

記憶モデルを用いた衝突回避動作の自動生成

佐久間 健[†] 栗山 繁[†] 金子 豊久[†]

既存の群集シミュレーションでは、各集団や人物に簡単な行動規則を与えて自然な振る舞いを生成する手法が多く用いられている。しかしながら、これらの手法では歩行者集団の密度や流動量を直接的には制御できないため、その集団的な振る舞いを正確にシミュレーションするには不向きである。そこで本研究では歩行者の行動の制御に人間の記憶と心理的なモデルを導入し、各行動に対する動作の生成にはモーションキャプチャデータの動的な処理を用いることにより、自然な歩行動作や衝突回避動作を生成する機構を提案する。この機構を用いた歩行者集団のシミュレーション結果を実測したデータと比較することにより、提案手法の精度と有効性を示す。

Generation of collision avoiding motions with memory model

Takeshi Sakuma,[†] Shigeru Kuriyama[†] and Toyohisa Kaneko[†]

Existing crowd simulations often introduce the control methods that give simple behavioral rules at each group or individual. These methods, however, are unsuited for exactly simulating group behaviors because of the lack of direct controls on the amount of density and flow of a pedestrian group. This research therefore proposes the method of generating plausible motions of gaits and collision avoidance by introducing human memory and psychological model to behavior controls of pedestrians, and by dynamically processing motion capture data. The accuracy and effectiveness of our method is shown by comparing the resulting simulation of pedestrian groups with measured data.

1. はじめに

CG におけるシミュレーションでは群集を構成する個々の仮想人間に思考を持たせる方法が一般的である。このような手法は Reynolds らによって提案され[1]、それ以降様々な改良が加えられてきた。日本では鷗沼らが行動科学や心理学的を取り入れ、個々の人間が状況に応じた振る舞いをする手法[2]を提案した。また、Terzopoulos らの研究では学習機能を持った魚群の制御モデル[4]が提案されている。映画製作に用いられている Massive[3]にもこのような群集制御のモデルが使用されている。

しかし、これらの手法では集団の密度や流動量に基づいた、歩行集団の正確なシミュレーションには不向きである。そこで本研究では人間の衝突回避における判断基準に記憶モデルを用いて自然な振る舞いを実現し、集団全体の流動量や歩行速度を実際の振る舞いに近づける手法を提案する。

図1に本手法の概要を示す。本手法は2章に記述する記憶モデルに基づいている。まず、各歩行者の持つパーソナルスペースと呼ばれる個人的空間を利用し、集団制御の基本となる記憶モデルを構築する。記憶モデルは各歩行者が認識している周囲の歩行者の情報である。

以後、2章において歩行者の心理的なモデルに関して述べ、3章では各歩行者が記憶モデルを使用して振る舞いを決定する方法について説明する。次に集団全体の制御方法として、集団の移動速度、及び移動方向を制御する方法を4章で述べる。

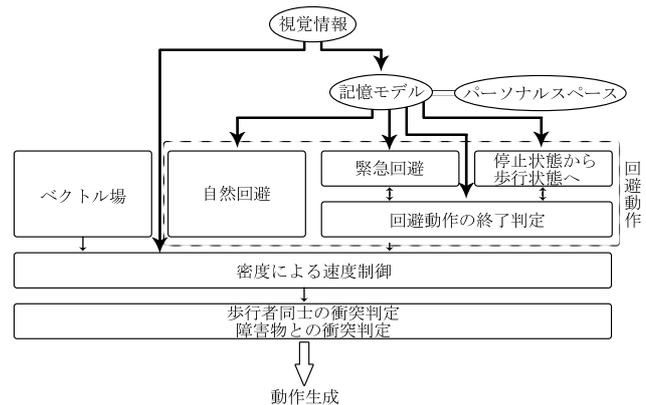


図1 処理の概要

5章ではモーションキャプチャデータを使用して動作を生成する方法について説明し、6章では本手法を実装したシミュレータにより生成された歩行者集団の振る舞いと実測値との比較により本手法の有効性を示す。

2. 歩行者の心理的モデル

2.1 パーソナルスペース

人間は自分の周囲に不可視の縄張りのような領域、あるいは個人的空間を持つとされる。これをパーソナルスペースと呼び、人間の間隔特性に基づき複数段階の領域が定義されている[5]。集団の振る舞いをシミュレーションする上で、パーソナルスペースの概念は鷗沼らの先行研究でも利用されている。

本手法では歩行者が注意を向ける対象を段階的に判別するために、2種類のパーソナルスペースを使用する。

[†]豊橋技術科学大学
Toyohashi University of Technology

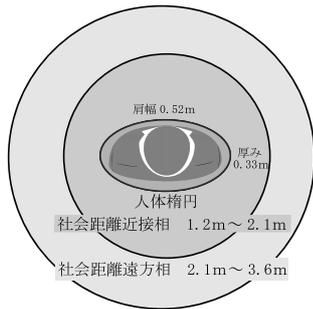


図2 パーソナルスペース

図2の社会距離遠方相として定義されているパーソナルスペースは、相手の身体を全て視野に入れる範囲であり、この領域に進入すると相手に社会的関心があると思わせる。本研究ではこの範囲に進入する歩行者に対して注意を向け、回避の準備をする。

社会距離遠方相の内側にある社会距離近接相は、会話などのコミュニケーションに用いられる領域で、本手法ではこの領域に進入する可能性がある歩行者に対して回避行動を取る。また、既にこの社会距離近接相に進入している歩行者を早急に回避する。

本手法では静止時の人体サイズとして人体楕円を設け、歩行者同士の人体楕円が接触した場合に衝突とみなす。また、全ての歩行者は他の歩行者の人体楕円内に進入できないと仮定する。

2.2 記憶モデル

実際の歩行者は自分以外のすべての歩行者に注意を向けているわけではない。例えば、人間の視界は基本的に前方に向けられているため、後方の歩行者を常に認識しているのは不自然である。遮蔽物により視界が遮られている場合は、お互いの存在を感知できない方が自然であろう。また、遥か遠くの歩行者や自分から遠ざかっていく歩行者に注意を向ける必要はない。以上の観点に基づき、本手法では、各歩行者は限られた対象のみに注意を向け認識するという仮定を設け、これを記憶モデルとして実装した。

まず、歩行者の前方に位置し、かつ一定時間内に対象の歩行者が自分の社会距離遠方相内に進入する場合に、対象歩行者を記憶に格納する(図3)。この時、歩行者が社会距離遠方相に進入するまでの時間が短いほど記憶内で優先順位の高い位置に格納する。また、既に社会距離遠方相内に進入している対象が複数存在する場合は、より近い距離に存在する対象を優先的に記憶モデルに格納する。記憶モデルに格納できる歩行者の人数には上限が定められており、衝突回避対象として優先度の高い歩行者のみを絞り込むことができる。そのため、より近い将来の衝突の回避に専念することが可能になり、衝突回避動作への遷移処理を高速化することができる。ただし、周囲の歩行者の位置関係は常に変化しているため、各歩行者の記憶は一定時間ごとに更新される。

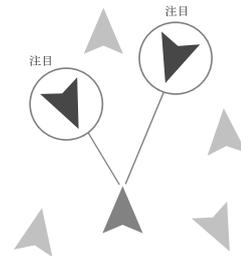


図3 記憶モデル

2.3 パラメータの決定方法

集団のシミュレーションを実現するにあたり、歩行者が回避行動に遷移するタイミングを決定する判断材料が必要となる。すなわち、パーソナルスペースの大きさや記憶の更新間隔、相手の動作をどのくらい先まで予測するかといった値を具体的な数値として決定する必要がある。そこで、本手法を実装する際の各種パラメータの最適な値を Simulated Annealing (以後 SA) を用いて決定する。

SAではパラメータ値の良し悪しを評価するために、コスト関数を使用される。本手法では、以下に記述する歩行者の挙動に対する評価基準を設定した。

歩行者同士の衝突を回避させるため、歩行者同士が衝突した際に負の報酬を与えるようにした。しかし、歩行者同士が衝突回避に専念しすぎると、なかなか目的方向に到達できない可能性がある。そこで、歩行者が目的方向に移動する度に正の報酬を与え、逆に歩行者が目的方向から遠ざかると負の報酬を与える。

実装では各歩行者の目的方向ベクトルを $targetV$ 、一定時間の移動ベクトルを $moveV$ とすると、コスト関数による評価値 $cost$ は以下の式(1)により更新される。なお、目的方向に近づいた際の報酬係数 w は5とし、歩行者同士が衝突した場合には-2000の負の報酬を与えるものとする。以下に $cost$ を計算する手順を示す。

$$cost' = cost + w \times |targetV \cdot moveV| \quad (w=5) \quad (1)$$

$$subject \ to \quad \begin{aligned} \|targetV\| &= 1 \\ \|moveV\| &= 1 \end{aligned}$$

$$if \quad collision = true \\ cost' = cost - 2000$$

社会距離近接相半径	150 [cm]
社会距離遠方相半径	320 [cm]
動作予測時間	5000 [ms]
記憶更新間隔	1500 [ms]

表1 SAによるパラメータの決定

表1にSAにより得られた各パラメータの値を示す。動作予測時間は他の歩行者の動作を最大何ミリ秒先まで予測するかを求めた値である。

3. 回避動作の生成

次に、歩行者同士の自然な回避動作を実現するための回避規則を提案する。

各歩行者は記憶モデルを参照し他の歩行者との衝突を予測すると、減速や回避行動に移ることにより衝突を回避する。回避行動は自然回避と緊急回避に分類され、それらの行動の選択は自分と相手との位置関係により決定される。

3.1 自然回避

実際の歩行者は通常、前もって緩やかに進路を変更し他の歩行者を回避する。そこで本手法では、各歩行者は一定時間内に社会距離近接相内に進入すると予想した歩行者に対して緩やかに進行方向を変え衝突を回避する。これを自然回避と定義する。複数の歩行者が社会距離近接相に進入する際には、最も近い将来衝突が予想される対象を自然回避する。

自然回避は左右のどちらかに進路を変更する。回避方向は回避対象の歩行者が社会距離近接相に進入すると予想される際の自分と相手の位置関係により決定される。ただし、自然回避をおこなう前に、回避の歩行軌道をシミュレートし、回避行動に移らない場合よりも近い将来に別の衝突が発生すると予測された場合には自然回避を中止する(図4)。

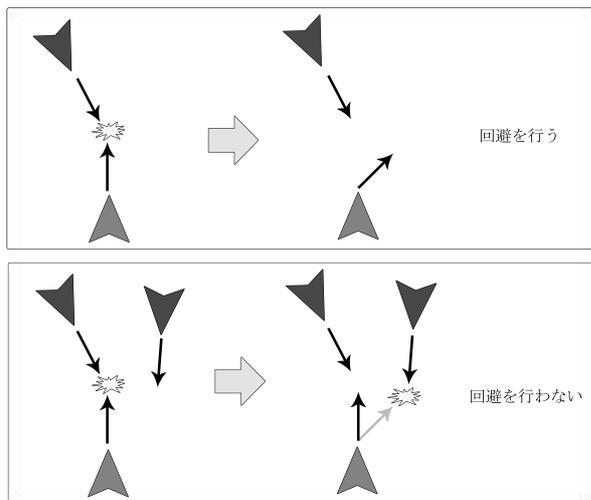


図4 自然回避

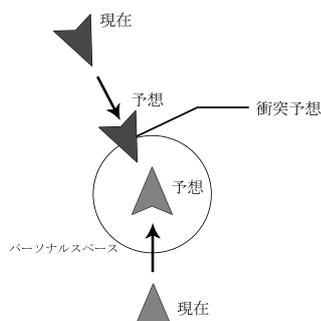


図5 衝突判定予測

実際の人間は他の歩行者と衝突するまでの時間を予測し、速度を制御するなどして衝突を回避する[6]。そこで、本手法では歩行者本人の移動ベクトルと他の歩行者の移動ベクトルから一定時間後までのそれぞれの歩行軌道を計算し、その間に自分のパーソナルスペース内に他の歩行者が進入するかどうかを判定する。もし、相手がパーソナルスペース内に進入する場合は、その時の位置関係と接触するまでの時間も同時に計算する(図5)。

3.2 緊急回避

緊急回避は早急に回避動作に移らなければ衝突する場合には取られる回避行動であり、他の歩行者が既に社会距離近接相内に進入している場合に用いる。複数の対象が社会距離近接相に進入している場合は、最も近い将来衝突が予想される対象に対して緊急回避が行われる。緊急回避時は自然回避よりも急激に歩行者の進行方向や速度が変化する。

緊急回避も自然回避と同様に、対象の歩行者との位置関係から回避動作の方向や種類を決定する。緊急回避では減速により衝突をやり過ごせる場合はそのまま減速する。もし相手が正面から接近してくるなど、減速により回避不能な場合は、左右方向へ急激に進路を変更し衝突を回避する(図6)。

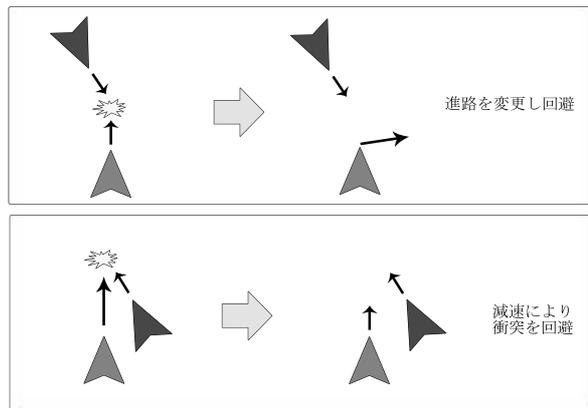


図6 緊急回避

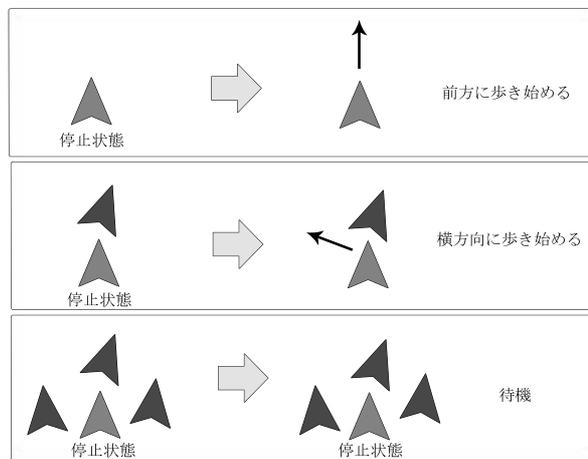


図7 停止状態から歩行へ

3.3 停止状態から歩行へ

速度制御や緊急回避により歩行者は歩行動作を停止する場合があります。その場合、歩行者は停止中も前方の視界から常に記憶を更新し、一定時間後には歩行動作に復帰しようとする。この時、前方に空間的な余裕があれば前方に歩行を開始する。また、前方に他の歩行者が存在し歩行動作に移れない場合は、左右方向を確認し横方向に歩き始める。左右を確認する場合は、横方向に歩き始めた場合の軌道をシミュレーションし、衝突が発生しないかどうか確認する。もし、横方向にも歩き出せないと判断した場合、ランダムな時間待機した後、再び歩行動作への遷移を試みる(図7)。

3.4 回避動作の終了

回避動作や減速動作により回避動作に遷移した歩行者は一定時間後に元の歩行動作に戻ろうとする。この時、元の歩行動作に戻った際の軌道をシミュレーションし、衝突が発生しないか調べる。衝突しないと判断すれば回避動作を止め、元の歩行動作に戻る。元の歩行動作に戻った場合に衝突が予想される場合は、回避動作を続けた場合の軌道をシミュレーションし、衝突までの時間が長い方の動作を選択する(図8)。

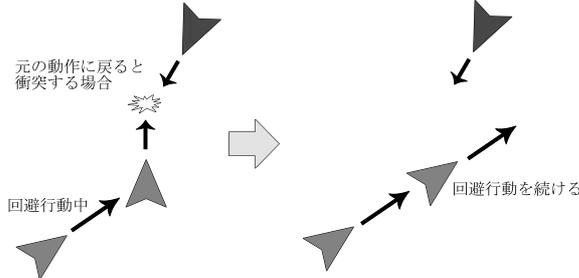


図8 回避行動の終了

4. 歩行の制御

本手法では群集全体の振る舞いを自然にするために個々の歩行者が集団の密度を認識し、適切な歩行速度を判断することによって集団の速度を制御する方法を提案する。また、集団の移動方向を制御するために、ベクトル場を使用する。

4.1 密度による速度制御

集団の密度が増加すると自分より遅い歩行者を追い越すのに十分な空間が得られなくなるなどの理由から、集団全体の平均歩行速度は図9に従い低下することが知られている[7]。

本手法では集団全体としての振る舞いを自然に表現するために、各歩行者の歩行速度を制御する方法を提案する。各歩行者は記憶モデルを更新する際に、自分の前方に存在する集団の密度を感知し、自律的に速度を制限する(図10)。この時、制限される歩行速度は図9のグラフに示す実測値に基づき、歩行者はこのグラフにより与えられた制限速度を超えないように歩行する。グラフの横軸は Fruin の提唱した指標に従い、一人あたりの占有面積を表す歩行者空間モジュール[7]と呼ばれる単位を使用する。

4.2 ベクトル場

本手法では集団の目標方向を指示するために Open Steer [1]と呼ばれる群集制御で導入された、任意の座標に対応するベクトル場により歩行者を制御する手法を用いる。歩行者は自分の座標に対応するベクトル場のベクトルに従い移動方向を決定する(図11)。ベクトル場は周遊や分岐、合流などの複雑な経路を設定することが可能であり、また複数のベクトル場を用いた集団ごとの移動方向制御や、動的に変動するベクトル場を使用した集団の移動方向制御ができる。

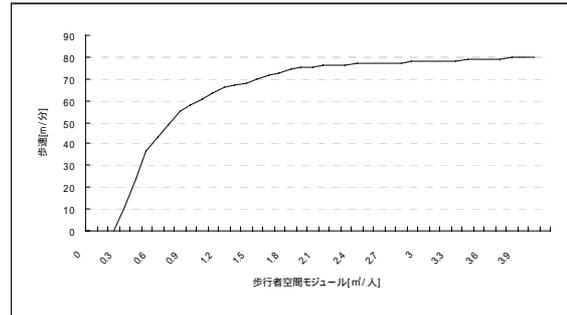


図9 密度と歩行速度

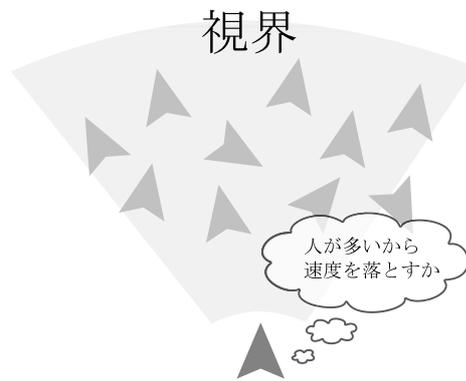


図10 速度制御

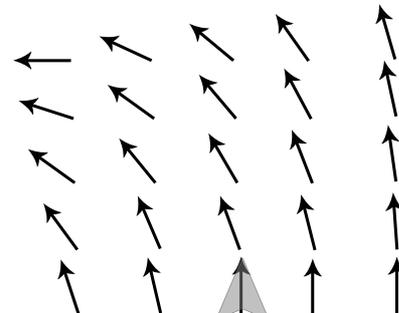


図11 ベクトル場

5. 歩行動作の生成

本手法を実装したシミュレータでは回避規則により得られた動作遷移に従い、歩行者の動作を生成する。歩行動作や回避動作の生成にはモーションキャプチャデータを使用した。ただし、データの数には限りがあるため、全ての動作をそのまま再現するのは不可能である。そこで、歩行と回避の動作データを組み合わせることにより新たな動作を逐次生成して歩行者の一連の動作を実現する。図12に実際に生成されたCG画像を示す。



(a)



(b)

図12 生成画像

5.1 回避動作への遷移

歩行者は衝突を回避する際に、歩行動作から回避動作へ遷移する必要がある。この時動作を急に切り替えようと姿勢が大きく変化し、動作にがたつきが生じる。そこで動作を遷移する際には比較的姿勢の近いフレーム同士を接続する[8]。また、新たな動作と元の動作を一定期間オーバーラップさせ、この間に Ease-In Ease-Out [9]と呼ばれる手法を用いて徐々にそれぞれの動作が使用される割合を変化させ、滑らかな動作遷移を実現する。

5.2 歩行動作の遷移

歩行動作は周期的な運動の繰り返しであるため、一周期分の歩行動作データを繰り返すことにより連続した歩行動作を生成することができる。ただし、動作データの繰り返し部分で姿勢の差が大きいと歩行動作にがたつきが生じてしまう。また、歩行動作の軌道が僅かでも曲がっていると、同じ歩行動作を繰り返した際に歩行者の軌道は徐々に曲がってしまう。そこで、一周期分の歩行動作データを補正しておくことにより、これらの誤差を予め取り除いておく。

また、周期的な運動により移動する動作には走行動作や横歩き、および後退なども含まれる。これらの周期的な動作はタイミングを合わせて動作遷移することにより、比較的近い姿勢で動作を切り替えることができる。

5.3 速度制御

それぞれの周期的な動作データは1周期に要する時間が異なる。そのため複数の動作データにより歩行動作を生成する際、動作データ間で歩行周期のタイミングを合わせる。この時に、歩行周期の長さを制御すると歩行速度を制御できる。ただし、歩行周期だけで速度制御するのは不自然であるため、歩幅の異なる歩行動作や、小走り、走行などの動作を適宜組み合わせることにより歩行速度を制御する。

次に静止状態への遷移について説明する。静止状態は歩行動作の周期の中には存在しない姿勢である。そこで、静止状態と歩行状態との間を遷移させるための動作データを使用する。歩行動作から静止状態に遷移する際、右足を下ろして静止する場合と、左足を下ろして静止する場合がある。この時、歩行動作の状態に応じ、どちらの動作を経て静止状態に遷移するか決定する。

静止状態から歩行状態に遷移する際は、右足から歩き始める場合と左足から歩き始める場合の動作を用意し、静止状態からランダムにどちらの動作に遷移し歩行を開始する。

6. 評価

6.1 記憶モデルの有効性

記憶モデルでは少数の歩行者のみを回避対象として扱うために、回避行動を求める際の計算を減らすことができる。図13に記憶モデルが有効な場合と無効な場合の軌道予測に関する実行速度の比較を示す。

また、記憶モデルにより歩行者の自然な振る舞いを生成させることが可能である例を図14に示す。記憶モデルが無効な場合は、歩行者はフィールド上の全ての歩行者を認識しているため、視界に入っていない歩行者を前もって回避してしまう。それに対し、記憶モデルが有効な場合では視界に入っていない歩行者を認識することができないため、出会い頭にあわてて停止する様子を表現することができる。

6.2 流動係数による評価

本手法の有効性を示すために、シミュレータにより生成された歩行者集団の振る舞いと、実測値とを比較した。実験環境は図15に示す幅4m、長さ無限長の

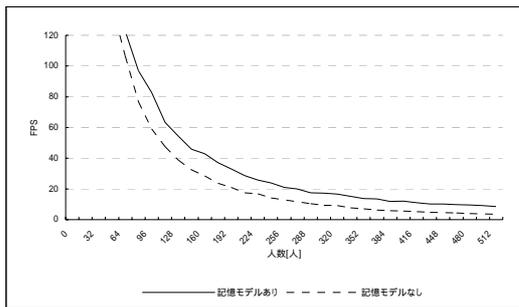


図 1 3 処理時間の比較 (AMD® Athlon® XP 2500+)

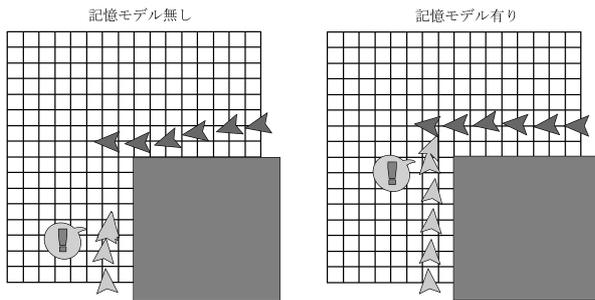


図 1 4 回避タイミングの比較

通路を想定し、集団密度を変化させながら平均歩行速度と流動係数を測定する。図の左右部分がグループする構造になっており、終端部においても記憶モデルや衝突判定がおこなえるように実装されている。

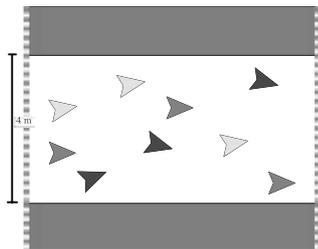


図 1 5 シミュレーション環境

出現する歩行者の通常の歩行動作は、次の 3 種類のモーションキャプチャデータを用いた。

- ・通常歩行 (80 [m/分])
- ・早い歩行 (110 [m/分])
- ・遅い歩行 (50 [m/分])

また、3 種類の歩行者を均等確率で出現させ、平均歩行速度 (80 [m/分]) を、実際の人間の平均歩行速度とほぼ一致させた。ただし、歩行者の進行方向は一方方向とし、各歩行者が 4 m 歩くごとの歩行速度と流動係数を 3 分のシミュレーション時間にわたって算出した。

流動係数とは単位時間、単位幅あたりの歩行者の流動量である。往来する歩行者の人数が増加するほど流動係数は増加する。しかし、集団の密度が増加するに伴い集団全体の平均歩行速度が低下するため、一定以上密度が高くなると流動係数は減少に転じる。さらに高い密度になると流動係数は 0 になることが実測値により知られている [7]。本手法を実装したシミュレータにより生成された集団の流動係数を実測値と比較した結果を図 1 6 に示す。このグラフにより提案手法が実際の集団の振る舞いに十分に近いことが確認できる。

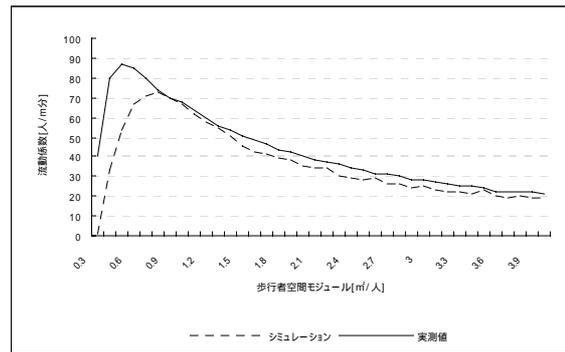


図 1 6 流動係数

7. むすび

本研究では自然な集団歩行動作を生成するための手法を提案した。まず、SA により歩行者のパーソナルスペース半径などのパラメータを決定し、回避規則を使用することにより歩行者同士の自然な衝突回避動作を生成した。この時、記憶モデルを使用することにより、高速に回避処理を計算することが可能となった。また、集団の密度により各歩行者の歩行速度を制限し、自然な集団の振る舞いを実現した。提案手法を実装したシミュレータでは、選択された各行動に対してモーションキャプチャデータを適宜組み合わせることにより、動作を生成する。シミュレータにより生成された集団の振る舞いと、実測データを比較することにより、本手法の有効性を示した。

今後は実際に集団の歩行の様子をビデオカメラ等で撮影して観察し、集団制御の精度を向上させると共に、その有効性を多面的に検証していくことを課題とする。

8. 謝辞

本研究は、日本学振興会・科学研究費・基盤研究(C)の援助を受けて実施された。また、この一部は文部科学省・21世紀 COE プログラム「インテリジェントヒューマンセンシング」と「東海産業技術振興財団」の援助を受けている。

文献

- [1] Craig W. Reynolds "Steering Behaviors For Autonomous Characters" 1999
- [2] 鶴沼宗利, "CGのための人間行動シミュレーション", 1992
- [3] <http://www.massivesoftware.com/>
- [4] Demetri Terzopoulos, Xiaoyuan Tu and Radek Grzeszczuk "Artificial Fishes: Autonomous Locomotion, Perception, Behavior, and Learning in a Simulated Physical World" 1994
- [5] Edward T. Hall "The Hidden Dimension", Garden City, N.Y.: Doubleday, 1966
- [6] Lee, D. N., Young, D.S., Rew, D. "How do somersaulters land on their feet? Journal of Experimental Psychology", pp1195-1202, 1992
- [7] John J. Fruin, "PEDESTRIAN Planning and design", Chapter Three - Traffic and Space Characteristics of Pedestrians, 1979
- [8] Lucas Kovar, Michael Gleicher, and Frederic Pighin, "MotionGraphs", ACM Transactions on Graphic, 21 (3), pp. 473-482, 2002.
- [9] Rick Parent "Computer Animation Algorithms and Techniques", pp68-96, 2002