

BOID アルゴリズムにおけるクラスタ度評価

大山義仁* 沼田秀穂† 池田佳代† 江村恒一‡ 青木輝勝‡

* 北海道大学電子科学研究所, 東京大学先端科学技術研究センター

† エクセリードテクノロジー, 東京大学先端科学技術研究センター

‡ 東京大学先端科学技術研究センター

コンピュータグラフィックス (CG) 技術は近年目覚ましい発展があり, 現実世界をより忠実に再現できようになってきた。しかし, 本物と CG によって再現されたものを定量的にどのように比べたらよいのか, すなわち CG の出来栄を定量的に評価するにはどのようにしたら良いのかが大きな課題となっている。そこで本研究では, BOID アルゴリズムを用いて (動物や人々の) 群れを再現し, その様子をキャラクタ間の距離と偏角により定義した評価パラメータによって評価した結果と課題について報告する。

Estimating cluster degree in BOID algorithm

Yoshihito Oyama* Mizuho Numata† Kayo Ikeda† Koichi Emura‡
Terumasa Aoki‡

* Research Institute for Electorical Science, Hokkaido Univ., and Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo

† Excellead Technology, and Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo

‡ Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo

Recently, the Computer-Graphics (CG) technology has remarkable development and can show us virtual world near the real world in the computer. However, it is difficult to evaluate quantitatively the virtual world near the real world. In this article, we reproduce cluster (ex. animals or people) by using the BOID algorithm and evaluate its CG by using order parameters that we define with distance and angle among characters. We report our results and problems.

1 はじめに

映画やゲーム等のコンピュータグラフィックス (CG) の世界で, 鳥や動物の群れを表現する際に利用されるアルゴリズムとして BOID アルゴリズム [1] がある。CG 上の複数のキャラクタの振る舞いを一つ一つ記述することは困難なため個々のキャラクタの基本的な振る舞いをルール化し, そのルールを元にシステムを動作させると群れとしての行動が再現される。

より現実的な群れの振る舞いを再現するために BOID アルゴリズムの改良が数多く行われている。そのようなものに群れて泳ぐ魚の動きを運動方程式と BOID アルゴリズムを組み合わせて再現する研究がある [2]。昨今はこの研究を発展, 改良してより自然な魚の群れの振る舞いを表現しようとする研究が行われている [3, 4]。単調な群れの行動だけでなく群れの中に石が投げ込まれたり捕食魚が現れた場合の群れの崩壊現象の再現に成功している。さらに自転車に乗った複数の人間が障害物を避けて運動

する場面を再現した研究も行われている [5]. 一方で, BOID アルゴリズムは物理学やマルチエージェント技術の分野においても注目されている [6]. 河川工事によって生息環境が変化した場合の魚類への影響を評価するための魚類生息環境評価シミュレータなどへの応用がある [7]. BOID アルゴリズムはコンピュータグラフィックスの分野に限らず様々な分野で注目されて研究が進められている.

松延ら [3] によると, BOID アルゴリズムは定常状態の群れを表現するためのものであり, 外部からの刺激による動きの変化など非定常状態を表現することが難しいことが指摘されている. そのため彼らは自己組織化理論を用いて魚の群れの非定常状態を再現する方法を研究している. CG において定常状態と非定常状態を判断する方法は, 再現されたグラフィックスを評価者が見て主観的に判断することになる. そのため出来上がったグラフィックスを客観的に評価することが困難であり, アルゴリズムの違いによる出来上がったグラフィックスを定量的に比較することが出来きない.

CG において群れの振る舞いを作成するアルゴリズムが多数提案されている中で, 群れの振る舞いを定量的に評価する方法を確立することが求められている. そこで本研究ではキャラクターが群れをなしして行動している様子 (クラスター) を定量的に評価する評価パラメータを検討する. 評価パラメータを次の3通りによって定義し, それぞれの特徴を評価することにする. 一つ目の評価パラメータは, 各オブジェクトの位置関係から定義する. 二つ目は, 個々のキャラクターの移動方向を用いて定義する. 三つ目は, 位置と移動方向を合わせた定義を用いる.

本レポートの構成は以下の通りである. 次の2章で一般の Boid アルゴリズムを説明し, 群れの様子を表現する評価パラメータを導入する. 3章では, 導入した評価パラメータとコンピュータグラフィックスを比較する. 4章ではこの研究から浮かび上がってきた課題について整理する. 最後の章で本研究のまとめを行う.

2 評価パラメータの導入

はじめに, Boid アルゴリズムの概略を説明する. Boid の基本ルールは以下の3つである.

1. 衝突回避 (仲間との衝突を避ける) ¹

¹repulsion

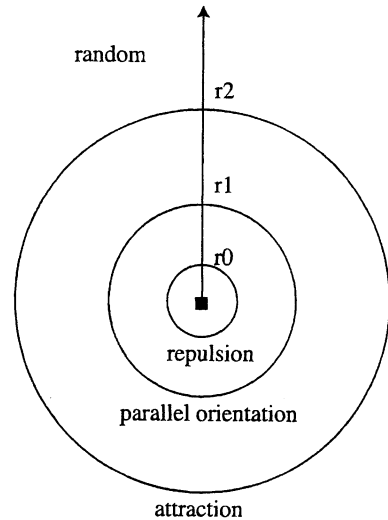


図 1: Boid rule

2. 速度調和 (仲間と速度を合わせる) ²
3. 群れの集中化 (群れの中心に向かう) ³

これらのルールはキャラクター i とキャラクター j の距離 r_{ij} に応じてルールが決まる. 図 1 のようにとると 1 番目のルールは $r_{ij} \leq r_0$ の時に適用される. 2 番目のルールは $r_0 < r_{ij} \leq r_1$ の時, 3 番目のルールは $r_1 < r_{ij} \leq r_2$ の時にそれぞれ適用される. $r_{ij} > r_2$ ではキャラクターはランダムに運動する. 先行研究ではこの基本ルールを元に改良が加えられている. 例えば視野角を導入し認識範囲を制限したものや進行方向と早さ (速度) を同時に制御するもの, 流速等の外的要因との相互作用を考慮したものがある. こうした様々な改良によりより自然な群れの振る舞いを再現させることが可能である. 以降, キャラクターが群れをなし一定方向に移動している様子を "クラスター" 又は, "クラスタリング" と呼ぶことにする.

次に, キャラクターが群れを形成して行動している様子を定量的に測定するため, 評価パラメータ λ を定義する. 評価パラメータは対象とする系の振る舞いをスカラー量で表現したものである. 評価パラメータは対象とする系に応じて定義されることになる. 例えば, システムの各要素が同期している様子を調べるための評価パラメータなどがある [8]. ま

²parallel orientation
³attraction

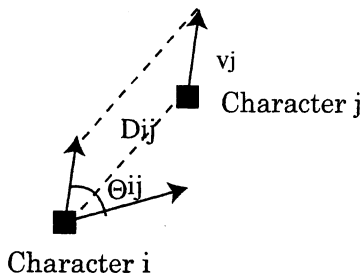


図 2: Definiton of order parameter

た同様に解析学の分野ではノルムというスカラー量を用いて微分方程式の解の大きさを評価することがある [10, 11]. BOID アルゴリズムを用いた先行研究においてもいくつかの評価方法が用いられている. [7] ではクラスタの半径を元にした評価が行われている. [9] では個々のキャラクタの偏角を用いて評価が行われている.

本研究では, 上記の評価方法を参考にして, 距離と偏角を用いた評価パラメータを以下のように 3 つ定義し, どの評価方法がクラスタの状態を上手に表現できるかを比較検討する.

以下において, N はシステムの個体数, r_{ij} はキャラクタ i とキャラクタ j の間の距離, θ_{ij} はキャラクタ i とキャラクタ j のなす角とする (図 2). r_1 は図 1 のものとする.

Definition 2.1

$$\lambda_1 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \cos \theta_{ij} \quad (1)$$

定義 2.1 は個々のキャラクタ間の偏角の平均値として定義する. 全てのキャラクタが同一方向に進んでいる場合は $\lambda_1 = 1$ となり, 全てのキャラクタがランダムな方向に進んでいる場合は $\lambda_1 = 0$ となる. すなわち, クラスタリングしているとキャラクタが同一方向へ進むことになるので, λ_1 は 1 に近づく.

Definition 2.2

$$\lambda_2 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} D_{ij} \quad (2)$$

ここで,

$$D_{ij} = \begin{cases} 1, & d_{ij} \leq r_1 \\ r_1/r_{ij}, & d_{ij} > r_1, \end{cases} \quad (3)$$

Definition 2.2 は個々のキャラクタ間の距離の平均値をもとにした定義である. クラスタリングしていると個々のキャラクタ間の距離が r_1 以下になることから上記のように正規化を行っている. 全てのキャラクタがクラスタリングしていれば $\lambda_2 = 1$, 全てのキャラクタがランダムに移動している場合は $\lambda_2 = 0$ となる.

Definition 2.3

$$\lambda_1 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} D_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (4)$$

ここで,

$$D_{ij} = \begin{cases} 1, & d_{ij} \leq r_1 \\ r_1/r_{ij}, & d_{ij} > r_1, \end{cases} \quad (5)$$

Definition 2.3 ではキャラクタ間の距離と向きの関数として評価パラメータを定義する. 全てのキャラクタがクラスタリングし, 同じ方向に向かって移動している場合は $\lambda_1 = 1$ となる. 一方, 全てがランダムに移動している場合は $\lambda_1 = 0$ となる. 式 (4) はキャラクタ間の向きと距離の概念を定量化したものである. Definition 2.2 はキャラクタ間の距離のみの関数として定義する.

以上定義したオーダパラメータ $\lambda_{1,2,3}$ は共に無次元量である. 全ての評価パラメータは正規化しているため, クラスタリング状態は $\lambda_{1,2,3} = 1$, ランダムな振舞いをしている場合は, $\lambda_{1,2,3} = 0$ となる.

3 評価パラメータの計算

本章では, 先ほど定義した評価パラメータとオブジェクトの振る舞いを比較する. はじめに, シミュレーション環境の説明を行う. 次に, Boid アルゴリズムを適用していない場合の $\lambda_{1,2,3}$ の様子を観察する. 次に, Boid アルゴリズムを適用した場合の $\lambda_{1,2,3}$ の様子を示す. その後で, $\lambda_{1,2,3}$ の特徴を比較することにする.

以下のシミュレーションでは前章で示した Boid アルゴリズムを用いる. 各キャラクタは 360 度どの

表 1: 各種値

Parameter	Value
キャラクタ数	10
システムよこ幅	500
システムたて幅	300
r_0	20
r_1	80
r_2	100

方向にも移動可能とする。各パラメータ値は表 1 の通りである。システムの境界では Neumann 境界条件を適用する。すなわちキャラクタは境界でその進行速度と向きを境界に対して反射するように変化する。初期時刻における (初期状態の) 各キャラクタの位置と速度ベクトルはランダムに決定される。

BOID アルゴリズムを適用していない場合の各キャラクタの様子とその時の $\lambda_{1,2,3}$ の様子を図 3 に示す。図 3 では、各キャラクタがランダムな動きをしていることが見て取れる。図 8 はこのシミュレーションを通しての $\lambda_{1,2,3}$ の変化の様子を時系列によって表示している。この時系列から、 $R\lambda_1$ は、0.6 付近で大きな変化をしていないこと、及び $R\lambda_{2,3}$ は 0.15 付近の値となり、ほぼ同様の動きをしていることが分かる。様々な初期状態から初めても定性的に図 8 の $R\lambda_{1,2,3}$ と同じようになることが観察できる。キャラクタの振る舞いを観察しているとクラスタリングを起こすことはなくランダムに運動していることが見てとれる。さらに定義した各評価パラメータは大きな変化を示さないことが確認できる。評価パラメータの変化がないことは、システムは定常状態になっていることを示している。

次に、BOID アルゴリズムを適用した場合のキャラクタの様子を図 4 から図 7 に示す。図 4 は各キャラクタがランダムに動いている場合である。 $\lambda_{2,3}$ はおよそ 0.13 である。この値はちょうど、ランダムな動きをする場合の評価パラメータ $\lambda_{2,3}$ の値と等しいことが分かる。図 5 は各キャラクタがクラスタリングしていく様子を表したスナップショットである。このとき、 $\lambda_{1,2,3}$ が増加していくことが分かる。特に $\lambda_{2,3}$ の値が増加していくことが分かる。図 6 はクラスタから 1 つのキャラクタが分離していく様子を表したスナップショットである。この時の $\lambda_{1,2,3}$ の値が減少していくことが見てとれる。図 7 はク

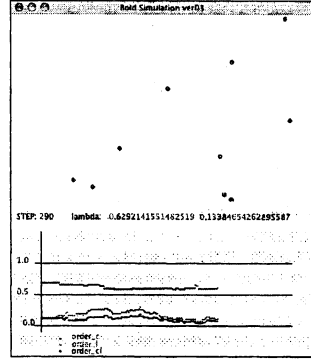


図 3: ランダムな振る舞いをするキャラクタのスナップショット。評価パラメータ $\lambda_{1,2,3}$ はどれも大きく変動することはない。すなわちシステムが定常状態にあることを示している。

ラスタリングしている場面である。注目すべき点としては、 $\lambda_2 = 1$ となっていることである。初期状態を複数変化させてみると、どの λ を用いても、評価パラメータの変化の様子を見ることにより、キャラクタの振る舞いを定量的に捉えることができる。

十分時間が経つと BOID アルゴリズムは定常状態に陥ることが知られている [3]。今回のシミュレーション結果からも定常状態に陥ることが見てとれる。評価パラメータを導入すると、定常状態に陥ることが定量的に確認できる (図 8)。

次に、Definition 2.1, Definition 2.2, Definition 2.3 のそれぞれの λ について比較する。図 8 を見ると、偏角をもとにした $B\lambda_1$ (Definition 2.1) は、距離をもとにした $B\lambda_2$ (Definition 2.2) と比べて変動が大きいことが分かる。BOID アルゴリズムを適用していない、 $R\lambda_1$ と $R\lambda_2$ においても同様のことが見てとれる。このことは、アニメーションを見ていると、個々のキャラクタが常に進行方向を変化させていることに寄っていることが分かる。コンピュータグラフィックスの視点に立つと、キャラクタが小刻みに向きを変化させていることによってより現実の動作らしく見えることから、偏角をもとにした λ_2 の方が評価パラメータとしては優れているように見える。言い換えるならば、個々のキャラクタの動作を表現するという意味で、 λ_1 は λ_2 より優れているといえる。一方で群れ (クラスター) の再現という視点に立つと、キャラクタの集まりがどのように動いているかを評価パラメータは表現す

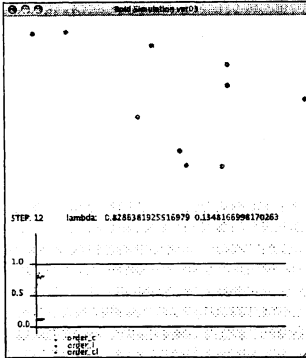


図 4: BOID アルゴリズムを適用した場合, ランダムな振舞いをしているときのスナップショット. $\lambda_{2,3}$ はおよそ 0.13 の値をとる.

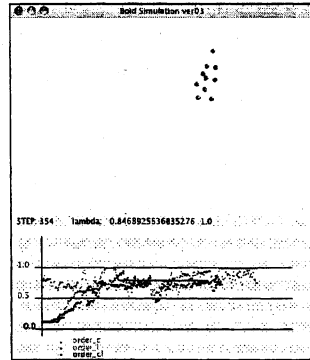


図 7: BOID アルゴリズムを適用した場合, クラスタリングのスナップショット. 定常状態に落ち着いている.

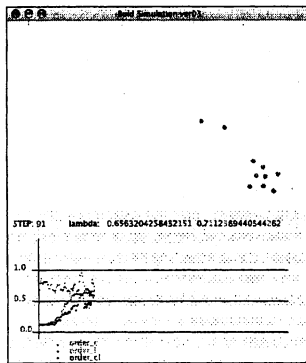


図 5: BOID アルゴリズムを適用した場合, クラスタリングを形成する過程のスナップショット. 評価パラメータ λ が増加していく様子が見てとれる.

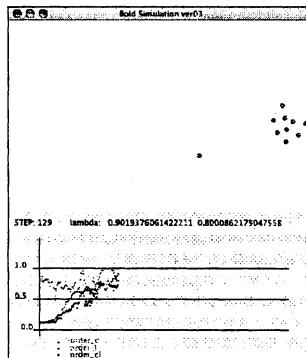


図 6: BOID アルゴリズムを適用した場合, cluster からキャラクタが分離していく過程のスナップショット

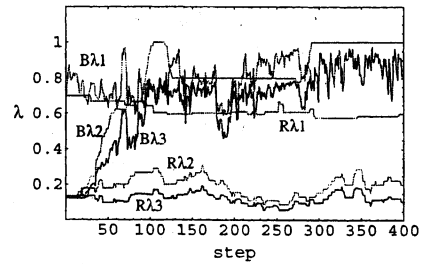


図 8: $B\lambda_1, B\lambda_2, B\lambda_3$ は BOID アルゴリズムを適用したシステムでの $\lambda_{1,2,3}$ にそれぞれ対応する. $R\lambda_1, R\lambda_2, R\lambda_3$ は BOID アルゴリズムを適用しない (ランダム) システムでの $\lambda_{1,2,3}$ にそれぞれ対応する.

必要がある。この点においては、 λ_2 の方が優れていることが見てとれる。さらに、 λ_2 (Definition 2.2) と λ_3 (Definition 2.3) を比べるとその変動がほぼ一致していることが分かる。これは、評価パラメータへの寄与が偏角よりも距離の方が大きいことを示している。これらの特徴を整理してみると表9のようになり、群れの様子を再現しかつ個々のキャラクターの動作状況を表現しているハイブリッド型の λ_3 が評価パラメータとして有効である。

以上のシミュレーションから、今回定義したそれぞれの評価パラメータを用いるとシステムがクラスタリングしている状態を表現できることが確認できた。さらに Boid アルゴリズムが定常状態に陥ることを定量的に確認できた。各評価パラメータを比較したところ λ_3 (Definition 2.3) が BOID アルゴリズムを用いたシステムの評価に有効であることが分かった。

4 議論

今回定義した評価パラメータを用いて実験をしてみると次の四つの疑問や課題が明らかになってきた。以下ではそれらについて述べる。

一点目は、定義した評価パラメータの値は相対値であり、絶対評価が難しいということである。すなわち、現実の動物や人の群れ(本物)を評価パラメータを用いて測定した場合いくつかの値になるかが分からない。反対に、再現されたCGを測定した際、いくつかの値になれば本物を忠実に再現できるといえるのかが分からないということである。

二点目は、作成されたCGが本物のように見えるためには、評価パラメータの時系列が急激に変化する時に本物のキャラクターの運動のように見えるのではないかとということである。キャラクターの動作が定常状態に陥っていると評価パラメータも定常状態となり現実世界とはかけ離れて見える。

三点目は、忠実に現実の世界を再現できなくても良いが、CGを作る上でキャラクターの集団行動の制御や操作が簡単に行える評価パラメータでなければならないということである。

四点目は、BOID アルゴリズムの違いを定量的に評価することができないだろうかということである。似たような群れの振る舞いを再現する際に複数のアルゴリズムが考えられる。それらのアルゴリズムの中でどれが優れているかを評価する際に利用

できるのではないかとということである。そのために評価パラメータの時間平均をとることが有効ではないかと考えている。

上記のような疑問や課題を今後さらに検討していく必要があると考えている。

5 まとめ

本論文では、BOID アルゴリズムによるキャラクターのクラスタリングの様子を定量的に表現する方法に関して検討を行った。本研究の主目的は、コンピュータグラフィックスを用いて動物や人の群れを忠実にかつ簡単に再現することである。その際、コンピュータグラフィックス上に再現された群れが現実の群れをどの程度再現できているかを比較することが重要となる。今回はキャラクター間の距離と偏角をもとに評価パラメータを定義した。距離と偏角の両方を用いた定義を用いるとこのキャラクターの運動状態と群れとしての運動状態の変化をとらえることが分かった。さらにそこから浮かび上がってきた課題について報告を行った。今後は、さらなる研究を進め上記の課題の解決に取り組むとともに、評価パラメータの精度を上げ、CGの評価方法の確立に努めていきたいと考えている。

参考文献

- [1] Graig W. Reynolds, "Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model", Computer Graphics, 21(4), July 1987, pp.25-34
- [2] D. Terzopoulos, X. Tu and R. Grzeszczuk, "Artificial fishes: Physics, locomotion, perception, behavior", Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH), pp.43-50, 1994
- [3] Naomi Matsunobe, Ryuuta Mizumori and DongSheng Cai, "Boid as Self-Organization Criticality System", IPSJ SIG Technical Report, 2003-CG-112
- [4] Daisuke Sato and Norimasa Yoshida, "Simulation of Two Kinds of Boids in Mutual Competition", IPSJ SIG Technical Report, 2004-CG-115

図 9: 評価パラメータの比較

項目	偏角 (λ_1)	距離 (λ_2)	ハイブリッド (λ_3)
個々の運動	○	×	○
群れの運動	×	○	○

- [5] David C. Brogan and Jessica K. Hodgins, "Group Behaviors for Systems with Significant Dynamics", *Autonomous Robots*, 4, 137-153, 1997
- [6] A. S. Mikhailov and V. Calenbuhr, "From Cells to Societies - Models of Complex Coherent Action", Springer (2002)
- [7] "個体ベースモデルによる魚類生息環境評価手法の構築", 石川雅朗, 足立恒, 平野弘晃, 河川技術論文集 第7巻 (2001)
- [8] Arkady Pikovsky, Michael Rosenblum, and Jurgen Kurths, "Synchronization - A universal concept in nonlinear sciences -", Cambridge University Press (2001)
- [9] Tamon Oboshi, Shohei Kato, Atsuko Mutoh, and Hidenori Itoh, "Collective or Scattering: Evolving Schooling Behaviors to Escape from Predator", *Alife*(200x)
- [10] 増田久弥, "関数解析", 裳華房 (1994)
- [11] Y. A. Kuznetsov, "Elements of Applied Bifurcation Theory Second edition", Springer (1998)