

# カオスと電荷モデルを用いた群集行動のモデリングと生成

非会員 小 松 利 彰 (大阪大学)

非会員 土 方 嘉 徳 (大阪大学)

非会員 才 脇 直 樹 (大阪大学)

正 員 西 田 正 吾 (大阪大学)

## Automatic Generation of Moving Crowd using Chaos and Electric Charge Model

Toshiaki Komatsu, Non-member, Yoshinori Hijikata, Non-member, Naoki Saiwaki, Non-member, Shogo Nishida, Member (Osaka University)

User support by a computer is desired for creating computer graphics. Automatic generation of moving human crowd is one of such demands. The feature of human crowd is that the behavior of each figure is independent, but the crowd, as a huge mass of it, has a pattern as a whole. It is too troublesome if the user inputs the all coordinates data of this behavior. This paper describes the modelling method using chaos and electric charge model. Chaos is convenient to represent such features. Electric charge model can represent the detail of each figure's movement.

キーワード：群集行動，モデリング，カオス，カオスアトラクタ，電荷モデル

### 1. はじめに

VR ( Virtual Reality ) 技術の進歩によって，三次元仮想空間をコンピュータ上に作り上げリアルタイムなインタラクションを行ったり現実世界を疑似体験したりすることが可能になった<sup>(1)</sup>。仮想都市の構築はその典型的な例<sup>(2)(3)</sup>であるが，従来構築された都市には，動く人間が存在しないものや，その数が少ないものが多い。また，動く人間が存在する仮想都市でも，それらの人間は，仮想都市を散策するユーザによって制御されているか，典型的な応答を行うようにあらかじめプログラムされているものがほとんどで，一般に都市という言葉から連想される雑踏を再現する試みはほとんどなされていない<sup>(4)</sup>。こうした理由の一つに，雑踏における一人一人の動き（移動方向やスピードなど）を自然に見えるように予め設定し，それらのデータを入力する作業時間や手間が膨大になることが挙げられる<sup>(5)(6)</sup>。

そこで本研究では，人間の群集の行動モデルを構築し，簡単なパラメータ調整によって様々な行動パターンを作り出すことを可能とすることで，より少ない手間で都市の雑踏を再現することを目指す。この研究に取り組むアプローチとしては，実際の群衆の動きを詳しく分析してそれを基にモデル化するのではなく，数少ないパラメータで様々な群衆行動を生成でき，かつ生成した群衆がそれらしく見える有用性の高いモデルを構築することとする。そのため，以

下のプロセスで研究を行っている。

- (1) 群衆の特徴的な行動パターンを抽出する。
- (2) それを具体的に表現できるモデルを構築する。
- (3) モデルの有効性を，被験者を用いた主観的な評価により検証する。

具体的には，まず個人としては無関係に動いているにもかかわらず全体としてお互いに協調を保っているように見える群衆の大きな行動パターンや流れをモデル化する。そのモデル化の手法として，群衆の行動パターンをマクロにとらえ全体の行動と各個体間の関係をカオス方程式を用いてマクロに記述することとする。これにより，個体の各々の行動や個体間相互の関係を記述することなしに全体の動きを表現できるようにする。

また，基本的な群集の大きな行動パターンや流れを表現するだけでは，群集らしさを表現するには不十分である。なぜなら，実際の都市の雑踏にはストリートパフォーマンスや信号，改札口など，局所的に群集の流れを変動させる要素があるからである。そこで，本研究では，こうした様々な局所的な振る舞いの変化を表現するための手法の一つとして，電荷モデルの導入を提案する。提案する手法では，電荷を群衆の中の個人やビル，信号機など都市を構成する総ての要素に割り当て，それらの相互の距離から計算するポテンシャルの大小によって群衆の動きを決定する。

本稿では，まず2節で群全体の行動を記述する研究例の

紹介と本研究で扱う群集の行動パターンについて説明を行う。その後、3節でカオスを用いたモデリング、4節で電荷モデルを用いたモデリングについて説明し、5節でこれらのモデルを用いたアニメーションの生成とモデルの評価を行う。最後に、6節でまとめを述べる。

## 2. カオスと電荷モデルを用いた行動のモデリング

〈2・1〉群全体の行動の記述 群全体としての行動を記述する試みそのものは、人工生命研究の初期の時代から研究テーマとして取り上げられてきた。これらは、個々の個体に自律性を持たせることによりできるだけ少ないデータ量で簡単に群の行動を表現できるようにしたものである。自律性を持たせるために、個々の個体ごとに周囲の状況に対する行動パターンを記述している。例えばレイノルズのボイドというシステムでは、鳥や魚の群れを表現するために、次の三つのルールを個体に与えている<sup>(7)</sup>。

- (1) 個々のメンバーが群全体に追従する。
- (2) 全体のスピードに個々が同調する。
- (3) 相手と近づきすぎたら距離を離す。

これらのルールに、群の個々のメンバーの初期配置や方向を与えるだけで群が勝手に行動する。しかし、こうした群としての特徴的な行動パターンを持つ動物ではなく、一般的な人間の群衆の行動パターンを数少ないパラメータでコントロールしようとする研究はあまり見られない。

その理由として、人間の群衆は鳥や魚の群に比べると、単純で際だった動きがあるわけではなく、まとまりがない場合が多いため、動きを自然に見せるためにはかなり複雑な記述が必要となることが考えられるためである。すなわち、人間の群衆行動を扱う場合、その対象となる行動パターンの選定と、それに見合ったパターンの記述方法が重要である。

〈2・2〉群集の行動パターン例 一口に群衆行動といっても様々な様式が存在し、それらを網羅して再現することは非常に難しい。しかし、本研究の目的は出来るだけ簡単に雑踏の雰囲気や再現する事であるため、雑踏らしさを醸し出す要素を検討した結果、行動パターンのすべてを網羅するのではなく、基本的行動パターンとして典型的な以下の例に注目することとした。

### (1) 直線運動が主体の場合

一般的な雑踏で一番目につくのは、よく人の出入りする場所に向かう方向性を持った群衆の流れである。この場合、目的地に向けてまっすぐに歩くことはほとんど不可能であり、しばしば接触や衝突を回避し前後左右にふらつきながら歩くことになる。又集団の中でも歩調の速いグループと比較的ゆっくりなグループに分けることができたり、数名づつのグループで固まったりする傾向がある。

### (2) 円運動が主体の場合

雑踏とはシチュエーションが異なるが、フォークダンスや盆踊り、運動会のトラック競技等の円運動

を主体とした群衆行動もある。これらはなんらかの人為的な規則や目的に則って行動している事が多いが、多少の不規則性やグループ化は直線運動と同様に存在する。また、全体として表現されるパターンが時間と共にドラスティックに変化する特徴がある。

このような基本的な群集の大きな行動パターンや流れだけでなく、都市の雑踏に存在する局所的な群集の行動パターンや流れを変動させる要素がある。例えば、ストリートパフォーマンスや信号、駅の改札口などである。これらの要素によっても、人の行動は様々な形で変動し、この変動が一層群集らしさを醸し出している。しかし、その変動の仕方も全てを網羅して再現することは非常に難しいため、その中でもはっきりした動きの変化である以下の変動に注目することとした。

### (1) 障害物回避動作

駅の改札口で改札機の間を通ったり、公園を散歩中に水溜まりを避けて歩いたり、人は障害物を避けて歩くことがある。これは、行動の一時的なふらつきとは異なり、進行方向を障害物を回避する方向に変更させるという意味を持った動作である。

### (2) 歩行停止動作

ストリートパフォーマンスを見るのに立ち止まったり、赤信号で立ち止まったりと、人はあるイベントを見るあるいは待つために、そのイベントの発生した場所からある程度の距離をおいて歩行を停止することがある。これも、行動の一時的なふらつきとは異なり、進行方向をそのイベントのある方向に変更し、その場所で歩行を停止するという意味を持った動作である。

我々は、基本的行動パターンを実現するためには、カオスの、初期値の僅かな変化によってその後の値が大きく変動する特徴や、一見ランダムに見えて全体としてカオスアトラクタのようなパターンを形成する特徴などを利用することが有効であると考えた。また、局所的な群集の行動パターンや流れの変動として挙げた、障害物回避動作と歩行停止動作には位置などによりなんらかのポテンシャル場を得ることのできる物理モデルの利用が有効であると考えた。このような物理モデルの最も一般的なものとして、電荷モデルが挙げられる。そこで、本研究では人の群集の行動をモデル化するのに、このカオスと電荷モデルを組み合わせる手法を取ることにする。

〈2・3〉カオスの適用 カオスには次の三つの性質があり<sup>(8)</sup>、それぞれを行動のモデル化に利用できると考える。まず一つ目は不規則性であり、この性質を用いると、人の行動時のふらつきなどの曖昧性を表現することができる。次に初期値敏感性という性質があり、これによって群衆の一人一人に与える初期値がほんの少し異なるだけでも、時間がたつと全く異なった値(行動)を与えることができ、様々な特徴を持つ行動パターンを生成することができる。最後は、カオス式のパラメータを変えると取りうる値の振る舞

いの性格に変化を持たせることができることであり、簡単なパラメータ操作によって群衆全体の行動の性格を変えることができるようになる。

人々が街路を自然に流れていくような直線運動の場合、単に乱数を与えても個々人のふらつきを実現することはできるが、人によって異なる特徴のある行動パターンを生成することは難しい。また、群衆全体の行動の性格を変えることも不可能である。これらの点で、乱数に比べてカオスの方が群衆行動を表現するのに優れていると考える。

〈2・4〉電荷モデルの適用 局所的な群衆の行動パターンや流れの変動のうち、障害物回避動作には次の特徴がある。

- 人が障害物回避経路を決定するには、より障害物の少ない経路（小さい経路）を選ぶ傾向がある。（このような経路は、経路上にある地点とその周囲にある障害物の大きさや距離に基づいて認識することができる。）

また、歩行停止動作においては、以下のような特徴がある。

- (1) より魅力的なイベントであれば、そのイベントの方向に移動する。
- (2) イベントの近くを通りすぎようとするれば、そのイベントの方向に移動する。
- (3) イベントの発生している場所から少し離れて停止する。

これらの特徴は、距離と大きさに基づいたものである。ここで、距離や大きさに基づいて値を算出するモデルが必要であるが、一般的な物理現象を利用したモデルはシンプルでユーザにとって馴染みやすいという利点がある。そこで、距離や大きさに基づいて値を算出する物理モデルとして最も一般的と思われる電荷モデルを採用した。

### 3. カオスによるモデリング

#### 〈3・1〉直線運動のモデル化

〈3・1・1〉カオスと人のふらつき カオスとは比較的簡単な規則に支配された不規則振動である<sup>(8)</sup>。この比較的簡単な規則の代表例としてロジスティック関数がある（(1)式）。

$$X[n+1] = RX[n](1 - X[n]) \quad R_\infty < R \leq 4 \quad (1)$$

この関数は、係数  $R$  が  $R_\infty < R \leq 4$  ( $R_\infty = 3.5699456\cdots$ ) の範囲であれば、初期値 ( $0 < X[0] < 1$ ) を与えると不規則でカオス的な数列が出現することで知られている。また  $R$  の値によって  $X[n]$  の振る舞い方も変化する（図1：いずれも  $X[0] = 0.3$ ）。

群衆を移動させるには、現在のポジションから次のポジションへの移動ベクトルを個々に与える。この際に、こうして生じるカオスの不規則性を利用すれば、個々としては不規則にふらつきながら移動しているように見えて、全体としてパターンを持った群衆の移動が実現する。

このような不規則なふらつきを実現するのに必要なカオティックな関数には、ロジスティック関数以外のものも存在する。本研究では、まず代表的なカオティックな関数であるロジスティック関数を適用してみて、〈3・1・3〉節で述べるシ

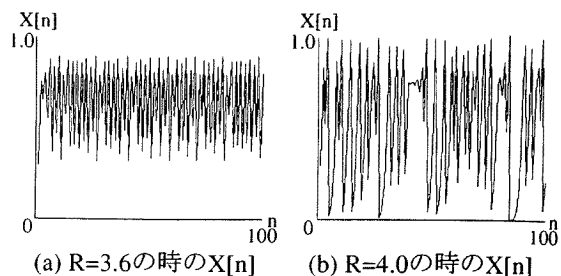


図1 ロジスティック関数の値の振る舞い  
Fig. 1. Value change in logistic function.

ミュレーション実験を行うことで、パラメータ操作により様々なパターンが生成できるかどうかを検証してみた。その結果、様々なパターンが発見されたため、最終的にロジスティック関数を採用することとした。

〈3・1・2〉移動ベクトルの計算 図2に示すように、個々の移動ベクトルをあらかじめ決められた基本移動ベクトルに対する角度と大きさで表現する。具体的には次式により求める。

$$\vec{v} = r\vec{b} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \cdots \cdots \cdots (2)$$

$$\begin{cases} r = T + X[n] - A_{vx} \\ \theta = Y[n] - A_{vy} \end{cases} \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$\begin{cases} X[n+1] = R_x X[n](1 - X[n]) \\ Y[n+1] = R_y Y[n](1 - Y[n]) \end{cases} \cdots \cdots \cdots (4)$$

$$\begin{cases} A_{vx} = -0.5R_x + 2.5 \\ A_{vy} = -0.5R_y + 2.5 \end{cases} \cdots \cdots \cdots (5)$$

$$R_\infty < R_x \leq 4.0, R_\infty < R_y \leq 4.0$$

(2) 式の  $\vec{b}$  は大きさ 1 の基本移動ベクトルで、初期設定などにより与える。(2) 式のように移動ベクトル  $\vec{v}$  は、基本移動ベクトル  $\vec{b}$  を  $\theta[\text{rad}]$  だけ回転し、大きさを  $r$  倍したものである。 $r$  は (3) 式のように、移動の大きさを表す定数  $T$  に、ふらつきを実現する  $X[n] - A_{vx}$  を足したものである。また、 $\theta$  は (3) 式のように移動方向のふらつきを実現する  $Y[n] - A_{vy}$  である。

ここで、 $A_{vx}, A_{vy}$  は、カオスの値  $X[n], Y[n]$  の取りうる値の範囲における中間値を表す。中間値を用いるのはふらつきを表す変動値を 0 を中心として、均等な幅で振動するようにするためである。この中間値は解析的には求めることはできないため、簡単な実験をして (5) 式のように近似することとした。これで、厳密な中間値を実現できるわけではないが、生成する直線行動のふらつきをそれらしく表現することには、直接影響することはないと思われる。

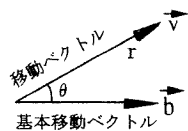


図 2 移動ベクトル  
Fig. 2. Vector for moving.

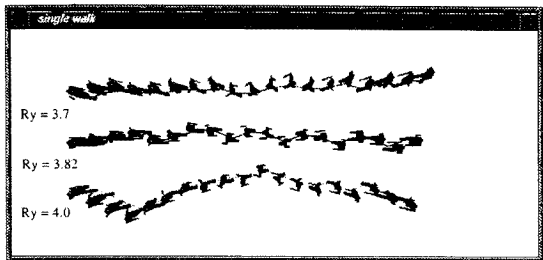


図 3  $R_y$  による人の移動経路の変化  
Fig. 3. Change of a person's movement.

〈3・1・3〉 パラメータ操作による行動の多様性 (2) 式の移動ベクトルを与えた群衆の行動モデルが、カオスのパラメータを変更することで、どれだけ多様な動きを与えるかを検証するために、シミュレーション実験を行った。シミュレーション実験では、カオスのパラメータを少しずつ変更させて、人の移動した軌跡を記録した。その様子を図 3,4 に示す。

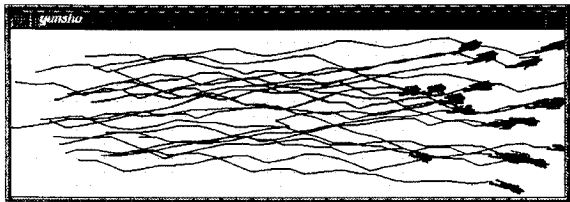
図 3 は一人の人においてパラメータ  $R_y$  のみを変化させた場合である。 $R_y$  の値が大きくなるに従ってふらつきも大きくなっていることがわかる。

図 4 は、これを複数の人に拡張して、 $R_x$  と  $R_y$  の値を様々に変化させた場合の群衆行動の例である。図 4(a) は流れに沿ってスムーズに移動しており、次の図 4(b) は全体として左右に別れつつある。また図 4(c) は先行する速足の人々とゆっくり歩く集団に別れ、最後の図 4(d) は全員千鳥足でまたよたと歩いているように見える。こうした群衆の振るまいのパターンとパラメータの関係を調べると、図 5 のように二つのパラメータで構成される二次元平面上の特定の範囲にそれぞれのパターンが分布する事がわかった。

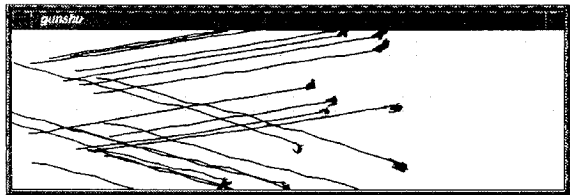
このようにパラメータ操作によって様々な群衆行動のパターンを作り出せる事が確認できた。

〈3・2〉 円運動のモデル化

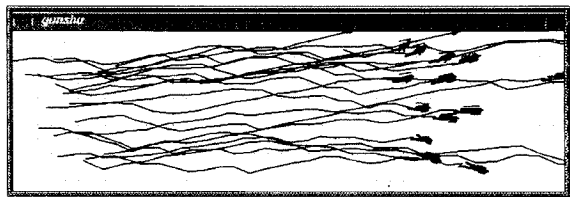
〈3・2・1〉 カオスアトラクタ カオスの軌道の中には、ある領域内において複雑で不規則な振る舞いをし続けるものがあり、それらはカオスアトラクタと呼ばれる。図 6 はカオスアトラクタの例で、その軌道を示したものである。この例では、いくつかの楕円軌道を描いていることが分る。カオスアトラクタのこのような振る舞いは、ダンスや盆踊



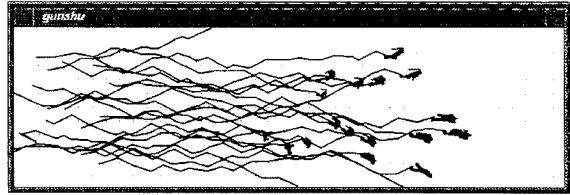
(a)  $R_x=3.7, R_y=3.7$  の時の群衆行動



(b)  $R_x=3.6, R_y=3.7$  の時の群衆行動



(c)  $R_x=3.7, R_y=3.6$  の時の群衆行動



(d)  $R_x=4.0, R_y=4.0$  の時の群衆行動

図 4  $R_x, R_y$  による群衆行動の変化  
Fig. 4. Change of a crowd's movement.

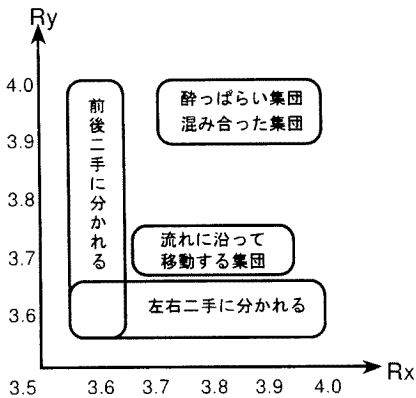


図 5 パラメータ値と行動の様子の関係  
Fig. 5. Relationship between parameters and action pattern.

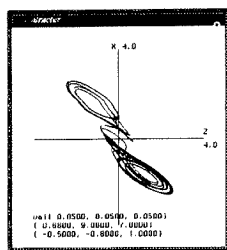


図6 カオスアトラクタの例  
Fig. 6. Example of attractor.

りのような群衆の円運動を再現するのに利用できると思われる。

そこで、円運動のモデル化にはカオスアトラクタを利用することとし、カオスアトラクタを発生させる方程式の一例として(6)式<sup>(8)</sup>を解くこととする。解法には、1階の常微分方程式の精度の高い数値解析法で知られている4次のルンゲクッタ法を用いる。

$$\begin{cases} dx/dt = (K_0(y-x) - g(x))/K_1 \\ dy/dt = K_0(x-y) + z \\ dz/dt = -K_2y \end{cases} \quad \cdots \cdots (6)$$

$$g(x) = K_3x + \frac{1}{2}(K_4 - K_3)|x + K_5| + \frac{1}{2}(K_3 - K_4)|x - K_5|$$

図6は、(6)式を  $K_0 = 0.68$ ,  $K_1 = 9.0$ ,  $K_2 = 7.0$ ,  $K_3 = -0.5$ ,  $K_4 = -0.8$ ,  $K_5 = 1.0$  として、解いた解の軌道である。これらの定数は、解が円軌道となるものを実験的に発見したものの一例である。

〈3・2・2〉パラメータ操作による行動の多様性 (6)式で発生したカオスアトラクタの軌道が、カオスのパラメータを変更することで、どれだけ多様な動きをするかを検証するために、シミュレーション実験を行った。

図7は、左から、〈3・2・1〉節のパラメータ( $K_1 \sim K_5$ )を使い、 $K_0$ パラメータの値を0.68, 0.67, 0.65に変化させて軌道をトレースしたものである。パラメータの値を変えた時の軌道の変化を見て取ることができる。

全体的に、楕円形の軌道を描いているが、その軌道の位置や円形の大きさなどが変化しており、パラメータ操作によって、ある程度異なった円運動の形状を作り出せる事が確認できた。

#### 4. 電荷モデルによるモデリング

〈4・1〉ポテンシャル場 群衆の行動パターンや流れを局所的に変化させる要素を表現する電荷モデルを用いたモデリングについて述べる。このモデリングでは、電荷モデルの中でもポテンシャル場を用いることにする。ポテンシャル場を用いる理由は、障害物回避動作を実現しようとした時に、電界を用いる方法に比べて自然な回避経路が得られ

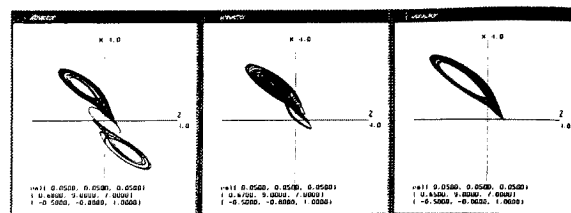


図7 パラメータ値によるカオスアトラクタ形状の違い  
Fig. 7. Change of attractor pattern.

るからである。

我々はまず、電界のベクトルを移動ベクトルの基本とする方法でモデリングしようとしたが、障害物回避動作を実現しようすると、自然な回避経路を得るのが非常に困難なことが分った。この方法によるシミュレーション実験を行ったところ、与える電荷の値が小さいと障害物を突破してしまったり、大きいと迂回しすぎたりと、不自然な経路になるのである。

このように自然な経路の得られない原因は、電界の一意性にある。ある位置における電界のベクトルは、ポテンシャル場の極小方向と言う意味合いを持ち、ポテンシャル場によって唯一に決定される。自然な移動経路を得るためにはポテンシャル場を調整しなければならないが、そのために電荷を置く位置やその値を適度に調節するのは、非常に困難な作業となる。

そこで、移動ベクトルの決定に電界を利用するのではなく、現在位置と移動先のポテンシャル場の高低を調べる方法を取ることにする。位置エネルギーの大きさを比較するような手法とすることで、唯一に決まっていた移動ベクトルを移動可能な範囲の中から選択することができるようになり、実際の人の経路選択方法に近い、自然な移動経路が得られると考える。

〈4・2〉ポテンシャル場の計算 ポテンシャル場を用いて群衆の行動パターンや流れを局所的に変化させる要素を表現するために、以下のように電荷とポテンシャルを配置する。

- 人：位置に正の微小点電荷
- 障害物の周囲：形状を示す線分上に正電荷を一様分布
- 障害物内部：一定の正ポテンシャル
- アトラクティブな要素：点負電荷

ある地点  $P_a$  におけるポテンシャルは、人・障害物・アトラクティブな要素の3種類から影響を受ける。

ある地点  $P_a$  における人からのポテンシャルを求める関数  $p\_man(P_a)$  は、次のようである。 $q$ は人に与える微小電荷、 $M_n$ は人の数、 $P_{mi}$ は  $i$  番目の人の位置である。

$$p\_man(P_a) = \sum_{i=1}^{M_n} \frac{q}{|P_a - P_{mi}|^2} \quad \cdots \cdots (7)$$

ある地点  $P_a$  における障害物の線分からのポテンシャルを求める関数  $p\_obj(P_a)$  は、次のようである。 $O_n$  は線分の数、 $p\_line(i, P_a)$  は  $P_a$  地点における  $i$  番目の線分からのポテンシャルを計算する関数である。

$$p\_obj(P_a) = \sum_{i=1}^{O_n} p\_line(i, P_a) \dots\dots\dots (8)$$

$p\_line(i, P_a)$  は、 $P_a$  地点から線分  $i$  に対して垂線を引くことができない場合は (9) 式で、垂線を引くことができる場合は (10) 式となる。ただし、 $q$  は線分に与える電荷の値、 $r_0$ 、 $r_1$  は計算地点と線分の端点までの距離 ( $r_0 < r_1$ )、 $r_2$  は計算地点から線分への垂線の長さである。

$$p\_line(i, P_a) = \int_{r_0}^{r_1} \frac{q}{r^2} dr \dots\dots\dots (9)$$

$$= q \left( \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} \right)$$

$$p\_line(i, P_a) = \int_{r_0}^{r_2} \frac{q}{r^2} dr + \int_{r_1}^{r_2} \frac{q}{r^2} dr \dots\dots\dots (10)$$

$$= q \left( \frac{2}{r_2} - \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} \right)$$

ある地点  $P_a$  におけるアトラクティブな要素からのポテンシャルを求める関数  $p\_atr(P_a)$  は、次のようである。 $q$  はアトラクティブな要素に与える負電荷、 $A_n$  はアトラクティブな要素の数、 $P_{ai}$  は  $i$  番目のアトラクティブな要素の位置である。

$$p\_atr(P_a) = \sum_{i=1}^{A_n} \frac{q}{|P_a - P_{ai}|^2} \dots\dots\dots (11)$$

ある地点  $P_a$  地点における全てのオブジェクトからのポテンシャルを求める関数  $p(P_a)$  は以下になる。

$$p(P_a) = p\_man(P_a) + p\_obj(P_a) + p\_atr(P_a) \quad (12)$$

〈4・3〉 障害物回避動作 ポテンシャル場を利用して、群衆の個人が障害物を避けながら現在地点から次の移動地点へ移動するための移動ベクトルの決定方法について述べる。ここでは、次の移動地点の候補をいくつか挙げて、現在地点とそれらの候補となる地点の障害物の有無やポテンシャル場の高低を調べることで、次の移動地点を選択する手法を取る。具体的には次のロジックにより移動ベクトルを決定する。

#### 障害物回避動作ロジック

**Step.1** 現在地点  $\vec{n}$  からゴール地点  $\vec{g}$  方向への単位ベクトル  $\vec{b}$  を求める。

$$\vec{b} = \frac{\vec{g} - \vec{n}}{|\vec{g} - \vec{n}|}$$

**Step.2** 単位ベクトルに〈3・1・2〉節のカオス変換を施したものを第一移動候補ベクトル  $\vec{v}_1$  とする。

$$\vec{v}_1 = \text{chaos}(\vec{b})$$

**Step.3** 現在地点  $\vec{n}$  から第一移動候補ベクトルで  $K$  回移動した地点  $\vec{s}_1$  の障害物の有無を調べる。障害物が存在しない場合、第一移動候補ベクトル  $\vec{v}_1$  を移動ベクトル  $\vec{V}_n$  とし、終了する。障害物が存在する場合、Step.4 に進む。

$$\vec{s}_1 = \vec{n} + K\vec{v}_1$$

**Step.4** 前回の移動ベクトル  $\vec{V}_{n-1}$  を第二移動候補ベクトル  $\vec{v}_2$  とする。

$$\vec{v}_2 = \vec{V}_{n-1}$$

**Step.5** 現在地点  $\vec{n}$  から第二移動候補ベクトル  $\vec{v}_2$  で  $K$  回移動した地点  $\vec{s}_2$  の障害物の有無を調べる。障害物が存在しない場合、第二移動候補ベクトル  $\vec{v}_2$  を移動ベクトル  $\vec{V}_n$  とし、終了する。障害物が存在する場合、Step.6 に進む。

$$\vec{s}_2 = \vec{n} + K\vec{v}_2$$

**Step.6**  $\vec{v}_1$  を  $\Theta$  回転、 $-\Theta$  回転したベクトル  $\vec{v}_3$ 、 $\vec{v}_4$  を第三、第四移動候補ベクトルとする。

$$\vec{v}_3 = \vec{v}_1 \begin{pmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta \\ -\sin \Theta & \cos \Theta \end{pmatrix}$$

$$\vec{v}_4 = \vec{v}_1 \begin{pmatrix} \cos(-\Theta) & \sin(-\Theta) \\ -\sin(-\Theta) & \cos(-\Theta) \end{pmatrix}$$

**Step.7** 現在地点  $\vec{n}$  から第三、四移動候補ベクトル  $\vec{v}_3, \vec{v}_4$  で移動した地点  $\vec{s}_3, \vec{s}_4$  のポテンシャルを計算し、低い方の地点に移動するのに使用した移動候補ベクトル  $\vec{v}_3$  または  $\vec{v}_4$  を移動ベクトル  $\vec{V}_n$  とする。

$$\vec{s}_3 = \vec{n} + \vec{v}_3$$

$$\vec{s}_4 = \vec{n} + \vec{v}_4$$

このロジックにおいて、 $\text{chaos}()$  の写像は〈3・1・2〉節の (2) 式に相当する。 $K$  は障害物回避動作を障害物のどのくらい手前から始めるかを表す定数である。また、 $\Theta$  は障害物を回避するために進行方向を変える時の角度を示す定数である。これらにより、障害物の手前から徐々に障害物を回避するようにしている。

〈4・4〉 歩行停止動作 アトラクティブな要素に、人が引き寄せられていき、その前で歩行を停止するという動作のロジックについて述べる。ここでは、ポテンシャルの値の範囲により、アトラクティブな要素に引き寄せられ、歩行を停止させている。具体的には次のロジックとなる。

#### 歩行停止動作ロジック

**Step.1** 現在地点  $\vec{n}$  のポテンシャル  $p(\vec{n})$  が、(1) 閾値  $P_u$  より高ければ Step.3 に進み、(2) 閾値  $P_u$  より低く、閾値  $P_d$  より高ければ Step.2 に進み、(3) 閾値  $P_d$  より低ければ Step.4 に進む。

**Step.2** 現在地点  $\vec{n}$  の最も近傍にあるアトラクティブな要素の位置  $\vec{a}$  を探す。その位置  $\vec{a}$  を、障害物回避動作ロジック

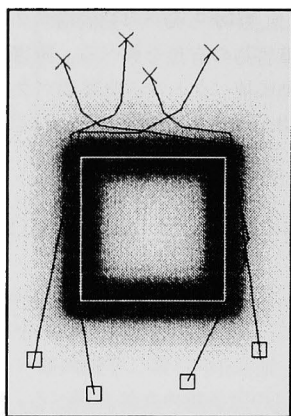


図 8 障害物回避例

Fig. 8. Example of moving around objects.

のゴール地点 $\bar{g}$ とする。

**Step.3** 障害物回避動作ロジックを実行し、終了する。

**Step.4** 現在地点を維持する。

このロジックにおいて、 $P_u$ と $P_d$ は、人がアトラクティブな要素に引き寄せられる範囲と、停止する位置をポテンシャルで決定するための定数である。これらにより、アトラクティブな要素から遠い位置にある人はその影響を受けずに歩行し、近くなると引き寄せられ、近づきすぎると停止するという動作が実現できる。

〈4・5〉 障害物回避例 電荷モデルを使った障害物の回避経路の例を、図 8 に示す。色の濃さは障害物からのポテンシャルの高さを示し、×印はスタート地点、□印はゴール地点を示す。この例から、障害物の少し手前から、障害物を検知して回避行動をとっていることが分かる。

## 5. 評価

〈5・1〉 評価の焦点 本モデルの評価を以下の点に焦点を当てて行う。

- (1) 様々な人の群集を容易に生成できること。
- (2) 生成した群集がある程度自然に見えること。

具体的な評価手法は以下のようにして行う。

- (1) カオスのパラメータを変化させることで、多様な行動パターンを生成することができるかどうかを、シミュレーション実験をして検証する。
- (2) 本モデルを用いて生成した群集のアニメーションにおいて、その全体のデータ量が手軽に入力できる範囲であるかどうかを検証する。
- (3) 本モデルを用いて生成した群集のアニメーションを数人のユーザに見せて、群集らしさに関する主観的な意見を得て、それらを検討する。

(1) は 3 節で示したので、ここでは (2)、(3) について示す。

表 1 パラメータ数

Table 1. Number of parameter.

	カオス	人		アトラクティブ要素			障害物		
例	係数	電荷	位置	電荷	位置	周期	電荷	位置	総数
(1)	10	1	1	0	0	0	0	0	12
(2)	2	1	4	1	1	1	0	0	10
(3)	2	1	16	3	5	2	24	48	101

〈5・2〉 データ量の評価 本モデルを用いて次の 3 種類のアニメーションを制作した。

(1) 社交ダンスの例 (図 9)

(2) ストリートパフォーマンスに群がる人々の例 (図 10)

(3) 信号を横断する人々の例 (図 11)

(1) は、全体の動きを決める大きなカオスアトラクタ軌道上にペアの動きを決める小さなカオスアトラクタの重心を多数配置した多重円運動として表現している。(2) は、アトラクティブな要素であるストリートパフォーマンスに一定間隔で電荷を与えることで、ストリートパフォーマンスをしている時は人が群がり、やめると去っていく様子を表現している。(3) は障害物として、建物・車道・水溜まりを用意して、アトラクティブな要素として、ストリートパフォーマンスと信号付きの横断歩道を用意している。ストリートパフォーマンスと横断歩道には、一定間隔で電荷を与えている。(1)、(2)、(3) の群集の人の数は、それぞれ 12, 24, 80 である。

これらの例におけるパラメータの数は表 1 のようになった。位置は (x, y) で 1 つとして計算している。障害物の線分は両端点の位置で与えており、各端点ごとに 1 つとして計算している。人の初期配置位置に関するパラメータは、登場する人数と配置範囲 (中心位置と半径) であり、これらからランダムに初期配置を行っている。これらの初期配置位置にゴール位置のパラメータを加えたものを一つの組として、パラメータの数を 4 つとして計算している。また、これらのデータとは別に CG 用のデータがある。

表 1 から、(3) は障害物を多く配置しているためデータ量が多くなっているが、このことを考慮するとどの例もデータ量が低く抑えられていることが分かる。これらのデータ量は、個人のふらつきや障害物の回避動作を座標で指定する方法に比べると少ないと言える。このことから、カオスと電荷モデルを利用したことが、入力するデータ量の削減に貢献していることが分かった。

〈5・3〉 群集らしさの主観的評価 〈5・2〉 節のアニメーションを 20 名の学生に見てもらい、次のような主観的意見を得た。

- (1) 直線運動では、個人の動きにおいて速度やふらつきに個人差があり、それが群集らしさを醸し出していると感じた。
- (2) 社交ダンスの例では、常に決まった円の軌道を回り続けるのではなく、ダンスの軌道が少しずつ変化しており、機械らしさがなかった。
- (3) ストリートパフォーマンスの例で、ストリートパ

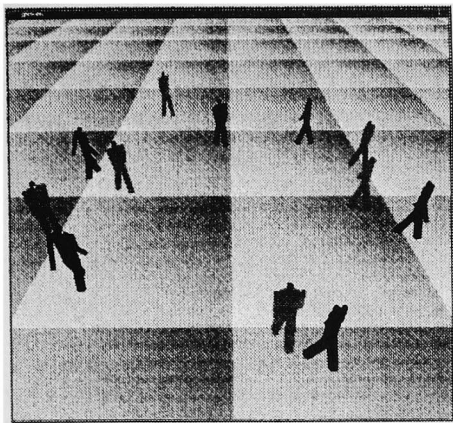


図9 アニメーション例(1)  
Fig. 9. Animation example (1).

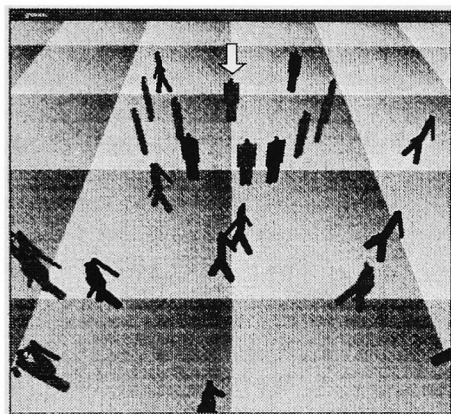


図10 アニメーション例(2)  
Fig. 10. Animation example (2).

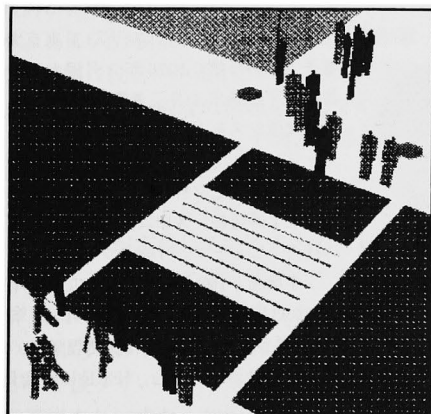


図11 アニメーション例(3)  
Fig. 11. Animation example (3).

パフォーマンスが始まると、ストリートパフォーマンスに近づいた人がばらばらと移動方向を変えて集まってくる様子は、実際のストリートパフォーマンスに人

が集まってくる様子とよく似ていると感じた。

(4) 水溜まりを避ける時は、水溜まりの少し手前から移動方向を変えており、かつ変に遠回りをするものもないため、不自然さを感じなかった。

(1) から、カオスの曖昧性の効果が現れていることが分かる。(2) からは、カオスアトラクタの軌道の変化を効果的に利用できていることが分かる。(3) は、歩行停止動作のロジックが、ストリートパフォーマンスから一定の距離(ポテンシャル)内に入った時だけ人の移動方向を変えているため、このようにばらばらと集まってくる自然さを表現できたと思われる。(4) は、障害物回避ロジックにおいて数回先の移動地点における障害物の有無をチェックしていることが、人の前もって障害物を認識して移動方向を変えようという行動を表現していることが分かる。また、回避経路選択時にポテンシャル場を考慮していることが、遠回りを避けていることが分かる。

以上のような意見に加えて、次のような問題点・改善点も指摘された。

(1) 実際の群集の中には、家族やカップルなどのグループがあるが、アニメーションの中にはそのようなグループがなかった。

(2) 人同士が衝突しているように見えることがあった。

(3) 大きな障害物を避ける動きがややぎこちなく見えた。

(1) は、本モデルでは移動ベクトルを個人毎に計算しているためである。個人毎の計算では、朝サラリーマンが通勤しているような様子はそれなりに再現できるが、このようなグループは再現できない。これは、グループとグループの中心の人を定義し、グループの他の人がその中心の人に従って行動するようなロジックを導入すると実現できると思われる。

(2) は、本モデルでは人同士の衝突を検出していないためである。今回は、障害物と比較すると人の大きさは小さいため、人同士の衝突はそれほど気にならないが、よりきめ細かな動きを再現するためには必要である。

(3) は、本モデルでは、障害物回避動作をどの時点で開始するかを決定するのに、障害物の大きさを考慮していないことが原因である。通常人は小さな障害物に対しては直前まで回避行動をとらないが、大きな障害物に対しては、障害物のかなり手前から回避行動をとることがある。本モデルの障害物回避ロジックは、一定先の障害物の有無をチェックしているため、このような障害物の大きさを考慮していない。そこで、より自然な障害物回避経路とするためには、現在地点のポテンシャルの大きさによりどれくらい先で障害物の有無をチェックするかを決定するようなロジックを導入する必要がある。

〈5・4〉 結 論 カオスのパラメータを変更することで、多様な群集行動を生成できたことと、アニメーション生成に必要なデータ量が手軽に入力できる範囲内であったことから、本モデルにより人の群集が手軽に作成できるこ



とが検証された。また、いくつかの細かい課題は指摘されたが、カオスと電荷モデルの特徴による効果が群集らしさを与えていると言う主観的評価が得られたことから、生成した群集がある程度自然に見えることも検証された。このことから、今後本モデルは、仮想都市において人通りを表現したり、ゲームや映画で人の群集を効果的に取り入れたりするのに、利用できると思われる。

## 6. ま と め

本稿では、カオスと電荷モデルを用いた人の群集行動のモデリングについて述べた。群集の大きな行動パターンや流れは、カオスを用いてマクロに記述することで、個人の各々の行動や個人間の相互の関係を記述することなしに、その動きを再現できるようにした。また、群集の障害物の回避やアトラクティブな要素に引かれて立ち止まるなどの細かい動きは、個人にその動きを生成する電荷モデルを用いたロジックを導入することで、電荷を与えれば細かな回避経路などを設定しておかなくてもすむようにモデル化した。

シミュレーション実験と20人のユーザによる主観的評価から、本モデルにより群集を容易に生成できることと、生成した群集がある程度自然に見えることが検証された。

今度は、より自然な障害物回避経路が得られるようロジックを工夫し、また群集らしさを定量的に評価できるよう、その評価基準について研究を進めていく予定である。

(平成12年4月12日受付, 同12年9月7日再受付)

## 文 献

- (1) 廣瀬通孝: パーチャル・リアリティ (1993) 産業図書
- (2) 落合和正: 商用化された下層社会 people space の現状, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告, Vol.1, No.1, pp.13-18.(1997)
- (3) 加藤伸子ほか: 遺伝的アルゴリズムを用いた仮想都市のための建物配置方式, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J82-D-II, No.10, pp.1766-1774.(1999)
- (4) 鶴沼宗利, 安生健一, 武内良三: 群衆行動のモデリング, T.IEE Japan, Vol.115-C, No.2, pp.212-221.(1995)
- (5) J. Lasseter: Principles of traditional animation applied to 3D computer animation, Proc. of SIGGRAPH'87, pp.35.(1987)
- (6) S. Glenn: Vector Animation Creation System, SIGGRAPH'93 Visual Proceedings, pp.223.(1993)
- (7) 服部桂: 人工生命の世界 (1994) オーム社開発局
- (8) 合原一幸編: カオス (1986) サイエンス社

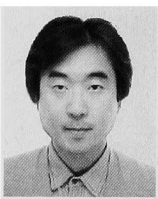
小 松 利 彰 (非会員) 1973 年生。1996 年 3 月大阪大学基礎工学部システム工学科卒業。1998 年 3 月同大学大学院修士課程終了。同年 4 月富士通 (株) 入社。在学中は、メディア技術の研究に従事。



土 方 嘉 徳 (非会員) 1973 年生。1996 年 3 月大阪大学基礎工学部システム工学科卒業。1998 年 3 月同大学大学院修士課程終了。同年 4 月日本アイ・ビー・エム (株) 東京基礎研究所入所。2000 年 10 月大阪大学大学院基礎工学研究科システム人間系専攻博士後期課程入学。ヒューマンインタフェース技術、メディア技術の研究に従事。情報処理学会, 日本ソフトウェア科学会, ヒューマンインタフェース学会, IEEE 各会員。



才 脇 直 樹 (非会員) 1965 年生。1989 年 3 月大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1991 年 3 月同大学大学院修士課程終了。同年 4 月同博士後期課程へ進学し, 1993 年 4 月同中退。同年 5 月, 大阪大学基礎工学部助手。1997 年 4 月改組により大阪大学大学院基礎工学研究科システム人間系助手。1999 年 4 月同講師。現在に至る。音楽情報処理, 生体信号処理 (脳波・脳磁波), ヒューマンインタフェース, アニメーション生成に関連する研究に従事。工学博士。情報処理学会, システム制御情報学会, 日本認知科学会, ICMA 各会員。Journal of New Music Research 誌 (Swets & Zeitlinger 発行) アドバイザリー・エディタ。



西 田 正 吾 (正員) 1952 年生。1974 年 3 月東京大学工学部電子工学科卒業。1976 年 3 月同大学大学院修士課程修了。同年 4 月三菱電機 (株) 入社。同社中央研究所システム基礎研究部研究員, グループマネージャーを経て, 1995 年 4 月, 大阪大学基礎工学部システム工学科教授。現在, 大阪大学大学院基礎工学研究科システム人間系専攻教授。システム技術, ヒューマンインタフェース技術, メディア技術の研究に従事。工学博士。1984-1985 年 MIT メディアラボ客員研究員。1986 年度, 1993 年度電気学会論文賞, 1992 年度電気学会著作賞, 1995 年度電気学会進歩賞受賞。情報処理学会, 電子情報通信学会, ヒューマンインタフェース学会, IEEE ほか会員。IEEE Fellow。

