画像電子学会
The Institute of Image Electronics Engineers of Japan

画電学会年次大会予稿
Proceedings of the IIEEJ Annual Conference

隣接関係を用いた群衆隊形の補間
Interpolating Crowd Formations using Adjacency Relations

新倉 寿樹† 高橋 成雄‡ Sung Yong SHIN‡‡
Hisaki NIIKURA† Shigeo TAKAHASHI‡, and Sung Yong SHIN‡‡

†東京大学 大学院情報理工学系研究科
† Graduate School of Information Sciences, The University of Tokyo
‡東京大学 大学院新領域創成科学研究科
‡ Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo
‡‡韓国科学技術院 コンピュータ科学学科
Department of Computer Science, Korea Advanced Institute of Science and Technology

1. はじめに

近年，群衆シミュレーションの研究が，コンピュータアニメーションのひとつの課題として重点的に研究をされるようになってきている．実際に，群衆シミュレーションの技術は，映画等に見られる魚や動物などが群れをなして移動するシーンや，合戦における多くの人の動きをとらえるシーンにも用いられており，またＴＶゲームやアニメ映画でも背景として人の群れを描く際にも群集シミュレーションの技術を用いることができる．

これまでの群集シミュレーションの手法は，大まかに手続きベースによるものと，例示ベースによるものに分類することができる．前者は，人口知能のように群れをなす個体ひとつひとつの動きを決める際の規則を，他の個体との位置関係や周辺の環境を考慮に入れて記述するものである．例えば，個体の動きを，空腹や喉の渇きや人と会うなどの目標をパラメータとして記述するもの[1]や,個体間の距離に応じて個体の行動を決定するもの[2]などがあげられる．しかし，実際に見られるような群集の動きを記述するための規則は一般的に膨大な数にのぼり,手軽に群衆を生成できない．後者の例示ベースの方法としては，例えばGroup Motion Graph[3]と呼ばれる手法がある．これは，集団のモーションキャプチャーデータを計測し，集団の形状が近いクリップをクラスタリングして，Motion Graph[4]のように自然につながるような群衆の動きを探索して生成している．しかし，動きをつなげる際には，個体の座標位置がつながるだけで，群衆における個体間の関係は考慮されているとは言えず，群衆らしい個体間の距離を考慮した動きの実現は難しい．集団のモーションキャプチャデータを何種類も用意しなければならない点でも敷居は高いと言える．

本研究では，実際の群衆を撮影したビデオから得られる群衆の動きのデータから，ユーザに自由にその群衆が成す隊形を編集できる，新たな手法を示す．この手法の主な貢献は，個体の空間における局所的な動きを保持したまま,(1)群衆内の個体が成す隣接関係を抽出・変更し,(2)そうして得られた群衆内の個体の隣接関係を時間軸方向に滑らかに補間する枠組みを構築したことである．この枠組みは，群集の隊形がそこに含まれる個体の隣接関係で記述できることに加え，個体は少なからず周辺の個体との相対的な位置関係に影響を受けることからも，正当化することができる．

提案手法は，次のような群集の動きの編集作業を実現することができる．例えば，図1(a)にあるような3行3列の隊形をなす群集の動きのデータが与えられているとする．提案手法を用いると，例えば最初のフレームのみ隊形を図1(b)のように三角形状にしたり，最後のフレームのみ隊形を図1(c)のように円状にしたり，あるいは図1(d)のように両方の隊形を変更したりできる．また，必要に応じて中間にもキーフレームの役割を成す隊形を指定することも可能である．

特筆すべきは，本手法は群集の隊形のみを抽出・変更するため，個体それぞれの局所的な動きは極力保持できることである．これにより，群衆の隊形を自然な動きを保ったまま編集することが可能となり，ビデオから得られる人々が隊列を成して行進するシーンや，人文字を成すシーンに，編集を加えたいときに効果的な手段を提供することができる．また，シンクロナイズドスイミングやサッカーなど，隊形の変化が重要なスポーツの映像を作る場合には，より本手法の特徴を発揮することができる(図11，12).

以下，2節で本研究の提案手法のアルゴリズムの詳細を述べ，3節では本研究の発展として，より柔軟に群衆を生成するための拡張機能について述べる．次に，4節でこの手法を用いて映像を作った結果について述べ，最後にまとめと今後の課題について述べる．

2. アルゴリズム

この節では，本研究の提案手法の詳細について説明する．本研究の核となる部分は，群衆のメッシュラプラシアン近似[5,6]と，群衆隊形の補間という2つのステップである．メッシュラプラシアン近似によって群衆内の個体が成す隣接関係と，群衆の個体の局所的な動きの特徴に分解することができ，群衆隊形の補間によって，その動きの特徴を保持したまま，ユーザが望むように隣接関係を変更できるようになる．

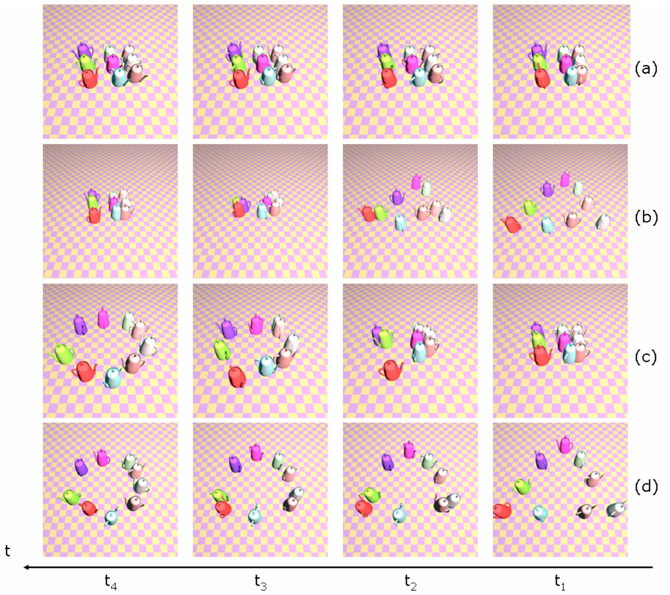

図1.隊形の変更

2．1 群衆のメッシュラプラシアン近似

ここでは，メッシュラプラシアン近似を用いて，群衆の動きを，群衆内の個体同士が成す隣接関係と，群衆の個体の局所的な動きに分解する手法について述べる．メッシュラプラシアン近似とは，3次元ポリゴンを頂点の接続関係と頂点座標でとらえることで，メッシュの概形を低周波と高周波に分解する手法である．

まず，タイムステップごとに個体同士の相対的な位置関係を表すため，群衆の重心からの相対位置座標で表す．そして，時系列のあるタイムステップ j での個体 i の相対位置座標を $(x_{i,j}, y_{i,j})$ としたときに，以下のように x 成分と y 成分を別々に列挙したベクトル X_j, Y_j で表すことにする．

$$X_j = (x_{1,j}, x_{2,j}, \ldots, x_{n,j}) \qquad (1)$$

$$Y_j = (y_{1,j}, y_{2,j}, \ldots, y_{n,j}) \qquad (2)$$

ここで，n は，群衆に含まれる個体の数である．

次に，この相対位置座標から群衆内の個体が成す隣接関係の情報を表現するために，隣接行列（A_j とする）を導入する．隣接行列は，個体間がどれだけ近いかを，隣接関係の強さを表す重みとして定義し，個体 k,l 間の重みを行列の (k,l) 成分として定義することにする．ここで，個体 i,j 間の隣接関係の強さを表す重みは，$w_{i,j} = e^{-d_{k,l}{}^2/2\sigma^2}$ という式で表すことにする（$d_{k,l}$ は個体 k,l 間の距離）．この理由については2.2.1節で後述する．次に，対角行列 B_j を求める，対角成分 (i,i) は個体 i と，他の個体との隣接関係の重みの和として，対角成分以外は0として定義する．B_j から A_j をひくことで定義される行列を*Kirchhoff*行列と定義し，K_j と表すことにする．

$$K_j = B_j - A_j \qquad (3)$$

この K_j によって，群衆内の個体が成す隊形をメッシュラプラシアンを用いて表現できる[5,6]．K_j の固有値を，昇順に $l_{0,j}, l_{1,j}, \ldots, l_{n-1,j}$（$l_{0,j} < l_{1,j} < \ldots < l_{n-1,j}$）とし，$l_{i,j}$ に対応する K_j の単位固有ベクトルを順に，$e_{0,j}, e_{1,j}, \ldots, e_{n-1,j}$ とする．ここで，値の小さな固有値に対応する単位固有ベクトルは低周波成分に対応し，群衆の隊形のおおまかな形状を表すのに対し，逆に値の大きな固有値に対応する単位固有ベクトルは高周波成分に対応し，群衆の隊形の詳細部分を表している．そして，低周波成分から高周波成分へと，次の式のように順々に単位固有ベクトルを足し合わせることで，得られる各個体の位置座標は段階的にオリジナルの群衆の隊形に近づいていく．

$$X'_j = c_{0,j}e_{0,j} + c_{1,j}e_{1,j} \ldots, c_{n-1,j}e_{n-1,j} \qquad (4)$$

$$Y'_j = d_{0,j}e_{0,j} + d_{1,j}e_{1,j} \ldots, d_{n-1,j}e_{n-1,j} \qquad (5)$$

この $c_{i,j}, d_{i,j}$ は，単位固有ベクトルに X_j, Y_j を射影して得られる，各単位ベクトルに対応する係数であり，次の式で表される．

$$c_{i,j} = X_j e_{i,j} \qquad (6)$$

$$d_{i,j} = Y_j e_{i,j} \qquad (7)$$

位置座標のベクトルを射影していることから，この係数によって各個体の位置座標といった幾何情報を表すことができる．そして，係数の時系列変化を見ることで，群衆の個体の局所的な運動の様子，すなわち動きの特徴を見ることができる．こうして，得られた単位固有ベクトルと係数により，群衆内の個体の隣接関係とそれらの局所的な動きの特徴を分解できる．

2．2 群衆隊形の補間

ここでは，様々な隊形の自然な動きをする群衆を生成するために，ある隊形から，別の異なる隊形へと，群衆らしい動きの特徴を保ったまま隊形を補間する方法について述べる．基底ベクトル（単位固有ベクトル）とその係数を用いることにより，それらの隣接関係と，各個体の局所的な動きの特徴に分解することができた．これを利用して，個体の局所的な動きを保持させたまま，滑らかに隣接関係が変更されるよう，基底ベクトル群と係数を別々に補間する．以下，基底ベクトルの補間方法と係数の補間方法の詳細を述べる．

本研究では，ある隊形から別の異なる隊形へと補間する際，その隊形の低周波成分同士の基底ベクトルと係数，高周波成分同士の基底ベクトルと係数を補間することにしている．なぜなら，実際の群衆を撮影して群衆内の各個体の座標を取得したデータ（以下，実データとする）から，タイムステップごとに*Kirchhoff*行列を用いて求めた時系列の基底ベクトルと係数を見たとき，係数も基底ベクトルも，低周波成分と高周波成分に分離されて，タイムステップが変わっても低周波成分は低周波成分のまま，高周波成分は高周波成分のまま，対応関係を保つように変化していたからである．

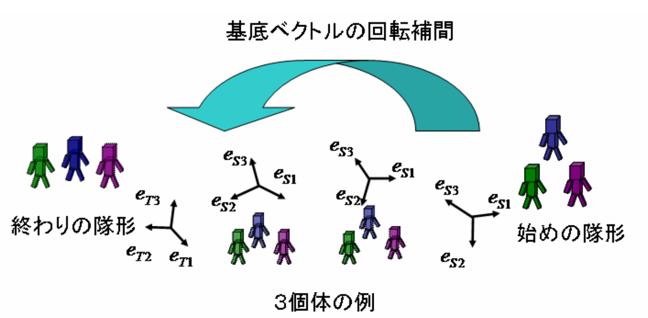

図2．基底ベクトルの補間

2．2．1　基底ベクトルの補間

まずは基底ベクトルの補間方法について述べる．実際のところ，群衆内の個体が成す隣接関係は，時間軸に関して滑らかに変化している．つまり，各時間ステップにおいて，基底ベクトル群は常に正規直交基底をなす単位固有ベクトルから構成され，それらが滑らかに変化していると考えられる．ここで，各隣接タイムステップ間の正規直交基底同士の変換は，回転行列で表現できることに注意する．これは，ある局所的な時間幅における個体同士の隣接関係の滑らかな変化を，この正規直交基底の時間に関する回転変換として近似できることを意味する(図2)．実際，後述するように，実データを用いて個体同士の隣接関係の時間軸に関する変化を見たが，正規直交基底の時間に関する回転変換としてとらえることができる．

そこで本手法では，次のように，ある隊形での基底ベクトル e_i^S を列挙した行列を S，別の異なる隊形での基底ベクトル e_i^T を列挙した行列を T とする．n は個体の数である．S と T は，正規直交基底を並べた直交行列となる．

$$S=(e_0^S, e_1^S, \ldots, e_{n-1}^S), T=(e_0^T, e_1^T, \ldots, e_{n-1}^T) \quad (8)$$

S, T の示す正規直交基底の補間を回転行列 R で実現させるとすると，次の式が成り立つ．

$$T = RS \qquad (9)$$

ここで，回転行列 R の平方根を取ることで，次のように補間の過程を記述することができる．

$$T = RS = R^{1/2}R^{1/2}S = R^{1/4}R^{1/4}R^{1/4}R^{1/4}S = \cdots = \{R^{(1/2)^N}\}^N S \qquad (10)$$

上式により，個体同士の隣接関係を補間するのに必要な 2^N+1 個の基底ベクトルを得ることができる．もちろん，補間するフレーム数は 2^N+1 個に限定する必要はなく，十分な個数の補間基底ベクトル群を用意しておけば，隣接ベクトル群がなす回転角も小さいので，その間は線形補間を用いて補間が可能である．

この回転行列を用いた補間方法(以下，回転補間と呼ぶ)によって，どれだけ実際の群衆に見られる滑らかな隣接関係の変化を近似できているか，実データと照らし合わせ，有効性を検証してみることにする．検証法として，実データから，タイムステップごとに*Kirchhoff*行列を用いて求めた時系列の基底ベクトル群と，タイムステップの最初と最後の基底ベクトル群を回転補間した基底ベクトル群とを比較し，ほぼ同じ時系列変化をしていれば，回転補間によって滑らかな隣接関係変化を近似してよいと判断できる．実は，2.1節にて，個体 i, j 間の隣接関係の重みを $w_{i,j}=e^{-d_{i,j}^2/2\sigma^2}$ とした理由は，この群衆内の個体が成す隣接関係の変化を，基底ベクトルの連続的な変化として反映させることにあった．つまり，隣接関係の滑らかな変化を実現するために，タイムステップごとの*Kirchhoff*行列の各成分の変化を連続的な値で表す必要があるからである．また，隣接関係の強さを表す重みの表現で用いた正規分布の式はなだらかに変化するのに加え，変曲点(σ に対応)を配置すると，その前後で正規分布の式が比較的勾配が急になることから，隣接関係の有無をある程度めりはりをつけて表現できることも都合が良い．

回転補間の有効性の検証のために，3つの個体を抽出し，その隣接関係の時間に関する変化を調べた．ここで,3個体のオリジナルの動きに対応する基底ベクトルの時系列変化と，回転補間で得られた基底ベクトルの時系列変化を,半径が1の単位球面の表面上に描画してみた．この場合個体数が3なので，オリジナルの時系列基底ベクトルが3個(低周波の順に e_0, e_1, e_2 とする)，補間した時系列の基底ベクトル(低周波の順に e_0', e_1', e_2' とする)が3個，それぞれ存在する．図3で表されるように，e_1, e_1' と，e_2, e_2' の組はほとんど重なっていることがわかる(e_0, e_0' の組はメッシュラプラシアンの定義からすべての要素が等しいベクトルとして求まり，変化しない)．実際，個体数が3個以上の場合を調べてみても，個体間の隣接関係の遷移が複数のパターンを含まない時間の範囲であれば，実際の基底ベクトルと回転補間により得られる基底ベクトルの差はかなり小さい．これより，時系列の基底ベクトル変化は回転補間によって十分近似できると判断できる(図3)．以下では，今まで述べたような回転補間によって実際の群衆のような滑らかな隣接関係の変化を実現できるものとする．

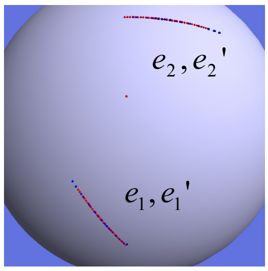

図3．実データの基底ベクトル群の時系列変化と，回転補間した基底ベクトル群の時系列変化を球面上に表した様子

2．2．2　係数の補間

ここでは，係数の補間法について述べる．実際の群衆がどのような動きの特徴を持っているか調べるために，実データから各個体の時系列の係数変化を見る．

2.2.1節の実データから得られる係数の時系列変化を求めると，次の図4のようなグラフが得られる．これより，実際の群衆の係数は，線形補間を表す直線に複数の周波数の正弦波の重ね合わせが表す揺らぎを加えた形になっており，この揺らぎが群衆特有の，個体の局所的な動きと特徴付けることができる．このような揺らぎは，実際の時系列係数の値から，タイムステップの最初と最後の係数の値を線形補間したものの差から取り出すことができる.こうして取り出した揺らぎを，ある隊形から別の隊形へと補間する際に，係数を線形補間してそこに足し合わせることで，オリジナルの群衆の係数変化を再現でき，群衆の動きの特徴を反映させることができる(図5).

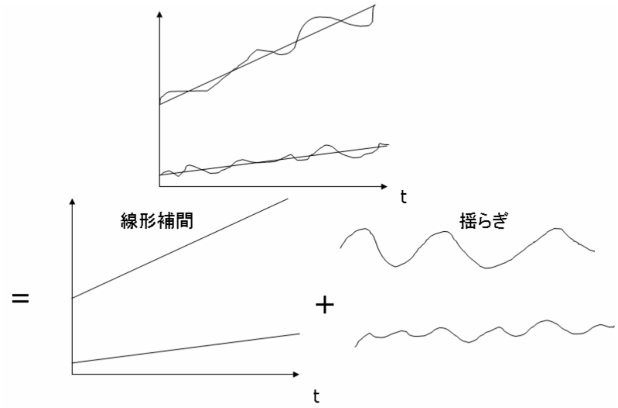

図4. 実データの基底ベクトルの係数の時系列変化

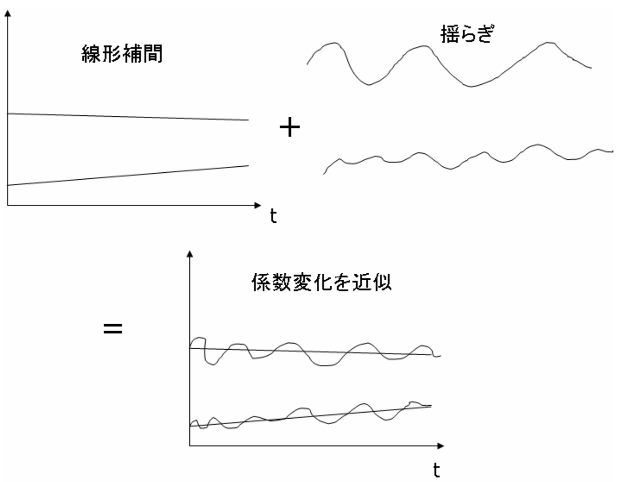

図5. 係数の補間

3. 発展

この節では，柔軟に群衆を生成するために必要な，本モデルの拡張的な機能について説明する.ところで，2.2.1節のように隣接関係を回転補間して隊形を変化させても，基底ベクトル群は正規直交基底を満たしながら回転しているので自由度が低く，ユーザの望む動きが得られない場合もある．そこで，補間途中のタイムステップでの各個体の動きをユーザが指定できるようにするために，群衆内の個体間の隣接関係を制御する方法や，補間途中のタイムステップでの群衆隊形を制御する方法を述べる．また，より大規模で複雑な群衆を容易に生成するために，小規模な群衆を個体とみなして階層化する方法を述べる．

3. 1 隣接行列の編集

隊形補間する際に，ユーザが個体間の隣接関係を指定することも可能である．具体的には，ユーザが隣接行列を編集してそれを元に*Kirchhoff*行列を計算することで，個体間の隣接関係をより柔軟に制御しながら隊形の補間を施すことができる．例えば，個体0，個体1,個体2という3個体がお互い隣接するように隣接行列を指定してやると,この3個体は三角形の隊形を組んだまま補間することができる．

3. 2 キーフレームの導入

補間途中のタイムステップでの群衆隊形を制御するために，群衆隊形のキーフレームを導入する．キーフレームは，ユーザが指定した補間途中のタイムステップで群衆が成す隊形と定義する．こうして，始めの隊形から，キーフレームの隊形を経て，終わりの隊形へと変化していくようにでき，より柔軟に群衆の個体の動きを制御できるようになる(図6).この実現法として，キーフレームの前後で2.2.1節の(9)，(10)式と同様に基底ベクトル群を回転行列で補間し，2.2.2節で述べた方法で係数を補間している．

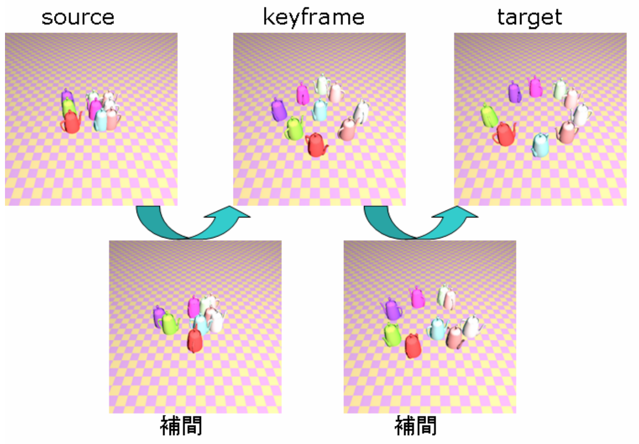

図6. 群衆隊形のキーフレーム

3. 3 群衆の階層化

ここでは複数の小規模な群衆を個体として扱い，より大規模で複雑な群衆を容易に生成する手法について述べる．まず小規模な群衆を個体とみなし，大規模な群衆の個体として配置する．また，そうして得られた大規模な群衆をさらに個体とみなして，群衆と個体の関係を階層化していくことで，群衆の規模を大きくしていくことが可能となる．作成例については，図9と図10を参照されたい．

4. 結果

本提案手法を用いて，実際に群衆を作成した．騎馬

戦の映像(図11)とシンクロナイズドスイミングの映像(図12)を示す．騎馬戦においては，1つの騎馬は3人の個体から構成されており，階層化を用いた記述に適している．シンクロナイズドスイミングにおいては，隊形の変化が重要なスポーツであるので，本手法を用いて簡潔に記述できる．

騎馬戦の映像は，整列して移動する群衆(図7)から，異なる3個体の組を9通り取って(例えば個体0，1，3の組や個体4，5，7の組など)，その3個体を1つの騎馬とし，その3個体の重心に騎手を配置して作成した．そしてランダムに歩いている群衆(図8)に先ほどの騎馬を個体とみなして配置すれば騎馬の集団となる．この基盤となる群衆の動きが，小規模な群衆の重心の動きとなる．また，整列しながら移動する群衆(図7)にも騎馬を配置し，先ほどの騎馬の集団に対峙させた(図9)．このようにして階層化した群衆を2通り用意することで，図11のような騎馬戦の映像を作成することができる．

シンクロナイズドスイミングの映像は，先ほどの映像と同様,整列しながら移動する群衆(図7)から異なる3個体の組を9通り抽出して，キーフレームを用いて隊形変化をさせ,小規模な群衆の動きを作成した.また，整列隊形(図7)から,キーフレームを挿入して様々な隊形へ変化していく群衆を作成し，その中に先ほどの3個体ずつ取り込んだものを個体とみなして配置した(図10)．こうして，図12の映像が出来上がる．

なお，ここではCollision Avoidance Force[7]を用いて，個体間の衝突を回避させている．個体間の距離に反比例する力である．また元の位置から離れすぎないようバネの弾性力を用いて反発力を緩和させている．

5. まとめと今後の課題

本研究では，メッシュラプラシアン近似を用いて，群衆の個体間の隣接関係と個体の局所的な動きの特徴を抽出して，群衆らしい自然な動きを保ちながら，ユーザが自由に群衆の成す隊形を編集できる方法について述べた．また，ユーザが隣接行列を指定したり，キーフレームを加えることで，より細かい群衆の個体の動きの制御を可能にした．さらに，群衆と個体との関係を階層化して，より複雑で大規模な群衆を生成できることも述べた．

将来的には，個体の局所的な動きを示す係数変化の揺らぎを，ウェーブレット解析を用いて分解してデータベース化し，係数補間の際にその揺らぎをランダムに取り出して組み合わせ，実データを用いなくても群衆の動きを生成できるようにしたい．他にも，劇的に隊形変化をさせると，各個体の動きが不連続となる場合があるので，それを緩和するために自動的にキーフレームを入れることも今後の課題である．

参考文献

[1] Shao, W. and Terzopoulos, D.: Autonomous Pedestrians, ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation 2005 Proceedings, pp.19-28(2005).

[2] Sakuma, T., Mukai, T. and Kuriyama, S.: Psychological Model for Animating Crowded Pedestrians, Computer Animation and Virtual Worlds, Vol.16, pp.343-351(2005).

[3] Lai, Y., Chenney, S. and Fan, S.: Group Motion Graphs, ACM SIGGRAPH Symposium on Computer animation 2005 Proceedings, pp.281-290(2005).

[4] Kovar, L., Gleicher, M. and Pighin, F.: Motion Graphs, SIGGRAPH '02 Proceedings, pp.473-480(2002).

[5] Karni, Z. and Gotsman, C.: Spectral Compression of Mesh Geometry, SIGGRAPH '00 Proceedings, pp.279-286(2000).

[6] Ohbuchi, R., Takahashi, S., Miyazawa, T. and Mukaiyama, A.: Watermaking 3D Polygonal Meshes in the Mesh Spectral Domain, Graphics Interface 2001 Proceeding, pp.9-17(2001).

[7] Kamphuis, A. and Overmars, M. H.: Finding Paths for Coherent Groups using Clearance, ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation 2004 Proceedings, pp.19-28(2004)

図7．整列して移動する群衆(右は個体番号)

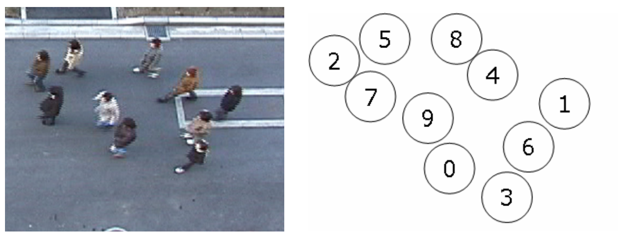

図8．ランダムに移動する群衆(右は個体番号)

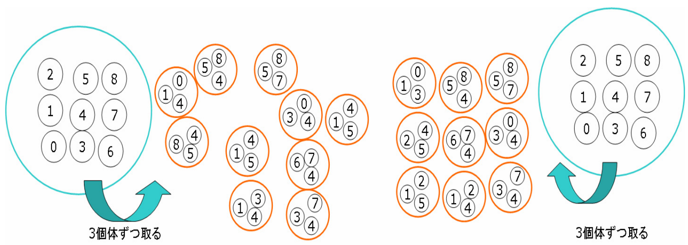

図9．騎馬戦の生成方法

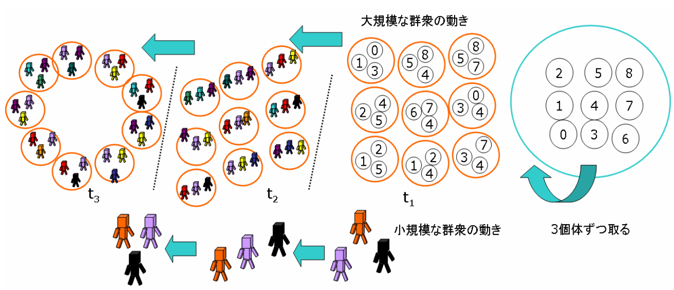

図10．シンクロナイズドスイミングの生成方法

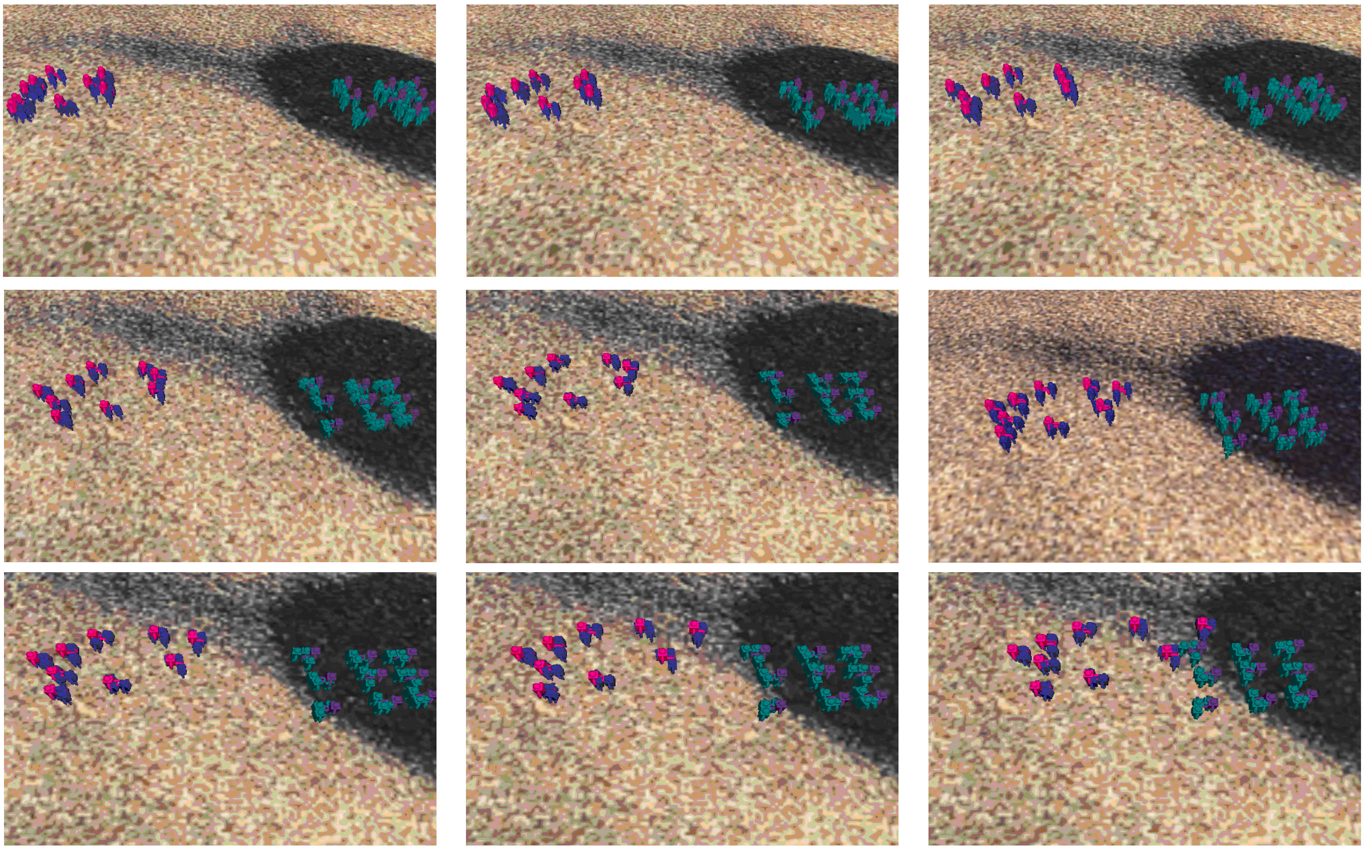

図11. 騎馬戦の映像

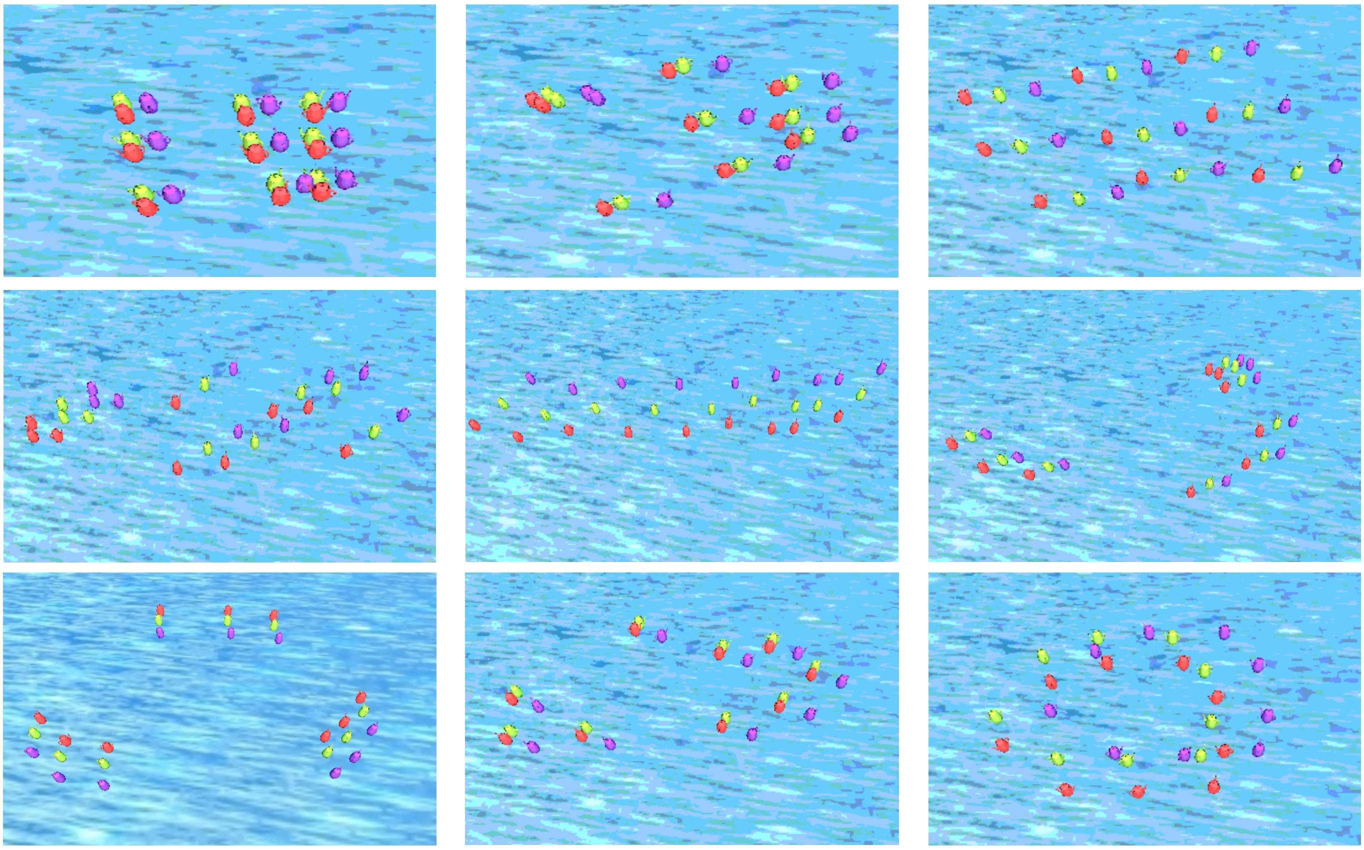

図12. シンクロナイズドスイミングの映像