

## 群れ制御インターフェースにおける移動経路 制御の試作と評価

佐藤歩夢<sup>†</sup> 青木輝勝<sup>††</sup>

CG における群れ制御インターフェースに関する研究はいくつかなされているが、群れがいくつかの経路に分裂して進んでいく様子を再現しようとした研究は筆者らの知る限り存在しない。そこで本研究では、群れに対してマウスにより直観的に複数の移動経路を指定した場合の移動制御について提案し、その概要と評価結果について報告する。提案方式は、フロアフィールドモデルに対して動的なゴールを適用することで、移動経路を制御している。評価実験により、群れの移動経路と指定経路について、高い整合性が得られた。

## Prototyping and Evaluation of controlling path system for crowd simulation

Ayumu Sato<sup>†</sup> and Terumasa Aoki<sup>††</sup>

There are a few studies to simulate crowd control interfaces in CG. But there is no study to simulate crowd animation with multiple paths as long as we know. In this paper, we propose a technique to control crowd's traveling intuitively depending on multiple specified paths, and show some evaluation results of the proposed approach. We can control crowd's traveling applying dynamic goal to Floor Field Model on this system. From result of the experiments, we show high compatibility with crowd's travelling courses and specified courses.

### 1. はじめに

CG 映画やテレビゲームにおいては、多数の人間や動物の動きを自動的に生成するために、群れシミュレーションが広く利用されている。映画の「ナルニア国物語」や「ロード・オブ・ザ・リング」では、群れシミュレーションのソフトウェアを用いて、大群衆を CG エージェントで表現している。こうしたソフトウェアは、群れの位置や間隔、他のエージェントとのインタラクションなどについて細かく設定することができる。暴徒のシミュレーションからスタジアムの群衆まで幅広い状況を再現することができる。しかしその一方で、非常に細かいパラメータ設定が要求されるため、制作には時間と手間がかかる。そのため、制作意図を適切かつ簡単に反映できるようなインターフェースが求められる。

同様の観点の研究はいくつかなされている。例えば Ulicny ら[1]は、複雑な群れシーンを簡単かつ直観的な方法で生成するという観点から、スプレーに模したインターフェースを提案している。しかし彼らのインターフェースはユニークではあるが、群れの移動経路について細かく指示を出すことができないという問題がある。萩原ら[2]は移動経路指定の観点から、マウスやペンタブレットにより群れの移動経路のサンプルとなる軌道を数本入力することで、自動的にパラメータの計算を行い、速く移動、ばらついて移動などの要求を直感的に反映できるインターフェースを作成し、報告している。彼らのインターフェースでは、群れの移動方法のみを指定の対象としているため、群れ同士の戦闘や他のインタラクションまでは十分に検討されていない。また移動方法についても、一つの群れに対して主線が一本のみであるため、群れを分裂させて進ませるなどの要求は満たすことができない。

以上を踏まえ本研究では、マウスやキーボードによる直感的な入力により、群れの移動、分裂、インタラクションなどを簡単にシミュレーションできるインターフェースの構築を目指している。その第一段階として本稿では、一纏まりになっている群れに対して2つの移動経路を指定した際の群れの移動制御について提案し、その概要と評価結果を報告する。

### 2. 群れ制御の関連研究

群れの移動シミュレーションを行う方法は、二つの種類に大別される。一つは、実数環境下において、ベクトル演算に基づいて移動制御をする方法(図1)である。Reynolds[3]が提案したBOIDSを土台としている研究が多い。先に挙げた萩原らの研究も、ベクトル演算により力や速度を計算し、実数環境下での群れの移動をシミュレートしている。今一つは、整数環境(セル・タイル環境)下で移動制御を行う、2次元

<sup>†</sup> 東北大学大学院情報科学研究科

<sup>††</sup> 東北大学未来科学技術共同研究センター

セル・オートマトンに基づいた方法である。代表的なモデルとして、Burstedde ら[4]が提案したフロアフィールドモデルが挙げられる。西成らは、フロアフィールドモデルを用いて、群集の避難シミュレーションに関する研究をいくつもを行っている[5,6]。

本研究では、後者の方法であるセル環境下における群集の制御を検討する。パラメータの自由度が大きい実数環境よりもセル環境での方法のほうが、簡潔性や拡張性の観点から優位であり、近年の群集シミュレーションの多くがセル環境の方法を採用しているためである。また、「シムシティ」や「Age of Empires」などシミュレーションゲームでは、セル環境が用いられるケースが多く、ゲーム AI との相性も良いと考えられるからである[7]。

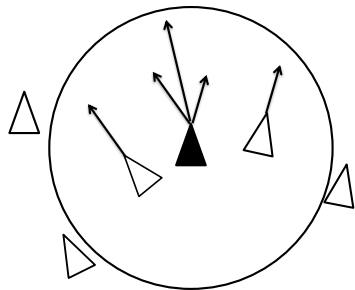


図 1 特定範囲内のエージェントの状態から、自身の速度ベクトルを求める概念図

## 2.1 フロアフィールドモデル

フロアフィールドモデルにおけるエージェントを動かすためのルールは以下のとおりである。

- 一つ一つのセルが、そのセルとゴールまでの最短距離（静的 FF）と、そのセルを通ったエージェントの数（動的 FF）の二つの情報を保持している。
- エージェントは、自身が今現在位置しているセル及び、その上下左右に位置するセル（ノイマン近傍）それぞれについて、先の二つの情報に基づいて移動確率を求める（式 1）。
- 求めた確率に応じて、ノイマン近傍のセルのいずれかへ移動するか、あるいは移動せず同じセルに留まる（図 2）。
- ノイマン近傍のセルに他のエージェントがいた場合、次のステップでそのセルに移動することができない（排除体積効果）。

この方法の特徴は、静的 FF と動的 FF の重み付けに差を持たせることによって群集

の移動パターンをシミュレートできるところである。静的 FF の重み付けを動的 FF に対して相対的に大きくしていくと、エージェントが最短距離のセルを優先的に選択していくことから、ゴールに向かって冷静に移動していく群集を再現することができる。逆に、動的 FF の重み付けを静的 FF に対して相対的に大きくしていくと、エージェントは動的 FF の値が大きいセル、すなわち多くのエージェントの密集地帯に位置するセルを選択していく確率が大きくなる。そのため、周りのエージェントに翻弄されながら進んでいく、パニック状況下でゴールを目指す群集を再現できる。

本研究では、研究蓄積の多いフロアフィールドモデルを土台として、移動制御を検討していく。ただし、パニック状況に主眼を置いているわけではないため、静的 FF と動的 FF の重み付けは同程度とした。そのため群集は、適度に周りの影響を受けながら、ゴールに向かっていく挙動をする。

$$p_{ij} = f(K_S \times S_{ij}, K_D \times D_{ij})$$

- $P_{ij}$  セル (i,j) への移動確率
- $S_{ij}$  セル (i,j) における静的 FF の値
- $D_{ij}$  セル (i,j) における動的 FF の値
- $K_S$  静的 FF の強度
- $K_D$  動的 FF の強度

式 1 移動確率

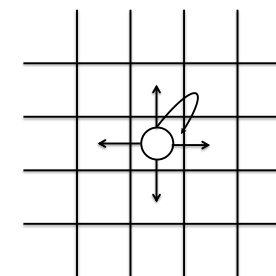


図 2 フロアフィールドモデルにおけるエージェントの移動方向

### 3. 複数経路指定可能な群れ制御インターフェースの提案方式

#### 3.1 複数経路を指定した場合の検討課題

セル環境において、ひとまとまりの群れが指定した複数の経路に分岐して進んでいく状況をシミュレートするためには、次の4つの課題がある。

##### (1) 指定経路別に群れを誘導する方法

確率的にセルを一つ一つ移動していく群れを指定経路別に移動させるためには、静的FF、動的FF以外に何らかの情報をセルに付加するか、あるいはセル情報の計算方法または処理方法に手を加えることにより、確率を制御していく必要がある。この観点からの研究は、筆者らの知る限り存在しないが、セル環境において群れの様々な行動を再現するための基本的な課題であり、検討が不可欠である。

##### (2) 群れの分割方法

ひとまとまりの群れに対して2つ以上の経路を指定した場合に、群れをどのようにして分裂させるかという問題がある。関連研究として、魚群が捕食者に遭遇した際の群れの崩壊現象について検討したものなどがあるが、群れの分割の一つの現象を対象としているに過ぎず、分割現象を様々な状況に応じて包括的に検討している研究は筆者らの知る限り存在しない。群れを二手あるいはより細かく分裂させて移動させるという要求は、避難シミュレーションや戦略系シミュレーションRPGでは多用されるものであり、群れの分割方法は検討余地が大きく、実用的側面からも検討する価値の高い課題であるといえる。

##### (3) 分裂した群れの速度調整

群れが幾つかに分裂して移動している際には、それぞれの群れの移動速度をどのようにして調整するかという問題がある。例えば、指定経路の距離にばらつきがある状況下で、それぞれの指定経路のゴールまで同時にたどり着いてほしいという要求を仮定する。それぞれの群れが同じ速さで移動していると、当然ながら短い経路を通っている群れから順番にたどり着くことになる。同時にたどり着くためには、経路の相対的な長さに応じて、それぞれの群れの速度を適切に調節する必要がある。他にも、経路Aでは早く移動させて、経路Bでは遅く移動させるなどの要求も大いにありうる。そのため、様々な要求に応じたそれぞれの群れの速度調整に関する包括的な検討が求められる。

##### (4) 群れ同士のインタラクション

群れが複数経路により分裂するという事は、経路別に複数の群れが生み出されることを意味する。つまり、幾つかの異なる群れが共存している状況と置き換えて、その群れ同士のインタラクションを考えることができる。例えば、経路A、Bにより一つだった群れが群れA、群れBに分かれたとする。その場合、群れAがつける足跡は足跡A、群れBがつける足跡は足跡Bと区別し、参照の重み付けを変えるなどにより、

自身が属している群れの移動により影響を受けやすくすることが可能となる。このように、群れごとにパラメータの設定に違いを持たせることで、群れ同士の戦闘や、捕食者・被捕食者の動き方などもシミュレートすることが可能となる。したがって、群れが分割した後の群れ同士の多様な動きを再現するためには、インタラクションに対する検討が不可欠である。

本稿では上記4つの課題のうち、(1)の課題について詳しく検討することとし、(2)～(4)の課題については詳しく立ち入ることはしない。

#### 3.2 移動経路制御

本稿で提案するインターフェースは、ひとまとまりに配置されている群れに対して、マウスで矢印を描くことで経路を指定する。矢印1本につき、経路が1つ指定されることになる。群れは設定されたゴールを目指して動く、ゴール駆動型エージェントで構成されている。この特性を利用し、矢印の始点から終点までのルートを移動していく動的なゴールを設定することで、群れを矢印のルートに誘導して移動させる効果が期待できる。ここでは、具体的な処理の中身について、矢印を指定した段階と、実際に群れを移動させていく段階に分けて説明する。

##### 3.2.1 矢印指定の段階

###### (1) クラスタリング

矢印を描き終わった時点で、それぞれの矢印に対応する群れの個体のクラスタリングを行う。矢印の位置やあらかじめ指定された状況設定などに応じて、群れ内のどの個体がどの矢印に従い移動するのかが決定される(図3)。

###### (2) 動的ゴール用の座標取得

矢印を引いている最中にマウスが通過したセルを単位時間あたりに取得していく。その結果これらのセル群は、矢印の始点から終点までマウスの速さに依存して離散的に配置される(図4)。これらのセル群が動的ゴールにとっての目標となる。始点から終点に至るまで、取得されたセル群を順番に通過できるように、動的ゴールを移動させることとなる。

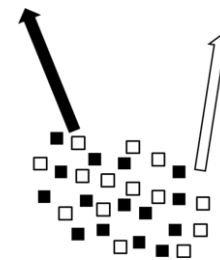


図3 経路別のクラスタリング概念図

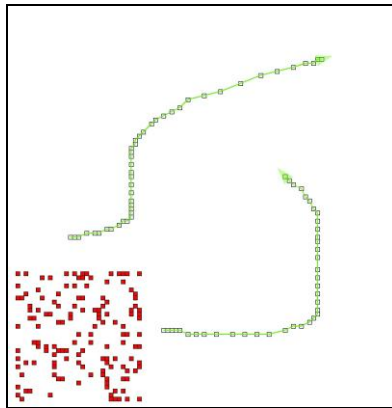


図 4 矢印記入時に通過したセル群

### 3.2.2 移動の段階

#### (1) 動的ゴールの移動の順番

動的ゴールは次の順番に沿って移動していく。

- 矢印の始点に配置される。
- 矢印上の次の目標セルまで移動させる。
- 目標セルまでたどり着いたら、次の目標セルまで同様に移動させる。この動作を終点にたどり着くまで繰り返し行う。
- 終点にたどり着いたら移動を止める。

動的ゴールは矢印の終点で移動を止めるが、ゴールとしての機能は持ち続ける。すなわち、矢印の終端が群れにとっての最終的な目標到達地点となる。

#### (2) 動的ゴールのセル間の移動方法

矢印上のセルは離散的に分布しており、マウススピードによってはセル間の距離が大きい場合も少なくない。その際に、適切な移動アルゴリズムを検討しなければ、目標セルを通過してはいるが、ユーザーの意図しない経路で動的ゴールが動いてしまう危険性がある。例えば、アルゴリズムが簡単である単純追跡と、直線描写に用いられる Bresenham アルゴリズムにおける移動の仕方を比較してみる。図 5 は下の黒丸から上の黒丸へ移動する場合、単純追跡で通るセル（左）と Bresenham アルゴリズムで通るセル（右）に色を付けたものである。この図から、どのアルゴリズムでセル間の移動を補完するかによって、経路に違いが生じることが想像できる。

セル間に広がりが生じる状況というのは、当然ながらマウスの移動が早いのである。ユーザーが早いスピードでマウスを動かしていることは、その間の移動が直線的であると想定することができる。なぜなら、曲率を持たせて線を引こうとする場合は、マウススピードを落として描くことになるため、必然的にセル間隔は狭まるからである。この想定から、本稿においては、セル間の移動の補間アルゴリズムとして、タイル環境において直線的な動き方を再現できる Bresenham アルゴリズムを採用する。

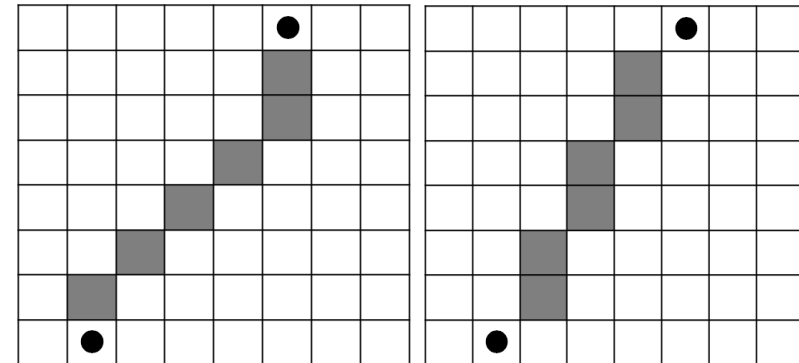


図 5 単純追跡（左）と Bresenham アルゴリズム（右）([7]を参考に作成)

#### (3) 群れ内の個体の動き方

群れ内の各エージェントはフロアフィールドモデルを土台としたアルゴリズムにより移動していく。動的ゴールを採用しているため、通常フロアフィールドモデルでは変化しない量としてセルに記録されるゴールまでの距離が、各ステップによって変化していくという大きな違いがある。そのため、ゴールの座標を各ステップで毎回取得するという処理を加え、以下のようなアルゴリズムで個体を移動させる。

- 自身に対応する動的ゴールの現在座標を得る。
- 自身のセルおよびノイマン近傍のセルと動的ゴールとの距離を計算する。
- フロアフィールドモデルに基づき、近傍セルへの移動確率を求める。
- 移動確率に応じて、セルを移動する。

これらの一連の処理を繰り返し行うことで、動的ゴールをフロアフィールドモデルに適応させ、群れの個体を指定経路に誘導することが期待できる。

## 4. 複数経路指定可能な群れ制御インターフェースの評価

### 4.1 実験条件

提案方式を用いた群集制御インターフェースは、Processing により実装した。マシンスペックは、CPU3.00GHz、メモリ 4.00GB、グラフィックボード Intel(R) G45/G43 Express Chipset である。200セル×200セルの環境とし、エージェント 150 体を第 3 象限の領域（セル環境を均等に 4 分割した場合、左下に位置する領域）にランダムに配置した。

### 4.2 パラメータチューニング

エージェントは、1 ステップあたり 1 セル移動するステップ周期である。その場合での動的ゴールのステップ周期について、主観評価でパラメータチューニングを行った。動的ゴールのステップ周期は、経路への誘導力と、群れの自然なばらつきについて、大きな影響を与えるからである。

1 セル移動あたりに要するステップ数を 1~10 の段階に分けて、誘導力およびばらつきを評価した。誘導力は最小を 1、最大を 5 とした 5 段階評価、ばらつきは最も不自然を 1、最も自然を 5 とした 5 段階評価である。結果は図 6 のようになった。

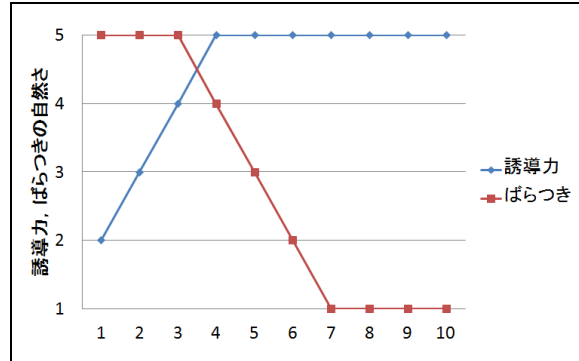


図 6 ステップ周期による誘導力・ばらつきの違い

図 6 より、ステップ周期の違いによる誘導力とばらつきは、トレードオフの関係となっていることがわかる。双方のバランスのいいステップ周期は、3 あるいは 4 であったため、本稿ではステップ周期を 3 として評価実験を行った。

### 4.3 総合実験

指定した移動経路と群れの動き方の判別性について評価実験を行った。

#### 4.3.1 被験者

被験者は、大学院生 8 人（男性 7 人、女性 1 人）であった。

#### 4.3.2 評価方法

一纏まりになっている群れが二つに別れて、最終的に同じ目的地を目指して移動していく動画を 10 種類用意した(図 7)。一つあたりの再生時間は 10~20 秒程度である。10 種類の動画を問 1~問 5、問 6~問 10 の二つのグループに分け、それぞれのグループごとに、解答用紙に 6 つずつ経路の選択肢を用意した(図 8)。

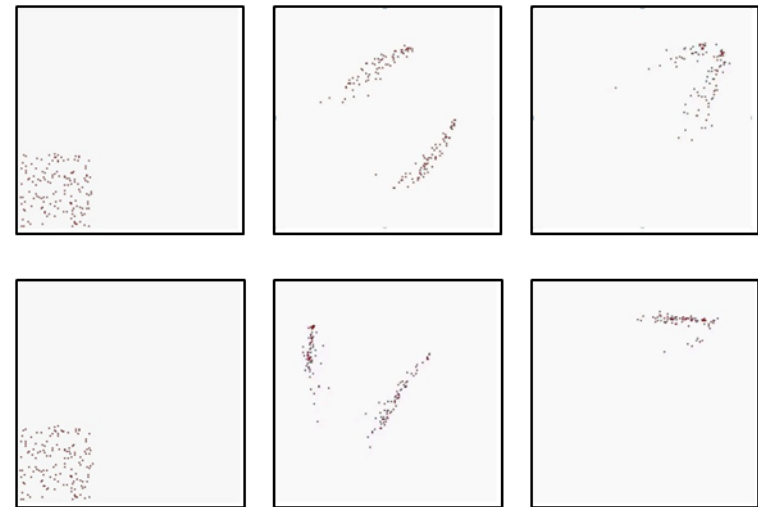


図 7 群集の推移の様子の例（上下二種類）

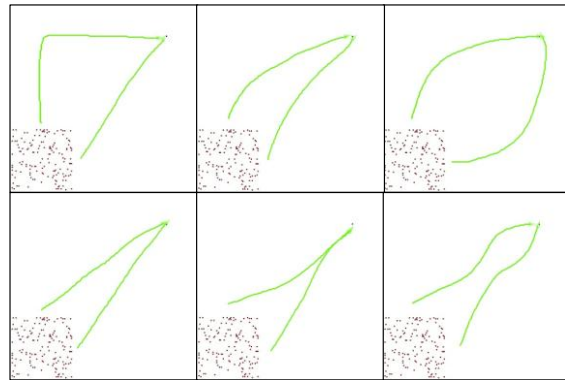


図 8 問に対する選択肢

被験者は問 1 から順番に一回ずつ動画を見ていく。動画を一つ見るごとに、選択肢の中から最も近いと思われる経路が描かれているものを選ぶ。

#### 4.3.3 実験結果

実験結果は表 1 のとおりである。

表 1 回答結果

		問1	問2	問3	問4	問5	問6	問7	問8	問9	問10	正答率(%)
被験者	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100
	B	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100
	C	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	90
	D	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100
	E	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100
	F	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	90
	G	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100
	H	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100
問題別の正答率(%)		100	87.5	100	100	87.5	100	100	100	100	100	97.5

回答結果より、群集の動きからのみで、二つの経路を高い精度で判定できていることがわかる。したがって、提案手法での移動経路制御により、二つの経路指定が簡単かつ高い精度で再現できることが示された。

## 5. まとめと今後の課題

本稿では、一纏まりになっている群集に対して 2 つの移動経路を指定した際の群集の移動制御方法について提案した。そして、その概要と評価結果について報告した。

今後の課題として、経路の曲率、始点の位置、交点の数による群集の動き方の違いについて細かく検討をして、提案手法の分解能を示す必要がある。

また、本文中でも指摘したように、本稿での提案手法を土台として、群れの分割方法、分裂した群れの速度調整、群れ同士のインタラクションそれぞれについても、詳しく検討していく。これにより、制作意図を適切かつ簡単に反映できるようなシステムが実現可能となる。

さらに、セル環境下での移動の制約は、群集の動きのパターンが再現しにくいという問題点があるため、可視化の方法を工夫するなどし、この問題点を克服する。

## 参考文献

- 1) Branislav Ulicny, Pablo de Heras Ciechomski, Daniel Thalmann: Crowdbrush: Interactive Authoring of Real-time Crowd Scenes, ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, pp. 243-252 (2004)
- 2) 萩原祐輔, 尾下真樹: ペンインターフェースを用いた群集アニメーションの作成, 情報処理学会研究報告, グラフィクスと CAD 研究会報告, 2008(109), pp.43-48 (2008)
- 3) Creg W.Reinolds, Flocks, Herds, and Schools:A Distributed Behavioral Model, SIGGRAPH'87, pp.25-34 (1987)
- 4) C. Burstedde, K. Klauack, A. Schadschneider, J. Zittartz: Simulation of pedestrian dynamics using a 2-dimensional cellular automaton, Physica A, Vol.295, pp.507-525 (2001)
- 5) K. Nishinari, A. Kirchner, A. Namazi, and A. Schadschneider: Extended Floor Field CA Model for Evacuation Dynamics, IEICE Trans. Inf. & Syst., E87-D, 726-732 (2004)
- 6) A. Kirchner, K. Nishinari, A. Schadschneider: Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics, Phys. Rev. E, 67, 056122 (2003)
- 7) David M. Bourg, Glenn Seemann: ゲーム開発者のための AI 入門, オライリー・ジャパン (2005)