験の結果、集団運動の形成後、各魚の速度がばらばらなために、魚群の空間移動が不自然になることが明らかになった。そこで、これらの欠点を改善するために、Boids理論<sup>(4)</sup>を導入する。

### 3. Boids理論による補正

#### 3.1 Boids理論の概要

群れる行動のアルゴリズムとしてCraig Reynolds<sup>(4)</sup>が考案した「Boids (ボイド)」という群集行動の理論を利用する。Boidsとは、生体（鳥、魚、蟻等）が群れを形成する人工生命のことで、以下の3つの基礎要件により形成される。

- ① Boidsは、他のBoidsを見つけたら、これらに近づき、近づきすぎたら、これらから離れる。
- ② Boidsは群れの中心（重心）へ向かおうとする。
- ③ Boidsの速度と進行方向を、周りのBoidsの速度と進行方向に合わせる。

Boidsが、この3つの条件を満たせば、集団運動を行う生体の群れを作ることが出来る。

#### 3.2 Boids理論の長所と欠点

Boids理論の長所としては、鳥や魚、蟻など、群をなす動物を対象とすれば、この対象に対して、この理論を適用でき、かつ、この理論により、簡単な条件で集団運動モデルを構築することができる。短所としては、様々な生体にこの理論を適用できるので、本研究にBoids理論をそのまま適用したのでは、魚の集団運動の特色を出すことが難しい。

そこで、本論文では、拡張されたモデルにおける欠点とBoids理論における欠点を補ったモデルを提案する。

#### 3.3 改善点

##### 3.3.1 自由運動領域における行動

提案モデルでは、Boids理論の「群れの中心へ向かう」という考えを利用し、図4に示すように、進行方向として魚群の重心に向かうような角度を与えることにする。この方法により、自然な魚群形成が可能となる。

自由運動領域（探索領域と死角領域）における、進行方向の決定には、式(10)に示した重心の値を用いる。この値とは、自由運動領域に魚  $F_i$  がいる場合、魚  $F_i$  以

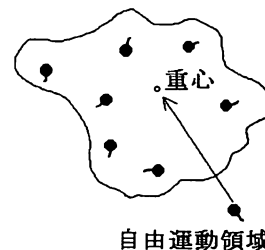


図4 Boids理論による運動のイメージ  
外の他の魚  $F_j(t)$  のある時刻  $t$  における重心の座標  $(x_{gi}(t), y_{gi}(t), z_{gi}(t))$  のことである。

$$x_{gi}(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} x_j(t) \quad (10-1)$$

$$y_{gi}(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} y_j(t) \quad (10-2)$$

$$z_{gi}(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} z_j(t) \quad (10-3)$$

この座標を用いて、角度差 $\theta_{gi}(t)$ 及び $\phi_{gi}(t)$ を求める。その値を用いて、節2.2.3で定義した求心運動のアルゴリズムを使用して、魚 $F_i(t)$ の進行方向を重心へと進ませる。

### 3.3.2 魚の速度の決定法

提案モデルでは、Boids理論の「速度を周りの魚にあわせる(注目する魚にあわせる)」の考え方を利用し、相手の魚に速度をあわせて運動するようにするとともに、境界に対し、魚 $F_j$ の進入角度を反転させるように運動させる。

運動を規定する手順を以下に示す。

相対距離 $R$ が $0 < R < R_c$ を満たすと、魚 $F_i$ は、相手の魚 $F_j$ に対し方向転換しようとする。Lを立法体の一辺の長さとする、魚 $F_i$ のz軸座標が、 $z < 0$ または $z > L$ の条件を満たす場合、次のような境界に対する衝突回避を行う。

行動アルゴリズムを以下のようにする。

①角度 $\theta_{ij}$ 及び $\phi_{ij}$ にランダム性を付与するために、ランダムな角度 $\theta_r$  ( $0 \leq \theta_r \leq 180$ )及び $\phi_r$  ( $0 \leq \phi_r \leq 180$ )と魚 $F_j$ の角度 $\theta_j$ 及び $\phi_j$ を用いて、角度 $\theta_{ij}$ 及び $\phi_{ij}$ が、式(11)に従って、更新される。

$$\theta_{ij} = \theta_r - \theta_j, \quad \phi_{ij} = \phi_r - \phi_j \quad (11)$$

②式(4)に従って、角度 $\theta_{ij}$ 及び $\phi_{ij}$ が決定される。

③魚 $F_i$ の角度 $\theta_i$ 及び $\phi_i$ を、式(5)に従って、更新する。

④魚 $F_i$ の角度 $\theta_i$ 及び $\phi_i$ に、式(6)に従って、ゆらぎが付与される。

なお、定数 $c$ は、以下のように運度領域ごとに設定する。魚 $F_i$ が相手の魚 $F_j$ に対して、並行して泳ごうとするときは、魚 $F_i$ に関する角度のゆらぎが大きくなるようにしている。

衝突回避領域,  $c=5$  (小さい)

平行運動領域,  $c=10$  (大きい)

求心運動領域,  $c=5$  (小さい)

## 4. 運動の評価方法

### 4.1 魚群の重心座標 $(x_g, y_g, z_g)$

魚群のある時刻 $t$ における重心座標 $(x_g(t), y_g(t), z_g(t))$ を、各魚 $F_i$  ( $0 \sim N-1$ )の座標 $(x_i(t), y_i(t), z_i(t))$ の平均値で定義する。

### 4.2 魚群の原点から重心までの距離 $R_g(t)$

ある時刻 $t$ における魚群の位置を把握するために、式(12)に示すような魚群の重心から原点までの距離 $R_g(t)$ を用いる。

$$R_g(t) = \{x_g(t)^2 + y_g(t)^2 + z_g(t)^2\}^{1/2} \quad (12)$$

### 4.3 魚群の重心の進行方向 $(\theta_g(t), \phi_g(t))$

魚群の進行方向を把握するために、各魚 $F_i$ の方向 $(\theta_i(t), \phi_i(t))$ の平均値で、魚群の重心の進行方向 $(\theta_g(t), \phi_g(t))$ を定義する。

### 4.4 魚群の重心からの平均距離 $E(t)$

魚群の重心からの平均距離 $E(t)$ は、重心座標 $(x_g(t), y_g(t), z_g(t))$ と各魚 $F_i$ の座標 $(x_i(t), y_i(t), z_i(t))$ との距離の平均値で定義する。

### 4.5 魚群の重心位置の標準偏差 $\sigma_R(t)$

魚群の重心距離 $R_g(t)$ と魚 $F_i$ の距離 $R_i(t)$ を用いて、重心距離の標準偏差値 $\sigma_R(t)$ を求める。

### 4.6 魚群の重心方向の標準偏差 $\sigma_\theta(t), \sigma_\phi(t)$

魚 $F_i$ の角度 $\theta_i(t), \phi_i(t)$ と魚群の重心の進行方向 $\theta_g(t), \phi_g(t)$ を用いて、標準偏差値 $\sigma_\theta(t), \sigma_\phi(t)$ を求める。

### 4.7 一匹の魚の距離を基準とした平均距離 $E_i(t)$

一匹の魚 $F_i(t)$ の原点からの距離 $R_i(t)$ を基準として、他の魚 $F_j(t)$  ( $0 \sim N-1$ )との距離の平均値 $E_i(t)$ を、式(13)を用いて求め、一匹の魚からみた魚群の広がり具合を調べる。

$$E_i(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (R_j(t) - R_i(t)) \quad (13)$$

### 4.8 一匹の魚の進行方向を基準とした平均角度差

一匹の魚 $F_i(t)$ の進行方向 $\theta_i(t), \phi_i(t)$ を基準として、他の魚 $F_j(t)$  ( $0 \sim N-1$ )の進行方向 $\theta_j(t), \phi_j(t)$ との角度差の平均値 $\Theta_j(t), \Phi_j(t)$ を、式(14)を用いて求め、一匹の魚からみた魚群の進行方向の広がり具合を調べる。

$$\Theta_i(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\theta_j(t) - \theta_i(t)) \quad (14-1)$$

$$\Phi_i(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\phi_j(t) - \phi_i(t)) \quad (14-2)$$

### 4.9 一匹の魚の位置を基準とした標準偏差 $\sigma_{Ri}(t)$

一匹の魚 $F_i(t)$ の原点からの距離 $R_i(t)$ を基準としたときの標準偏差値 $\sigma_{R_i}(t)$ を、式(15)を用いて求め、一匹の魚からみた魚群の広がり具合を調べる。

$$\sigma_{R_i}(t) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (R_j(t) - R_i(t))^2} \quad (15)$$

4.10 一匹の魚の進行方向を基準とした標準偏差

一匹の魚 $F_i(t)$ の進行方向 $\theta_i(t), \phi_i(t)$ を基準としたときの標準偏差値 $\sigma_{\theta_i}(t), \sigma_{\phi_i}(t)$ を、式(16)を用いて求め、一匹の魚からみた魚群の進行方向を調べる。

$$\sigma_{\theta_i}(t) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\theta_j(t) - \theta_i(t))^2} \quad (16-1)$$

$$\sigma_{\phi_i}(t) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\phi_j(t) - \phi_i(t))^2} \quad (16-2)$$

5. シミュレーション

5.1 実験方法

各パラメータを以下のように設定して、魚群の運動の評価方法を用いて調べる。

①表示する魚の最大数

魚の運動に及ぼす運動決定領域の影響を、目視でも確認できるようにするために、魚の数を20匹とする。

②魚の平均の速さ

自然界において、同じ体長の魚が集まって群れの行動になることを考慮して、体長を一定の値とする。

③運動決定領域の値

運動決定領域の値は、魚の体長を1とした値を基準として設定される。

④運動決定領域の範囲

運動決定領域を $(R_s, R_b, R_k) = (2, 10, 15)$ とする。

⑤分裂・四散運動の選択

集団運動(G)を形成する場合、④のパラメータを変化させることにより、魚群を形成しやすく、あるいは形成しにくくできる。分裂運動(S)あるいは四散運動では、④のパラメータ及び外乱の大きさが重要になる。外乱が小さすぎると、分裂及び四散運動の効果が薄い。

⑥外乱の大きさ<sup>(3)</sup>

運動が分裂、あるいは四散運動になったときの、魚の移動量の大きさである。

⑦自由運動領域

自由運動領域の動きは、魚群の重心へ向かうようにする。

⑧運動可能範囲

立体視(アナグリフ法および交差法<sup>(6)</sup>)により、魚

の運動状況を、図5(交差法)に示すような運動範囲

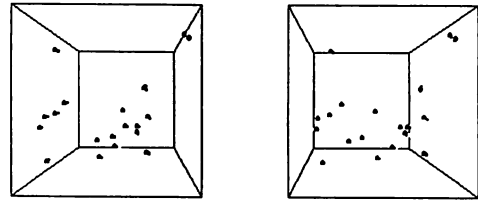


図5 運動状況の立体視用表示

$(x_{\max}=180, y_{\max}=120, z_{\max}=80)$ で可視化するために、 $z_{\max} < x_{\max}, z_{\max} < y_{\max}$ として、z軸の範囲をx軸とy軸の範囲よりも小さく設定する。

⑨計測時間

計測時間を4200m秒とする

5.2 シミュレーション結果

節5.1で設定した条件でシミュレーションを行い、節4で定義した運動の評価方法をもとに、魚群モデルの特徴を調査する。なお、ガンマ分布の定数を $A=2, k=2$ とする。

5.2.1 魚全体の動き

5回のシミュレーションを行った結果では、開始時から500~2000m秒の間に魚が一つの群れを形成する。また、魚が一つの群れになった5回の平均時間は約700m秒であり、群れがくずれる平均時間は約700m秒であった。集団になった時間と分裂した時間の一例として表1に示す。

表1 運動状況の計測例

回数	集団(m秒)	分裂(m秒)
1回目	431	1216
2回目	1260	1473
3回目	1776	2235
4回目	3563	4066

5.2.2 魚群の重心の位置から見た魚群の動き

図6に重心の座標 $(x_g(t), y_g(t), z_g(t))$ を、図7に重心までの距離 $R_g(t)$ を、図8および図9に重心の進行方向 $(\theta_g(t), \phi_g(t))$ を示す。これらのパラメータにより、

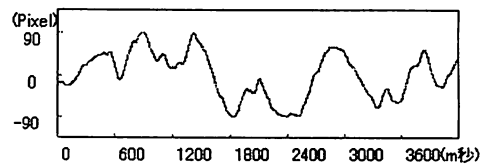


図6(a) 魚群の重心座標 $x_g(t)$

魚群の重心の動向を知ることができる。

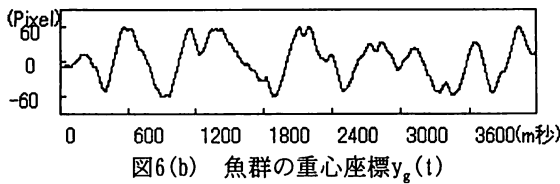


図6(b) 魚群の重心座標 $y_g(t)$

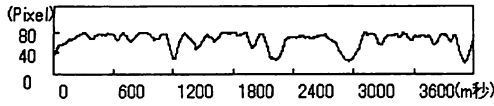


図6(c) 魚群の重心座標 $z_g(t)$

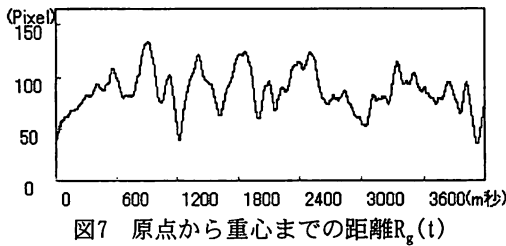


図7 原点から重心までの距離 $R_g(t)$

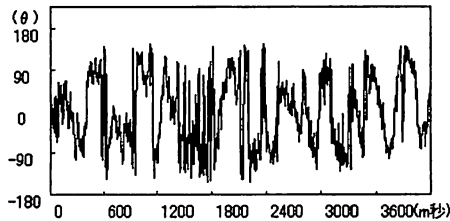


図8 魚群の重心の進行方向 $\theta_g(t)$

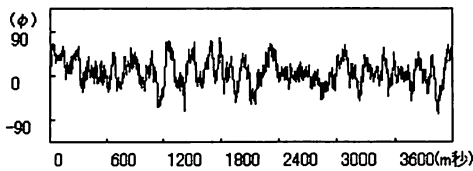


図9 魚群の重心の進行方向 $\phi_g(t)$

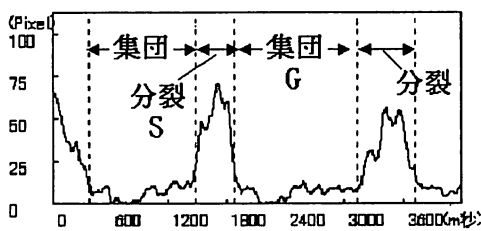


図10 魚群の重心からの距離 $E(t)$

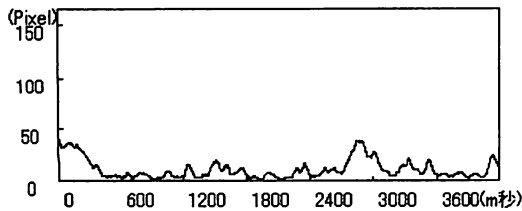


図11 魚群の重心位置の標準偏差 $\sigma_r(t)$

5.2.3 魚群の重心からの平均距離 $E(t)$

平均距離 $E(t)$ の結果を図10に示す。 $E(t)$ の値は、魚

が集まるほど小さくなり、ばらばらになるほど大きくなる。この結果から、魚の集まり具合をある程度把握することができる。また、魚群の重心の進行方向を調べることによって、魚群がどちらに進んでいるのかわかる。

5.2.4 魚群の重心位置の標準偏差 $\sigma_r(t)$

重心位置の標準偏差 $\sigma_r(t)$ の結果を図11に示す。 $\sigma_r(t)$ の値は、魚が集まるほど小さくなり、ばらばらになるほど大きくなる。この結果は重心の平均距離における結果と類似している。

5.2.5 魚群の重心の進行方向の標準偏差 $\sigma_\theta(t)$

図12および図13に、魚が壁に衝突していない場合と魚が壁に衝突している場合の標準偏差 $\sigma_\theta(t)$ の変化の様子を示している。魚群が壁に衝突したときに、壁から離れようとする魚と壁に向かう魚の数が増えるため、魚群の進行方向の重心と各魚との進行方向の角度差が生まれ、 $\sigma_\theta(t)$ の値が増加することになる。

図14に標準偏差 $\sigma_\theta(t)$ と魚群の集まり具合との関係を示す。 $\sigma_\theta(t)$ の値は、魚群が分裂したときと魚群が方向転換するときに大きくなり、魚群が安定して同じ方へ進行しているときに小さくなる。

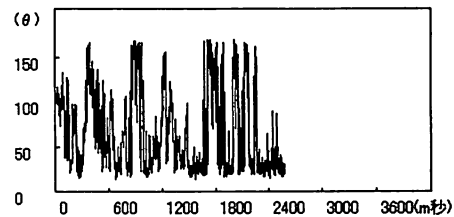
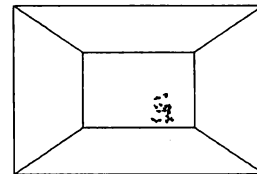


図12 壁に衝突していない魚群の動き

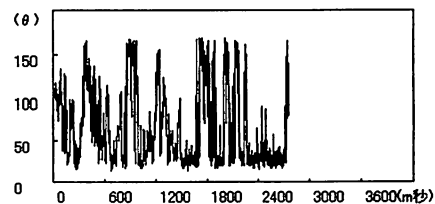
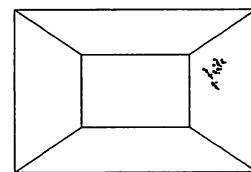


図13 壁衝突時

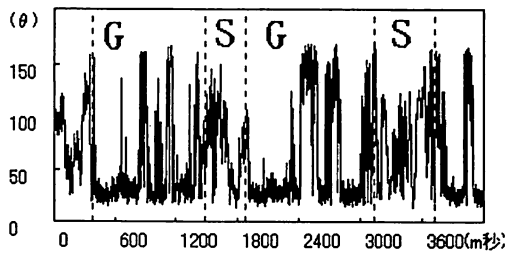


図14 魚群の重心の標準偏差角度  $\sigma_\theta(t)$

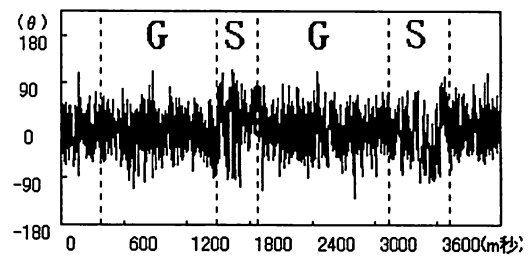


図17 一匹の魚の進行方向を基準とした平均角度  $\theta_i(t)$

5.2.6 魚群の重心の進行方向の標準偏差  $\sigma_\phi(t)$

標準偏差  $\sigma_\phi(t)$  の結果を図15に示す。  $\sigma_\phi(t)$  の値は、魚群が分裂したときに大きくなる。  $\sigma_\phi(t)$  の値には  $\sigma_\theta(t)$  の値において方向転換するときに観測された特徴は現れていない。

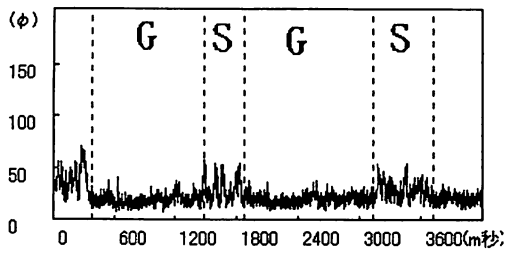


図15 一匹の魚を基準とした平均角度  $\sigma_\phi(t)$

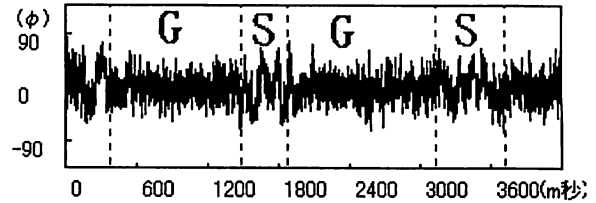


図18 一匹の魚の進行方向を基準とした平均角度  $\phi_i(t)$

5.2.7 一匹の魚の距離を基準とした平均距離  $E_i(t)$

魚  $F_i(t)$  の距離を基準とした平均距離  $E_i(t)$  の結果を図16に示す。  $E_i(t)$  の値は、魚が一つに集まるほど小さくなり、魚が分散するほど大きくなる。この結果は重心からの平均距離  $E(t)$  で得られた結果と類似している。また、基準とする魚  $F_i(t)$  だけが魚群の群れからはぐれると  $E_i(t)$  の値が必然的に大きくなるので、  $E(t)$  と  $E_i(t)$  のそれぞれの値を比較することにより、一匹の魚が群れの中にいるかどうか判定することができる。

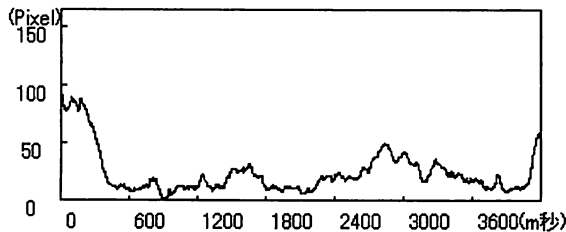


図16 一匹の魚の位置を基準とした平均距離  $E_i(t)$

は、基準とする魚  $F_i(t)$  が魚群の中に含まれているときに限る。

5.2.9 一匹の魚の位置を基準とした標準偏差  $\sigma_{ri}(t)$

魚  $F_i(t)$  の位置を基準とした標準偏差値  $\sigma_{ri}(t)$  の結果を図19に示す。  $\sigma_{ri}(t)$  の値は、魚群が一まとまりのときには小さな値で安定し、分裂したときには大きくなる。

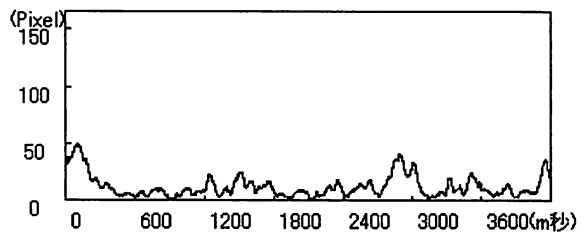


図19 一匹の魚の距離を基準とした標準偏差  $\sigma_{ri}(t)$

5.2.8 一匹の魚の進行方向を基準とした平均角度

魚  $F_i(t)$  の進行方向を基準とした平均角度  $\theta_i(t)$  および  $\phi_i(t)$  のそれぞれの結果を図17, 図18に示す。

$\theta_i(t)$  および  $\phi_i(t)$  のそれぞれの値は、一つの魚群にまとまっているときには、  $0^\circ$  付近における値であり、逆に魚群が一つにまとまっていないときには、  $0^\circ$  付近における安定した値にはならない。ただし、この傾向

5.2.10 一匹の魚の進行方向を基準とした標準偏差

魚  $F_i(t)$  の進行方向を基準とした標準偏差  $\sigma_\theta(t)$  の結果を図20に示す。

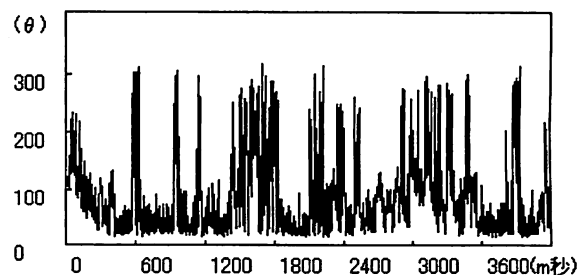


図20 一匹を基準とした標準偏差角度  $\sigma_{\theta_i}(t)$   $\sigma_\theta(t)$  の値は、魚群が分裂しているときと魚群が方

向転換するときには大きくなり、魚群が安定して同じ方向へ進行しているときには小さな値の範囲で変化する。魚群の中に基準とする魚 $F_i(t)$ が存在するときには、節5.2.5の標準偏差角度 $\sigma_\phi(t)$ とほぼ同じ結果が得られた。

#### 5.2.12 一匹の魚の進行方向を基準とした標準偏差

魚 $F_i(t)$ の進行方向を基準とした標準偏差 $\sigma_{\phi_i}$ の結果を図21に示す。 $\sigma_{\phi_i}$ の値は、魚群が一つにまとまっているときには小さな値の範囲で変動し、魚群が分裂しているときには大きくなる。また、 $\sigma_{\phi_i}$ の値には、 $\sigma_\phi$ において魚群が方向転換するときを観測された特徴は現れてなかった。ただし、この結果は、魚群の中に基準とする魚 $F_i(t)$ がいるときに限る。

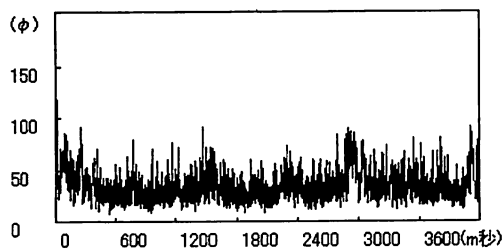


図21 一匹を基準とした標準偏差角度  $\sigma_{\phi_i}(t)$

#### 5.3 自由運動領域における魚の動き

自由運動領域では、魚 $F_i$ を魚群の重心方向に移動させるようにしたため、魚が一匹で群れからはぐれるということは、ほとんどなくなった。また、魚 $F_i$ が魚群からはぐれた場合でも、魚 $F_i$ が徐々に魚の数の多い方向へ向かう様子が確認できる。

#### 6. まとめ

本論文では、青木モデルとBoids理論を融合することによって、三次元空間における魚群の行動モデルを提案するとともに、モデル化された魚群の行動特性を表すパラメータを提案した。提案モデルにより、三次元空間における魚群の集団運動を実現することができた。また、提案したパラメータを用いて、魚群の行動を分析することができることが明らかになった。すなわち、①進行方向を決める角度については、一匹の魚を基準とした平均角度が $0^\circ$ 付近で安定しているか否かで、魚群が一つにまとまっているか否か判定できる。②魚群の重心の進行方向の角度の標準偏差については、この値を監視することにより、魚群がいつ方向転換を行っているかが把握できる。③一匹の魚の進行方向を基準とした標準偏差については、基準とする魚が魚群の中にいるときは、②と同様の結果が得られる。④魚群の重心の位置の標準偏差および一匹の魚の位置を基準とした標準偏差については、これらの値は、とも

に集団が分裂したときに値が大きくなる。⑤重心の位置の標準偏差および一匹の魚の位置を基準とした標準偏差については、両者を比較することにより、基準とする魚が魚群の中にいるか否かを判別することができる。

#### 参考文献

- (1) 三宮信夫, 島田亮, 中峰浩: “魚群行動における自立分散機構のモデリング”, 計測自動制御学会論文集, Vol.29, No.2, pp.211-219, 1993
- (2) 三宮信夫: “魚群行動のモデル”, システム/制御/情報 /, vol.37, No.12, pp.696-703, 1993
- (3) 青木一郎: 魚の群れ行動のシミュレーション, 海洋科学, Vol.15, No.4, pp.207-210, 1983
- (4) Craig Reynolds: “Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model”, acm SIG-GRAPH'87, Computer Graphics, July, 1987
- (5) 科学シミュレーション研究会: “パソコンで見る複雑系・カオス・量子”, 講談社, 1997
- (6) 東恒人: “3次元線図形のフーリエ記述法と立体視像”, 信学論(D-II), Vol.J77-D-II, No.7, pp.1198-1208, 1994



# A three-dimensional model of fish schooling behavior

Tsunehito HIGASHI, Syougo BABA\* and Hayato KAKUTA \*\*

*Department of Information and Computer Engineering,*

*Faculty of Engineering,*

*Okayama University of Science,*

*1-1 Ridai-cho, Okayama 700-0005, Japan*

*\* Software Service Inc.*

*1-7-38 Nishimiyahara, Yodogawa-ku, Osaka, 532-0004, Japan ,*

*\*\*Nippon COMSYS Corporation,*

*4F,1-398 Yoshino-cho, Kita-ku, Saitama, 331-0811, Japan*

(Received September 3, 2004; accepted November 5, 2004)

A model of fish schooling behavior in a three-dimensional coordinate frame is proposed, drawing from observed fish behavior and theoretical behavior domains. Although fish schooling has been studied extensively, most models are based on a two-dimensional coordinate system, and as such cannot be said to accurately express the real behavior of fish. There are two well-known models of schooling behavior; a model based on the observed behavior of fish schools in tanks, and a theoretical model in which behavior is categorized into four domains of collision avoidance, collective behavior, attempting to reach the center of a group, and random behavior. In the observed behavior model, action factors are expressed in terms of virtual forces, and fish are assumed to act autonomously and dispersively. In the domain model, fish are assumed to collectively fall into a common domain of behavior, resulting in collective action. The model proposed in this paper adopts the key features of both of these existing models and extends the scheme to three dimensions. Based on this modeling concept, parameters that express the behavior of a school of fish are proposed.