

2003年度修士論文

個人行動をベースにした歩行モデルと
高密度シミュレーション

東京工業大学大学院
情報理工学研究科 数理・計算科学専攻
学籍番号: 02M37064

岡田 公孝

指導教官
高橋 幸雄 教授

2004年2月

目次

1	はじめに	3
2	ベースモデル	5
2.1	歩行モデルと歩行者パラメータ	5
2.1.1	人体円	5
2.1.2	歩行速度	5
2.1.3	目的地	6
2.1.4	パーソナルスペース	6
2.1.5	情報空間	7
2.2	最適速度ベクトルの決定	8
2.2.1	衝突領域	8
2.2.2	移動可能領域と速度ポテンシャル	9
2.2.3	最適速度ベクトル	10
3	ベースモデルの問題点とその改良	11
3.1	改良案 1: 周辺密度による優先権 A	11
3.1.1	高密度判定	11
3.1.2	優先権 A	12
3.1.3	問題点	13
3.2	改良案 2: アイコンタクトによる優先権 B	13
3.2.1	neighbor	14
3.2.2	優先権 B	14
3.2.3	問題点	16
3.3	改良案 3: 速度ベクトル認識補正	16
4	高密度歩行アルゴリズムを用いた歩行モデル	18
4.1	モデル 1	18
4.2	モデル 2	18
4.3	モデル 3	19
4.4	モデル 4	19
4.5	モデル 5	20
5	シミュレーション実験と歩行流の特性量	21
5.1	シミュレーション実験	21
5.1.1	シミュレーションの流れ	21
5.1.2	測定方法	22
5.2	歩行流の特性量	22
5.2.1	歩行速度	22
5.2.2	歩行者密度	23
5.2.3	歩行流率	23
5.3	特性量間関係式	24
5.3.1	歩行速度・歩行者密度間関係式	24
5.3.2	歩行流率・歩行者密度間関係式	25

6	実験結果	26
6.1	2方向モデル	26
6.2	1方向モデル	30
6.3	回帰分析	32
7	今後の課題	35
7.1	パラメータ設定・推定	35
7.2	計算時間	35
7.3	グループ歩行	36
7.4	アプリケーションツール化	36
8	おわりに	37
8.1	適合性	37
8.2	簡潔性	37
8.3	適用性	38
8.4	説明性	38
A	流体力学的理論	42
A.1	交通流の運動方程式	42
A.2	交通流の連続方程式	43
A.3	$V-K$ 関係式	43
A.4	各特性量の一意性	44
B	シミュレーションと応用例	45
B.1	回避・追従・追越のシミュレーション	45
B.2	横断歩道・スクランブル交差点のシミュレーション	46
B.3	障害物のある歩行空間でのシミュレーション	62
B.4	混雑した歩行空間でのシミュレーション	62
	B.4.1 歩道橋でのシミュレーション	62
	B.4.2 初詣のシミュレーション	66

1 はじめに

歩行モデルに関する研究は、心理学や交通工学、建築学などを中心に行なわれているが、その多くは1人1人の歩行者の個人情報を見捨てたマクロ的な視点での研究である。例えば [38] では横断歩道上にいる歩行者の歩行経路を考慮し、帯化指標と呼ばれる歩行流の帯状化の形成度を与えることによって歩行流を評価している。また [22] では各歩行者に正の磁極を、目的地に負の磁極を与えることによって、磁気モデルと運動方程式を用いたモデル化を行なっている。[5] では歩行空間をグリッド化し、視野内の entity との位置関係から次に進むべきグリッドを見つけ、歩行速度からグリッドの占有時間を決定している。このように多くの歩行モデルに関する研究が存在するが、これらは歩行領域をメッシュ状に分割したり、歩行空間をネットワークとして捉えたりしたものがほとんどである。そのため歩行者同士の衝突や回避等のミクロ的な視点から見た挙動についてはあまり考慮されてこなかったばかりか、どのような要因が歩行者行動に大きな影響を及ぼしているのか、特に高密度下ではどのような要因により歩行流率が下がるのかといったことを知ることができないでいた。

それに対して本研究のベースとなる歩行モデルは [44] で提案され、[23][24] で改良を重ねてきたもので、メッシュの制約を取り除き、歩行者同士の衝突や回避等に注目して歩行モデルをミクロ的な視点から考えている。本論文では [24] で扱うモデルをベースモデルと呼ぶことにする。ベースモデルでは、各歩行者は人間の視野に相当する情報空間を考慮しながら、その中に位置する歩行者の歩行経路を前時点の速度ベクトルから予測することで、衝突の可能性を微小時間毎に判断する。そして歩行のしやすさを速度ポテンシャルとして与え、衝突領域外で最もポテンシャルの高い速度ベクトルに従って歩行する。また [14][30] では [24] と似た発想に基づいてモデル化されているが、これらは衝突そのものではなく、歩行時に受ける心理的ストレスを用いて歩行者の挙動を表現している。ストレスとして、他者が近くにいた場合に受ける他者ストレスと目的地への最短経路からずれた場合に受ける目的地ストレスの2つを主に考慮し、各歩行者はそれらを足し合わせて得られる心理的ストレスが最も低い地点へ移動する。ベースモデルや [14][30] の歩行モデルは、モデルの単純化という目標から歩行者の個人情報を表すパラメータの数を最小限に抑えているにも関わらず、シミュレーションでは追従や回避等のミクロ現象だけでなく、歩行流の隊列化に代表される歩行流の変化といったマクロ現象までも表現することができている。さらには単純な歩行空間ばかりか、駅改札口などの複雑な歩行空間でのシミュレーションに対しても適用でき、建築設計や都市開発などの分野への応用も期待されている。

しかしこれらの既存モデルはみな歩行者密度がかなり低いケースを想定しているため、高密度下での歩行まで詳細に扱うことができていない。例えば本研究のベースモデルでは歩行者密度が $1.0[\text{ped}/\text{m}^2]$ で限界となり、これ以上歩行者数を増加させると対向する歩行者同士が互いに壁を作り合い、やがて膠着状態に陥ってしまう。少人数であってもいったん膠着状態に陥ってしまうと、混雑の解消が極めて困難となる。そのため上記のような応用までには至っていないのが現状である。

そこで本研究では対向者の行動を予測するための方法をいくつか考案し、シミュレーションによってそれらの効果を検討した。その結果、相手の自由歩行速度ベクトルを基にした行動予測とアイコンタクトによる優先権をモデルに導入することにより、歩行者密度がかなり高いケースでも歩行者をスムーズに流せることがわかる。特にベースモデルに比べて予測の精度を高めたことで、混雑時における歩行者の挙動が大きく改善されている。

実際にこれらの効果を数量的に示すため、[23][24] で行なったのと同様に、シミュレーションによって作り出した歩行流に対してその特性量を測定し、その解析を行なう。具体的には、歩行流の特性量である歩行速度・歩行者密度・歩行流率のデータをシミュレーション実験から採取し、これらを用いて歩行流において成立すべきそれらの間の関係式についての評価を行なう。その結果、定性的には実際の歩行流を観察して得られた関係式と同様の関係式が得られ、それらは高い相関

を示すことがわかる。さらに $2.5[\text{ped}/\text{m}^2]$ 程度の歩行者密度でも歩行者をスムーズに流せることが確認される。このことから歩行者行動において相手の動向を予測することが非常に重要な要因であることがわかる。

本論文の構成は次の通りである。2 節で本研究のベースモデルの概要を紹介する。3 節ではベースモデルの問題点を挙げるとともに、それらの問題点を踏まえた上での改良案を示す。そして 4 節では 3 節で述べた改良案を組み込んだモデルを示す。また 5 節ではそれらのモデルに対して歩行流を数値的に解析するためのシミュレーション実験方法を説明し、さらに既存の研究によって示された実測値に基づく歩行流の特性量間の関係について紹介する。6 節では 4 節で示したモデルを用いたシミュレーション実験の結果とそれに対する考察について述べ、最後に 7 節で今後の課題について述べる。

2 ベースモデル

歩行者個人の挙動が歩行流全体に及ぼす影響を見るために、本研究では個人行動をベースにした歩行モデルを採用する。これまでに提案されたそのようなモデルには例えば [44][14][30] などがあるが、ここでは本論文で用いた歩行モデルの基となったモデル (ベースモデルと呼ぶ) についてまず説明する。そしてこのベースモデルに改良を加えたものが本モデルである。

2.1 歩行モデルと歩行者パラメータ

ベースモデルはミクロ的な視点からモデルを構築しているため、各歩行者は個人情報としての歩行者パラメータを持つ。通常そうしたパラメータは多数考えられるが、モデルの単純化という目標から以下の 8 種類という最小限のパラメータで歩行者を特徴付けている。

- 位置座標: (x, y)
- 速度ベクトル: (u, v)
- 人体円半径: r
- 自由歩行速度: V_s
- 最大速度比: k
- 目的地: PQ
- パーソナルスペース比: c
- サーチ距離係数: τ

ベースモデルでは微小時間毎に各歩行者がその時点で最適な速度ベクトルを決定し、その速度に従って微小時間歩行する。つまり速度ベクトルは時間とともに変化し、それによって位置座標も変化する。そのようにして一連の歩行挙動を得ている。以下ではベースモデルの特徴に沿いながら、その他の 6 種類のパラメータについて説明していく。

2.1.1 人体円

人体をモデル化する際、通常人体を真上から見て表現し、楕円や円弧を合成したもの、あるいは三角形などで表現するのが適当であると考えられる。しかしモデルをより単純化するという目標と計算時の便宜から、ベースモデルでは半径 r の人体円として表現している。

2.1.2 歩行速度

一般に歩行速度は混雑度との関係が非常に強く、混雑していれば遅くなり、そうでなければ速くなる。しかし個々の歩行者には自分にとって歩きやすい速度があり、周囲に何も無いような状況でも無理に加速しないケースが多い。いわゆる自由歩行である。このときの速度を自由歩行速度と呼び、 V_s と表す。

また歩行者は、他の歩行者との衝突を避ける場合など瞬間的に加速することがある。このときの最大の歩行速度 V_{max} を最大歩行速度と呼び、自由歩行速度に対する最大歩行速度の比 k を最大速度比と呼ぶ。すなわち $V_{max} = kV_s$ が成り立つ。ただし $1 < k < 2$ とする。

2.1.3 目的地

歩行者は意識的にしろ無意識的にしろ、ある場所を目指して歩行している。言わば、それが目的地である。目的地を点として歩行する人はほとんどいないと思われ、ある範囲を持つのが一般的である。そこでベースモデルでは2点 $P(p_x, p_y)$ 、 $Q(q_x, q_y)$ を与え、それらを結ぶ線分 PQ を目的地として考える。

また歩行者の経路として、自由歩行時には原則として目的地への最短経路を選択する。ベースモデルでは自由歩行の原則に従い、各歩行者は図1のような経路を選択するものとしている。

さらにここで考える目的地とは、最終的に辿り着くべき目的地だけでなく、その過程における仮目的地も含んでいる。つまり仮目的地を変更していくことによって、カーブや交差点などがある複雑な歩行空間に対応することが可能となる。

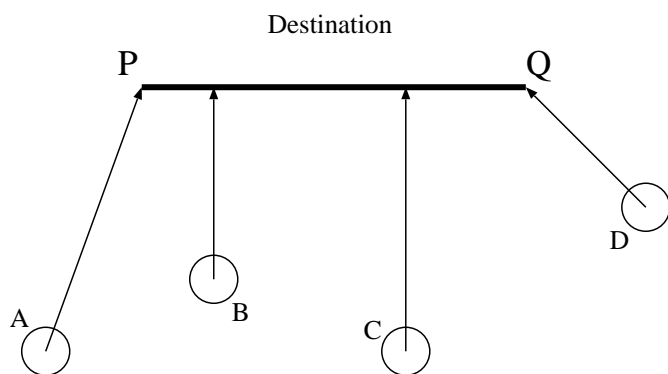


図 1: 目的地と自由歩行

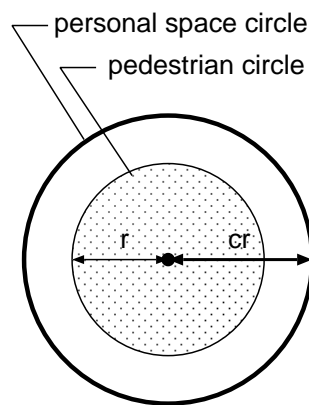


図 2: パーソナルスペース

2.1.4 パーソナルスペース

他者が入り込むと不快感を感じるような、歩行者を取り巻く目で見えない空間をパーソナルスペースと呼ぶ。通常パーソナルスペースは形状が楕円であったり菱形であったり、また円であったとしても人の位置が中心にないようなもの考えることが多いが、ここでもモデルの単純化のために図2のような人体円に対する同心円として考えている。ただしパーソナルスペース内で感じる不快感は一様とする。

また人体円半径に対するパーソナルスペース円半径の比をパーソナルスペース比と呼び、 $c(\geq 1)$ で表す。このときパーソナルスペース円半径は cr である。パーソナルスペース比には上限があるものとし、その値 c_{max} を最大パーソナルスペース比と呼ぶ。一般に混雑している状況では、相手とぶつかることは避けようもなく、いちいち気にしない。そしてそのような場合、当然歩行速度が小さくなる。よってパーソナルスペースの大きさは間接的に歩行速度に依存すると考えられる。そこで前時点の速度ベクトルを (u, v) とすると、歩行速度 V_p は

$$V_p = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

となり、さらに

$$\gamma = \begin{cases} 1 & \text{if } V_s \leq V_p \leq kV_s \\ V_p/V_s & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

を定める。これを用いてパーソナルスペース比を以下のように表すこととする。

$$c = (c_{max} - 1)\gamma + 1 \quad (3)$$

このとき、 $\gamma = 0 \Rightarrow c = 1$ (パーソナルスペース円は人体円と一致)、 $\gamma = 1 \Rightarrow c = c_{max}$ となる。

2.1.5 情報空間

各々の歩行者は前方にいる他の歩行者を認知すると、衝突の危険を察知して回避行動を選択する。しかし前方にいる歩行者全てから影響を受けているわけではなく、ある空間に入った歩行者に限定している。そこで図3のような情報空間と呼ばれる、人間の視野に相当する空間を定める。つまり情報空間内にいる歩行者のみが自分の歩行に影響を与える可能性があると考えられる。形状については円や扇形、長方形、菱形など、いろいろなものが考えられ提案されているが、ベースモデルでは以下の理由から中心や半径が歩行速度に依存するような円としている。

- 混雑しているときはごく近くしか見渡さない
- 極端に混雑しても完全に停滞することはない
- 計算量の軽減

歩行速度が小さいときには情報空間の大きさも小さくとり、中に入る歩行者数を制限している。このように連動しないと、他の歩行者から受ける影響が大きくなり過ぎ、停止し続ける可能性が高くなってしまふ。ベースモデルでは情報空間の中心 (x_d, y_d) 、半径 d は

$$x_d = \tau(2\gamma + 1)u_{opt}/6 \quad (4)$$

$$y_d = \tau(2\gamma + 1)v_{opt}/6 \quad (5)$$

$$d = \tau(2\gamma + 1)V_s/6 \quad (6)$$

で与えるものとする。ここで τ はサーチ距離係数と呼ばれ、どれだけ先の時間までの範囲を認識するかというパラメータである。つまり自由歩行時には τV_s だけ前方の歩行者まで認識することができる。また (u_{opt}, v_{opt}) は自由歩行時の速度ベクトル自由歩行速度ベクトルを表し、以下を満たす。

$$u_{opt}^2 + v_{opt}^2 = V_s^2 \quad (7)$$

図3の状態では歩行者Aの速度が自由歩行速度以上 ($\gamma = 1$) であればB~Eを全て認識することになるが、停止した状態 ($\gamma = 0$) であればBしか認識しないことになる。

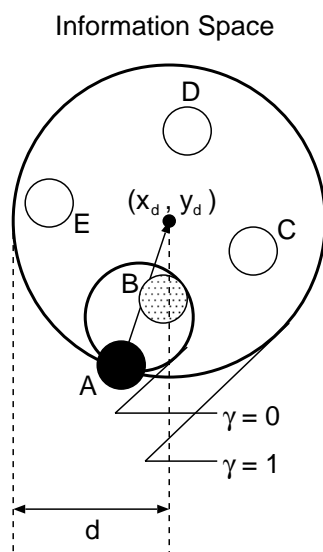


図3: 情報空間

2.2 最適速度ベクトルの決定

各歩行者は、歩行中絶えず前方の歩行者との衝突の危険性を探る。それを認識した全歩行者に適用することで、速度ベクトルに対する衝突領域を速度平面上で見つける。そして微小時間毎に求めた衝突領域外におけるその時点での最適な速度ベクトルを求め、それに従って歩行する。

2.2.1 衝突領域

歩行者 i, j の位置座標を $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ 、速度ベクトルを $(u_i, v_i), (u_j, v_j)$ とすると、シミュレーションクロックに対して十分大きな時間 t 後の i, j の位置座標はそれぞれ $(x_i + u_i t, y_i + v_i t), (x_j + u_j t, y_j + v_j t)$ となる。 i, j のパーソナルスペース円半径をそれぞれ $c_i r_i, c_j r_j$ とすると、 i と j が衝突する、つまりパーソナルスペースが交わるということは、 t に関する 2 次方程式

$$\{(x_i + u_i t) - (x_j + u_j t)\}^2 + \{(y_i + v_i t) - (y_j + v_j t)\}^2 = (c_i r_i + c_j r_j)^2 \quad (8)$$

$$(u^2 + v^2)t^2 + 2(xu + yv)t + (x^2 + y^2 - c^2 r^2) = 0 \quad (9)$$

が $t > 0$ で解を持つことと同値である。ただし、 $x = x_j - x_i, y = y_j - y_i, u = u_j - u_i, v = v_j - v_i, cr = c_i r_i + c_j r_j$ としている。 t に関する 2 次方程式 (9) における判別式を D とすると、

$$\begin{aligned} D/4 &= (xu + yv)^2 - (u^2 + v^2)(x^2 + y^2 - c^2 r^2) \\ &= c^2 r^2 (u^2 + v^2) - (xv - yu)^2 \end{aligned} \quad (10)$$

となる。これが負となるように歩行者 i は速度ベクトルを変化させていく。

そこで歩行者 i は、現在位置を原点とする速度平面上における歩行者 j との衝突領域を求める必要がある。 $D = 0$ とおくと、

$$m = \frac{v}{u} = \frac{xy \pm cr \sqrt{x^2 + y^2 - c^2 r^2}}{c^2 r^2 - x^2} \quad (11)$$

となる。これは衝突領域の境界の傾きを表している。歩行者 i と j のパーソナルスペース同士が重なっていないことが仮定されているので、式 (11) の根号の中は非負となる。よって m は実数となり、以下のような境界の式を得る。

$$v_i = m(u_i - u_j) + v_j \quad (12)$$

歩行者 i, j の位置をそれぞれ I, J とすると、実際に求めるアルゴリズムは以下のようになり、速度平面上の衝突領域は図 4 のようになる。

- <1> 歩行者 i の位置を歩行者 j の速度で単位時間移動させ、 I' とする
- <2> 歩行者 j の単位時間後の位置 J' を考える
- <3> J' を中心とした半径 cr の円を考える
- <4> I' から J' を中心とした円に接線を引く (式 (12) に相当)
- <5> 接線で囲まれた図 4 の網かけ部分が衝突領域となる (便宜上、境界は含まない)

歩行者 i がここで求めた領域に終点が入るような速度ベクトルで歩行し続け、歩行者 j もそのままの速度ベクトルで歩行し続けた場合、いつかは必ず両者が衝突する。この作業を情報空間内の全歩行者に対して行ない、それぞれの衝突領域を合成することによって最終的な衝突領域を得る。

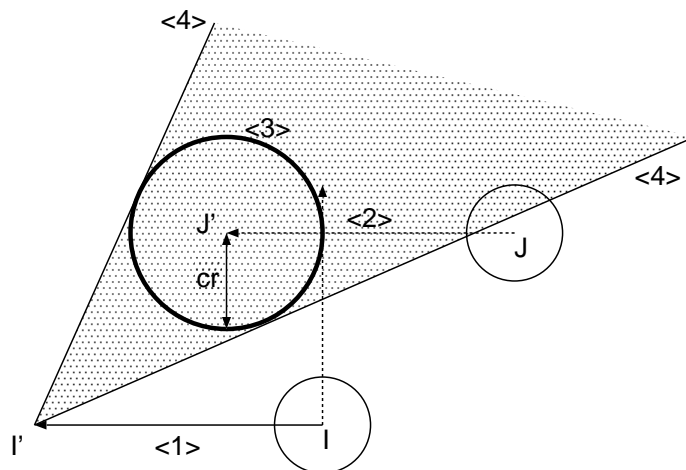


図 4: 衝突領域の求め方

2.2.2 移動可能領域と速度ポテンシャル

歩行者は、移動しないことを意味する原点 O を含んだ移動可能領域と呼ばれる円形の空間を速度平面上に持つ。移動可能領域は選択可能な速度ベクトル (の終点) の集合である。この移動可能領域内に、歩行のしやすさを表す速度ポテンシャル s を導入する。自由歩行速度ベクトル、最大歩行速度ベクトルの終点をそれぞれ A 、 B とし、 $O(s=0)$ 、 $A(s=1)$ 、 $B(s=k)$ のように各点の速度ポテンシャルを定める。さらに OB の中点を $C(s=k/2)$ とし、 C を中心とした O を通る円を移動可能領域の境界とする。そして移動可能領域内に図 5 のようにポテンシャル円を描く。移動可能領域は、 $s = k/2$ のときのポテンシャル円の境界とその内部と言い換えることができる。

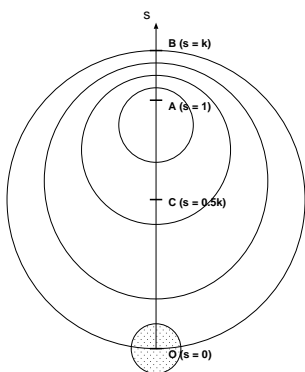


図 5: ポテンシャル円

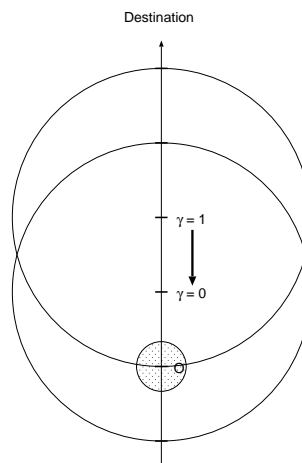


図 6: 移動可能領域の変化

混雑した状況では当然自由歩行することができず、むしろ真横や時には後方へ移動することも考えられることから、各歩行者の移動可能領域 (ポテンシャル円) は自由歩行速度に対する速度の比 γ によって図 6 のように変化するものとする。ここでは速度ポテンシャル s のポテンシャル円の中心 (u_s, v_s) は、

$$u_s = u_{opt} \frac{\gamma + 1}{2} s \quad (13)$$

$$v_s = v_{opt} \frac{\gamma + 1}{2} s \quad (14)$$

で与えるものとする。またポテンシャル円半径の $r(s)$ については歩行速度に依存せず、以下の式で与えられ、グラフを描くと図7のようになる。

$$r(s) = \frac{R}{1 - \frac{k}{2}}(1 - s) \quad \left(\frac{k}{2} \leq s \leq 1\right) \quad (15)$$

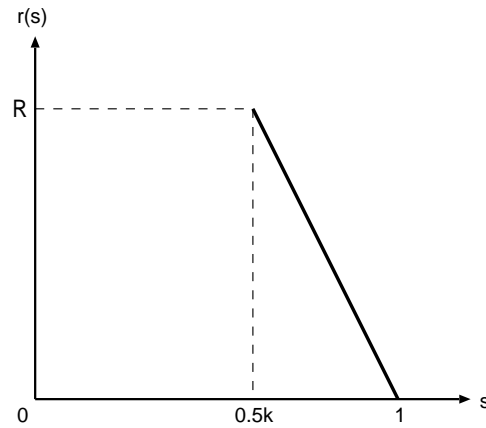


図 7: ポテンシャル円の半径のグラフ

ただし R は移動可能領域の半径を表し、 $R = \frac{k}{2}V_s = \frac{1}{2}V_{max}$ である。こうして描かれた同一円周上の速度ポテンシャルは一定となっている。

2.2.3 最適速度ベクトル

各歩行者は衝突領域外で最大となる速度ポテンシャルの速度ベクトルを最適速度ベクトルとして選択する。ただし移動可能領域が全て衝突領域で覆われてしまった場合、どの速度ベクトルを選択してもいつかは衝突してしまうため、その場に停止することを選択する。つまり最適速度ベクトルは零ベクトルとなる。全ての歩行者が最適速度ベクトルを選択した後、シミュレーションクロックである Δt (微小時間) だけこの速度で歩行する。これを繰り返すことで一連の歩行挙動が得られる。

3 ベースモデルの問題点とその改良

前節で紹介した歩行モデルは、個人情報としてのパラメータを最小限に抑え、ミクロ的に構成した非常に単純なモデルである。これは比較的的低密度な状況を想定しているため、低密度状態では回避・追従など詳細な歩行挙動をうまく表現しているが、歩行者数が増大するにつれて対向者をスムーズに回避することができなくなる傾向にある。そしてスムーズに回避できない状況が続くと次第に対向する歩行者同士が壁を作り合うように立ちはだかり、膠着状態に陥ってしまう。少人数でもいったん膠着状態に陥ると、追従してきた歩行者も集団に飲み込まれて歩行者集団がどんどん膨れ上がり、解消するのは極めて困難となる。しかし現実には、混雑が増していったとしても歩行者が完全に停滞してしまうことはなく、少しずつでもその状況を打開していくはずである。

上述の現象から、ベースモデルの問題点として以下の点が挙げられる。

問題点 1: 情報空間内の歩行者を一様に見る

問題点 2: どんな場合でも他人よりも自分の歩行を優先する

問題点 3: 情報空間内の歩行者の動向に対する予測が不十分

問題点 4: 歩行者密度 $1.0[\text{ped}/\text{m}^2]$ 程度で膠着状態に陥る

問題点 5: いったん膠着状態に陥ると解消できない

下の 2 点は上の 3 点によって引き起こされる問題点であることから、上の 3 点を重点的に考慮する。以下ではこれらの問題点に対する改良案を示し、モデルへの導入を検討する。

3.1 改良案 1: 周辺密度による優先権 A

ここでは譲り合いの概念をモデルに導入することが混雑解消に繋がるのではないかと考え、そのためにも問題点 1 や問題点 2 を避けなければならないと考えた。特に問題点 2 に主眼を置き、優先権の概念を定義する。後述の優先権と区別するため、ここでは優先権 A とする。優先権 A は周辺密度が高密度であると判定された場合のみ発生するものとし、高密度下において優先権 A を持つ歩行者を優先歩行者、優先権 A を持たない歩行者を非優先歩行者と呼ぶ。優先歩行者に歩行経路を譲るために、非優先歩行者は高密度下では通常の歩行アルゴリズムとは異なるアルゴリズムによって速度ベクトルを決定する。こうすることで、高密度下では優先歩行者に歩行経路を譲り、流れをスムーズに保つことができるのではないかと考えた。高密度と判定されない歩行者は通常歩行者と呼ばれ、通常の歩行アルゴリズムに従って速度ベクトルを決定する。以下の流れによって優先権 A を定め、非優先歩行者の速度ベクトルを決定する。

3.1.1 高密度判定

ここでは周辺密度として、情報空間内の歩行者密度を使用する。歩行者 i の情報空間内に存在する歩行者の目的地方向に着目する。本モデルでは目的地を線分で与えているだけであり、厳密には方向という概念は存在しないが、ここでは便宜上以下のように方向を定める。

同方向 歩行空間内において、目的地が自分の目的地と同じ側にある

逆方向 歩行空間内において、目的地が自分の発生位置と同じ側にある

そこで歩行者 i の情報空間内に存在する同方向、逆方向、その他の歩行者数をそれぞれ $N_i^{(f)}$, $N_i^{(b)}$, $N_i^{(o)}$ とする。また合計の歩行者を N_i とする。

$$N_i = N_i^{(f)} + N_i^{(b)} + N_i^{(o)} \quad (16)$$

情報空間の面積を S_i とすると、歩行者 i の情報空間歩行者密度 K_i は次のように表せる。

$$K_i = \frac{N_i + 1}{S_i} \quad (17)$$

ただし分子の「+1」は歩行者 i 自身を表す。したがって K_a を一定の閾値とし、 $K_i > K_a$ のとき、歩行者 i の周辺は混雑しているとみなす。この場合に高密度歩行アルゴリズムを適用し、それ以外の場合は通常歩行アルゴリズムに従うものとする。

3.1.2 優先権 A

高密度歩行アルゴリズムが適用されるとき、情報空間内の歩行者の向きを考慮して優先権 A を与える。高密度でないと判定された場合は優先権 A は与えられず、通常歩行アルゴリズムに従うものとする。情報空間内の歩行者の目的地方向に注目し、 $N_i^{(f)} \leq N_i^{(b)}$ のときに優先権 A が歩行者 i に与えられるものとする。これは同方向に流れる歩行者数が少ないことを意味し、少数派を先に流すことによって混雑を解消しようとする狙いがある。

譲り合い現象を表現するため、非優先歩行者は優先歩行者に歩行経路を譲ることを第一に考える。しかし問題点 1 を考慮して、情報空間内の全ての優先歩行者に対してではなく、最も距離の近い歩行者が優先歩行者の場合に適用することとする。さらに同方向に歩行する歩行者に対しては譲り合いを考慮する必要がないため、その対象を対向する優先歩行者に限定する。つまり非優先歩行者が歩行経路を譲ることを考える相手は、以下の条件

- 情報空間内の歩行者のうち最も距離が近い歩行者
- 対向する歩行者
- 優先歩行者

を全て満たす歩行者となる。

高密度状態において非優先歩行者 i は上の 3 条件を満たす優先歩行者 j に対して以下のアルゴリズムを適用し、 j がスムーズに歩行できるように歩行経路を譲る。

- (1) 情報空間内の歩行者のうち、歩行者 i と最も距離の近い歩行者 j が対向する優先歩行者かどうか判断する
- (2) 歩行者 j が対向する優先歩行者の場合、 j の自由歩行速度ベクトルに垂直でかつ歩行者 j と同じ大きさの速度ベクトル (の候補) を選択する
- (3) 候補となる 2 本の速度ベクトルのうち、歩行者 j からの距離が遠くなる方を採用する

図 8 では優先歩行者 j と対峙した非優先歩行者 i の挙動を表している。(2) において歩行者 j の長い矢印は自由歩行速度ベクトルを表しており、これに垂直な 2 本の速度ベクトルが候補となる。この図の場合は (3) の速度ベクトルが採用される。

混雑した空間では他の歩行者と触れ合うことも覚悟した上で歩行すると考えられる。特に強引に突破を図る優先歩行者は、その優先歩行者に歩行経路を譲るであろう非優先歩行者との接触は時として避けられないことも多い。よって優先歩行者と非優先歩行者のパーソナルスペース比を最小の 1.0 とする。これはすれ違うときはお互いに身体が触れ合うことを意味する。このように設定することで混雑していてもより狭いスペースに割り込んでいき、自ら流れを作り出すことで混雑の解消を図る。

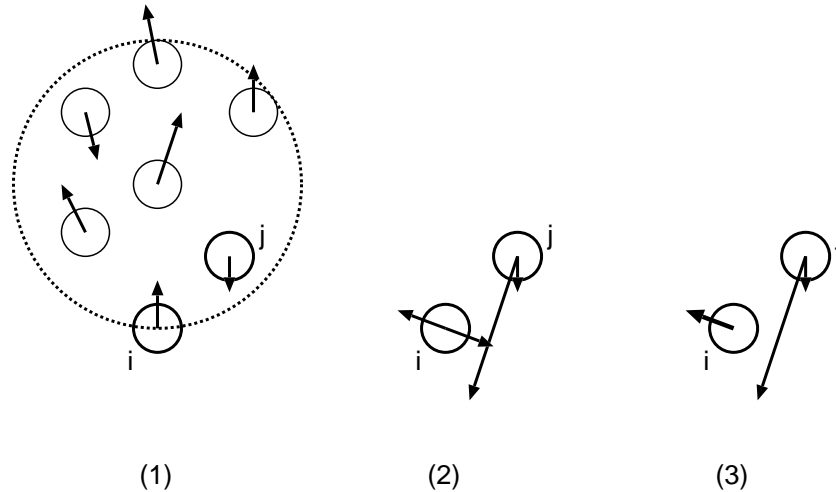


図 8: 非優先歩行者の挙動

3.1.3 問題点

しかしこの改良案にも問題点が存在する。そもそも情報空間は直前の速度に応じてサイズが変化する仕組みになっているため、速度が大きくなれば、情報空間も大きくなる。しかしある歩行者が情報空間内に入り込むと、その歩行者に対する衝突領域が大きくなり歩行可能な領域が大幅に制限される。それに伴って速度が急激に落ち込むため、次時点では情報空間のサイズが小さくなる。すると前時点で情報空間内に入り込んだばかりの歩行者が情報空間外となり、歩行可能な領域が大きくなることもある。このため再び速度が大きくなり、情報空間のサイズも大きくなるという現象が起り得る。これによって時点毎に高密度状態と通常状態を繰り返すため、それに伴って優先歩行者 (または非優先歩行者) と通常歩行者の状態を繰り返すことになる。さらには優先歩行者と非優先歩行者とがそのまま入れ替わることさえある。現実的にも優先権が歩行者間を往来する現象が起こるとは考えにくい。そして優先歩行者同士、あるいは非優先歩行者同士が対峙することもある。これらのことからさほど混雑の解消には繋がらないことも判明した。

以上より新たな問題点としては、

問題点 6: 優先権の対象者が明らかでない

問題点 7: 優先権が歩行者間を往来する

問題点 8: 優先権を断続的に持つ

といったことが挙げられる。そこでこれらの反省点を踏まえた改良案を考案する。

3.2 改良案 2 : アイコンタクトによる優先権 B

改良案 1 では譲り合いの概念をモデルに導入したが、問題点 6 から明らかなように必ずしも十分な効果が得られなかった。ここでも問題点 2 に主眼を置き、優先権 (上述の優先権 A と対比して優先権 B とする) の概念を定義するとともに、同時に問題点 6 も考慮していく必要がある。また問題点 7 は情報空間を用いて高密度判定を行なうことが原因で生じることからも、ある条件を満たす 2 人 1 組の歩行者がアイコンタクトによって優先関係を定めることとする。改良案 1 と同様に、優先権 B を持つ歩行者を優先歩行者、優先権 B を持たない歩行者を非優先歩行者と呼ぶ。優

先歩行者に歩行経路を譲るために、非優先歩行者は高密度下では通常歩行アルゴリズムとは異なるアルゴリズムによって速度ベクトルを決定する。こうすることで、高密度下では優先歩行者に歩行経路を譲り、流れをスムーズに保つことができるのではと考えた。どの歩行者とも優先関係を結んでいない歩行者を通常歩行者と呼び、通常歩行アルゴリズムに従って速度ベクトルを決定する。以下の流れにより優先関係を定め、非優先歩行者の速度ベクトルを決定する。

3.2.1 neighbor

問題点 1 にも挙げたように、高密度状態になってくると情報空間内の全歩行者に対して均等に注意を払っていることが問題となり、ある特定の 1 人の動向に注目し出すと考えるのが自然であろう。特に自分の歩行経路に大きな影響を与える歩行者への注目度が増してくる。この注目する相手の歩行者をneighborと呼ぶことにする。自分の歩行経路に対する影響度を測る尺度として移動可能領域内における衝突領域の面積を用い、情報空間内の歩行者のうちその大きさが最大の歩行者を neighbor と設定する。もし該当する歩行者が 2 人以上存在するときは、その中で距離の最も近い歩行者を neighbor と設定する。

ただし問題点 7 のように優先権が歩行者間を往来することは不自然であり、一度優先関係を定めたペアに関しては優先関係が解消するまでその関係を保ち続けるように設定すべきである。また問題点 8 は情報空間のサイズの変化によって引き起こされるが、こうした現象を解消するため、前時点で neighbor となっていた歩行者は実際に情報空間内に存在しなくとも情報空間内に存在するものとして扱う。

3.2.2 優先権 B

混雑した中で歩行する場合、実際には 1 人の歩行者 (neighbor) にしか注目していないことが多い。neighbor との回避を終えて、初めて次の歩行者に注目し出す。または neighbor との回避の途中で新たな歩行者が邪魔しようとしたとき、それまでの neighbor に代わって、その新たな歩行者に注目し出す。

しかしそのためにはお互いがスムーズに回避することが必要となる。問題点 2 の見地からも優先権 (優先権 B) をここでも導入し、お互いに相手を意識したときにのみ発生するものとする。まず歩行者 2 人を考える。この場合周囲の状況には直接的に関係せず、この 2 人の歩行者の関係のみによって優先関係を定める。具体的にはお互いの歩行者が他方の歩行者の neighbor となった瞬間に、お互いがアイコンタクトを交わしたとみなし、このとき一方が優先歩行者、もう一方が非優先歩行者となる。どちらの歩行者に優先権 B を与えるかについてはいろいろな考えがあるが、本モデルでは身体が大きい方に優先権 B を与えることとする。これは現実においても、身体の高い歩行者から威圧感を感じ、他者はこの歩行者を避けることがしばしば観察されることを考慮したもので、こうすると問題点 7 も自動的に解決することができる。

図 9 に歩行者 i, j の優先関係の定め方を示す。(1) ではそれぞれ自由歩行している。(2) の状況では歩行者 i の情報空間内に歩行者 j が入ったが、歩行者 j 自身は歩行者 i を認識すらしていないため、まだ優先権 B はどちらの歩行者にも与えられない。(3) のようにお互いが相手の情報空間内に入って初めて、優先権 B が与えられる。この場合は歩行者 i の方が人体円が大きいので優先歩行者となり、逆に歩行者 j は非優先歩行者となる。そして (4) の状況になるまでは、両者の情報空間の大きさに関係なく、与えられたままの優先関係が保たれる。

図 10 には図 9 の状態に歩行者 k を加えた場合の優先権 B の定め方を示す。(1) では図 9 と同じであるが、(2) では歩行者 k が大きな速度で近づいている。(3) では歩行者 j の情報空間内には歩行者 i しかいないため、歩行者 i と歩行者 j との間で優先関係のやり取りが行なわれる。しかし (4) で歩行者 k が歩行者 j の情報空間内に入り込む。このとき歩行者 j は、移動可能領域内で衝突領

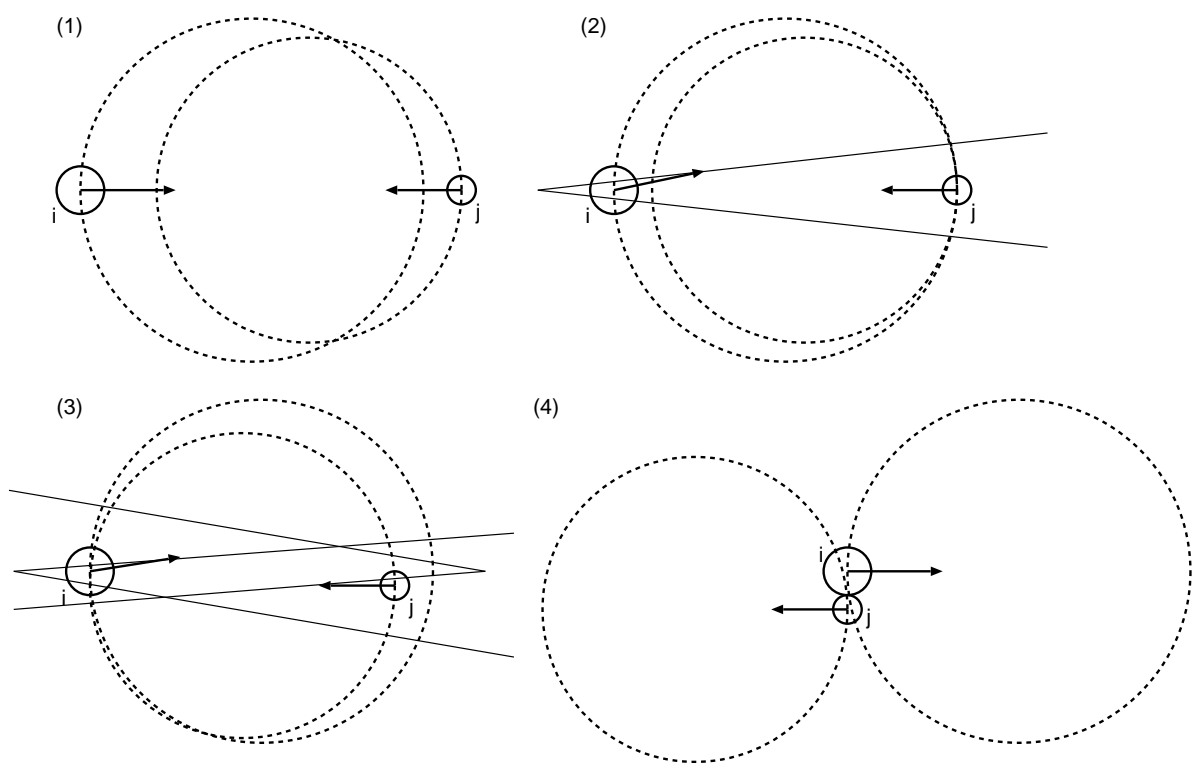


図 9: 優先権 B の与え方 (1)

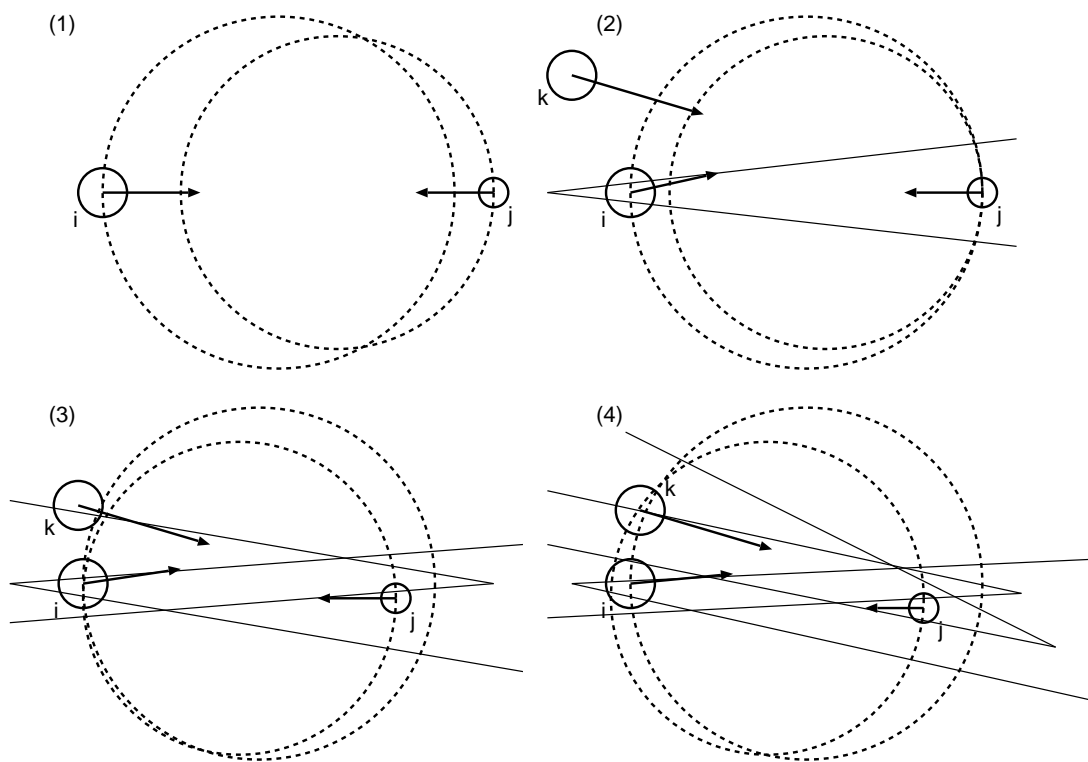


図 10: 優先権 B の与え方 (2)

域の占める面積がより大きい歩行者 k と優先関係のやりとりを行なう。よって歩行者 i との優先関係は解消される。

以上のように優先関係を定め、非優先歩行者は優先歩行者の歩行経路を譲るために振る舞う。また優先歩行者は非優先歩行者に対して優先的に歩行経路を占有する権利を持つこととなる。そこで優先歩行者は視野に入っているはずの非優先歩行者を、あたかも眼中にはないように振る舞うものとする。つまり優先歩行者は非優先歩行者との衝突領域を考慮しないことになる。逆に非優先歩行者は優先歩行者との衝突領域を考慮し、それゆえ衝突回避は非優先歩行者の速度ベクトルの決定に委ねられることとなる。

さらに改良案 1 同様、優先歩行者と非優先歩行者のパーソナルスペース比を最小の 1.0 と定める。特に優先歩行者が強引に突破することを許容しているため、このように定めることはごく自然であろう。

3.2.3 問題点

しかしこのままでも多少の問題は残る。このアルゴリズムでは、衝突回避や混雑の軽減は全て非優先歩行者に委ねられている。改良案 2 では非優先歩行者が優先歩行者に歩行経路を譲ることによって、高密度下でもスムーズな歩行を可能にしたいと考えているが、非優先歩行者の移動可能領域が全て衝突領域で埋まってしまうと、歩行可能なスペースがなくなり、停止を余儀なくされる。すると次第に歩行者同士の間隔は狭くなり、膠着状態に陥る危険性が高くなる。このようにまだ改善の余地はあると思われる。

問題点 9: 衝突回避が非優先歩行者の動向に委ねられている

3.3 改良案 3: 速度ベクトル認識補正

情報空間内の歩行者の歩行速度が非常に小さい場合、周辺が混雑していることが多い。そうした状況にも関わらずその歩行者に対する衝突領域を求めると、移動可能領域自体が自由歩行しているときと比べて後方に位置するため、前方が完全に塞がってしまう恐れがある。さらには情報空間内の歩行者が次時点においてもその前の時点の速度ベクトルで歩行することを前提に自分の速度ベクトルを決定しているため、意に反して大きな速度で歩行されると回避をスムーズに行なうことができない可能性がある。問題点 3 にも挙げたように、これは相手の歩行者に対する予測が不十分と考えられ、予測の精度を高める必要がある。ここでは対象とする歩行者の速度ベクトルに対して、前時点の速度ベクトルをそのまま用いず、次の 2 点を考慮する。

- ある一定の閾値に満たない歩行速度を持つ歩行者の速度を自由歩行速度を考慮して実際よりも大きめに見積もる
- 目的地方向へ向いていない速度ベクトルを持つ歩行者の速度ベクトルを目的地方向に傾ける

これら 2 点を考慮することで、対象の歩行者が予測に反して自由歩行速度に近い速度で歩行したときにも柔軟な対応が可能となり、混雑を未然に防ぐことができるのではないかと期待できる。具体的には以下のように認識すべき速度ベクトルを補正する。この操作を速度ベクトル認識補正と呼ぶ。

- (1) 速度 V_p が一定の閾値 V_a に満たない情報空間内の歩行者 j に適用する
- (2) 歩行者 j の速度ベクトルに、自由歩行速度ベクトルを $1 - \frac{V_p}{V_a}$ 倍したベクトルを加える
- (3) そのベクトルの大きさを V_a としたものを、歩行者 j の速度として認識する

これを図示したのが図 11 である。(1) のような非常に小さい速度を持つ歩行者に対して、最終的には (3) の太線で表されたベクトルを速度ベクトルとして認識する。

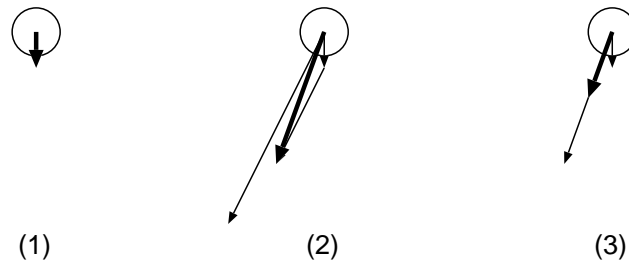


図 11: 速度ベクトル認識補正

この速度ベクトル認識の効果は予想以上に大きく、改めて相手の動向に対する予測が歩行者行動において非常に重要な要因であることがわかる。この効果の詳細は 6 節で数量的に示したシミュレーション実験結果とともに述べる。

4 高密度歩行アルゴリズムを用いた歩行モデル

3節で挙げた3つの改良案を踏まえ、本節では本論文で扱うモデルをまとめる。それぞれのモデルには番号を付け、便宜上ベースモデルをモデル0とする。高密度歩行アルゴリズムを組み合わせる5つのモデルを定め、ベースモデルを含めた6つのモデルにより後述するシミュレーション実験を行なった。

モデル1~5に対して、それぞれにおける各歩行者の速度ベクトル決定までの流れを以下に示す。特に種類の異なる優先権を組み込んだモデルの違いを明確にする。

4.1 モデル1

ベースモデルを基に、

- 周辺密度による優先権 A

を組み込んだモデルをモデル1とする。具体的には各歩行者は以下のように速度ベクトルを決定する。そして決定した速度ベクトルに従って微小時間だけ歩を進めることにより、全体の挙動である歩行流を得る。

1. 各歩行者は情報空間を基に周辺をサーチする
2. 情報空間内歩行者密度によって高密度状態か否かを判定する
3. 高密度状態と判定された場合は情報空間内の歩行者の目的地方向を考慮して優先権 A を得るか否かを判定する
4. 非優先歩行者は情報空間内の歩行者で距離が最も近い歩行者が対向する優先歩行者の場合、優先歩行者に歩行経路を譲るような速度ベクトルを決定する
5. それ以外の歩行者は情報空間内の歩行者に対して、前時点の速度ベクトルから衝突領域を考慮し、情報空間内の全歩行者に対する衝突領域外で速度ポテンシャルが最大の速度ベクトルを決定する

4.2 モデル2

ベースモデルを基に、

- アイコンタクトによる優先権 B

を組み込んだモデルをモデル2とする。具体的には各歩行者は以下のように速度ベクトルを決定する。そして決定した速度ベクトルに従って微小時間だけ歩を進めることにより、全体の挙動である歩行流を得る。

1. 各歩行者は情報空間を基に周辺をサーチする
2. 各歩行者は情報空間内の歩行者に対して、前時点の速度ベクトルから衝突領域を考慮する
3. 各歩行者は情報空間内の歩行者のうち、移動可能領域内の衝突領域の占める面積が最も大きい歩行者を neighbor と定める
4. neighbor の neighbor が自分だった場合、neighbor と優先関係を結び、身体の大きさによって優先権 B を得るか否かを判定する
5. 優先歩行者は優先関係を結んだ非優先歩行者との衝突領域を考慮せず、その他の情報空間内の歩行者に対する衝突領域外で速度ポテンシャルが最大の速度ベクトルを決定する
6. それ以外の歩行者は情報空間内の全歩行者に対する衝突領域外で速度ポテンシャルが最大の速度ベクトルを決定する

4.3 モデル 3

ベースモデルを基に、

- 速度ベクトル認識補正

を組み込んだモデルをモデル 3 とする。具体的には各歩行者は以下のように速度ベクトルを決定する。そして決定した速度ベクトルに従って微小時間だけ歩を進めることにより、全体の挙動である歩行流を得る。

1. 各歩行者は情報空間を基に周辺をサーチする
2. 各歩行者は情報空間内の歩行者に対して、前時点の速度ベクトルを基に補正した速度ベクトルから衝突領域を考慮する
3. 各歩行者は情報空間内の全歩行者に対する衝突領域外で速度ポテンシャルが最大の速度ベクトルを決定する

4.4 モデル 4

ベースモデルを基に、

- 周辺密度による優先権 A
- 速度ベクトル認識補正

を組み込んだモデルをモデル 4 とする。具体的には各歩行者は以下のように速度ベクトルを決定する。そして決定した速度ベクトルに従って微小時間だけ歩を進めることにより、全体の挙動である歩行流を得る。

1. 各歩行者は情報空間を基に周辺をサーチする
2. 情報空間内歩行者密度によって高密度状態か否かを判定する
3. 高密度状態と判定された場合は情報空間内の歩行者の目的地方向を考慮して優先権 A を得るか否かを判定する
4. 非優先歩行者は情報空間内の歩行者で距離が最も近い歩行者が対向する優先歩行者の場合、優先歩行者に歩行経路を譲るような速度ベクトルを決定する
5. それ以外の歩行者は情報空間内の歩行者に対して、前時点の速度ベクトルを基に補正した速度ベクトルから衝突領域を考慮し、情報空間内の全歩行者に対する衝突領域外で速度ポテンシャルが最大の速度ベクトルを決定する

4.5 モデル5

ベースモデルを基に、

- アイコンタクトによる優先権 B
- 速度ベクトル認識補正

を組み込んだモデルをモデル5とする。具体的には各歩行者は以下のように速度ベクトルを決定する。そして決定した速度ベクトルに従って微小時間だけ歩を進めることにより、全体の挙動である歩行流を得る。

1. 各歩行者は情報空間を基に周辺をサーチする
2. 各歩行者は情報空間内の歩行者に対して、前時点の速度ベクトルを基に補正した速度ベクトルから衝突領域を考慮する
3. 各歩行者は情報空間内の歩行者のうち、移動可能領域内の衝突領域の占める面積が最も大きい歩行者を neighbor と定める
4. neighbor の neighbor が自分だった場合、neighbor と優先関係を結び、身体の大きさによって優先権 B を得るか否かを判定する
5. 優先歩行者は優先関係を結んだ非優先歩行者との衝突領域を考慮せず、その他の情報空間内の歩行者に対する衝突領域外で速度ポテンシャルが最大の速度ベクトルを決定する
6. それ以外の歩行者は情報空間内の全歩行者に対する衝突領域外で速度ポテンシャルが最大の速度ベクトルを決定する

5 シミュレーション実験と歩行流の特性量

モデルがどれだけ現実に則しているかを数量的に見るためには、歩行流の特性量を用いてそれらの間に成り立つ関係式を評価するのが一般的である。特性量間の関係式を満たしていることが現実的な歩行流の必要十分条件となっているわけではないが、最低限満たしていなければならない必要条件となっている。本シミュレーション実験でも後述する歩行流の特性量をシミュレーションによって計算するものとし、特性量間の関係式を実測値に基づいて評価するという手法を取る。

5.1 シミュレーション実験

ここではシミュレーション実験の概要、及びシミュレーションの流れと作り出した歩行流から得られる特性量の測定方法を説明する。実験結果については6節を参照されたい。

5.1.1 シミュレーションの流れ

本研究では歩行空間として図12のような幅25[m]、長さ50[m]の長方形を用いる。シミュレーションクロックは0.1秒とし、シミュレーションの流れとしては以下のものである。

1. 新規参入歩行者の発生
2. 周辺のサーチと最適速度ベクトルの決定
3. 求めた速度ベクトルによる歩行
4. 目的地に達した歩行者の退去

歩行者の発生に関して、本モデルではポアソン過程に従い、発生位置は一様乱数を用いて点で与えられる。様々な歩行者密度を作り出すためにも到着率を変化させながらシミュレーション実験を行なうが、1回の実験において到着率 λ は一定としている。

また発生した各歩行者のパラメータを以下のように設定する。

- 人体円半径 $r \sim Tr(0.200, 0.225, 0.250)$
- 自由歩行速度 $V_s \sim N(1.36, 0.25^2)$
- 最大速度比 $k \sim Tr(1.0, 1.2, 1.5)$
- 最大パーソナルスペース比 $c_{max} \sim Tr(1.0, 1.2, 1.5)$
- サーチ距離係数 $\tau \sim Tr(2.0, 4.0, 5.0)$
- 高密度判定の閾値 $K_a = 1.0[\text{ped}/\text{m}^2]$
- 速度ベクトル認識補正における閾値 $V_a = 0.225[\text{m}/\text{s}]$

ただし $Tr(a, b, c)$ は最小値 a 、最頻値 b 、最大値 c の三角分布[†] に、 $N(\mu, \sigma^2)$ は平均 μ 、分散 σ^2 の正規分布に従うことを意味する。さらに目的地を次のように定める。まず乱数を用いて図12の歩行空間の上寄りに行きたいか、下寄りに行きたいかを決定し、行きたい方の端点を1つ選択する。次に両端点間の一様分布に従って新たな点を選択し、選択した2点を結ぶ線分を目的地とする。

[†]密度関数 $f(x) = \begin{cases} \frac{2}{(c-a)(b-a)}x - \frac{2a}{(c-a)(b-a)} & a \leq x \leq b \\ -\frac{2}{(c-a)(c-b)}x + \frac{2c}{(c-a)(c-b)} & b \leq x \leq c \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

5.1.2 測定方法

各特性量を計算する際は図 12 の測定領域 (網かけ部分) と 3 本の測定線分 (太線部) を用いる。各特性量は平均値を算出してそのデータとするが、具体的な測定方法・計算方法は本節で後述する。また各歩行者は図 12 の矢印部分で発生し、発生側と反対側に向かって歩行する。

測定は 10 分間分のシミュレーションを対象とし、それを 10 秒ずつ 60 区間に区切り、各区間で 1 組のデータを得るものとする。シミュレーションは歩行者がいない状況から開始するため、この初期条件の影響が十分小さくなると思われるまでの測定データを破棄する。ここでは歩行流が十分定常とみなせるまでに 100 秒間 (10 区間) かかるものとし、それまでのデータは破棄される。したがって各シミュレーションでは、実験結果として歩行流の特性量のデータが 50 組得られる。それぞれの特性量は各シミュレーションクロック毎に計測し、各区間毎の平均値がデータとして出力される。

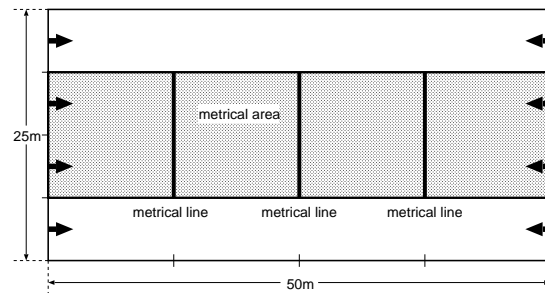


図 12: 測定領域と測定線分

5.2 歩行流の特性量

歩行流の特性量として、

- 歩行速度: $V[m/s]$
- 歩行者密度: $K[ped/m^2]$
- 歩行流率: $Q[ped/m \cdot s]$

がよく用いられている。これらは全て平均値で算出されるが、本研究でもこれらの特性量を用いて、シミュレーションで得られる歩行流を数量的に扱うこととする。各特性量の詳細は以下で述べる。

5.2.1 歩行速度

歩行流の特性量の中で、歩行速度が最も代表的なものと言えよう。通常は平均値を用いるが、平均速度には時間平均速度と空間平均速度とが存在する。前者は「ある地点において対象とする時間内に通過する歩行者の地点速度を測定した平均速度」を表すのに対し、後者は「ある瞬間に対象とする領域内に存在する歩行者の地点速度を測定した平均速度」を表す。特徴として空間平均速度は時間速度分布の調和平均となっており、時間平均速度よりも小さい値を取ることが知られている。

歩行流を数量的に解析する際に用いる平均速度は空間平均速度である。ここでは各クロックにおける図 12 の測定領域内にいる全歩行者の速度の合計値を測定時間足し合わせ、その間の歩行者数で除したものを歩行速度として用いる。 t クロック時に測定領域内にいる歩行者 i の速度を $V_i(t)$ 、歩行者の人数を $N(t)$ とすると、歩行速度は次式で表される。

$$V = \frac{\sum_t \sum_i V_i(t)}{\sum_t N(t)} \quad (18)$$

5.2.2 歩行者密度

多くの先行研究では、歩行速度と混雑度には密接な関係があることが報告されている。一般に混雑度が増すにつれて歩行速度が小さくなる。このことを確認するために、混雑度を表す1つの尺度として歩行者密度(単位面積に占める歩行者数)を考える。車両などで構成される交通流においては線密度を考えるのが一般的であるが、車両に比べて歩行者は横への動きが頻繁に行なわれるため、歩行流を扱う場合は面密度を用いる。各クロックにおける図12の測定領域内にいる歩行者数を測定時間足し合わせ、その面積および測定時間のクロック数で除したものを歩行者密度として用いる。面積を S 、測定時間を T 、シミュレーションクロックを Δt とすると、歩行者密度は次式で表される。

$$K = \frac{\sum_t N(t)}{ST/\Delta t} \quad (19)$$

なおここでは $S = 12.5[m] \times 50[m] = 625[m^2]$ 、 $T = 10[s]$ 、 $\Delta t = 0.1[s]$ とした。

またここでは扱っていないが、[2]では歩行者1人あたりが所有する空間の面積である歩行者空間モジュール $M[m^2/ped]$ を歩行者密度の代わりに使用している。歩行者空間モジュールは

$$M = \frac{1}{K} \quad (20)$$

のように密度の逆数で表され、歩行者空間のサービス水準であるLOS(Level Of Service)を議論する際によく用いられる。

5.2.3 歩行流率

歩行空間において、歩行速度とともに重要となる特性量が歩行流率(単位時間に通路を通過する単位幅員あたりの歩行者数)である。これは主に空間設計において通路の幅員を決定するときなどによく用いられ、駅の建物やホームの設計などにも応用されている [13]。各クロックにおける図12の測定線分を通過する歩行者数の合計を測定時間で除し、さらに幅員で除したものを歩行流率として用いる。 t クロック時に測定線分を通過した人数を $M(t)$ とし、3本の線分の長さの和を L とすると、歩行流率は次式で表される。

$$Q = \frac{\sum_t M(t)}{LT} \quad (21)$$

なおここでは $L = 12.5[m] \times 3 = 37.5[m]$ とした。

表 1: 歩行における LOS

LOS	$M[m^2/ped]$	$K[ped/m^2]$	$Q[ped/m \cdot s]$
A	3.5 ~	~ 0.29	~ 0.33
B	2.5 ~ 3.5	0.29 ~ 0.40	0.33 ~ 0.50
C	1.5 ~ 2.5	0.40 ~ 0.67	0.50 ~ 0.75
D	1.0 ~ 1.5	0.67 ~ 1.00	0.75 ~ 1.00
E	0.5 ~ 1.0	1.00 ~ 2.00	1.00 ~ 1.33
F	~ 0.5	2.00 ~	1.33 ~

[2] では $[ft^2/ped]$ を単位とした歩行者空間モジュールと $[ped/ft \cdot min]$ を単位とした歩行流率[†]によって LOS の各レベルが定義されている。表 1 は LOS の各サービスレベルをそれに対応した歩行者空間モジュール・歩行者密度・歩行流率の範囲をそれぞれ本論文で扱う単位で表している。サービスレベル F は交通の麻痺状態を表しており、本研究ではサービスレベル E を目標に高密度歩行アルゴリズムを開発した。

5.3 特性量間関係式

5.3.1 歩行速度・歩行者密度間関係式

歩行者は周囲に人が少ない状況の下では自分の意思に則した歩行速度で歩行することができるが、混雑している場所では思うような歩行速度を選択することができず、流れに身を委ねるばかりである。つまり歩行速度は歩行空間の混雑度を表す歩行者密度に依存する。以前から歩行速度と歩行者密度の関係については多くの研究者が興味を示しており、多くの研究がなされてきた。特に実際の歩行の様子を観察し、分析する手法が採られることが多く、その関係式を回帰直線（回帰曲線）として導き出している。[27] によれば、実際の観測データから確認され提案された歩行速度と歩行者密度との関係は図 13 に示したようなものがある。(1) は Greenshields、(2) は Greenberg、(3) は Drake によるものである。ただし V_s は自由歩行速度を表し、 K_j は飽和密度と呼ばれ、歩行が完全にストップしてしまう歩行者密度を表す。関係式の詳細については付録 A で紹介する。

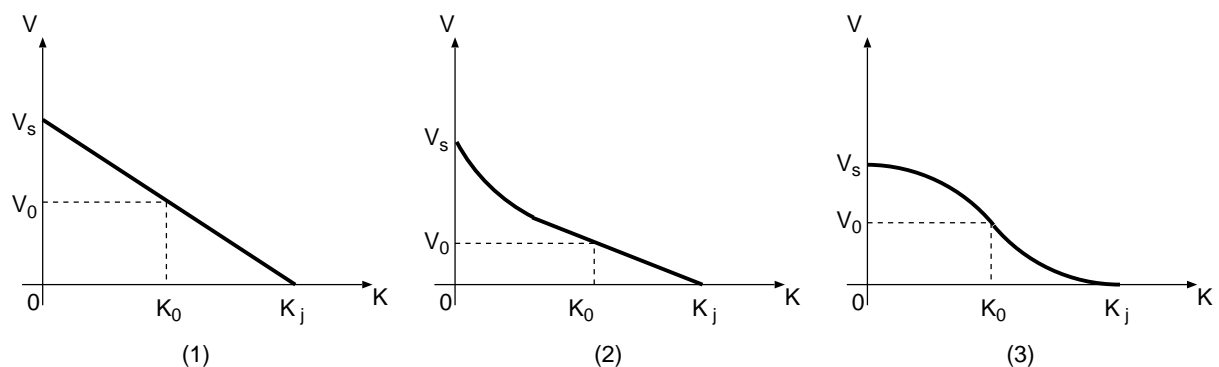


図 13: $V-K$ の関係

ここでは最も簡単であり、最も多くの場合で利用されている (1) の線形式を用いることとした。すなわち正の定数 a, b を用いて歩行速度 V は歩行者密度 K の関数として次のような式で表されるものとする。

$$V = a - bK \quad (22)$$

ここで a は一般に自由歩行速度とされている [27]。しかし低密度の状況で歩行する場合、ほとんど周りの影響を受けずに歩行することができるため、 $K = 0$ でなくとも自由歩行が可能であり、実際の a は自由歩行速度よりも若干大きくなると考えられる。つまり式 (22) はある一定以上の密度の範囲について成立し、[27] ではこの一定値が $0.2 \sim 0.4 [ped/m^2]$ であると報告されている。また a/b の値は飽和密度 K_j を表す。表 2 はこれまで実測を基に行なわれてきた主な研究によって得られた $V-K$ 関係式 (22) の係数 a, b の値であり、[27] にもまとめられている。

$V-K$ 関係式についてはさらに細かい議論が様々に行なわれており、例えば [37] では、 $K \leq 1.5$ までは式 (22) が成立するが、 $K \geq 1.5$ では歩行速度がいったん急激に減少し、その後再び緩やか

[†][2] では流動係数と呼ばれる

表 2: $V-K$ 関係式の係数

	a	b	参考文献
吉岡 (通勤)	1.61	0.33	[40]
吉岡 (行事・催物)	1.349	0.376	[41]
吉岡 (買物)	1.13	0.28	[41]
毛利・塚口 (通勤)	1.48	0.204	[37]
竹内 (住宅地内)	1.50	0.38	[33]
Fruin (通勤)	1.356	0.341	[2]
Older (買物)	1.311	0.337	[11]
Oeding (混合)	1.50	0.394	[8]
Navin・Wheeler (大学構内)	1.63	0.60	[7]

になると報告されている。この議論によれば表 2 の a, b は $K \leq 1.5$ のとき、つまり直線近似できるときの値であり、 $K > 1.5$ については

$$V = a' \log \frac{b'}{K} \quad (23)$$

という式が当てはまる。ここの a', b' の値は $a' = 1.32, b' = 9.16$ と報告されている。なお歩行者密度が $1.5[\text{ped}/\text{m}^2]$ という状態はかなり歩行者の自由度が制限されている状態であり、表 1 からはサービスレベル E に位置付けられる。

5.3.2 歩行流率・歩行者密度間関係式

一般に歩行流率は歩行速度と歩行者密度に比例する。つまり、

$$Q = KV \quad (24)$$

$$= K(a - bK) \quad (25)$$

となる。

式 (24) は歩行流の基本式と呼ばれている。この式は歩行流が定常なときには明らかに成立する。逆に歩行流が定常でない場合は厳密には成立しないが、それでも近似的に成立することが、[9] で確認されている。

式 (25) に関して歩行者密度 K は 0 から K_j までの値を取るが、1 つの歩行流率に対して 2 つの歩行者密度が対応する。歩行者密度が小さいと自由流 (非渋滞流) となり、非常にスムーズに歩行することができる。このとき歩行者密度が増加するにつれて、歩行流率も増加していく。しかしある歩行者密度でそれ以上歩行流率が増加しない臨界点が存在する。これは歩行者密度の増加により、歩行に拘束を受ける歩行者の割合が急激に増加し、歩行速度の大きな減少が生じることが原因と考えられる。このときの歩行者密度 K_0 を臨界密度、歩行速度 V_0 を臨界速度と呼び、さらにこのときの歩行流率 Q_0 を最大流率と呼ぶ。 $V-K$ 関係式が線形で与えられるのであれば、明らかに $K_0 = \frac{K_j}{2}$ となる。歩行者密度が臨界密度を超えると渋滞流となり、次第に自由に歩行をすることが不可能となっていく。これにより歩行流率も減少していく。

6 実験結果

4節で示した6つのモデルについてシミュレーション実験を行ない、それらの結果を比較した。実験概要・測定方法等については5節を参照されたい。

また本モデルでは目的地を線分で与えることから、あらゆる方向への歩行が可能となる。しかし歩行流を数量的に見る場合、十分に定常とみなせることが必要となる。そこで定常な歩行流を作り出すために、本シミュレーション実験では歩行者の進行方向を限定し、

- 2方向モデル(対向流)
- 1方向モデル(一方通行流)

について実験した。それぞれにおいて、4節で述べたモデルに対してシミュレーション実験を行った。各実験で歩行速度 V 、歩行者密度 K 、歩行流率 Q を測定し、 $V-K$ グラフ、 $Q-K$ グラフ、 $KV-Q$ グラフをプロットしてそれらを比較した。

6.1 2方向モデル

2方向モデルで扱うモデルは以下の6つであり、同時に本シミュレーション実験で実行可能であった λ の値の範囲を示す。本シミュレーション実験では λ の値を $1.0[\text{ped}/s]$ から実行不可能となるまで 1.0 刻みで増加させながら、歩行者密度に変化をつける。ただし各方向とも λ の値を等しくしているため、歩行空間全体としての到着率は 2λ となる。

- モデル0 $\lambda \leq 12.0$
- モデル1 $\lambda \leq 12.0$
- モデル2 $\lambda \leq 12.0$
- モデル3 $\lambda \leq 15.0$
- モデル4 $\lambda \leq 15.0$
- モデル5 $\lambda \leq 15.0$

このことは速度ベクトル認識補正の効果が高密度状態で顕著に現れていることを意味する。それぞれのモデルに対する $V-K$ グラフを図14~19に、 $Q-K$ グラフを図20~25に、 $KV-Q$ グラフを図26~31に示す。

$V-K$ グラフに関して、明らかにモデル0~2とモデル3~5とはその形が異なる。特に前者は K が $1.0[\text{ped}/m^2]$ を超えてからの V の急激な減少が目立つ。この結果から速度ベクトル認識補正の効果が顕著に現れていることがわかる。つまり歩行者密度が $1.0[\text{ped}/m^2]$ を超える高密度状態において、相手の歩行速度を過大評価することが逆に全体としてスムーズな歩行をもたらすと考えられる。

また直線近似した場合の a の値、すなわち自由歩行速度の値を見ると、モデル3およびモデル4は比較的低い値を取ることがわかる。本シミュレーション実験では自由歩行速度の平均値は $1.36[m/s]$ としており、明らかにこの値よりも小さくなっている。これは逆に速度ベクトル認識補正が悪影響を及ぼしていると考えられる。高密度状態では絶大な効果を発揮するが、混雑していないところで相手の歩行速度を過大評価すると、自由歩行している歩行者にとっては速度を下げざるを得ない状況に陥ることがある。この現象を補うのがアイコンタクトによる優先権Bであり、優先歩行者は前述の状況でも速度を落とさずにスムーズな歩行が可能となる。このことから速度ベクト

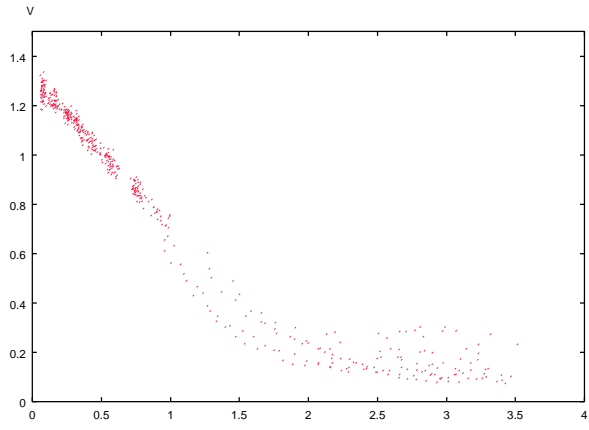


図 14: モデル 0; $V-K$

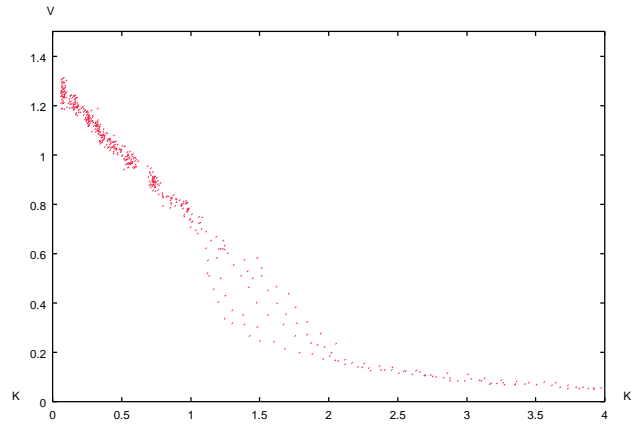


図 15: モデル 1; $V-K$

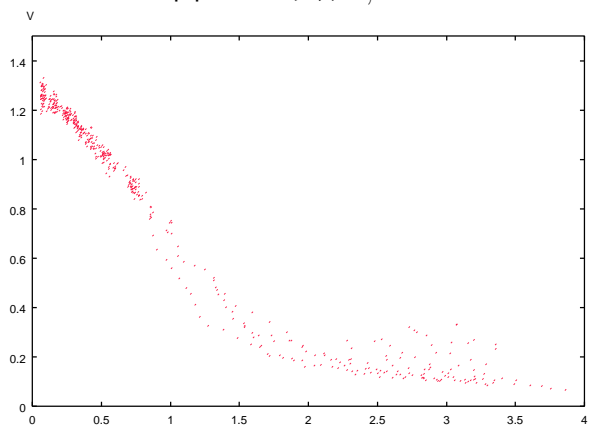


図 16: モデル 2; $V-K$

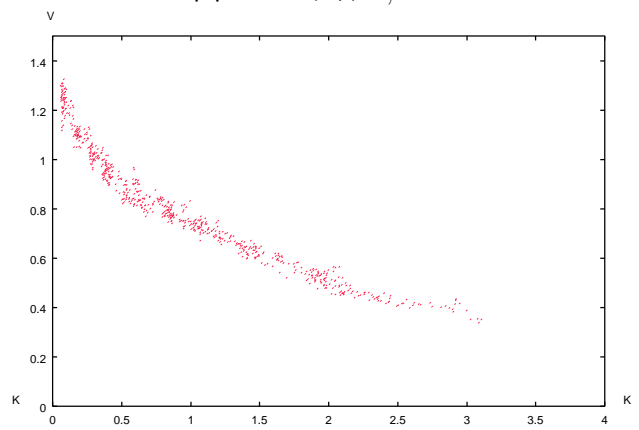


図 17: モデル 3; $V-K$

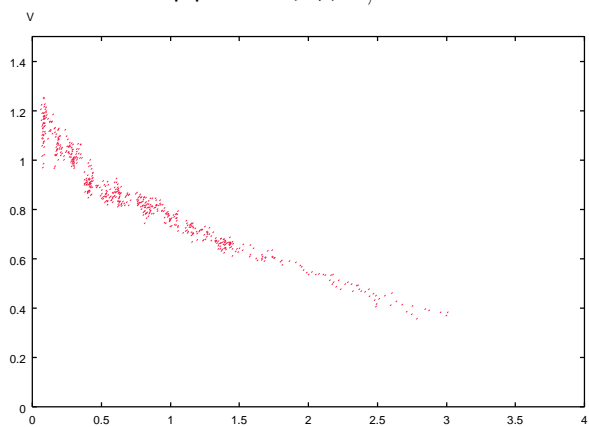


図 18: モデル 4; $V-K$

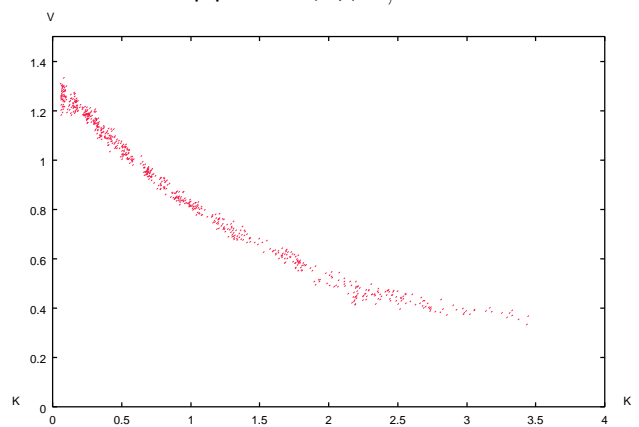


図 19: モデル 5; $V-K$

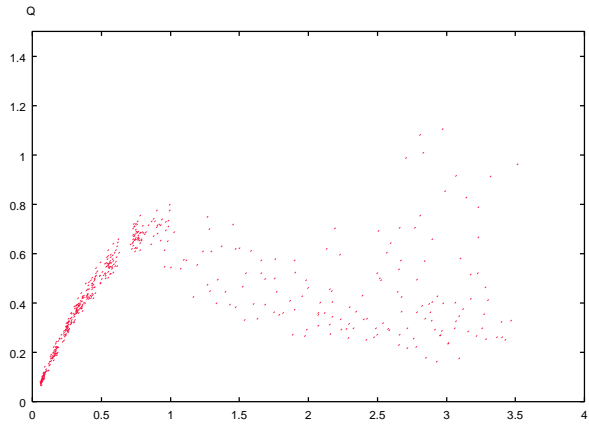


図 20: モデル 0; $Q-K$

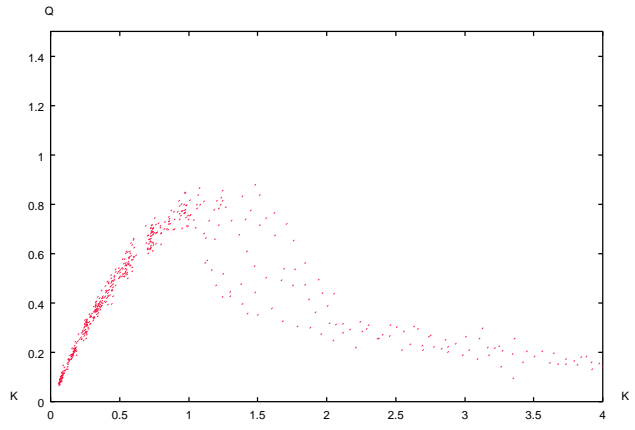


図 21: モデル 1; $Q-K$

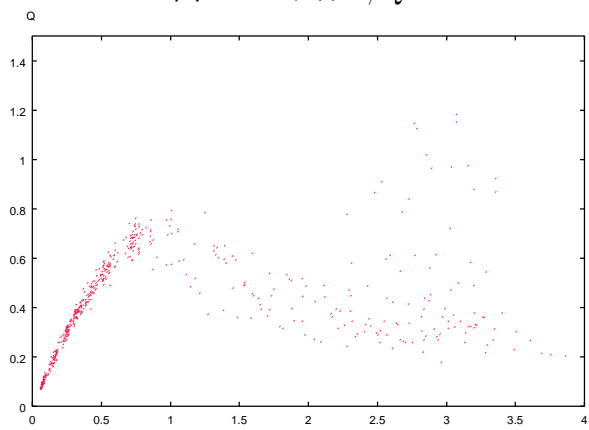


図 22: モデル 2; $Q-K$

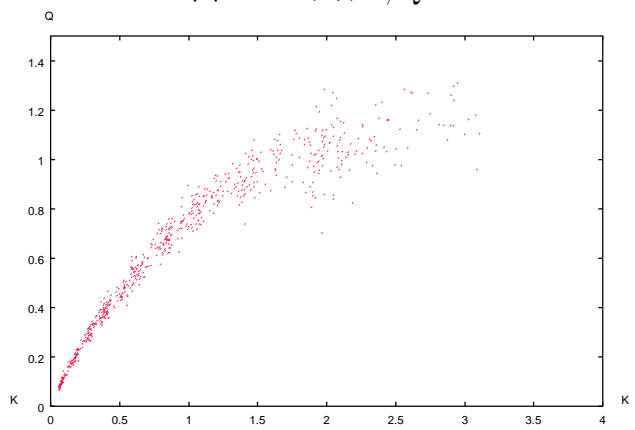


図 23: モデル 3; $Q-K$

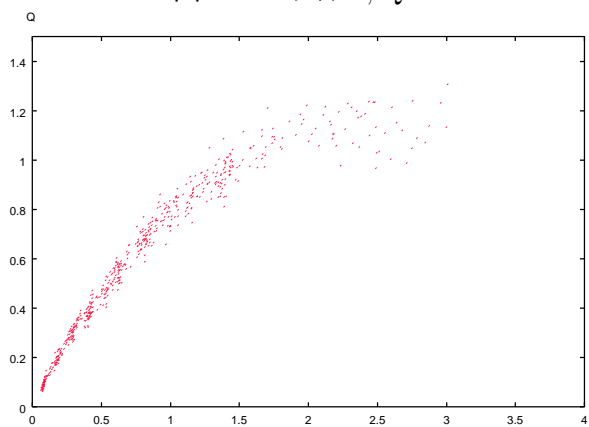


図 24: モデル 4; $Q-K$

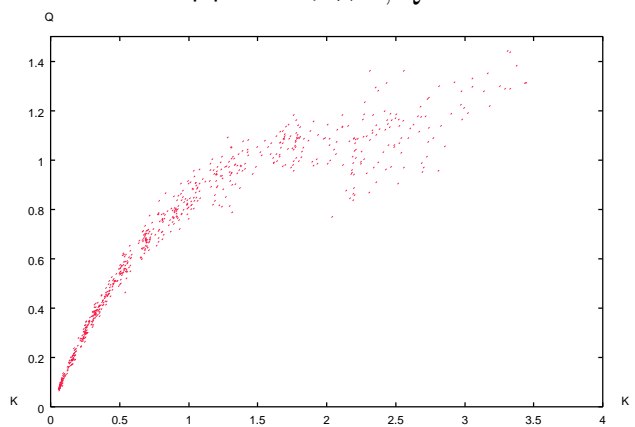


図 25: モデル 5; $Q-K$

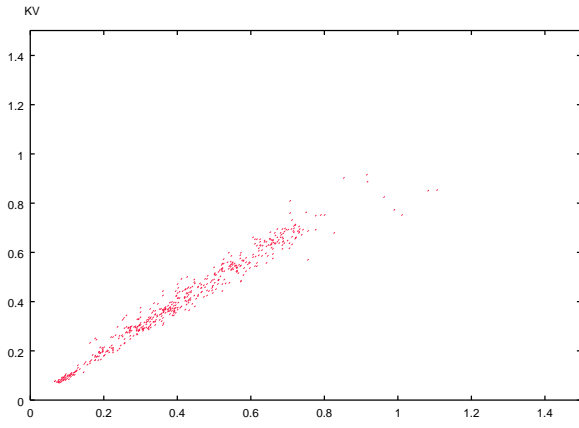


図 26: モデル 0; $KV-Q$

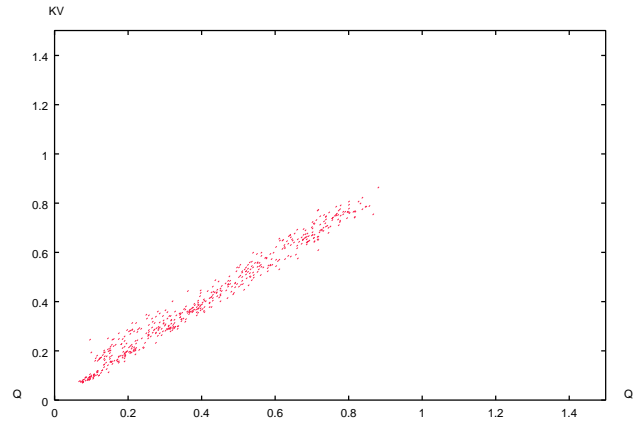


図 27: モデル 1; $KV-Q$

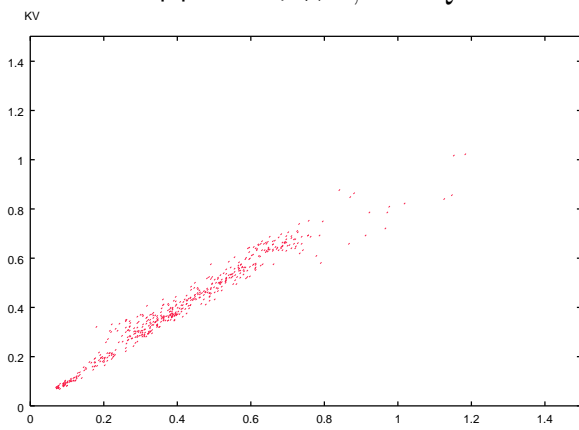


図 28: モデル 2; $KV-Q$

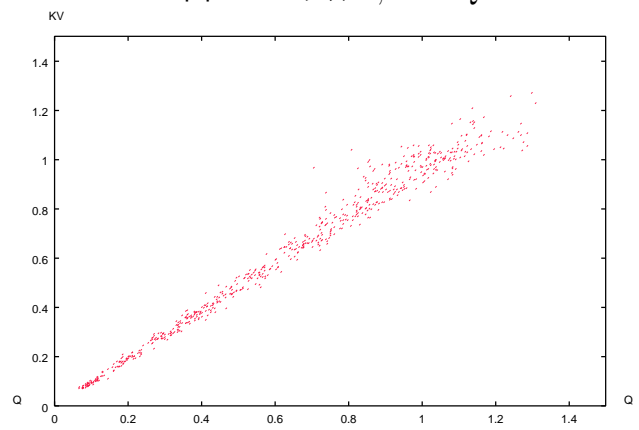


図 29: モデル 3; $KV-Q$

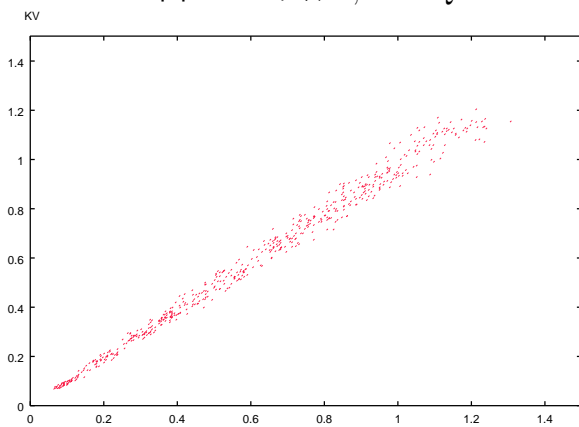


図 30: モデル 4; $KV-Q$

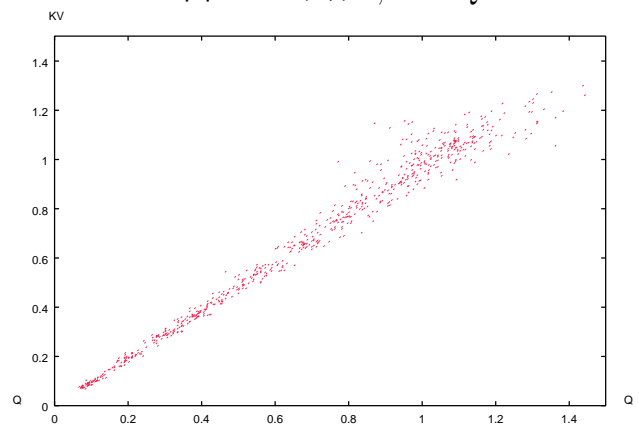


図 31: モデル 5; $KV-Q$

ル認識補正とアイコンタクトによる優先権 B を組み合わせることで相乗効果が得られることがわかる。

しかしモデル 5 でも完全に直線近似できないことが見てとれる。つまり他の関数形が適用できる可能性を排除しない。本シミュレーション実験では実際に 5 種類の関数形を用いて回帰分析を行なった。その結果は本節で後述する。

次に $Q-K$ グラフに関して、これも $V-K$ グラフ同様、モデル 0~2 とモデル 3~5 とは明らかに異なる。特に前者と後者の臨界密度および最大流率に大きな違いが見られる。前者は臨界密度が $1.0[\text{ped}/\text{m}^2]$ 程度で、そのときの最大流率は $1.0[\text{ped}/\text{m} \cdot \text{s}]$ を下回る。これに対して後者は臨界密度が $2.0[\text{ped}/\text{m}^2]$ 程度で、そのときの最大流率は $1.0[\text{ped}/\text{m} \cdot \text{s}]$ を超える。これが意味することは、前者では高密度状態ではスムーズな歩行流が形成できず、膠着状態に陥りやすいということである。逆に後者では高密度状態であっても、ある程度は歩行者の流れをスムーズに保つことができていることがわかる。しかし歩行者密度が $2.0[\text{ped}/\text{m}^2]$ を超えると、ばらつきが次第に大きくなる傾向にあり、安定した歩行流の形成は難しくなってくる。

また後者においても膠着状態が起きないとは限らない。実際にシミュレーションの様子を観察すると、歩行者密度は $2.5[\text{ped}/\text{m}^2]$ 程度まで上昇していくが、その後は膠着状態に陥ることがある。ただし前者と異なるのは、速度ベクトル認識補正によって各歩行者は前進に積極的であるため、歩行流率はそこまで落ち込まない。とは言いつつも、いったん膠着状態に陥ると解消は困難となり、次第に歩行流率は減少していき、そればかりか歩行者密度も減少していく。歩行者集団が後続の歩行者を吸収してどんどん膨張していくが、その周辺では歩行者が極端に少なく、歩行空間全体としての歩行者密度は徐々に減少していくのである。

最後に $KV-Q$ グラフに関して、どれもほぼ直線上に分布している。よって本モデルにおいても歩行流の基本式 (24) は近似的に成立していることがわかる。

6.2 1 方向モデル

1 方向モデルで扱うモデルは以下の 2 つである。2 方向モデル同様、本シミュレーション実験で実行可能であった λ の値の範囲を示す。ただし $\lambda \geq 15.0$ では 5.0 刻みとしている。

- モデル 0 $\lambda \leq 40.0$
- モデル 5 $\lambda \leq 40.0$

それぞれのモデルに対する $V-K$ グラフを図 32~33 に、 $Q-K$ グラフを図 34~35 に、 $KV-Q$ グラフを図 36~37 に示す。

$V-K$ グラフに関して、どちらのモデルも似たようなグラフとなっている。しかし歩行者密度 $4.0[\text{ped}/\text{m}^2]$ 付近での歩行速度はかなり違いが見られ、モデル 5 ではあまり落ち込んでいない。またどちらのモデルも直線近似では無理があり、他の関数形が当てはまると考えられる。さらに 2 方向モデルと比べると、歩行者密度の増加に対して歩行速度がかなり緩やかに減少していくことがわかる。これにより対向者の存在がいかに大きな影響を及ぼしているかが確認できる。

次に $Q-K$ グラフに関して、明らかにグラフに違いが見られる。臨界密度はどちらも $2.0[\text{ped}/\text{m}^2]$ 程度だが、それを超えると違いがはっきり現れる。モデル 0 では歩行者密度が上昇するにつれて歩行流率が落ち込んでいるが、逆にモデル 5 ではほぼ横ばい、あるいは上昇するといった現象まで見られる。これは速度ベクトル認識補正によって、歩行者の前進に対する欲望が大きくなっていることが要因であると考えられる。再びシミュレーションの様子を観察すると、目的地付近でかなり混雑していることが確認された。特に目的地が進行方向に対して横方向で発生位置と反対側にあると、大きな流れを伴う歩行流を横断していくことが困難となり、斜めに歩行するのではなく直進し続ける。そのまま目的地付近まで来たときに、目的地方向を示す自由歩行速度ベクト

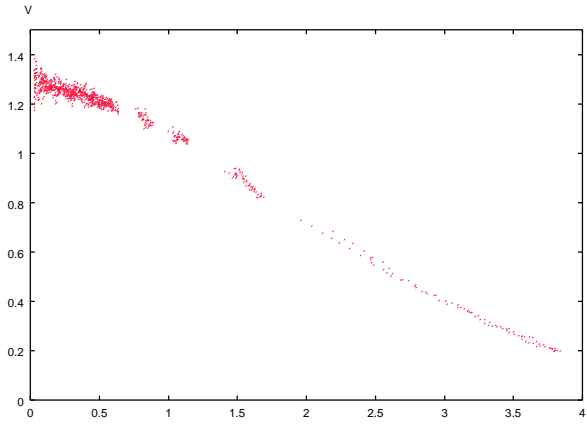


図 32: モデル 0; $V-K$

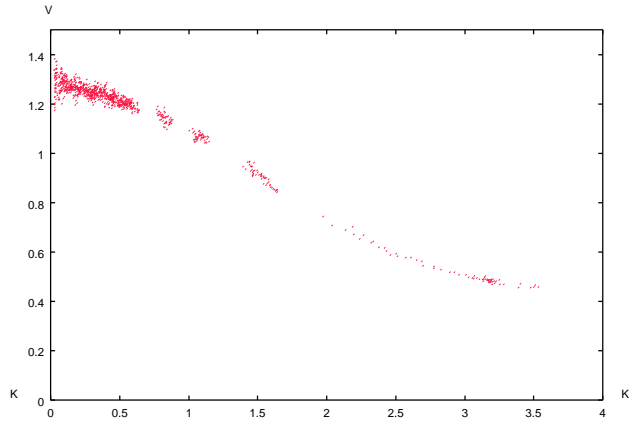


図 33: モデル 5; $V-K$

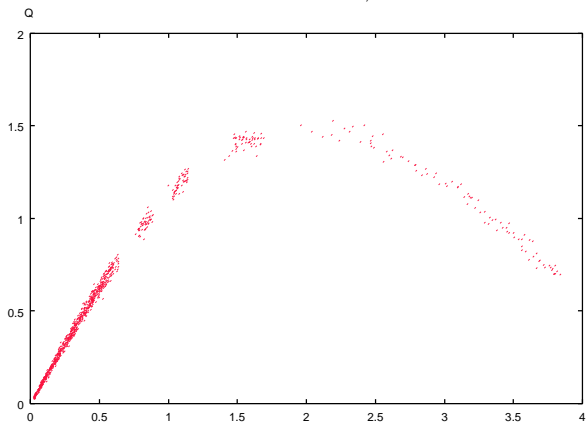


図 34: モデル 0; $Q-K$

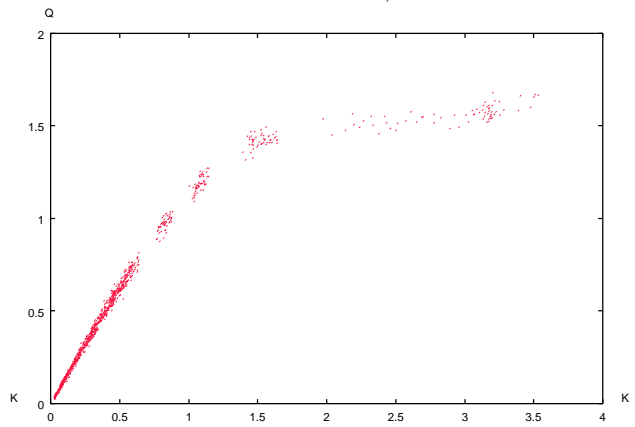


図 35: モデル 5; $Q-K$

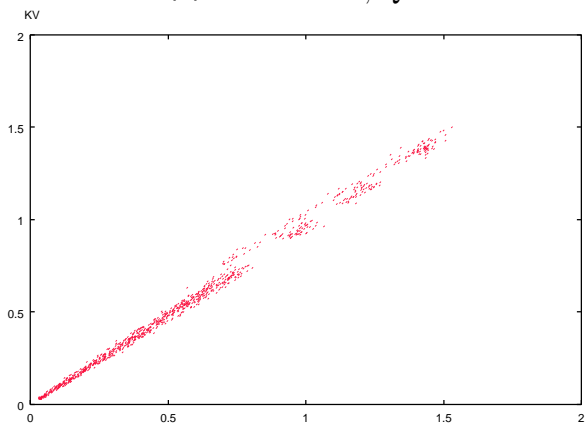


図 36: モデル 0; $KV-Q$

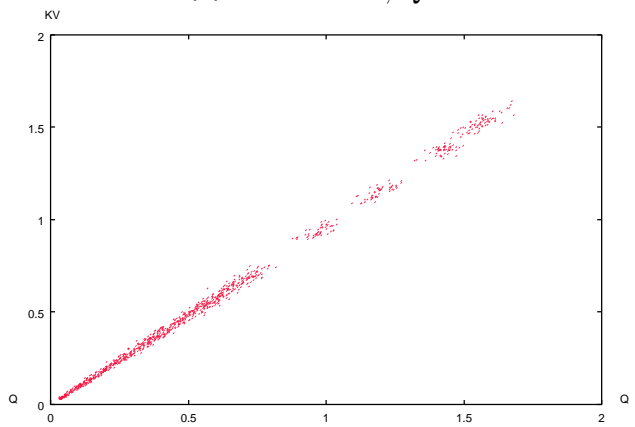


図 37: モデル 5; $KV-Q$

ルが歩行流に対してほぼ直角になってしまうことが起きる。これにより目的地付近で膠着状態に近い形に陥るため、徐々に歩行者密度が上昇する。しかし測定線分上では依然として歩行者が流れている状況が続く。したがってこのようなグラフの形を生むという結果となる。

最後に $KV-Q$ グラフに関して、2方向モデル同様どちらのモデルとも歩行流の基本式 (24) が成立することが確認される。しかし前述の結果を見ると、1方向モデルに関しては、モデル5よりもモデル0の方がより自然な結果を導いていることがわかる。特に対向者が存在しないため、優先権 B を考慮する効果が十分に得られなかったことが原因であろう。

6.3 回帰分析

ここでは本シミュレーション実験で行なった回帰分析の結果を述べる。対象とするのは以下に示す3つのモデルである。

- <1> 2方向モデル モデル5
- <2> 1方向モデル モデル0
- <3> 1方向モデル モデル5

まずは歩行流の基本式 (24) について考えるため、 $KV = pQ + q$ を仮定して回帰直線を求めた。それぞれのモデルに対する結果を表3に示す。ただし表中の η^2 は決定係数である。決定係数は回帰の精度を表す指標であり、一般に $0 \leq \eta^2 \leq 1$ が成立して、1に近い値を取るほど回帰の精度が高いことを表す。さらに線形回帰においては決定係数の平方根が相関係数と一致する。

表 3: 回帰分析 (1)

モデル	< 1 >	< 2 >	< 3 >
p	0.959	0.981	0.971
q	0.010	-0.001	-0.003
η^2	0.979	0.996	0.998

Q と KV との間に強い正の相関があることはグラフからも読み取れるが、決定係数は非常に大きな値になっている。これは本モデルにおいても歩行流の基本式 (24) がほぼ成立するということである。なおモデル < 1 > における値が他と比べて小さめなのは、データ数が少ないためと考えられる。

次に $V-K$ 関係式について考える。既存の研究の多くでは線形で与えられる式 (22) で十分と考えられてきたが、本シミュレーション実験の結果からはそうとも言い切れない。そこでここでは正の定数 a, b, c, d を用いて、以下の5種類の関数形を考慮する。

関数 1 $V = a - bK$

関数 2 $V = a \log \left(\frac{b}{K} \right)$

関数 3 $V = a - b\sqrt{K}$

関数 4 $V = a \exp(-bK)$

関数 5 $V = a + b\sqrt{K} - cK + dK\sqrt{K}$

関数 1~3 は後述する付録 A で導出される式 (42) である。それぞれ $n = 1$ 、 $n = -1$ 、 $n = 0$ としたものに対応する。また関数 4 は K が増加するにつれて V が緩やかに減少することから、式 (42) そのものではないが取り入れてみた。これによって裾の重さを表現できるのではないかと考えた。さらに関数 5 は、特に 1 方向モデルにおいて変曲点のようなものが見られるため、その部分を表現できないものかと考え、取り入れてみた。関数 4 同様、式 (42) そのものではないが、式 (42) の $n = 0$ 、 $n = 1$ 、 $n = 2$ についての重ね合わせとして表現できる。ただし K が非常に大きいと V が発散してしまうという欠点も持ち合わせている。

表 4 に V - K 関係式としてそれぞれの関数を仮定して回帰分析を行なった結果を示す。

表 4: 回帰分析 (2)

モデル		< 1 >	< 2 >	< 3 >
関数 1	a	1.214	1.340	1.327
	b	0.327	0.299	0.265
	η^2	0.947	0.983	0.976
関数 2	a	0.259	0.181	0.143
	b	19.67	198.0	1211
	η^2	0.905	0.598	0.595
関数 3	a	1.493	1.554	1.501
	b	0.667	0.586	0.490
	η^2	0.986	0.879	0.874
関数 4	a	1.309	1.378	1.354
	b	0.452	0.327	0.272
	η^2	0.992	0.935	0.949
関数 5	a	1.261	1.228	1.221
	b	0.276	0.334	0.385
	c	1.072	0.541	0.643
	d	0.359	0.047	0.108
	η^2	0.994	0.991	0.983

関数 1 による線形回帰はもちろん高い精度を持つと考えられるが、それ以上に関数 5 がよい結果を導いている。また関数 4 も比較的決定係数の値が大きい。逆に関数 2 はモデル < 1 > においてはまずまずの結果を残したものの、他のモデルではよい結果を得られなかった。これは K が 0 に近い値を取るときに、偏差が非常に大きくなってしまうことによると考えられる。よって [37] でも述べられているように、 K の値が比較的大きい場合以外は関数 2 を用いることは好ましくない。

次に自由歩行速度と飽和密度について考察する。自由歩行速度については関数 2 以外において a で得られ、どれも本シミュレーション実験で用いた平均値 $1.36[m/s]$ に近い値を取っているが、その値を下回るものが目につく。飽和密度については関数 1 では $\frac{a}{b}$ で、関数 2 では b で、関数 3 では $(\frac{a}{b})^2$ で得られる。しかし関数 2 における値はとても現実的な値であるとは言い難く、関数 3 においても若干高め値となっている。また関数 4 および関数 5 からは飽和密度は得られない。よって V - K 関係式について総合的に判断すると、線形回帰は最も単純でありながら、最もバランスが取れているものと言えよう。

最後に Q - K 関係式について考える。 V - K 関係式に既に述べた 5 つの関数形を用い、さらに歩行流の基本式 (24) と組み合わせることで、 Q - K 関係式でも 5 つの関数形を用いる。表 5 に Q - K 関係式としてそれぞれの関数を仮定して回帰分析を行なった結果を示す。

表 5: 回帰分析 (3)

モデル		< 1 >	< 2 >	< 3 >
関数 1	a	1.035	1.419	1.372
	b	0.226	0.332	0.278
	η^2	0.919	0.993	0.991
関数 2	a	0.385	0.539	0.115
	b	8.282	6.178	1213
	η^2	0.962	0.910	0.783
関数 3	a	1.443	1.966	1.792
	b	0.621	0.905	0.725
	η^2	0.950	0.980	0.991
関数 4	a	1.272	1.716	1.529
	b	0.414	0.493	0.350
	η^2	0.959	0.957	0.993
関数 5	a	1.131	0.893	0.700
	b	0.804	1.519	2.214
	c	1.594	1.639	2.416
	d	0.512	0.346	0.623
	η^2	0.959	0.997	0.997

$V-K$ グラフよりもばらつきが大きいいためか、決定係数は $V-K$ グラフのときのそれよりも小さな値になっているものもある。その中でも関数 5 が非常に精度の高い値を導き出している。またモデル < 2 > やモデル < 3 > では $V-K$ グラフのときのものよりも高い値を示している。実際グラフに描いてみると、関数 5 は特にモデル < 3 > の高密度部分まで精度よく回帰していることがわかる。しかし関数 1 も関数 5 と比べて遜色ない結果を導いており、そのバランスのよさが際立つ。さらに表 4 同様、表 5 においても 2 方向モデルに比べて 1 方向モデルの決定係数が大きな値となっており、データ数の違いが顕著に現れている。

7 今後の課題

本研究では2節で紹介したベースモデルに高密度歩行アルゴリズムを組み込むことで、ベースモデルでは表現するまでには至らなかった高密度下での歩行の様子も表現できるようになった。しかしモデルが完全に定まったわけではなく、完成するまでにはさらなる研究・改良が必要である。またこのモデルを建築設計や都市開発などの分野の応用することまで考えていながらも、専らモデルを単純に保ちながらいかに現実に近い挙動をシミュレーションで得られるかについて探求するにとどまっている。その意味で応用までに解決しなければならない問題点は多い。以下では現段階で挙げられる課題について述べる。

7.1 パラメータ設定・推定

本モデルでは各歩行者に個人情報としてのパラメータを与えることで、シミュレーションによって各歩行者の歩行の様子を詳細なレベルで表現している。単純なモデルを目指してモデルを構築しているためパラメータ数を最小限に抑えてはいるが、高密度歩行アルゴリズムの導入もあり、ベースモデルと比べるとその数は明らかに多くなっている。そして本モデルで与えたパラメータ値は現実的な範囲内ではあるものの、本当に現実的な値であるかはまだ検証されていない。

検証方法として多くの研究で行なわれているのは、一般にパラメータ推定と呼ばれる手法である。歩行者毎にパラメータ値は異なるので、歩行者別にパラメータを推定する必要がある。本モデルは速度ポテンシャルを基に歩行速度を決定しているため、実際の歩行者の軌跡から得られる次時点の歩行位置は速度ポテンシャルを最大にする速度ベクトルで移動した地点と考えられる。よって原理的には、各時点において実際の歩行流を観察して各歩行者の歩行軌跡から得られる地点と本モデルから得られる速度ポテンシャル最大地点との距離自乗誤差を見積もり、それに基づいてパラメータを推定することになる。しかし多数の歩行者についてこの推定作業を行なうことは難しく、間接的なパラメータ推定を模索するなど、さらなる検討が必要である。

7.2 計算時間

本研究ではシミュレーションによって歩行者のミクロ的な動向やマクロ的な動向を検証している。しかし現在のハイスpek的な計算機[†]をもってしても、莫大な計算時間を要する。特に歩行者数に応じて計算時間は急激に上昇するため、高密度下でのシミュレーション実験を行なうことは時間的な困難を伴う。理論上では歩行空間内の歩行者数を N とすると、シミュレーション時間は $O(N^2)$ のオーダーでかかることになる。

この問題解決にはグリッドコンピューティングを含む並列計算が期待される。グリッドコンピューティングとは、ネットワーク上にあるコンピュータ資源を結びつけ、1つの複合したコンピュータシステムによる仕組みである。各資源に小規模の計算モジュールを割り当て、全体を統括することで、スーパーコンピュータに匹敵する規模を持つことができると考えられている。本モデルでは周辺のサーチから始まる速度ベクトル決定の計算は各歩行者に対して独立に行なわれる。つまり各歩行者の速度ベクトル決定の計算を1つの計算単位として使用可能な資源に割り当て、その結果を受けて全体の動きを決定することで、計算速度の向上を狙うことができる。しかし優先関係の付与には他者の影響を受けるため、完全に独立な歩行者として計算できないという問題点がある。また資源間のデータのやりとりをどれだけ簡潔に行なうことができるかという問題点もあり、さらなる検討が必要である。これらの点をクリアできれば、並列計算は強力な武器となる可能性を大いに秘めていると言えよう。

[†]本シミュレーション実験では CPU:3.2GHz、メモリ:1GB の計算機を主に使用

7.3 グループ歩行

本モデルでは歩行者は全て単独で歩行するものと仮定している。もちろんこのことは現実とは大きく異なり、グループ歩行が歩行空間全体に与える影響は大きいはずである。[43]では渋谷駅前交差点での歩行の様子を観察した結果、約半数の歩行者がグループを形成しながら歩行していることが報告されている。

グループ歩行を表現するためにはいろいろなことを考慮する必要がある。グループ内のリーダーシップの問題、グループ内の歩行者の速度に関する問題、グループ内の歩行者に対するパーソナルスペースに関する問題など様々な問題が存在する。特にグループという制限された枠の中にながら、それぞれがどのように速度ベクトルを決定するかは非常に難問である。またグループ外の歩行者がグループをそれぞれの歩行者として捉えるか、グループ全体として捉えるかによっても挙動が異なるであろう。考慮すべき点は他にもあるだろうが、それらを実現するためには新たなパラメータの導入を余儀なくされる可能性が高い。

本研究でも試作段階として、グループ歩行の表現を試みた。グループを単独の歩行者(シングル)と2人組の歩行者(ペア)の集合体と捉え、通常の歩行者よりも大きな円でペアを表現した。しかしこのペアをそれぞれの歩行者として表現するには至らず、またそれらの集合体であるグループ全体を表現するまでにも至らなかった。よって本研究では本格的な導入は見送った。グループの混在した歩行流とシングルのみで形成した歩行流との違いを見出し、その違いを実現できるようなモデル化を試みる必要がある。

7.4 アプリケーションツール化

本研究での大きな目的はどのような要因が歩行者行動に多大な影響を及ぼしているかを見るというものである。そのために簡潔なモデルでありながらも、現実の歩行者行動と非常に近い様子がシミュレーションで表現できるように努めてきた。その点ではある程度の成果が得られ、高密度下でのシミュレーションも対応できるまでになった。

しかし本研究では建築設計や都市開発といった分野への応用まで視野に入れている。具体的には駅のコンコースや歩道橋の幅を設定したり、歩行流を整理するために置かれる柱の位置を決定したりするのに用いられるのではないかと推測できる。さらには交通整理の人員を配置して、歩行者にどういったタイミングでどのような情報を流せば混雑を防ぐことができるかといったことまで考えられる。

そのためには現在のシミュレーションをさらに充実したものにする必要がある。特にマウスやキーボードを使った操作をしながら、様々な状況を作り出せるようなシミュレータが望まれる。歩行空間を画像として読み込んだり、パラメータの値を自在に変化させたり、また歩行者や障害物を簡単に発生・消去できるような操作性を取り入れることで、アプリケーションツールとしての機能を果たすことができる。もちろんその前提として既に述べたような課題を解決することが先決であり、モデルをより充実したものにする必要があるとってくる。

8 おわりに

本研究ではベースモデルを基に、それまで表現できなかった高密度下での歩行の様子をシミュレーションによって表現することに成功した。特に歩行者行動として相手の動向を精度よく予測することが、非常に重要な要素であることが確認された。さらに歩行流の特性量を用いてシミュレーションで作り出した歩行流と現実の歩行流との整合性を数量的に検証した。

このように本モデルが現実にとどのくらい近いのかを検証することは非常に重要なことである。しかしモデルの善悪を量る尺度はこれだけではない。いろいろな側面からモデルを見る際、以下の性質を満たすものが「よいモデル」と考えられる。

1. 適合性
2. 簡潔性
3. 適用性
4. 説明性

しかしここに挙げた全ての要素を完璧に満たすモデルは存在しない。例えば適合性と簡潔性はトレードオフの関係にあることは明らかであろう。本モデルの目指すべき「よいモデル」とは、これらの性質をバランスよく満たすモデルであり、そういった意味でも本論文のまとめとしてこれらの性質を検証したい。

8.1 適合性

現実とモデルとがどれだけ一致しているか、つまりモデルがどれだけ現実に近いものなのかを示すものが適合性である。一般的にモデルを評価する上で、最重要視すべきものであろう。

しかしミクロ的な視点から構築した歩行モデルにおいてはこれを判断する術が少なく、非常に困難である。シミュレーションを眺めながら、現実的な動きをするか否かを判断するのでは、厳密性に欠けてしまう。非現実的かどうかはわかっても、現実的かどうかまで踏み込むのは難しい。

本研究では5節で行なったような方法で適合性を検証している。結果については6節を参照されたい。しかしこの検証方法ではモデルが現実的であるための必要十分条件とは言えず、単に必要条件を示しているにすぎない。さらにはミクロ的な視点からモデル化しているにも関わらず、歩行流全体を対象にしたマクロ的な視点からの検証のみでは十分な検証とは言い難いというも事実である。

8.2 簡潔性

適合性とトレードオフの関係にある簡潔性は、モデルがどれだけシンプルに表現されているかを表すものであり、特にパラメータの数に依存する。またパラメータ同士の関係を表す、いわゆる制約式の数も少ないほど、簡潔なモデルとすることができよう。モデルを簡潔にすると、計算量などの面で多大な利益を得る。ハイスペックな計算機を利用してでもまだまだ莫大な計算時間がかかるため、簡潔性を保つことは非常に重要である。しかしモデルを簡潔にすればするほど、現実とのずれは大きくなる傾向にもある。

本モデルは既に述べたように歩行者パラメータを最小限に抑えた非常に簡潔なモデルである。これ以上パラメータ数を減らすことは、簡潔性を向上させる以上に適合性や以下で述べる説明性をも失うことになり得る。ベースモデルと比べると、高密度アルゴリズムを実現させるために必要な変数が増えているが、現在のところこれはやむを得ない範囲にあると考えている。

8.3 適用性

構築したモデルがどれほど現実に近い素晴らしいモデルであったとしても、それをを用いて何かに応用できなければその存在価値は薄れてしまう。どれだけモデルを応用することができるかを示すものが適用性であり、構築したモデルを応用できる範囲が広いほど適用性の高いモデルとすることができる。

本モデルは将来的に建築設計や都市開発といった分野への応用を視野に入れており、この適用性の意義は非常に大きい。具体的な適用方法の例については付録 B を参照されたい。また適用性向上のためにはシミュレータのアプリケーションツール化は必須であり、その点については課題として残る。

8.4 説明性

モデルをいくら現実に近づけたところで、実際に起こる現象をモデルに即して説明ができないのであれば意味のあるモデルとは言えない。説明性の高いモデルというのは、説明力の強いモデルであり、モデルを構築する際に最も気をつけなければならない部分であろう。つまりなぜそのようにモデル化したのか、なぜそのようなモデル化でよいのか、なぜそのようなモデル化がこのような結果を導くのかをうまく説明できなければ「よいモデル」とは言えまい。

本論文では説明性を重要視して構成しており、本モデルの構築過程における説明は 2、3 節を、また結果に関する説明は 6 節を参照されたい。

以上の 4 点に注意しながらモデル化に努めてきたが、まだまだ完成されたモデルとは言えない。7 節に挙げた課題を中心に、よりよいモデルを目指して改良していきたい。そして人間の行動に影響を与える要因とその影響度を、歩行という側面から見出せていけたらと考えている。

謝辞

本論文の作成に際して論文全般に渡って御指導いただいた、高橋幸雄教授に深く感謝いたします。本研究を立ち上げ、引き継ぎの際やその後にあたるまで数々の助言をいただいた、大日本印刷株式会社の和田剛さんにはいろいろなことを丁寧に教えていただきました。また他専攻ながらゼミに参加させていただいた、情報環境学専攻の大佛俊泰助教授と研究室のみなさんにも多くの助言をいただき、大変勉強になりました。そして高橋(幸)研究室の皆様方はもちろんのこと、学生室を共同で使用している小島(政)・三好・下平各研究室の皆様方にも大変お世話になりました。さらには総合ゼミに参加されている皆様方からも、貴重な御意見をいただきました。この場をお借りして、深く感謝いたします。

参考文献

- [1] J.J.Fruin, “DESIGNING FOR PEDESTRIANS: A LEVEL-OF-SERVICE CONCEPT”, Highway research record, No.355, pp.1-15, 1971.
- [2] J.J.Fruin (長島正充 訳), 「歩行者の空間」, 鹿島出版会, 1979.
- [3] M.Haklay, D.O’Sullivan, M.Thurstain-Goodwin, T.Schellhorn, “So go downtown: simulating pedestrian movement in town centres”, Environment and Planning B, Vol.28, pp.343-359, 2001.
- [4] D.Helbing, P.Molnar, I.J.Farkas, K.Bolay, “Self-organizing pedestrian movement”, Environment and Planning B, Vol.28, pp.361-383, 2001.
- [5] J.Kerridge, J.Hine, M.Wigan, “Agent-based modelling of pedestrian movements: the questions that need to be asked and answered”, Environment and Planning B, Vol.28, pp.327-341, 2001.
- [6] S.W.Malone, C.A.Miller, D.B.Neill, “Traffic Flow Models and the Evacuation Problem”, The UMAP journal Vol.22, No.3, pp.273-292, 2001.
- [7] P.D.Navin, R.J.Wheeler, “Pedestrian Flow Characteristics”, Traffic Engineering, Vol.39, No.9, pp.30-36, 1969.
- [8] D.Oeding, “Verkehrbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fussgängerverkehrs”, No.22, 1963.
- [9] C.A.O’Flaherty, M.H.Parkinson, “Movement on a city centre footway”, Traffic Engineering & Control, Vol.13, No.10, pp.434-438, 1972.
- [10] S.Okazaki, S.Matsushita, “A STUDY OF SIMULATION MODEL FOR PEDESTRIAN MOVEMENT WITH EVACUATION AND QUEUING”, Proceedings of the International Conference on Engineering for Crowd Safety, pp.271-280, 1993.
- [11] S.J.Older, “Movement of Pedestrians on Footway in Shopping Streets”, Traffic Engineering & Control, Vol.10, No.4, pp.160-163, 1968.
- [12] B.S.Pushkarev (月尾嘉男 訳), 「歩行者のための都市空間」, 鹿島出版会, 1979.
- [13] 青木 俊幸, “駅の旅客流動”, bit, Vol.31, No.9, pp.91-98, 1999.

- [14] 朝田 伸剛, “歩行者の回避行動に関する研究”, 東京工業大学 情報環境学専攻 2001 年度修士論文 (大佛研究室), 2002.
- [15] 植下 協, 加藤 晃, 小西 純一, 間山 正一, 「エース 道路工学」, 朝倉書店, 2002.
- [16] 大蔵 泉, 「交通工学」, コロナ社, 2000.
- [17] 岡崎 甚幸, “建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 —その 1 : 磁気モデルの応用による歩行モデル—”, 日本建築学会論文報告集, Vol.283, pp.111-117, 1979.
- [18] 岡崎 甚幸, “建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 —その 2 : 混雑した場所での歩行—”, 日本建築学会論文報告集, Vol.284, pp.101-110, 1979.
- [19] 岡崎 甚幸, “建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 —その 3 : 停滞や火災を考慮して最短経路を選ぶ歩行—”, 日本建築学会論文報告集, Vol.285, pp.137-144, 1979.
- [20] 岡崎 甚幸・山本 親, “建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 —その 4 : 群集歩行の透視図による表現—”, 日本建築学会論文報告集, Vol.299, pp.105-113, 1981.
- [21] 岡崎 甚幸・松下 聡, “建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 —その 5 : 探索歩行及び誘導標による歩行—”, 日本建築学会論文報告集, Vol.302, pp.87-93, 1981.
- [22] 岡崎 甚幸, 松下 聡, “避難計算のための群集歩行シミュレーションモデルの研究とそれによる避難安全性の評価”, 日本建築学会計画系論文報告集, Vol.436, pp.49-58, 1992.
- [23] 岡田 公孝, “歩行速度・密度・交通流量間関係式の評価 —シミュレーションによる検討—”, 東京工業大学 情報科学科 2001 年度学士論文 (高橋 (幸) 研究室), 2002.
- [24] 岡田 公孝, 和田 剛, 高橋 幸雄, “個人行動をベースにした歩行モデルと歩行流シミュレーション”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会, 2003 年春季研究発表会, 2003.
- [25] 河上 省吾, 松井 寛, 「交通工学」, 森北出版, 1987.
- [26] 河田 繁範, “ミクロモデルによる交通量と速力に関する研究”, 鳥取大学大学院 社会開発システム工学専攻 1999 年度修士論文, 2000.
- [27] 交通工学研究会, 「交通工学ハンドブック」, 技報堂出版, 1984.
- [28] 佐佐木 綱, 「交通流理論」, 技術書院, 1965.
- [29] 佐々木 綱, 飯田恭敬, 「交通工学」, オーム社, 1992.
- [30] 佐藤 航, “群集流動分析のための歩行シミュレーションモデルの開発”, 東京工業大学 情報環境学専攻 2002 年度修士論文 (大佛研究室), 2003.
- [31] 高橋 幸雄, 森村 英典, 「混雑と待ち」, 朝倉書店, 2001.
- [32] 田口 剛生, “渋谷駅構内の混雑時における人の流れに関する研究”, 東京工業大学 情報科学科 1997 年度学士論文 (高橋 (幸) 研究室), 1998.
- [33] 竹内 伝史, “住区内道路における歩行速度の決定について”, 土木学会中部支部研究発表会概要集, 第 4 分冊, pp.203-209, 1977.
- [34] 樗木 武, 横田 漠, 平田 登基男, 堤 昌文, 天本 徳浩, 「エース 交通工学」, 朝倉書店, 2002.

- [35] 藤田 陽子, “電車内における人の乗降立ち位置モデル”, 東京工業大学 数理・計算科学専攻 2001 年度修士論文 (高橋 (幸) 研究室), 2002.
- [36] 松下 聡, “待ち行動を含む群集歩行シミュレーションモデルの研究”, 日本建築学会計画系論文報告集, Vol.432, pp.79-88, 1992.
- [37] 毛利 正光, 塚口 博司, “歩行路における歩行者挙動に関する研究”, 土木学会論文報告集, Vol.268, pp.99-108, 1977.
- [38] 矢守 克也, 杉万 俊夫, “横断歩道における群集流の巨視的行動パターンのシミュレーション”, 実験社会心理学研究, Vol.32, No.2, pp.129-144, 1992.
- [39] 吉岡 昭雄, “歩行者交通と歩行空間 (1) —歩行者交通量の変動と設計のための交通流量—”, 交通工学, Vol.13, No.4, pp.25-36, 1978.
- [40] 吉岡 昭雄, “歩行者交通と歩行空間 (2) —歩行速度・密度・交通量について—”, 交通工学, Vol.13, No.5, pp.41-53, 1978.
- [41] 吉岡 昭雄, 桑原 玉樹, “歩行者交通と歩行空間 (3) —買物・通勤 (駅構内通路) の速度、密度、交通量—”, 交通工学, Vol.16, No.3, pp.13-21, 1981.
- [42] 吉岡 昭雄, “歩行者交通と歩行空間 その特質と特性”, 道路, Vol.487, pp.10-16, 1981.
- [43] 和田 剛, “渋谷八千公前交差点における横断者の歩行分析”, 東京工業大学 情報科学科 1998 年度学士論文 (高橋 (幸) 研究室), 1999.
- [44] 和田 剛, “スクランブル交差点における歩行挙動モデルとシミュレーション”, 東京工業大学 数理・計算科学専攻 2000 年度修士論文 (高橋 (幸) 研究室), 2001.

付録

A 流体力学的理論

歩行流を数量的に評価する上で、歩行速度・歩行者密度・歩行流率を考えることは本論文で既に述べた。ここでは [26] を参考にして、流体力学的理論を用いてこれらの関係式 (特に $V-K$ 関係式) を導く過程を紹介する。本節では歩行流の代わりに車両などで構成される交通流をベースに考えることとし、各特性量を速度 ($V[m/s]$)・密度 ($K[car/m]$)・流量 ($Q[car/s]$) とする。ただしここで導出される関係式は、歩行流においても対応する特性量を用いて置き換えることができる。また車両は横の動きが歩行者に比べて極端に少ないことから、 K は線密度として考えるのが一般的である。よって Q は流率ではなく、測定線分を単位時間に通過した台数である流量を考える。これらの特性量を用いると、交通流の基本式が成立する。

$$Q = KV \quad (26)$$

交通流は多数の車両の運動からなるため、あたかも連続した流体のように考えることができる。交通流の疎密の動きを波の伝播として取り扱うことができ、渋滞時の交通流の挙動の解析等に応用される。交通流を流体力学的に扱うことで、交通流の基本式 (26) 以外にも 2 つの方程式が成立し、それらから $V-K$ 関係式が導かれる。またある Q が与えられたときに残りの特性量が一意に決まる。

A.1 交通流の運動方程式

図 38 は円柱の中を流体が流れる様子を示している。流体の断面積を A とし、一定であるものとする。また流体中では密度に比例する圧力が働くものとする。このとき断面 $x, x + \Delta x$ の流体にニュートンの法則を適用すると、以下が成立する。

$$KA\Delta x \frac{dV}{dt} = -c^2 A \frac{\partial K}{\partial x} \Delta x + o(\Delta x) \quad (27)$$

ここで c は流体の伝播速度を表す定数、 t は時間とする。 $\Delta x \rightarrow 0$ とすると、Greenberg が提唱した次の運動方程式が得られる。

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{c^2}{K} \frac{\partial K}{\partial x} \quad (28)$$

さらに Drew はこれを一般化し、以下を交通流の運動方程式として用いた。

$$\frac{dV}{dt} = -c^2 K^n \frac{\partial K}{\partial x} \quad (29)$$

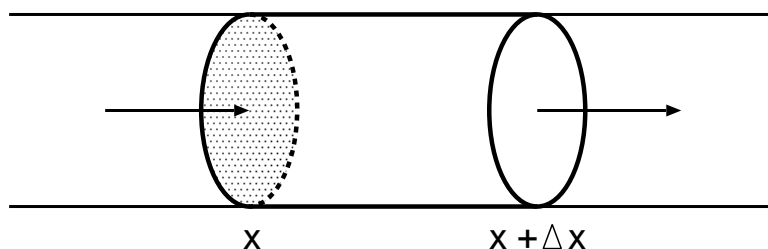


図 38: 交通流

A.2 交通流の連続方程式

時間 Δt 間において、断面 $x, x + \Delta x$ 間を通過する交通量の差は、この間に貯留される流体の量に等しいことから、以下が成立する。

$$-\frac{\partial Q}{\partial x} A \Delta x \Delta t = \frac{\partial K}{\partial t} A \Delta t \Delta x + o(\Delta t \Delta x) \quad (30)$$

ここで $\Delta x \rightarrow 0, \Delta t \rightarrow 0$ とすると、以下の交通流の連続方程式を得る。

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (31)$$

また交通流の基本式 (26) から以下のようにも書ける。

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \frac{\partial(KV)}{\partial x} = 0 \quad (32)$$

A.3 $V-K$ 関係式

一般的に速度 V は密度 K の減少関数 $V = f(K)$ で表すことができる。このとき、

$$\frac{\partial(KV)}{\partial x} = \left(V + K \frac{dV}{dK} \right) \frac{\partial K}{\partial x} \quad (33)$$

となり、交通流の連続方程式 (32) は以下ようになる。

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \left(V + K \frac{dV}{dK} \right) \frac{\partial K}{\partial x} = 0 \quad (34)$$

一方、

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} \quad (35)$$

であり、また、

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{dV}{dK} \frac{\partial K}{\partial t} \quad (36)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{dV}{dK} \frac{\partial K}{\partial x} \quad (37)$$

であるから、交通流の運動方程式 (29) は以下ようになる。

$$\frac{dV}{dK} \frac{\partial K}{\partial t} + \left(V \frac{dV}{dK} + c^2 K^n \right) \frac{\partial K}{\partial x} = 0 \quad (38)$$

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \left(V + \frac{c^2 K^n}{\frac{dV}{dK}} \right) \frac{\partial K}{\partial x} = 0 \quad (39)$$

こうして得られた偏微分方程式 (34), (39) は $\partial K / \partial t, \partial K / \partial x$ について同次である。よってこれらの方程式が自明でない解を持つには、

$$\begin{vmatrix} 1 & V + K \frac{dV}{dK} \\ 1 & V + \frac{c^2 K^n}{\frac{dV}{dK}} \end{vmatrix} = 0 \quad (40)$$

を満たさなくてはならない。よって関数 f が単調減少より、

$$\frac{dV}{dK} = -cK^{\frac{n-1}{2}} \quad (41)$$

を得る。これを変数分離して解き、 $K = 0$ のとき $V = V_s$ 、 $K = K_j$ のとき $V = 0$ とすれば以下の式となる。

$$\begin{cases} V = c \ln\left(\frac{K_j}{K}\right) & \text{if } n = -1 \\ V = V_s \left\{ 1 - \left(\frac{K}{K_j}\right)^{\frac{n+1}{2}} \right\} & \text{if } n > -1 \end{cases} \quad (42)$$

通常は $n = 1$ とした Greenshields の式 (43) を採用する。

$$\frac{V}{V_s} + \frac{K}{K_j} = 1 \quad (43)$$

A.4 各特性量の一意性

交通流中に密度の不連続な箇所があり、その前後の 2 つの断面をそれぞれ A、B とする。断面 A での流量を Q 、密度を K とし、断面 B での流量を $Q + \Delta Q$ 、密度を $K + \Delta K$ とする。また密度の不連続な箇所を移動する速度を c とする。このとき単位時間あたりに 2 断面を通過する車両数の差がこの 2 断面内に貯留される車両数に等しくなる。よって以下が成立する。

$$Q - (Q + \Delta Q) = -c\{(K + \Delta K) - K\} \quad (44)$$

$$c = \frac{\Delta Q}{\Delta K} \quad (45)$$

ここで $\Delta K \rightarrow 0$ とすると、

$$c = \frac{dQ}{dK} \quad (46)$$

となる。密度に対する微小な攪乱は $Q-K$ 曲線の傾きに等しい速度で移動することになるため、自由流領域では正の方向に伝播し、渋滞流領域では負の方向に伝播していくことがわかる。以上よりある流量が与えられると、密度と速度が一意に求まる。

B シミュレーションと応用例

2節で述べたベースモデルに4節の高密度アルゴリズムを組み込んだ本モデル(モデル5)を用いて、様々なシミュレーションを行なった。なお、図では便宜上歩行者を二等辺三角形で表し、頂点のある方向に向かって進むものとしている。また歩行者同士を結ぶ直線は、その歩行者同士が優先関係を結んでいることを表す。

B.1 回避・追従・追越のシミュレーション

代表的なマイクロ現象とも言うべき回避行動・追従行動・追越行動を詳細なレベルで実現することを大きな目的として、ベースモデルの開発が行なわれてきた。よってベースモデルでもこれらの行動はよく表現できている。そして本モデルではアイコンタクトによる優先権Bをモデルに導入しており、その様子が特に回避のシミュレーションに顕著に現れている。

図39は対向する歩行者 i, j が互いに回避し合う様子を示している。両者が同じ時点で $20[m]$ 四方の歩行空間に参入し、0.5秒毎の歩行軌跡を10秒間図示している。ベースモデルでは両者とも情報空間内に相手が入った瞬間に回避行動を始めるが、本モデルでは両者とも情報空間内に相手が入った瞬間に優先関係を結ぶ。そしてこの場合は歩行者 i が優先歩行者に、歩行者 j が非優先歩行者になる。優先歩行者 i は非優先歩行者 j を無視し、そのまま自由歩行(直進)する。逆に非優先歩行者 j は優先歩行者 i に歩行経路を譲るため、ベースモデルよりも大きく回避行動を取る。回避が終わると、優先歩行者 i 同様、自由歩行する。

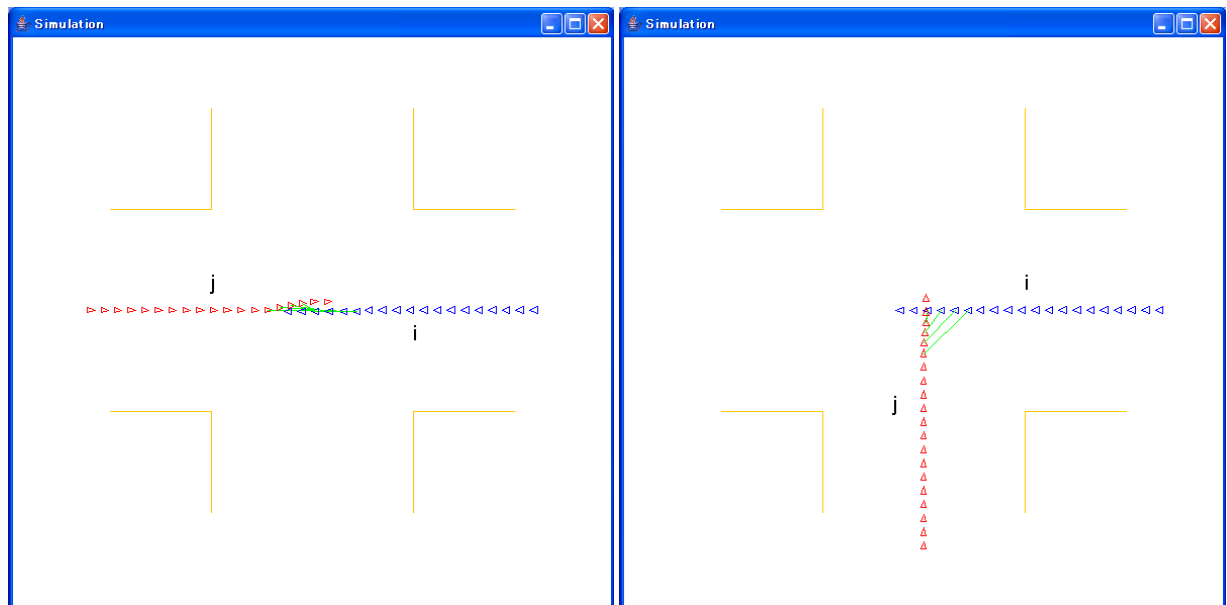


図 39: 回避の様子 (1)

図 40: 回避の様子 (2)

図40は歩行者 i, j がそれぞれ横切るときの挙動を示している。図39と同様の歩行空間を用い、同様の方法で図示している。ベースモデルでは両者とも減速しながら回避行動を取るが、本モデルでは優先歩行者 i は自由歩行し続け、非優先歩行者 j が減速して優先歩行者 i に歩行経路を譲っている。このことは優先関係を表す直線の傾きからも明らかである。そして優先歩行者 i が目の前を通り過ぎると次第に速度を上げ、情報空間外となるとようやく自由歩行できるようになる。

回避のシミュレーションの他にも、追従や追越のシミュレーションももちろん表現できるが、回避のシミュレーションと比べ優先権Bを用いた効果は少なく、ベースモデルとほぼ同じ挙動をするため、図は割愛する。

B.2 横断歩道・スクランブル交差点のシミュレーション

ベースモデルの出発点は JR 渋谷駅八チ公口前のスクランブル交差点 (以下、渋谷駅前交差点) での歩行挙動の再現を目的としており、本研究でも [43][44] と同様に渋谷駅前交差点での歩行者の様子を観察してきた。実際に図 41 に示した渋谷駅前交差点の様子を見てみると、サブメイン流の歩行者がメイン流の歩行者に対して非常に少ない (サブメイン流の歩行者数はメイン流の歩行者数の約 $\frac{1}{10}$ であることが [43] で報告されている) ことから 2 方向モデルとして近似でき、歩行流を形成していることがわかる。特に歩行流の隊列化は典型的なマクロ現象であり、追従行動が頻繁に行なわれていることを物語っている。

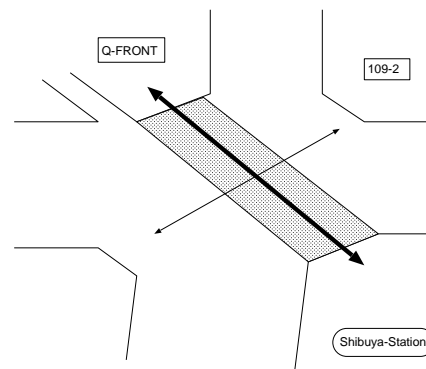


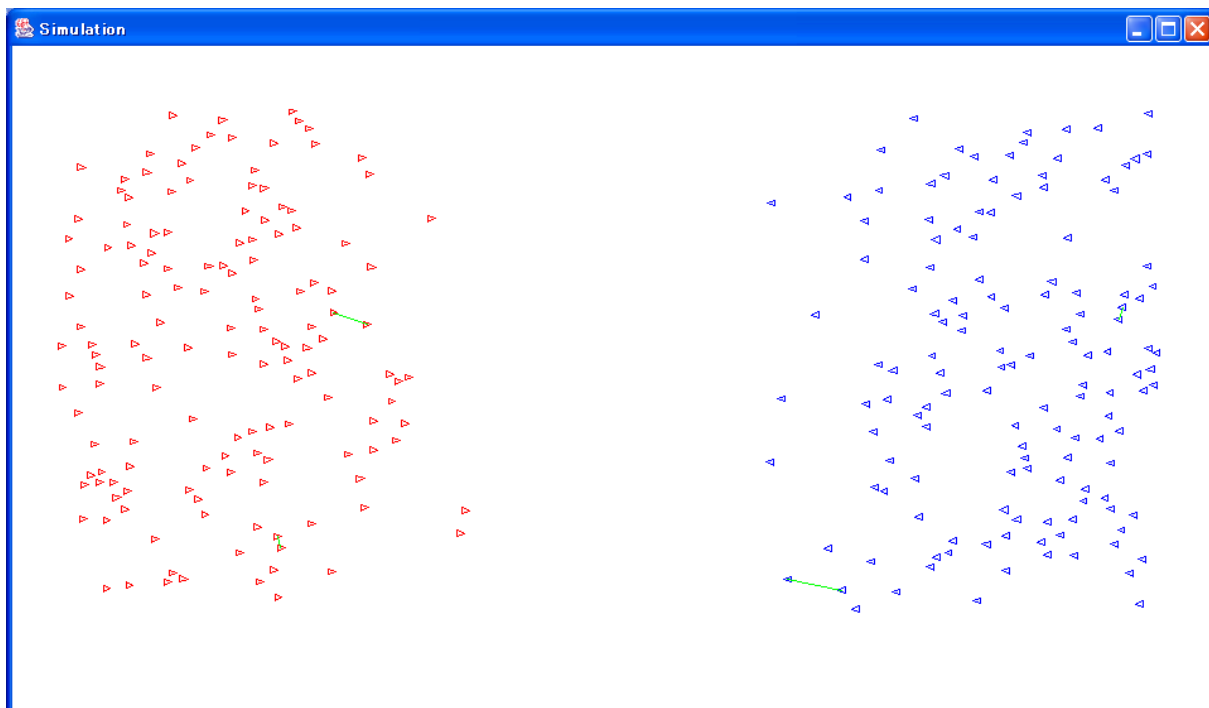
図 41: 渋谷駅前交差点

図 42 は 2 方向モデルのシミュレーションにおいて 2 分間実行した様子を 12 秒毎に図示したものである。用いた歩行空間は図 12 と同じものである。左右とも平均 $12.0[\text{ped}/\text{s}]$ ずつのポアソン過程によって歩行者を発生させ、歩行者密度は $2.0[\text{ped}/\text{m}^2]$ を超える。ベースモデルでは膠着状態に陥る状況でも、高密度歩行アルゴリズムの効果が現れ、スムーズな歩行流を形成しているのが見てとれる。特に優先関係を結ぶ歩行者が多く、未然に膠着状態を防いでいると考えられる。図を見ると、歩行者は全体的に見て一様に分布しているわけではなく、混雑しているところとそうでないところが不規則に存在しているのがわかる。歩行者の数が多いと後続の歩行者は左右のスペースが少ないために追越ができず、前方にいる歩行者のペースに合わせざるを得ない。そのために混雑した領域が生じることになり、逆に混雑していない領域は前方にスペースが十分あるために自由歩行に近い歩行者によって作られる。

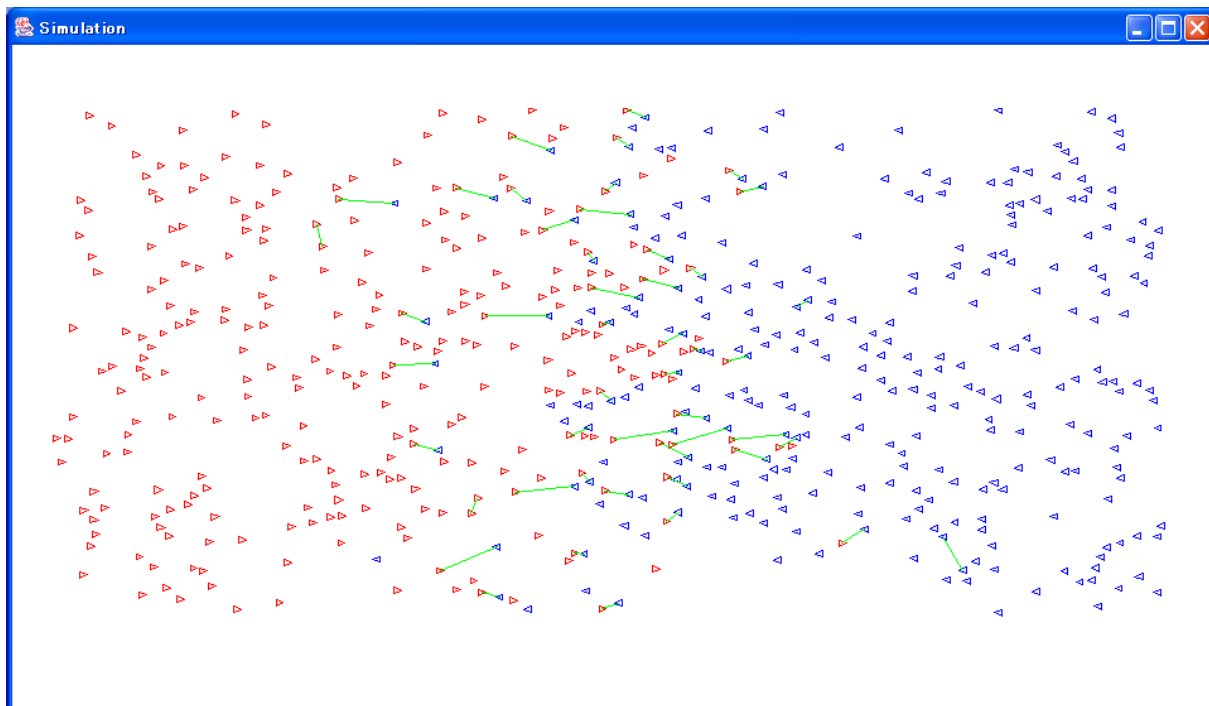
またこのシミュレーションでは対向者が隊列状に互いにすれ違う様子も観測される。歩行流の隊列化は現実でもよく見られる代表的なマクロ現象であり、図 41 に示した渋谷駅前交差点でも実際に観察される。特に混雑した歩行空間内で見られることが多いのが特徴であり、大きな速度を持つ歩行者であっても混雑のために追越ができず、前方の歩行者に追従するために隊列化が起こる。これによって追従する歩行者は対向者との回避にそれほど注意を要することがなく、歩行流全体としても隊列の先頭同士が対向流を回避するだけで済むため、比較的スムーズな流れを保つことができるというメリットがある。

図 43 は 4 方向モデルのシミュレーションにおいて 2 分間実行した様子を 12 秒毎に図示したものである。左側にある図が歩行空間全体を表し、その図の中央部分を拡大した図が右側となっている。用いた歩行空間は $50[\text{m}]$ 四方の正方形である。左右が平均 $5.0[\text{ped}/\text{s}]$ ずつ、上下が平均 $1.0[\text{ped}/\text{s}]$ ずつのポアソン過程によって歩行者を発生させる。2 方向モデルに比べて歩行者密度はさほど高くないが、それでも中央部分の混雑度は図 42 に示した 2 方向モデルのそれに匹敵する。これはメイン流の大きな流れの中においてサブメイン流の歩行がいかに難しいかを示していると言えよう。

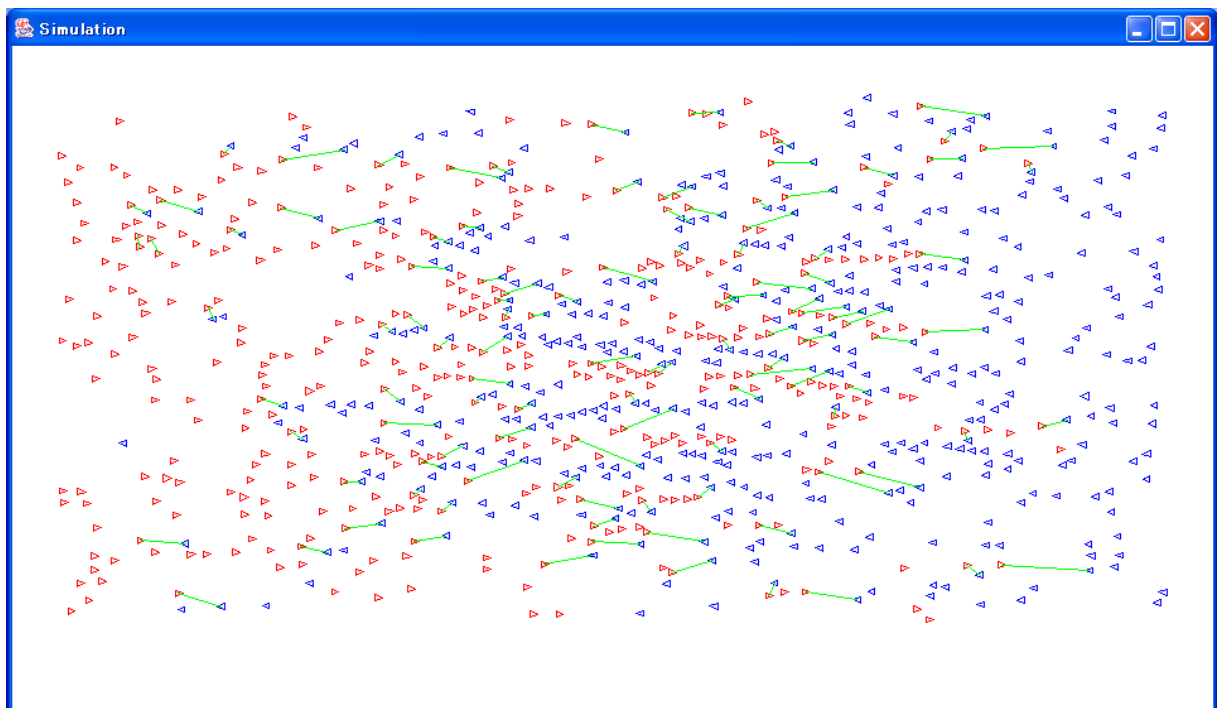
しかしベースモデルに比べて、サブメイン流の流れが非常にスムーズである。これはアイコンタクトによる優先権 B の効果であり、サブメイン流の歩行者がメイン流の歩行者と優先関係を結び、一方が他方の歩行経路を譲るために優先歩行者は減速することなく歩行し続けることができる。そればかりか非優先歩行者にとっても、優先歩行者が減速しないために少しの間待つだけで再び歩行が可能となるメリットもある。このように 6 節ではあまり見られなかったアイコンタクトによる優先権 B の効果がここでは顕著に現れている。



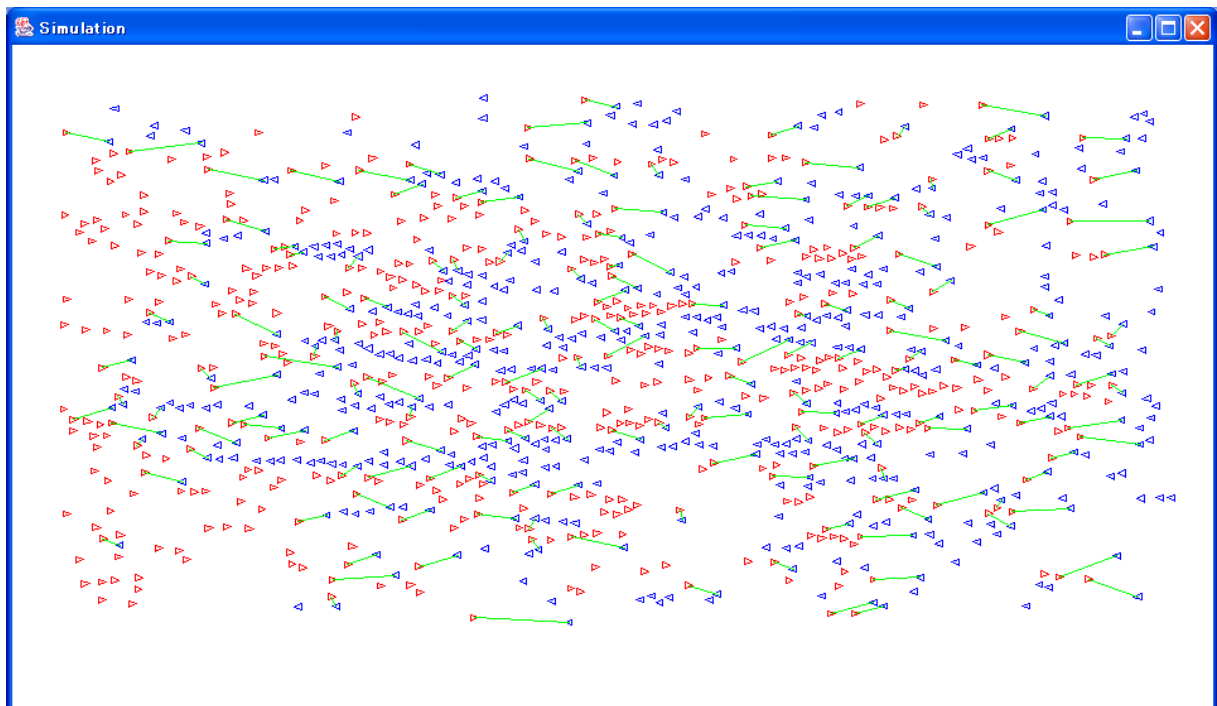
(12 秒後)



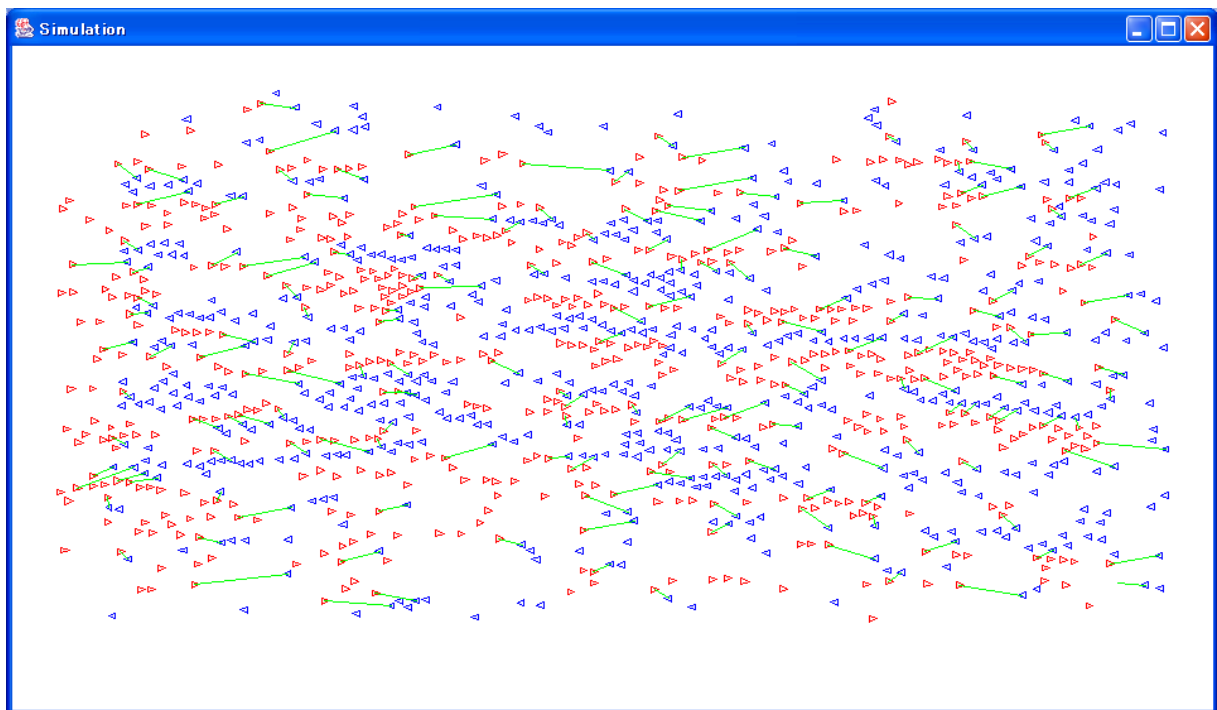
(24 秒後)



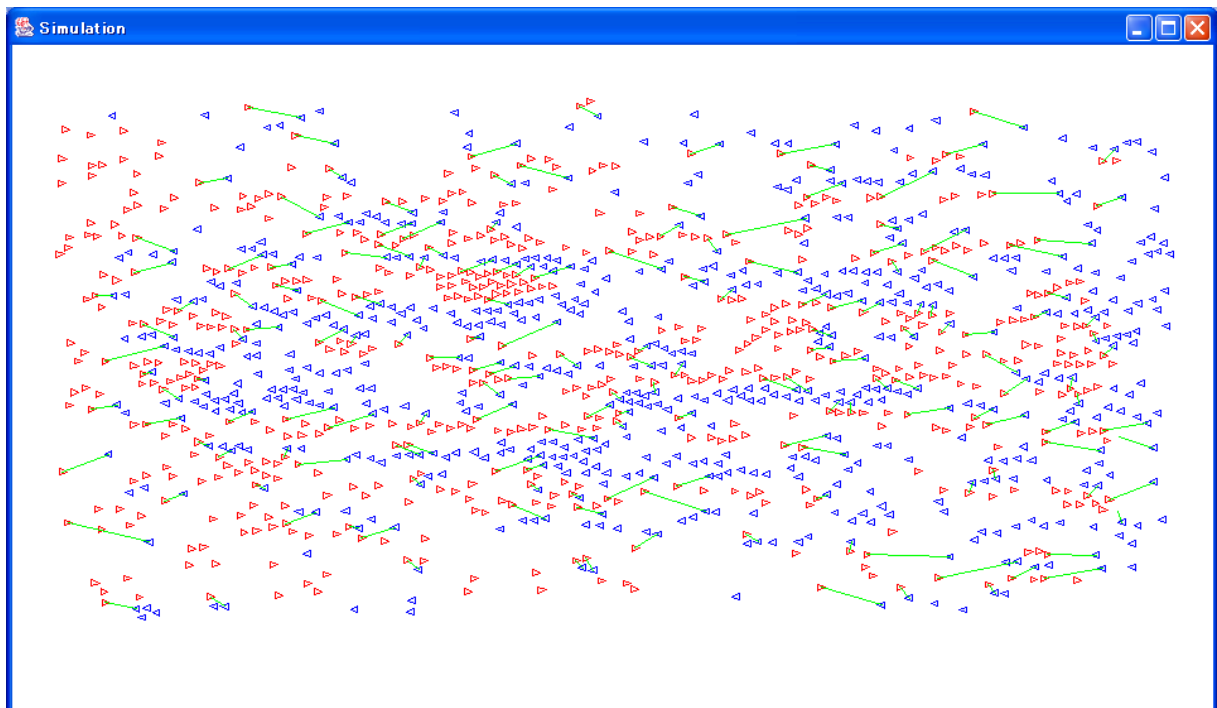
(36 秒後)



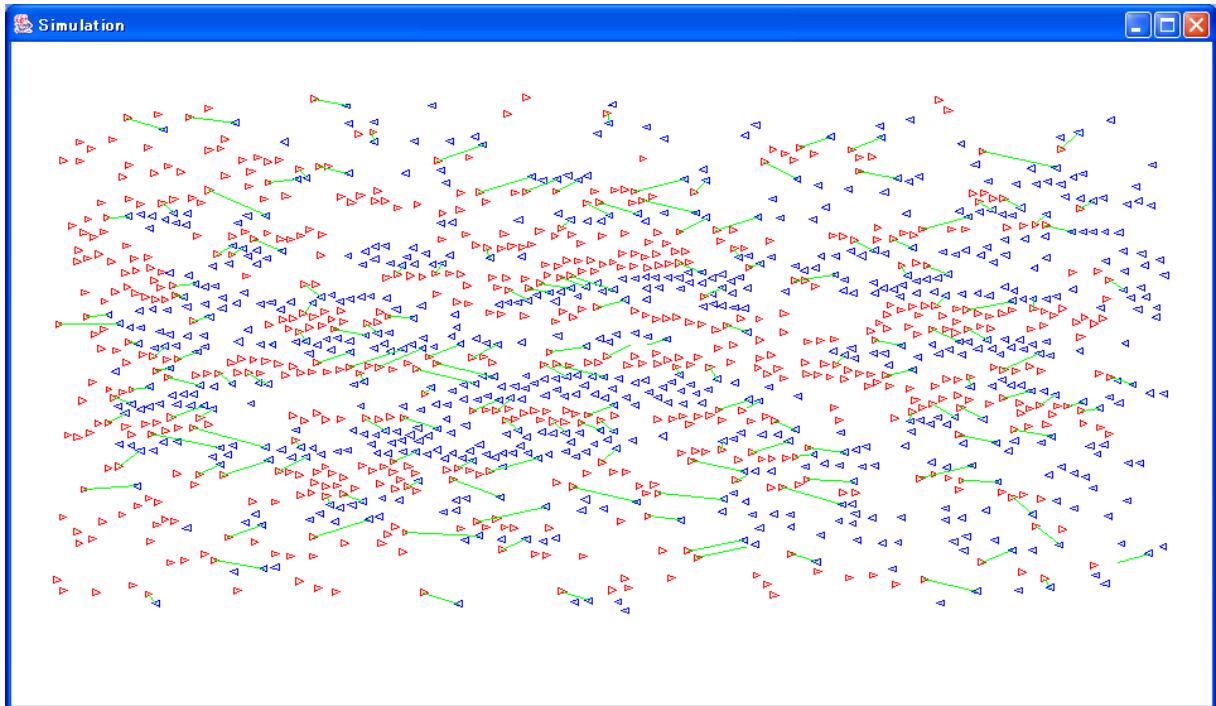
(48 秒後)



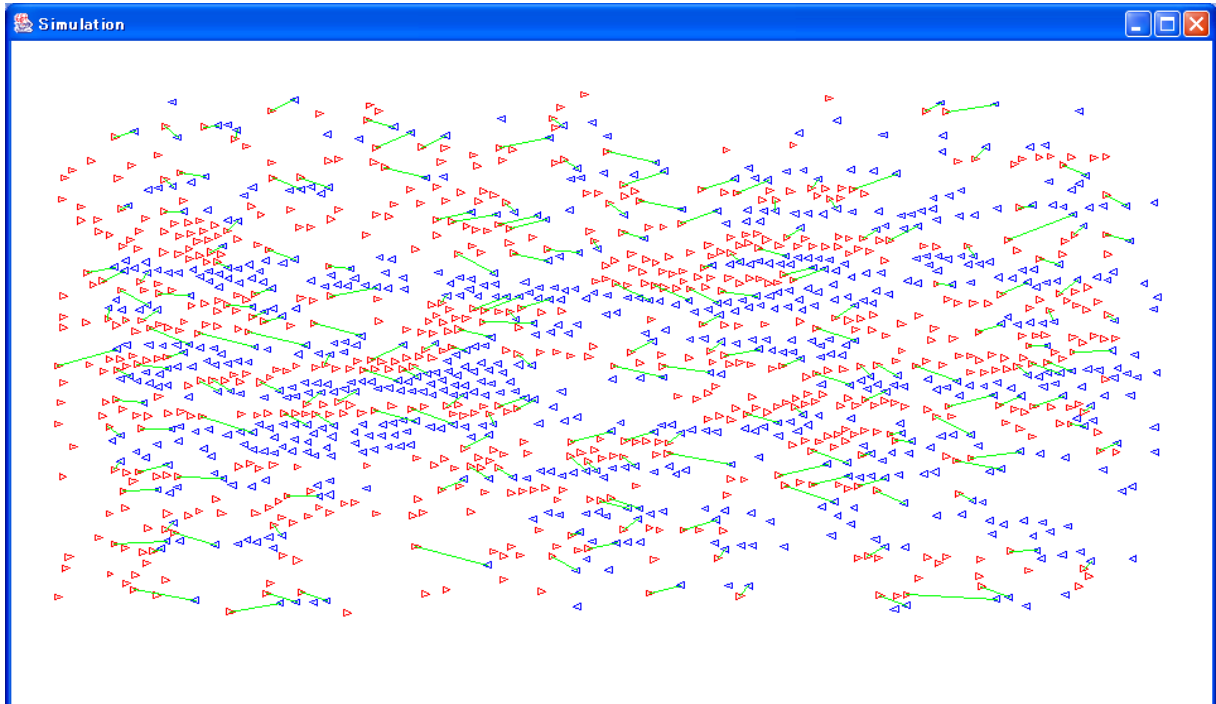
(60 秒後)



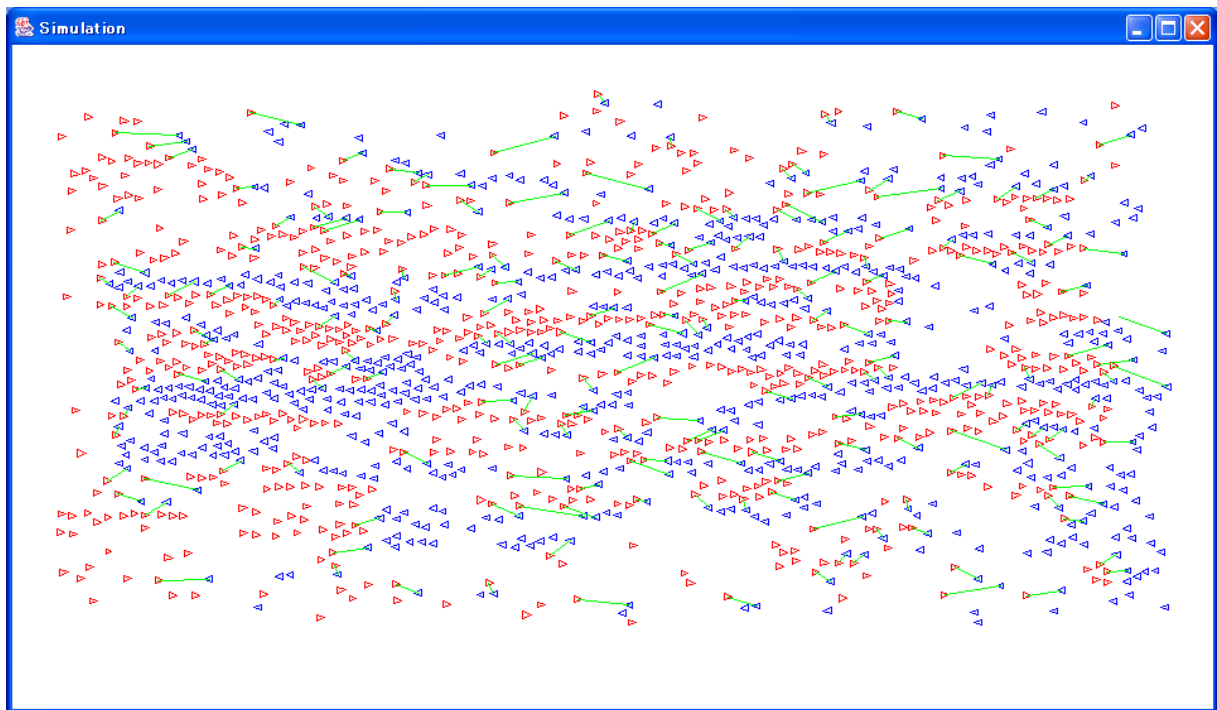
(72 秒後)



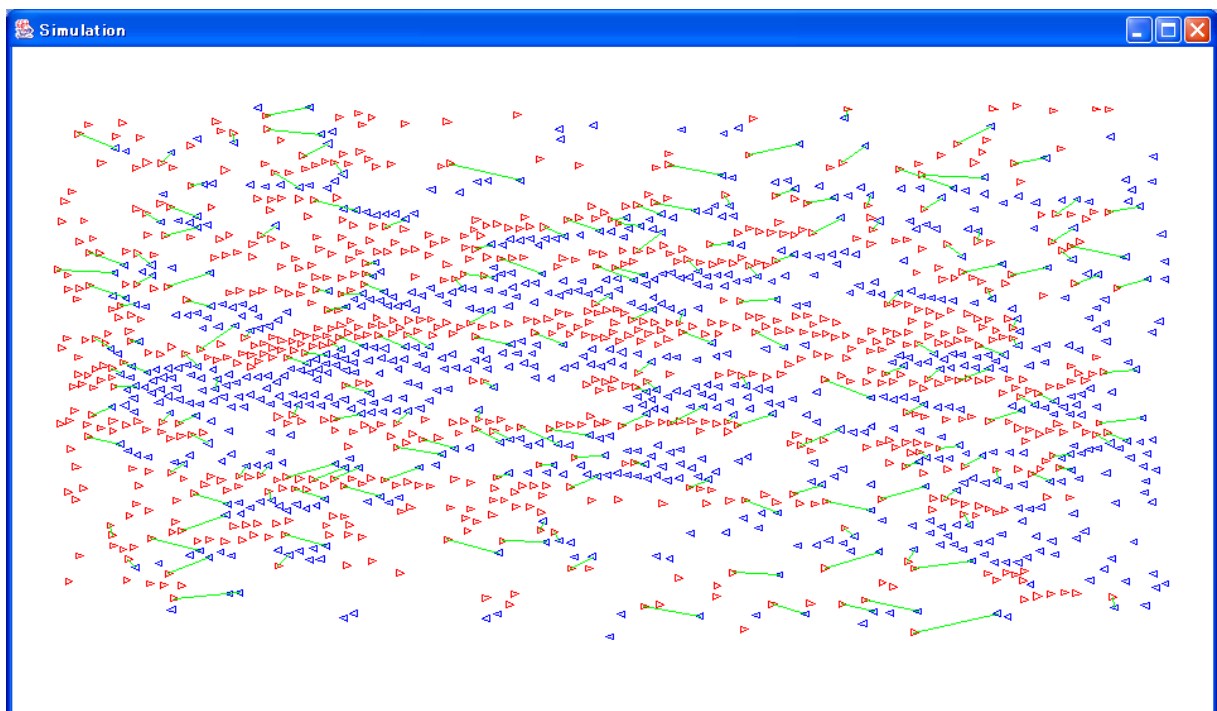
(84 秒後)



(96 秒後)

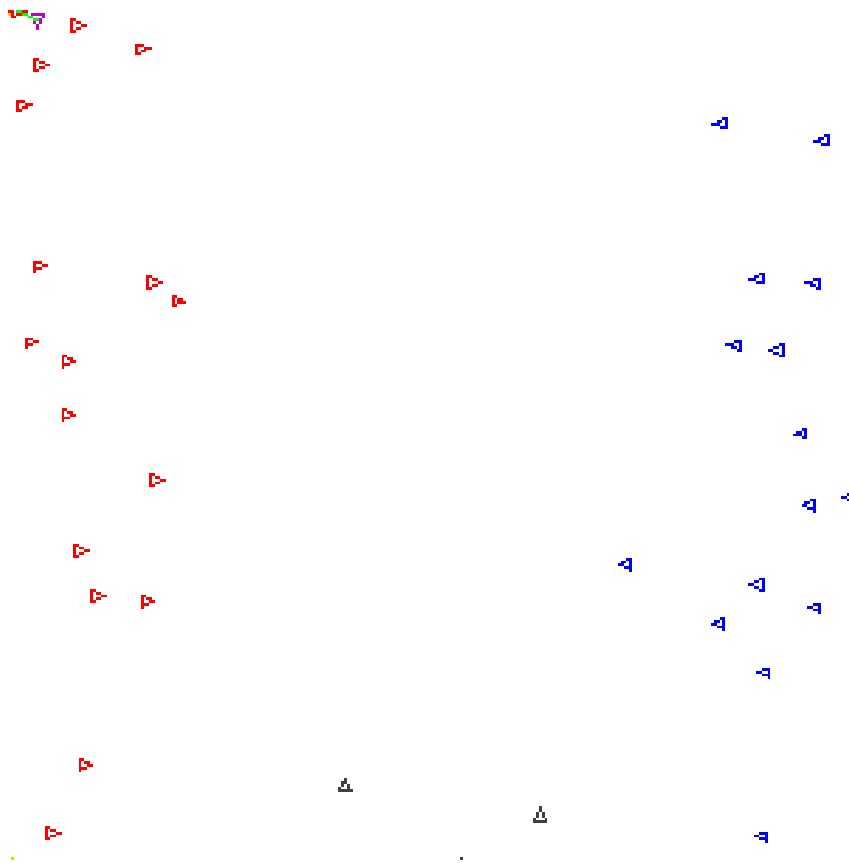
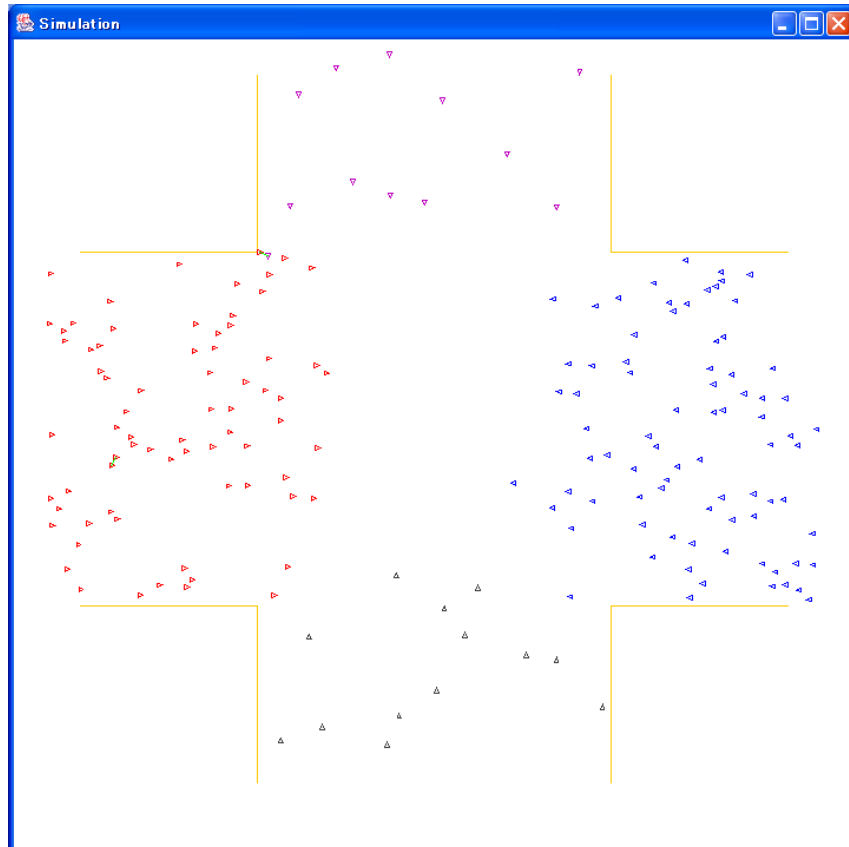


(108 秒後)

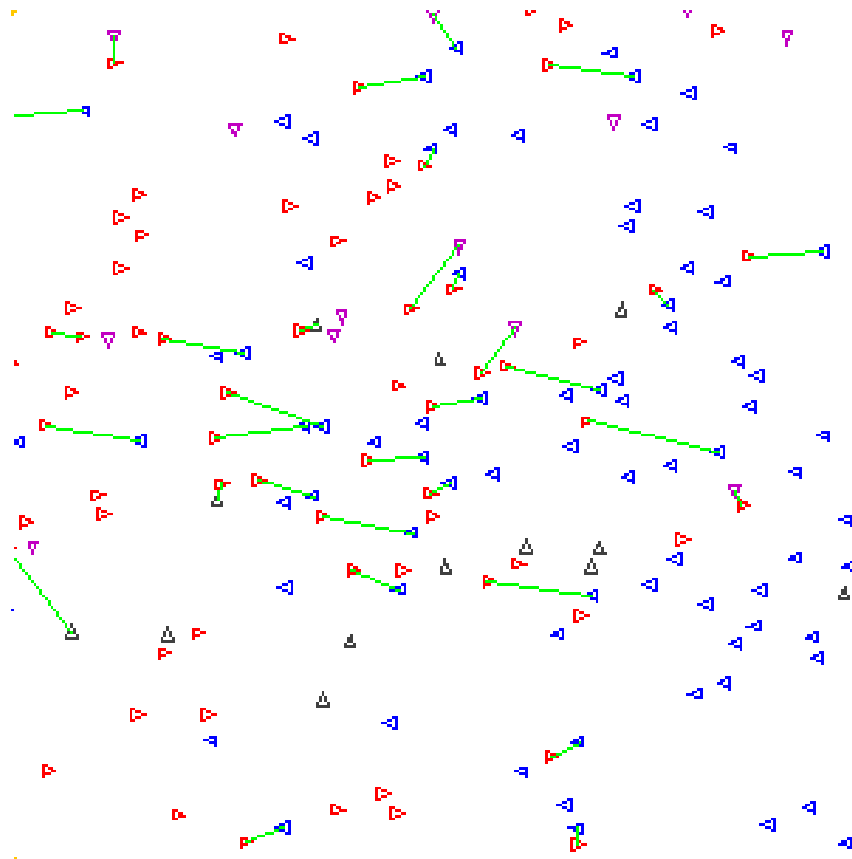
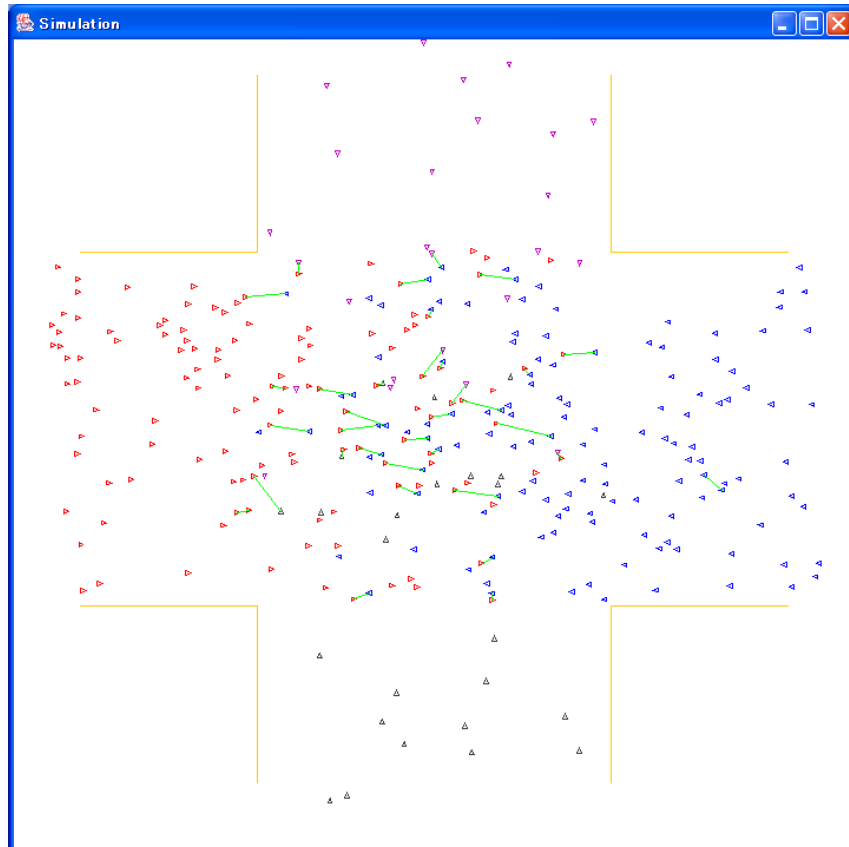


(120 秒後)

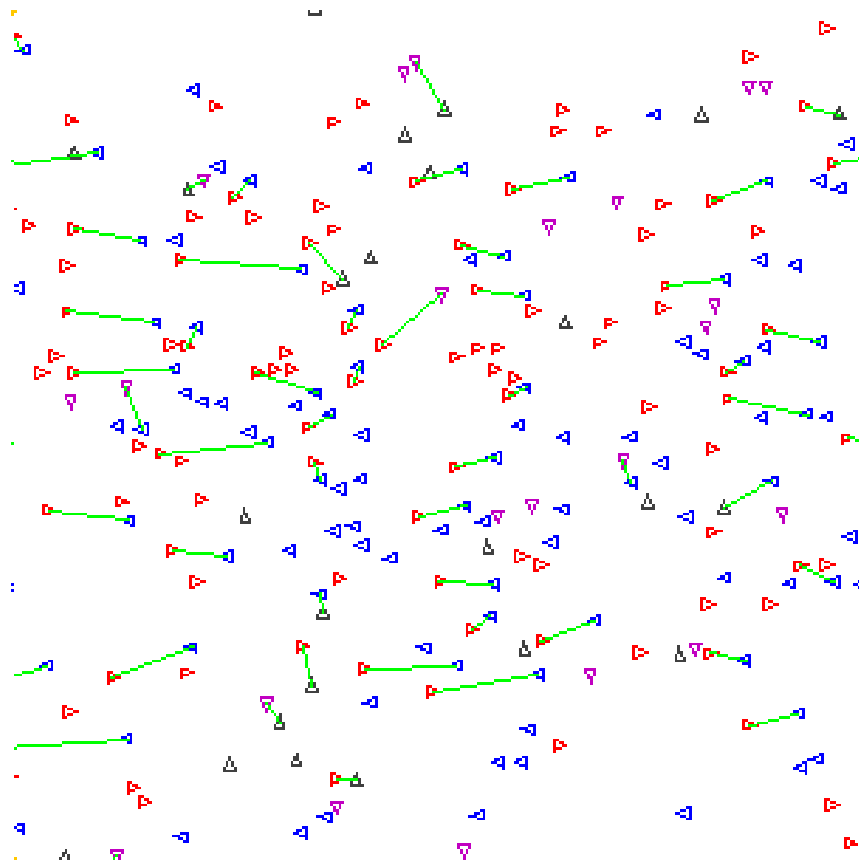
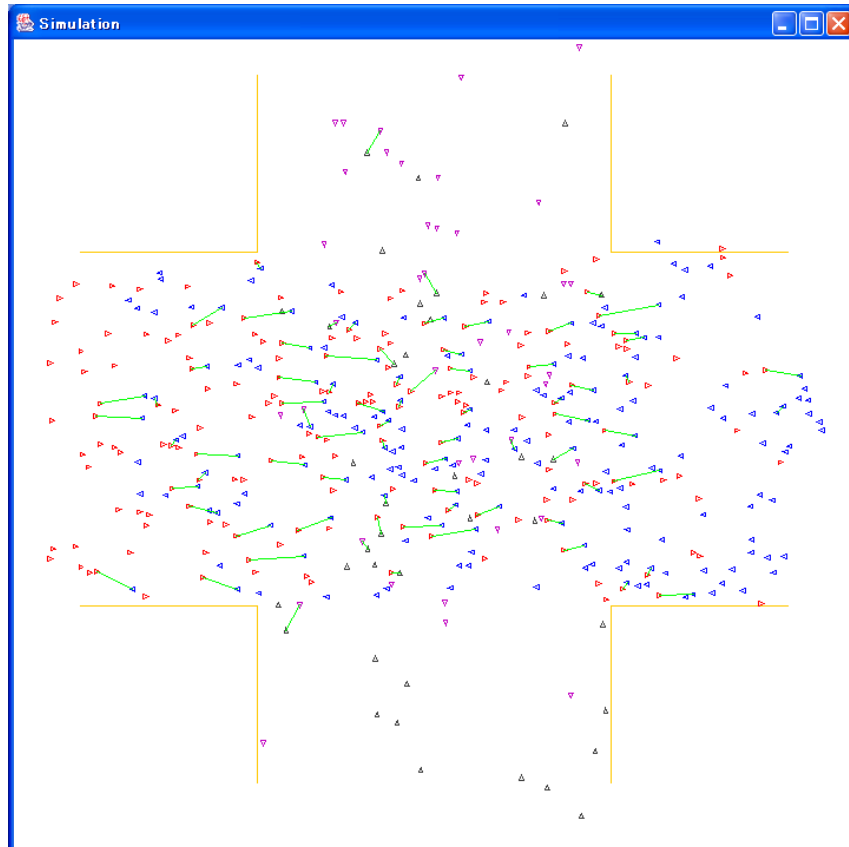
図 42: 横断歩道の様子



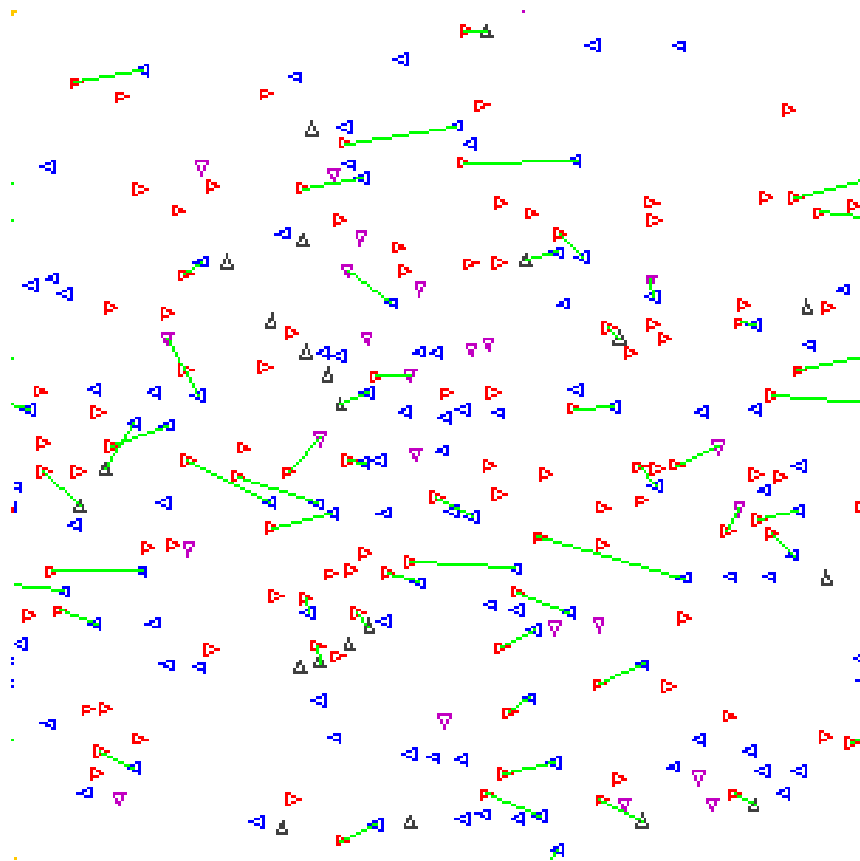
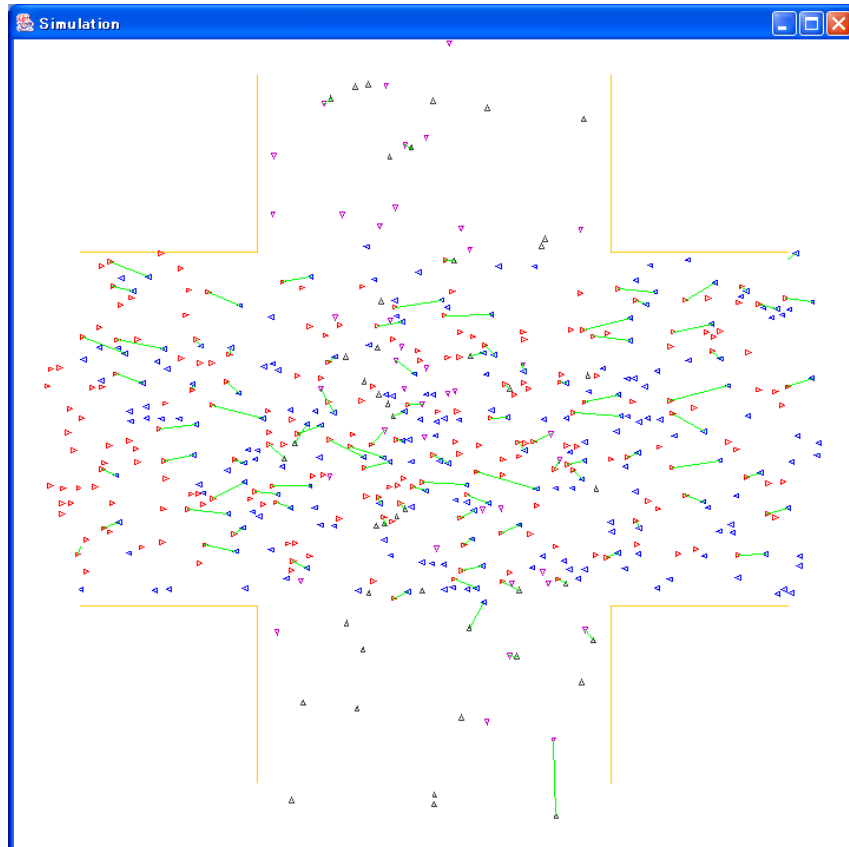
(12 秒後)



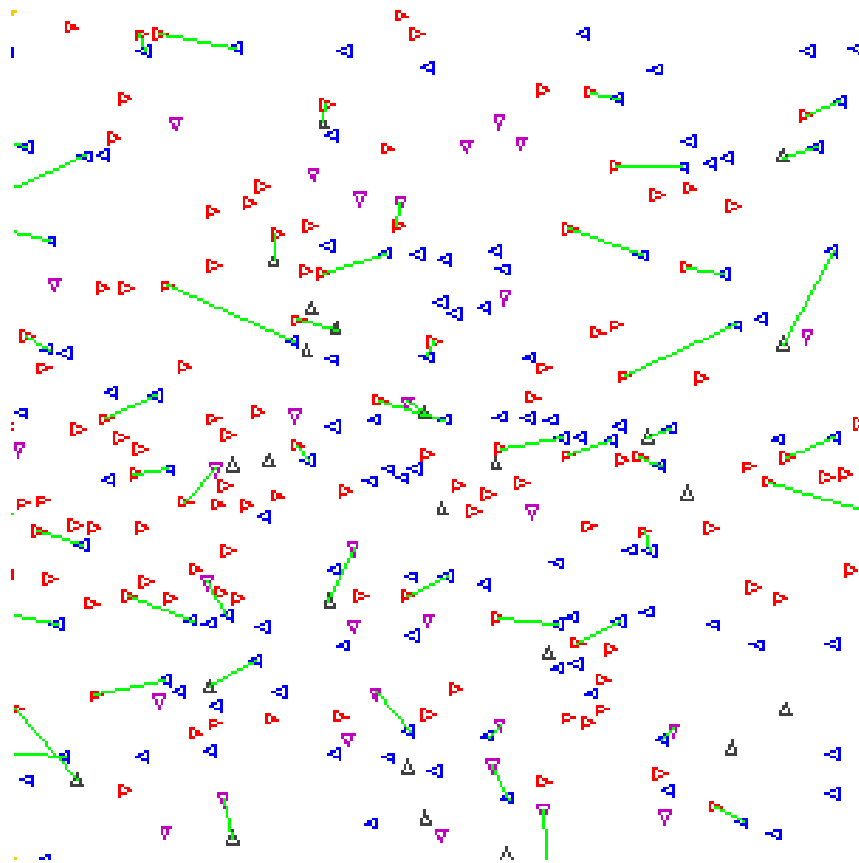
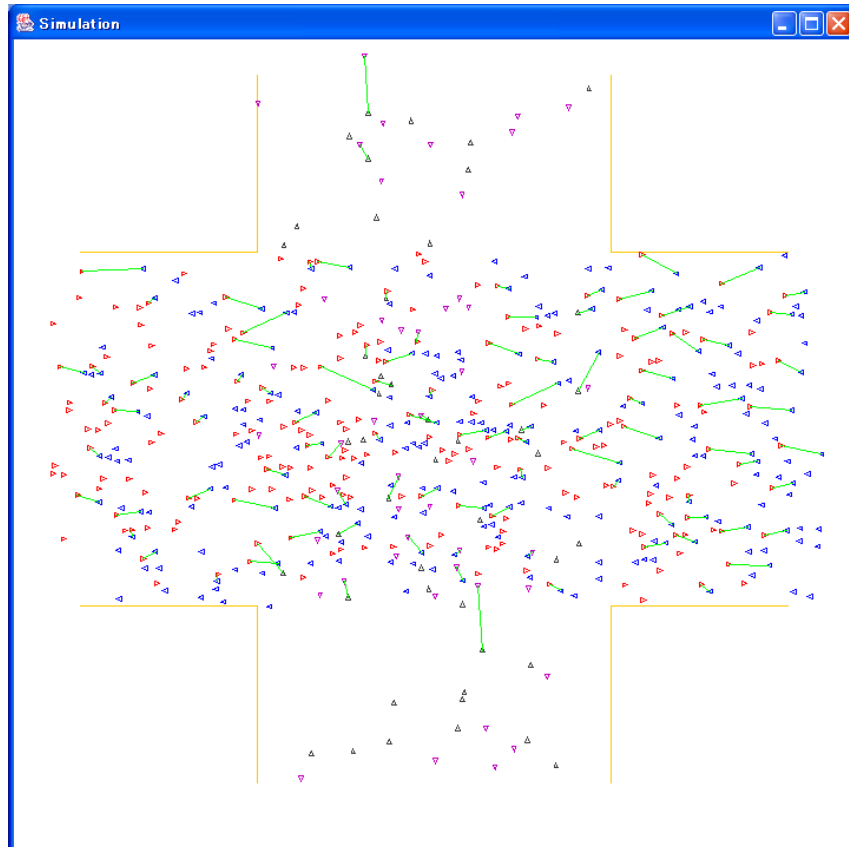
(24 秒後)



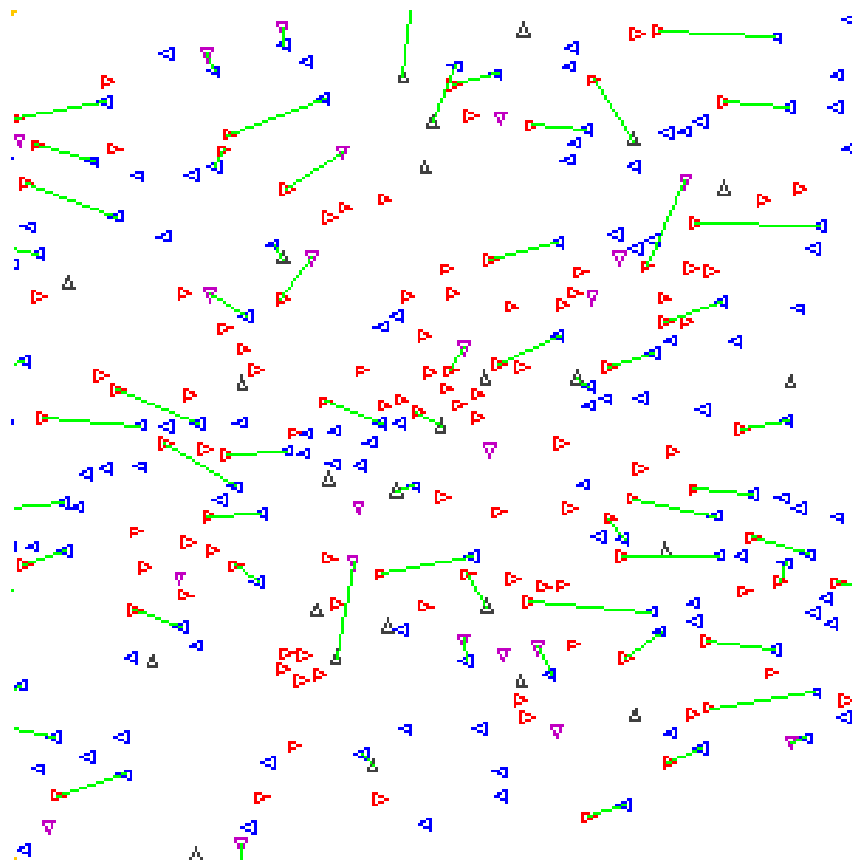
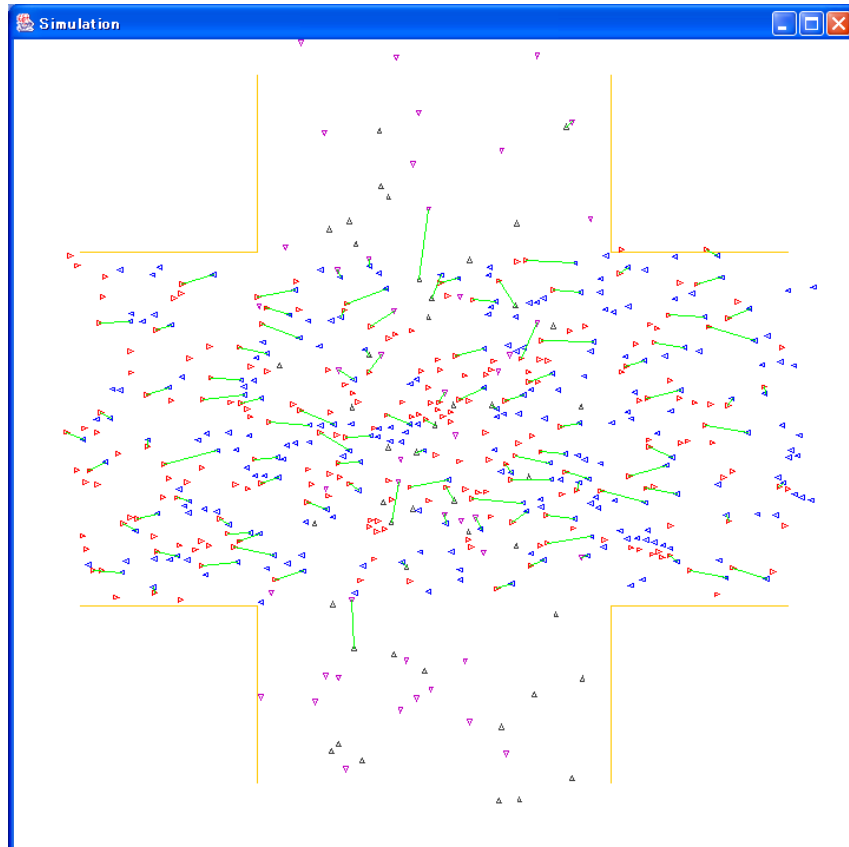
(36 秒後)



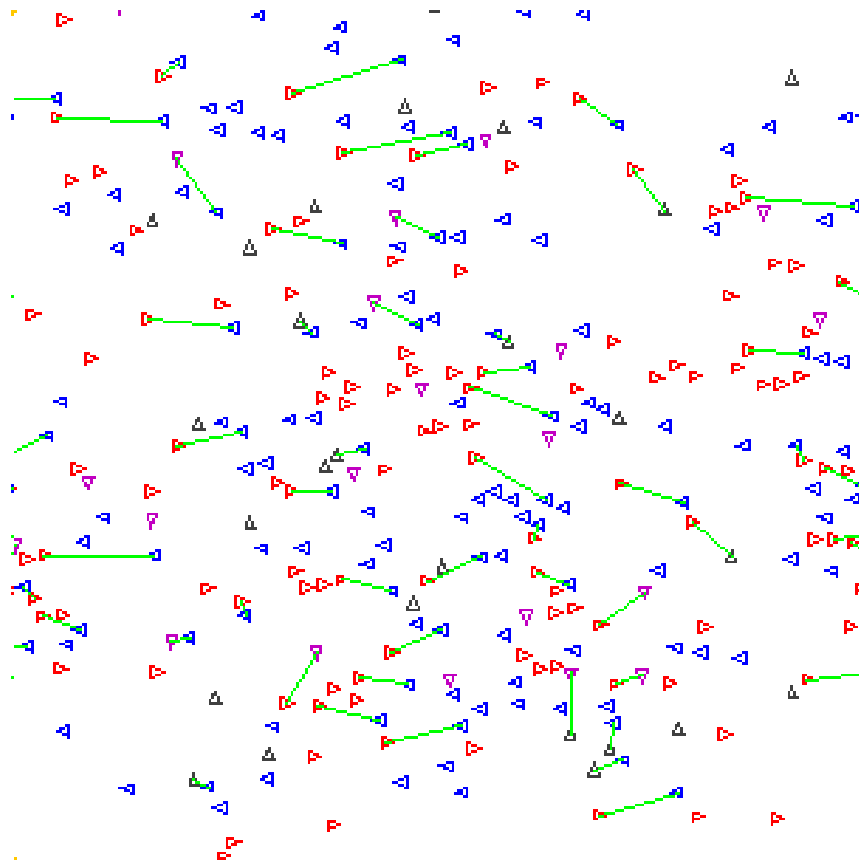
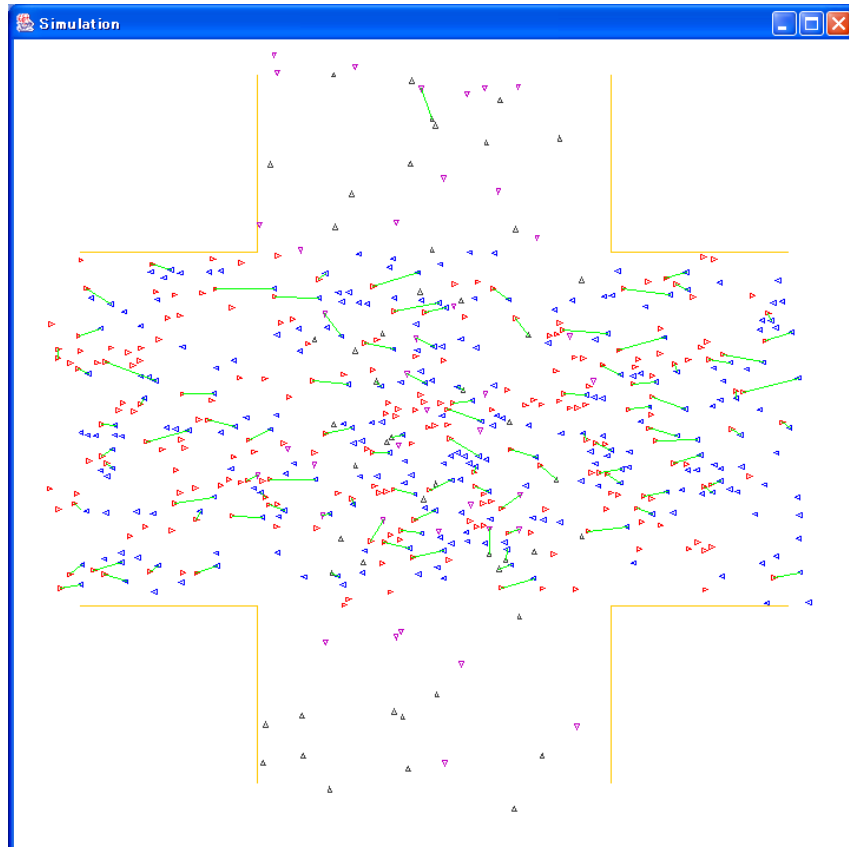
(48 秒後)



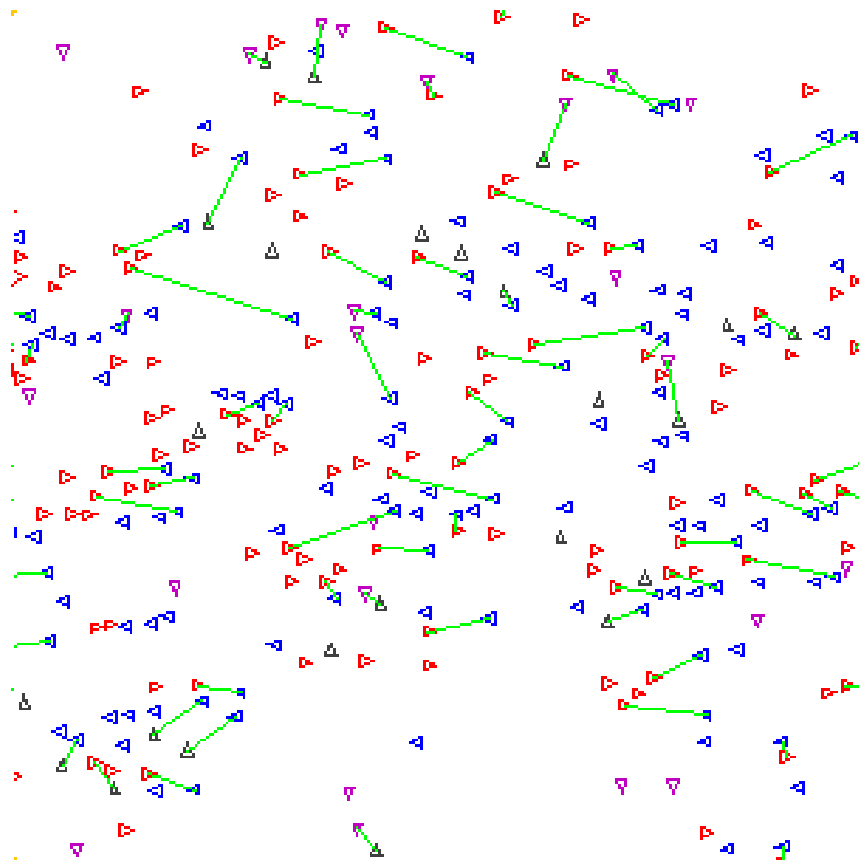
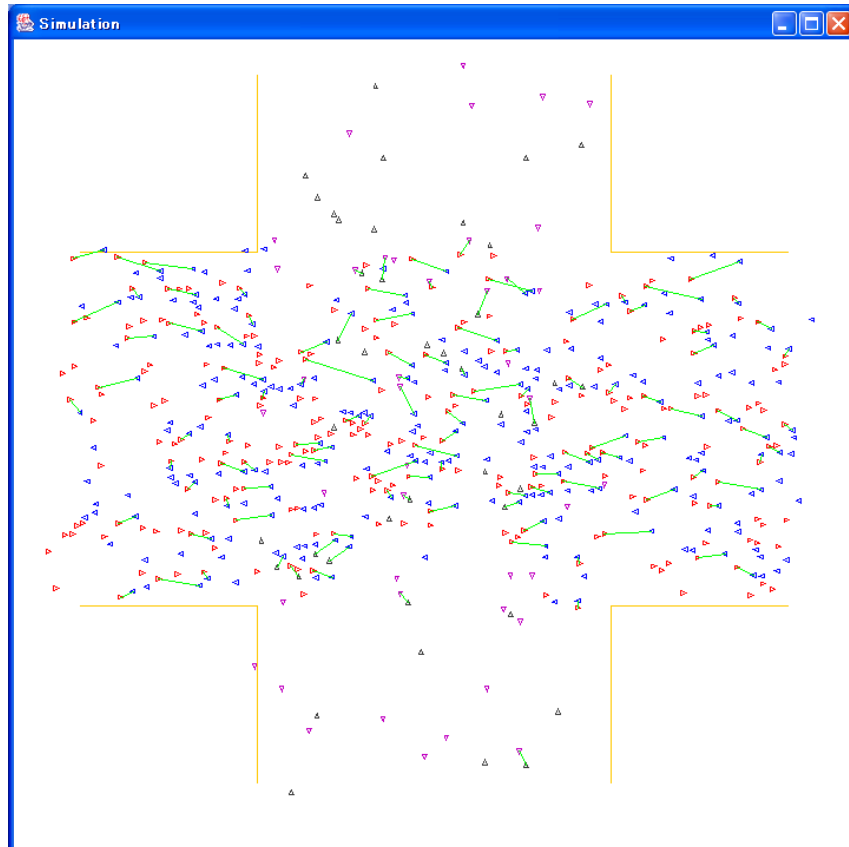
(60 秒後)



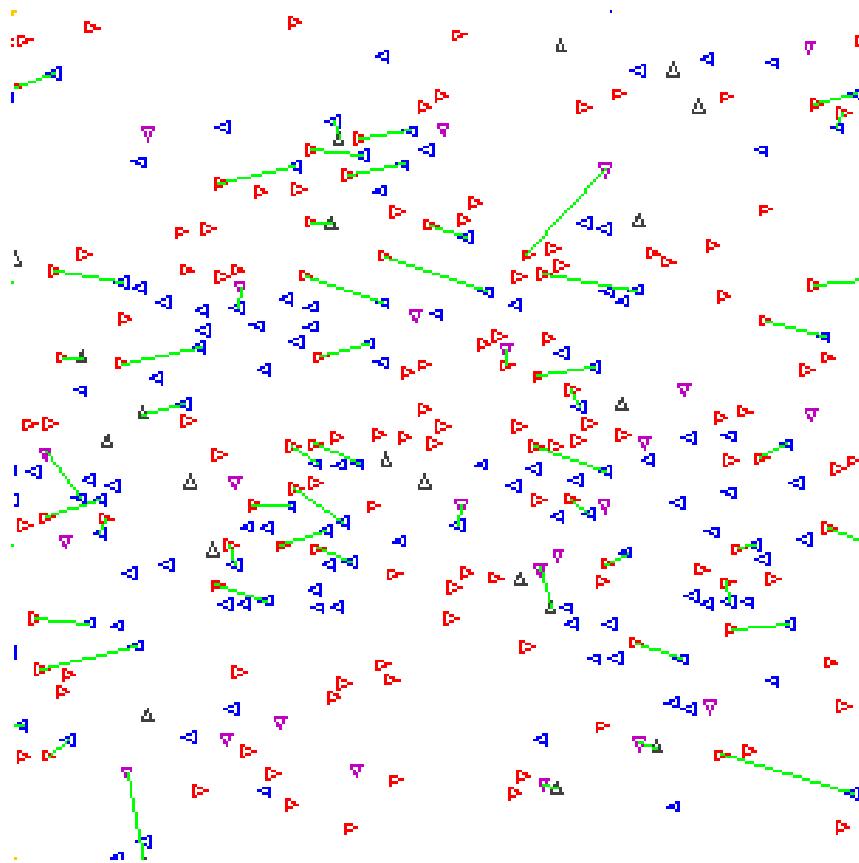
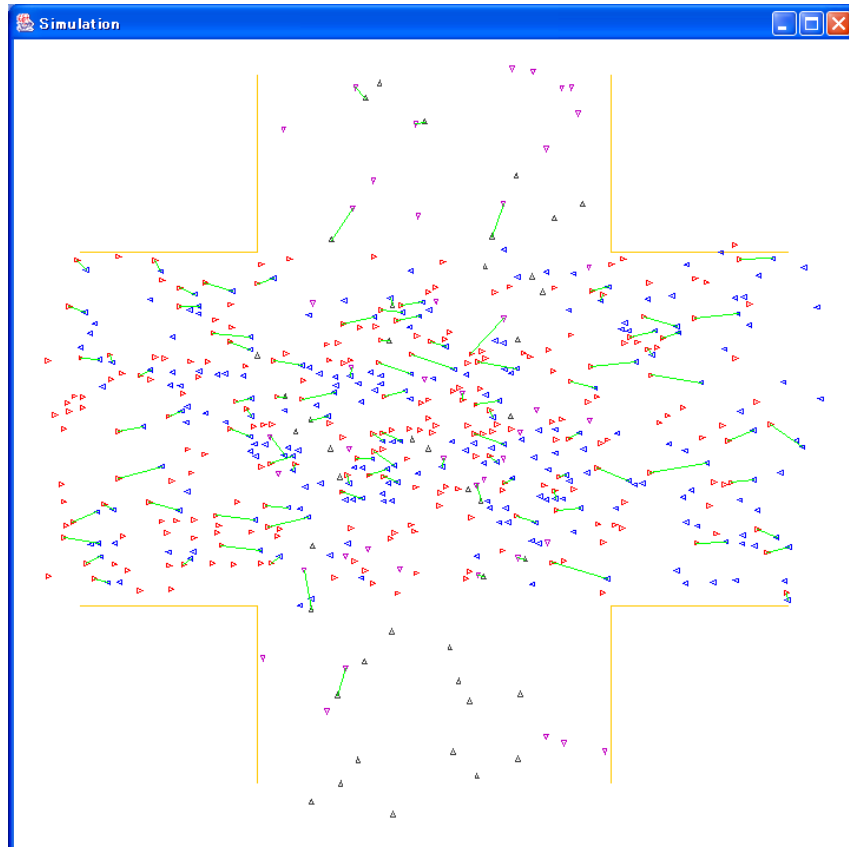
(72 秒後)



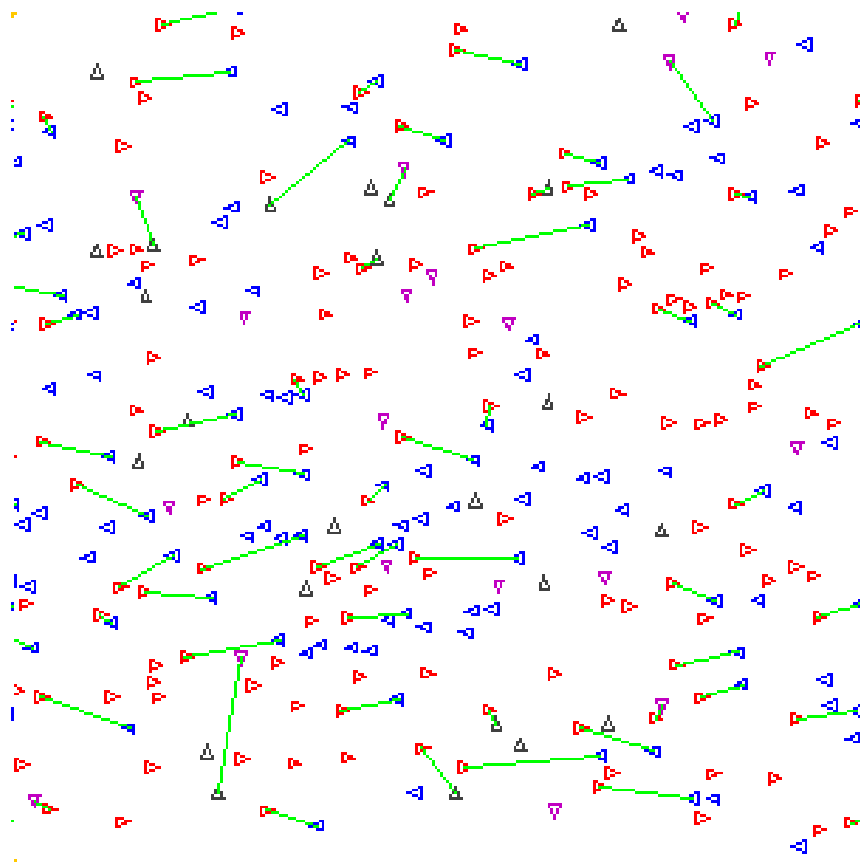
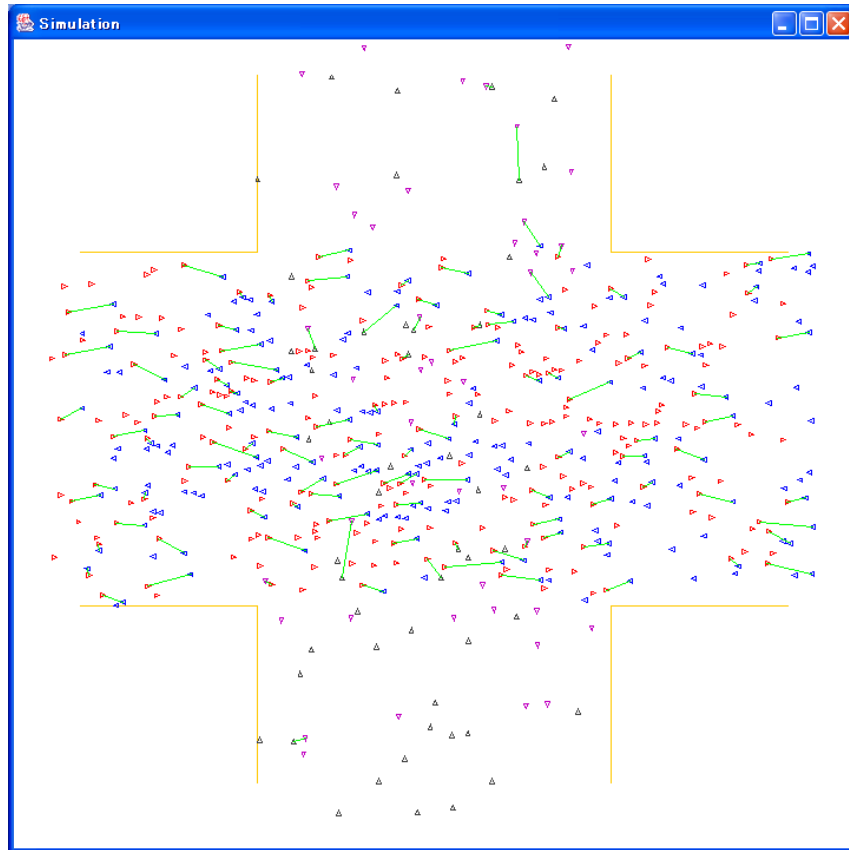
(84 秒後)



(96 秒後)



(108 秒後)



(120 秒後)

図 43: スクランプル交差点の様子

B.3 障害物のある歩行空間でのシミュレーション

本論文ではこれまで「動的」な障害物である他の歩行者のみを衝突の対象と考えてきた。しかしベースモデル同様、本モデルでも「静的」な障害物として柱や壁、施設などを考えることができる。特に円形の柱に対しては位置座標と半径さえ与えれば、速度0の歩行者と同様に扱うことができる。

また円形以外の柱や壁に対しては、点もしくは点の集合と考え、各点との衝突領域を考えることでそれらを回避することができる。しかし任意の点に対して衝突領域を求めると、式(10)が $t > 0$ で解を持つ範囲が衝突領域であることから、図44(2)のようになってしまう。そこでこの点に対し、単位時間までの衝突可能性のみを考慮することとする。これを図示すると、図44(3)のようになり、点の集合である壁全体に対する衝突領域は図45(4)のように表され、衝突領域を縮小することでより自然な歩行を表現できるのではと考えた。ただし衝突領域の幅はパーソナルスペース円半径となる。

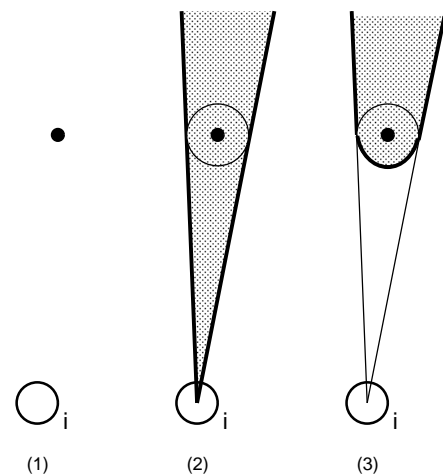


図 44: 単位時間内の衝突領域

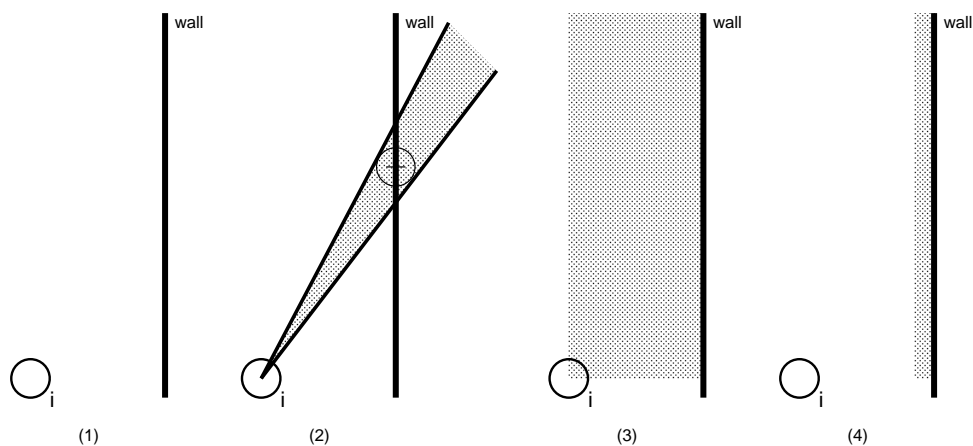


図 45: 壁との衝突領域

これらを応用することで、例えば駅構内の乗客のシミュレーションを行なう際にも、柱・壁・売店・ロッカー・改札口などに対して回避行動を行なうことができる。逆にこれらを目的地にすることによって、改札や階段、エスカレーターの周辺に集まる乗客の挙動を見ることもできるはずである。

B.4 混雑した歩行空間でのシミュレーション

高密度シミュレーションの応用として、次の2つを行なう。

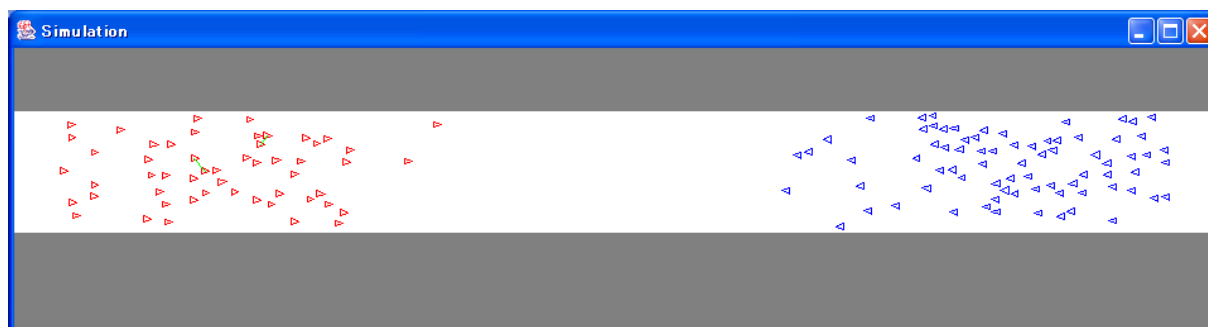
B.4.1 歩道橋でのシミュレーション

2001年7月21日、兵庫県明石市の大蔵海岸からJR朝霧駅に通じる歩道橋(幅6[m]、長さ100[m])で痛ましい事故が起きた。子供9人、老人2人の計11人が死亡し、さらには100人超の負傷者が

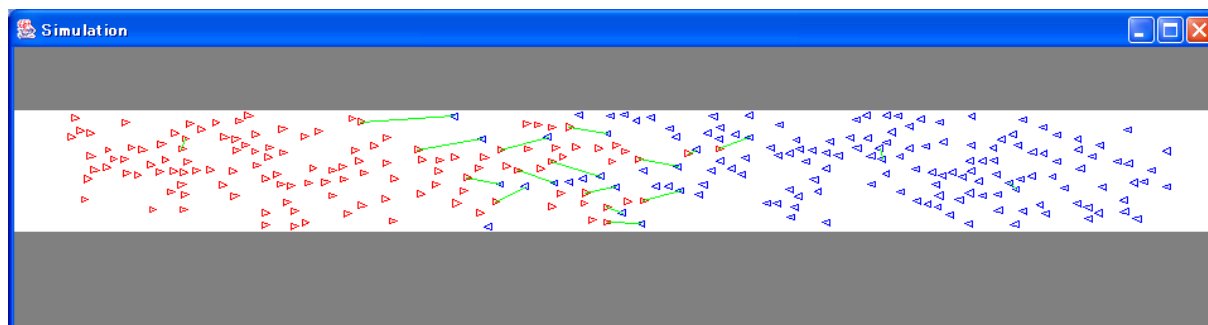
発生する、近年例のない大惨事となった。これが明石歩道橋事故(将棋倒し事故)である。原因としてはいくつも考えられるが、歩道橋上が歩行者密度 $10[\text{ped}/\text{m}^2]$ 程度の過密状態になってしまったことが最大の原因として挙げられている。場所によっては最高で $13[\text{ped}/\text{m}^2]$ に達したとも推測されており、ラッシュアワーの電車内を上回る超過密状態であったとも言われている。当初歩道橋上には1800人(歩行者密度 $3[\text{ped}/\text{m}^2]$)程度との予想だったが、実際は6000人程度の人が歩道橋上にいたことになる。

この事故は非常に衝撃的であり、本モデルの高密度対応化への大きなきっかけとなった。ここでは本モデルを用いて歩道橋上のシミュレーションを試みた結果を述べる。6節で示したように、本モデルではこの事故で起きたような超過密状態までは表現できないが、できるだけ歩行者密度を上昇させてシミュレーションを行なった。ここでは歩道橋を幅 $6[\text{m}]$ 、長さ $50[\text{m}]$ とし、到着率は $5.0[\text{ped}/\text{s}]$ ずつとした。

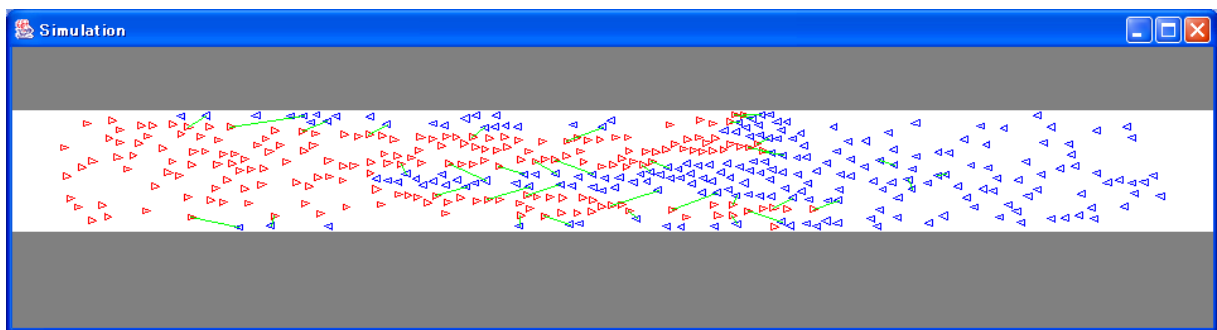
図46にシミュレーションの様子を示す。上下が壁に覆われており、その外には出ることができないため、横断歩道などの開空間よりもずっと混雑が起きやすい。いったん膠着状態が起きると、これを解消するのは至難の業であり、明石歩道橋事故のような超過密状態になることも頷ける。そして現実ではモデルとは違い、こうした状況でもどんどん前へ行こうとする心理が働く。心理学的にも危険を感じると個々の思考や判断を停止して集団の進む方向に行こうとし、集団の中に身を置くことで一種の自己防衛が働くとも言われている。そうすると歩行者集団の中にいる人には想像もつかないような圧力が働き、その圧力に耐え切れなくなってバランスが崩れると、このような大惨事を招くこともある。実際に明石歩道橋事故では水平方向に $400[\text{kg}/\text{m}]$ を超える圧力がかかっていたとの報告もなされている。シミュレーションにおいて歩行者密度は時間とともに上昇を続け、24秒後には $1.0[\text{ped}/\text{m}^2]$ を、36秒後には $1.5[\text{ped}/\text{m}^2]$ を、48秒後には $2.0[\text{ped}/\text{m}^2]$ を超えた。その後上昇は緩やかになったが、84秒後に $2.5[\text{ped}/\text{m}^2]$ を超え、さらに108秒後には $3.0[\text{ped}/\text{m}^2]$ を超えた。最終的な歩行者密度は $3.2[\text{ped}/\text{m}^2]$ 程度に達することが確認された。このことから事故当時の混雑の凄まじさが感じられる。



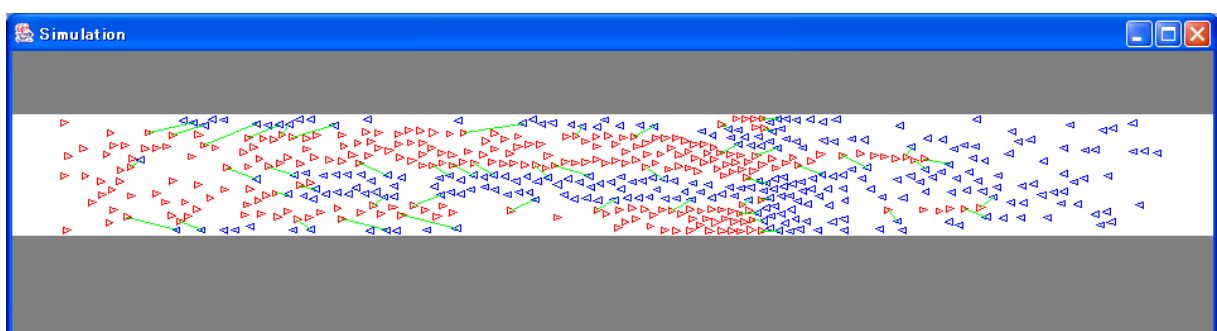
(12 秒後)



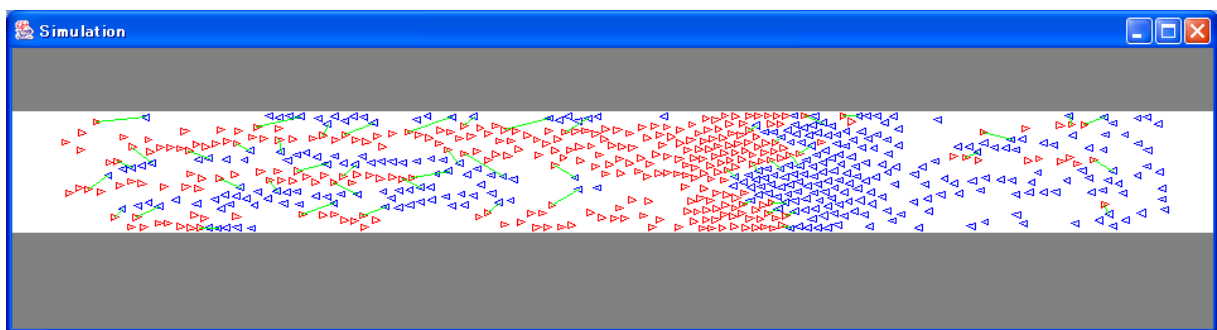
(24 秒後)



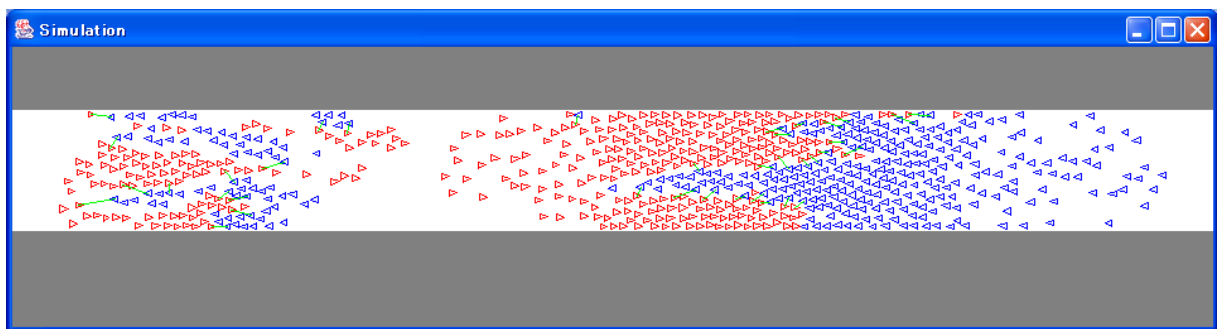
(36 秒後)



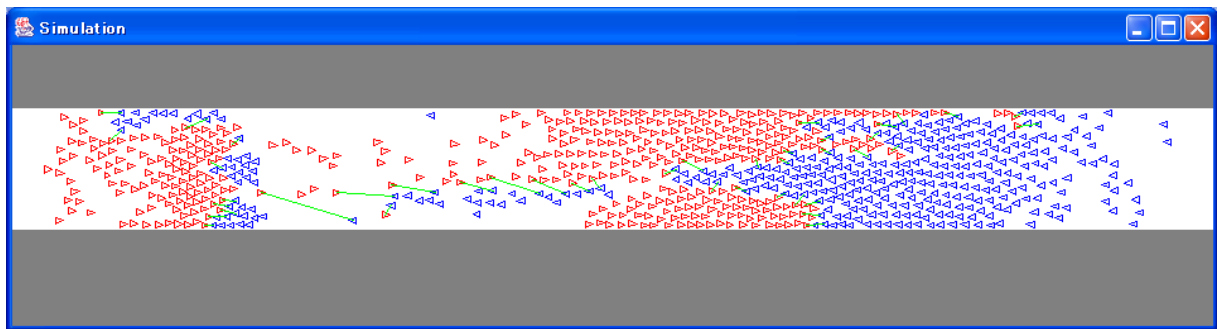
(48 秒後)



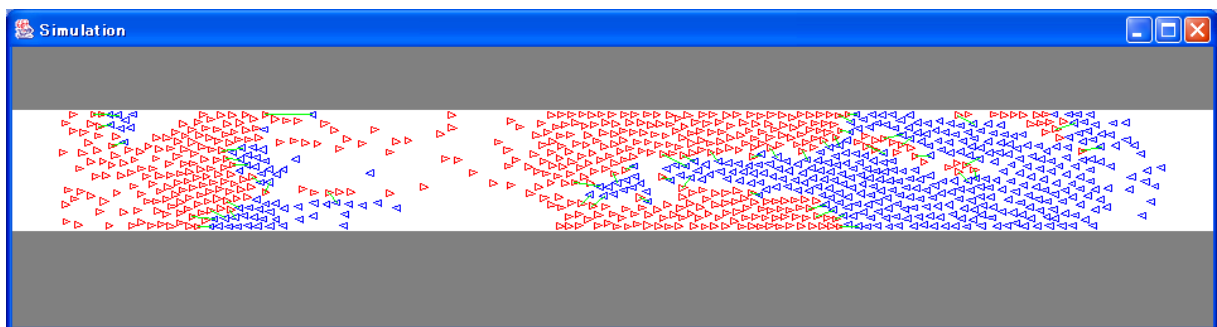
(60 秒後)



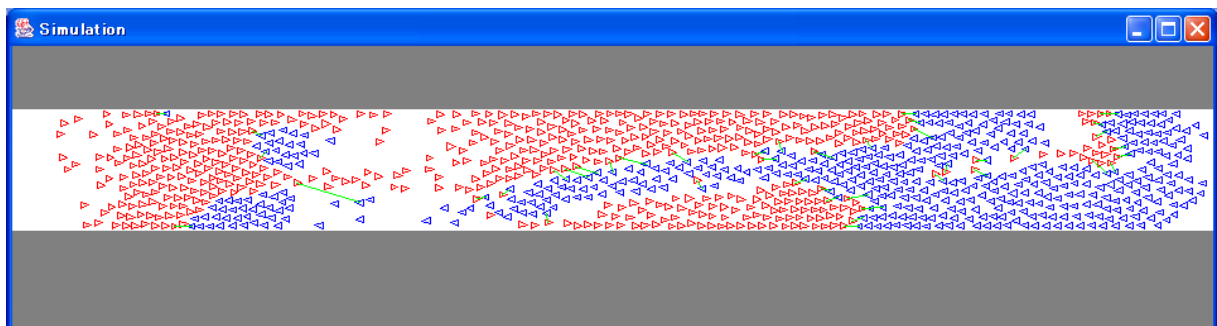
(72 秒後)



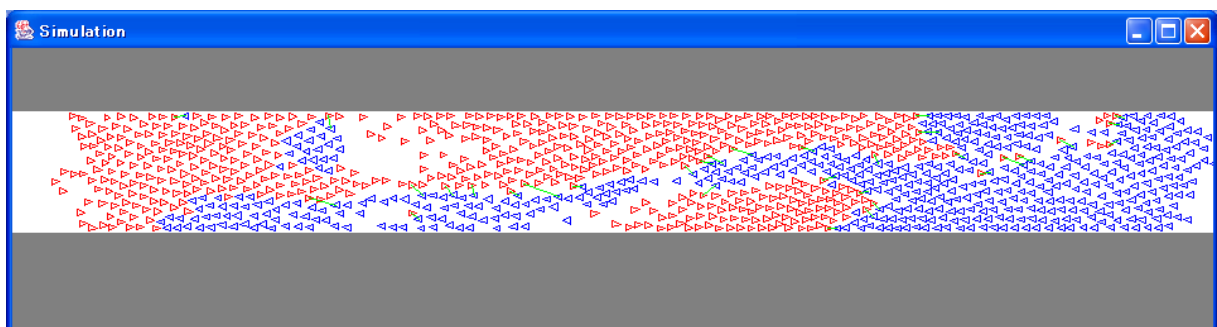
(84 秒後)



(96 秒後)



(108 秒後)



(120 秒後)

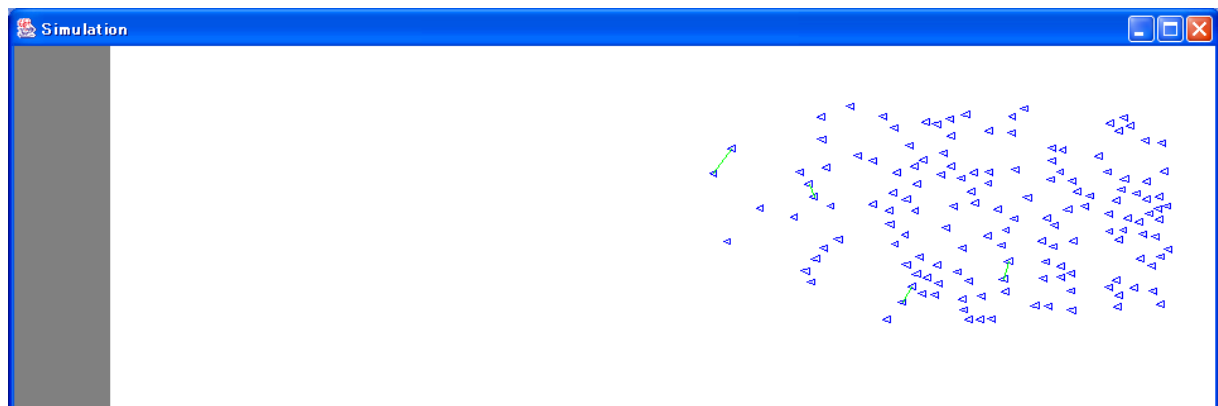
図 46: 歩道橋シミュレーションの様子

B.4.2 初詣のシミュレーション

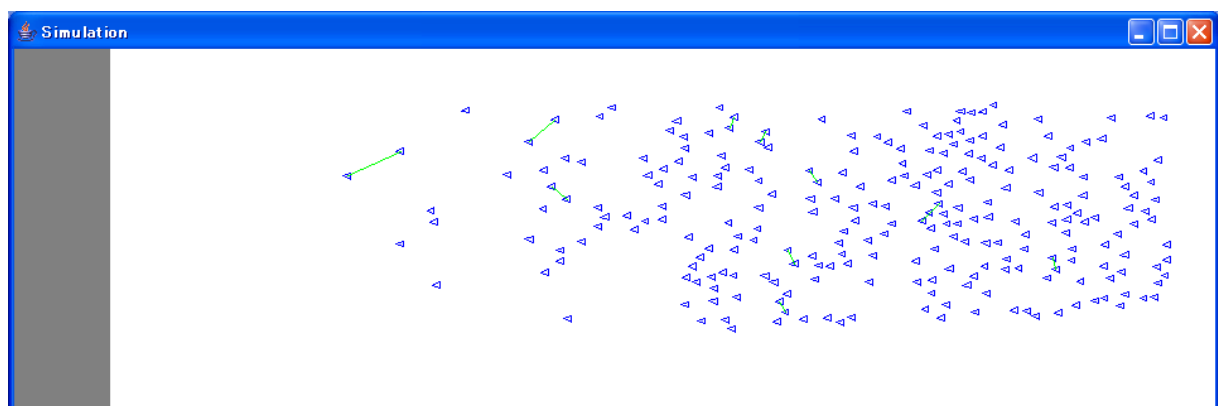
日本では毎年多くの人々が正月に初詣へ出かける。首都圏では100万人を超える参拝客が訪れる神社も少なくない。

初詣では参拝するまでも混雑を経験するが、参拝後にまだ並んでいる参拝客との衝突による混雑がそれ以上に激しい。この様子表現するべく、シミュレーションを行なった。1方向の流れを作り出し、歩行者は歩行空間左側に設置した賽銭箱を目指して歩行する。賽銭箱に辿り着くと、しばらくの間参拝する。ここでは平均10秒、標準偏差1秒の正規分布に従う時間だけ参拝するものとした。参拝が終わると、人の流れに対して横に逃れるように振る舞う。

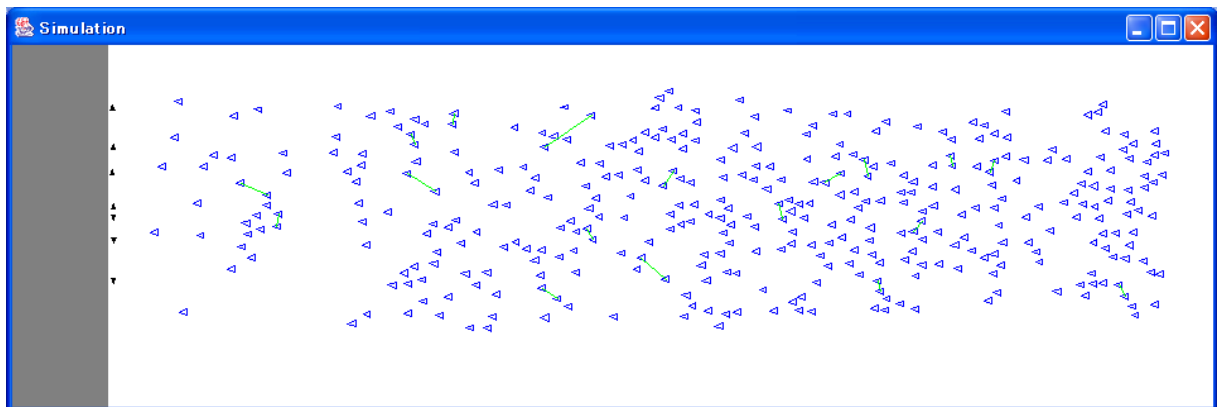
図47にシミュレーションの様子を示す。歩行空間は幅10[m]、長さ50[m]、到着率は10.0[ped/s]とし、2分間のシミュレーションを12秒毎に図示している。白抜きの三角形は歩行中を、黒く塗りつぶした三角形は参拝中をそれぞれ表しており、参拝が終わると再び白抜きの三角形に戻る。参拝後の方向は単純に歩行空間外までの距離によって決めている。この結果から賽銭箱付近で次第に歩行者集団が膨れ上がっていく様子が見てとれる。特に参拝時間を参拝客数から考えると長めに設定しているため、こうした状況は避けられない。参拝の終わった歩行者は押し寄せる歩行流に押し込まれながらも、懸命に外へ逃れようとする意志が見えるが、参拝中の歩行者は優先関係を結ばないと設定したためか、なかなか思うようにいかない場面が多く見受けられる。よって大きな流れに逆らって歩行することは極めて困難であり、また歩行する意思のない人がそこに混じると不可能に近い状態にまで陥ることがこのシミュレーションからわかる。



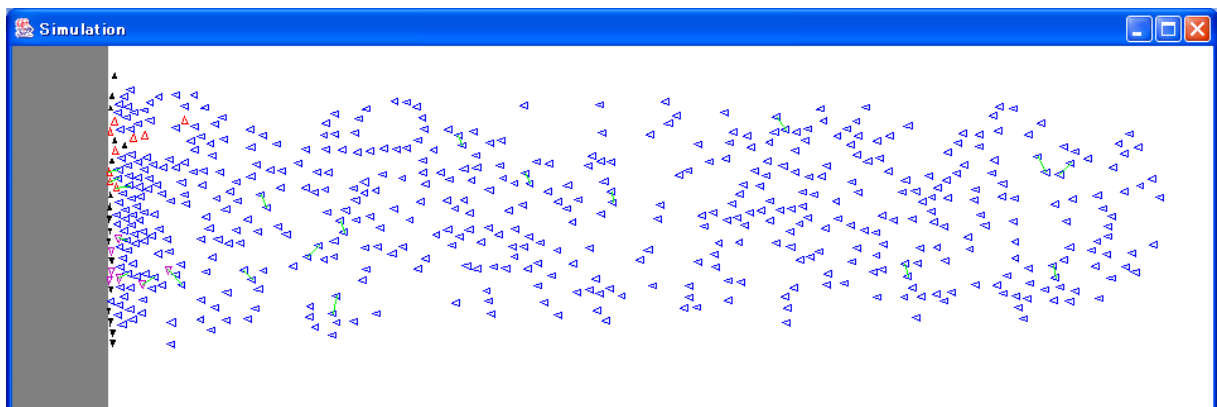
(12 秒後)



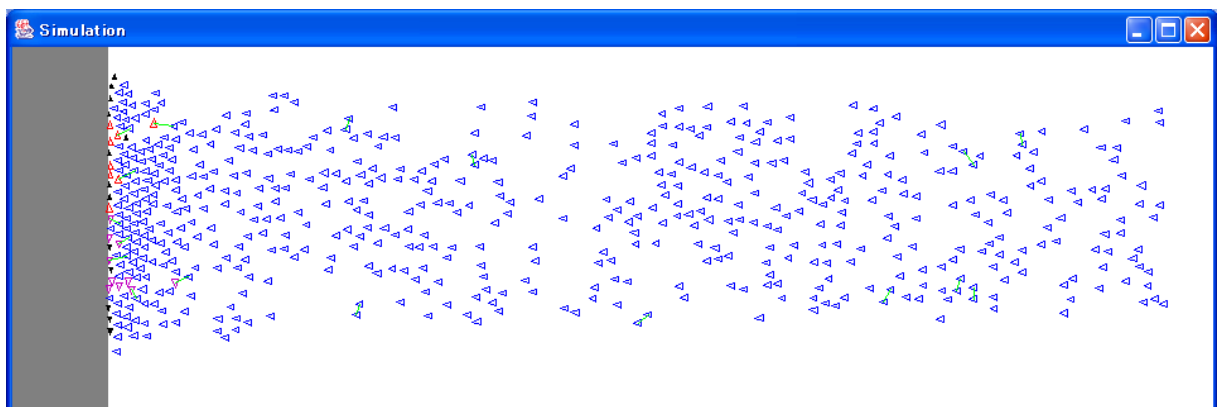
(24 秒後)



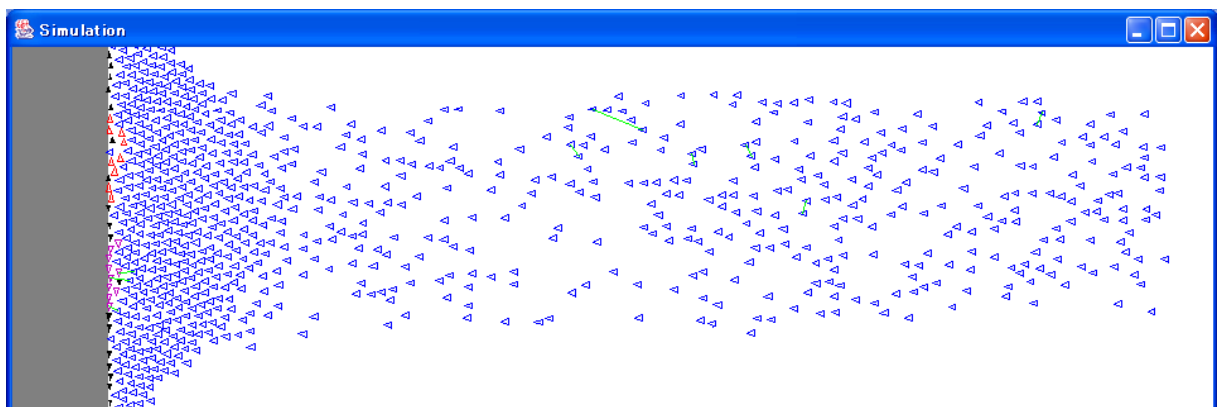
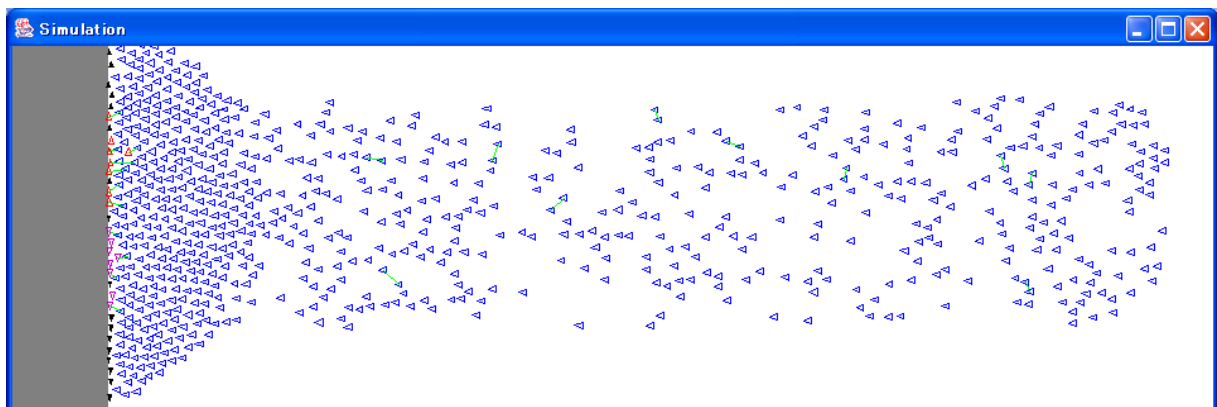
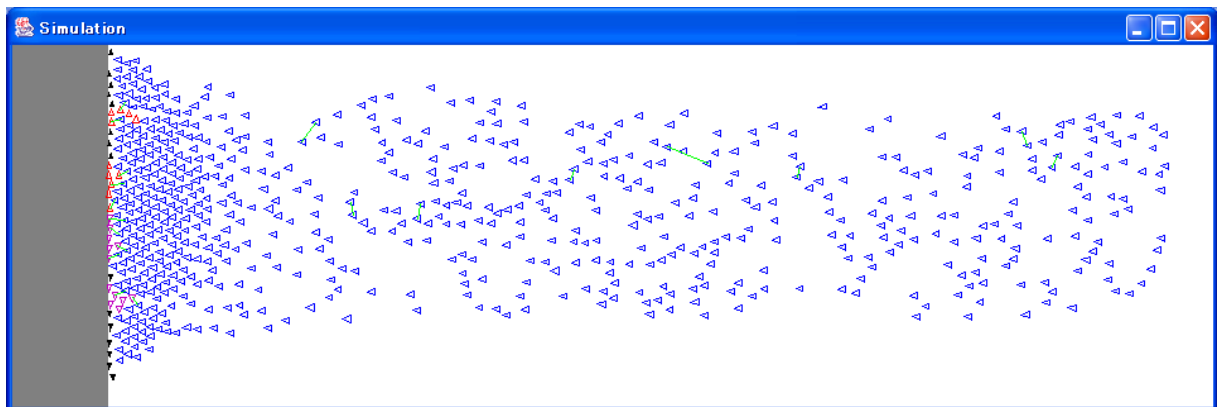
(36 秒後)

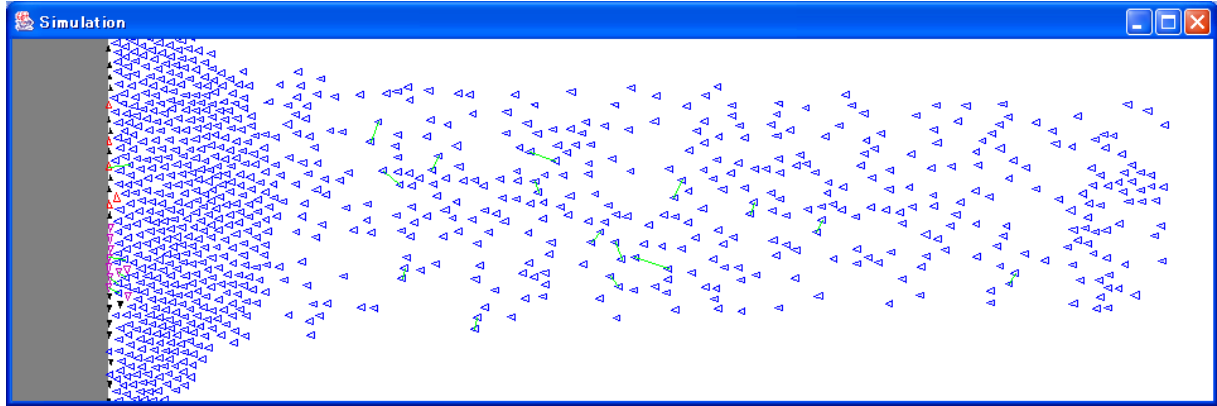


(48 秒後)

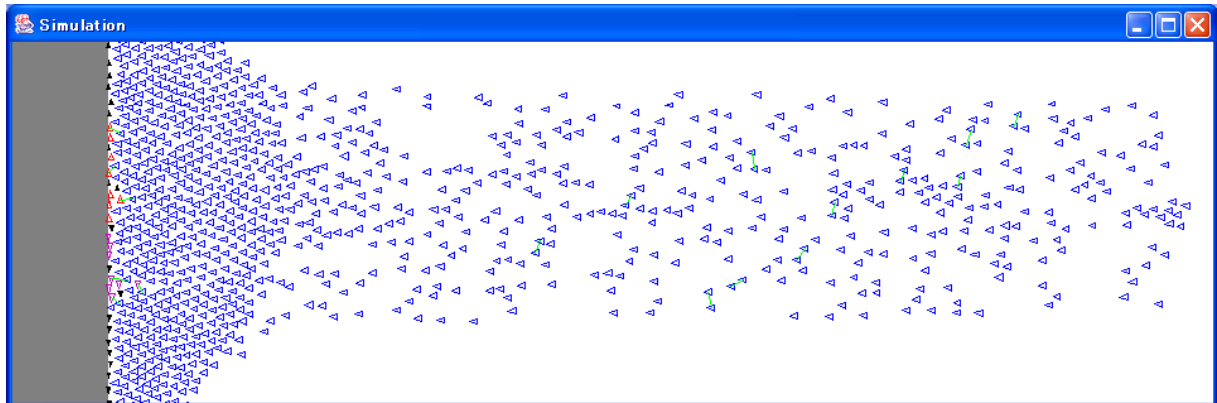


(60 秒後)





(108 秒後)



(120 秒後)

図 47: 初詣シミュレーションの様子