

歩行者シミュレータ開発のためのバーチャルリアリティを用いた歩行者モデルの評価 Evaluation of Pedestrian Model in Virtual Reality for Pedestrian Simulator Development

小黒 司友¹⁾ 上村 健二²⁾ 竹部 啓輔²⁾ 高橋 章²⁾
Shiyu Oguro Kenji Kamimura Keisuke Takebe Akira Takahashi

1 はじめに

これまでに、避難誘導や空間設計のシミュレーションのために、歩行者集団の移動の円滑性・効率性に着目する歩行者交通流シミュレータが開発されてきた [1],[2]. これらは目的地が同じ集団の流れや、集団同士の反応に対して焦点が当てられていた。しかし、近年開発が進められている歩行者と空間を共有するパーソナルモビリティやロボットを、安全かつ快適に運用するには、安全性の観点から、個々の歩行者の振る舞いや歩行者間の相互作用までシミュレートする必要がある。また、その際には歩行ルール（歩行モデル）の「人間らしさ」も求められる。

交通流の性能評価として、速達性（効率性）と歩行の安定性が用いられている [3]. 一方で、歩行モデルの評価として、見え方の自然さが提案されている [4]. また、安全な移動のためには、衝突回数の少なさ（安全性）も考慮する必要がある。

本研究では、効率性、安定性、安全性、見え方の自然さの4つの観点から歩行モデルの人間らしさの評価を行う。

近年 VR 技術が発展しており、見た目の観点からの歩行モデルの観察には、VR が有用である [5]. これまでに、VR を用いた歩行者シミュレータ [4][6] が提案されているが、その際の被験者の反応をデータ化したうえで、歩行モデルの設計に応用することは行われていない。

そこで本研究では、VR ビューアを用いることで、被験者がシミュレーション時に歩行モデルの観察を行えるようにする。また、アバターを操作する機能を設けることで、被験者がシミュレーションに介入することができるようにする。アバターの操作は、VR ビューアによって一人称視点で行う。

人間らしい歩行モデルを持つアバターを扱うシミュレータを作成することを最終的な目標とする。

2 歩行者シミュレーションシステム

本研究で使用するシステムは、歩行モデルを備えたアバター、アバターをシミュレーション環境中で扱うシミュレータ、シミュレーションの様子を可視化するための VR ビューアによって構成される。システムの構成を図1に示す。

2.1 シミュレーション環境

実験に用いるシミュレーション環境を図2に示す。

空間を2次元平面で考え、アバターの行き交う交差点、アバターの歩行開始地点もしくは目的地となる歩道 A,B,C,D を用意する。アバターの流れは様々に設定できるようにする。アバターは円形領域とする。アバターの流入位置および目的地、円形領域の半径、基本的な歩

- 1) 長岡工業高等専門学校専攻科電子機械システム工学専攻
- 2) 長岡工業高等専門学校電子制御工学科

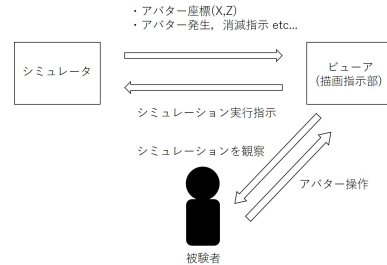


図1 歩行者シミュレーションシステムの構成

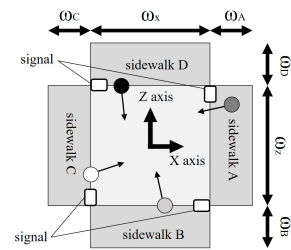


図2 シミュレーション環境

行速度などは独立に一定の確率分布を与えて決定する。シミュレーションは離散時間間隔で進行させ、アバターの通し番号や座標、衝突状況などの情報をログファイルに記述する。

2.2 使用する歩行モデル

今回のシミュレータでは、3種類の性質の異なる歩行モデルを用いる。使用するそれぞれの歩行モデルについて、概要を示す。

モデル1: ポテンシャルモデル [7]

アバターに同一符号の電荷を持たせ、クーロン力によりアバター間の斥力を計算し、全てのアバターについて足し合わせる。さらに、目的地に向かう力を加えて最終的にアバターが受ける力を計算する。

モデル2: 追従型モデル [8]

目的地に向かう基本的な速度を持ち、前方に他の目的地へ向かうアバターがいれば回避、同一の目的地のアバターがいれば追従する付加的な速度を加える。

モデル3: 効率重視型モデル

アバターに視野を定め、視野内の他のアバターとの衝突を避けるように目的地に向かう方向と速度を選択する。

2.3 ビューアとアバター操作モード

被験者がシミュレーション中にどのような行動を行うのかをデータとして得るために、アバターのうちの一体を操作し、シミュレーションに参加することができるモード（アバター操作モード）を実装する。被験者はシ

ミュレーション中で、他のアバターたちと同様に目的地を目指し、自分のアバターを操作する(ユーザーアバター)。被験者は、一人称視点で操作を行う。アバターの操作はキーボードで行う。

また、シミュレーション空間内に描画される周囲のアバターには歩行モデルが組み込まれており、アバター同士だけでなくユーザーアバターの動きにもリアルタイムで反応して行動する。被験者が体験するシミュレーションの様子を図3に示す。

なお、シミュレーションの様子は、一人称視点以外からも観察することができる。シミュレーション環境を俯瞰した様子を図4に示す。

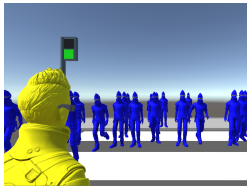


図3 被験者が体験するシミュレーションの様子

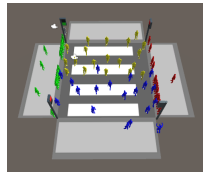


図4 シミュレーション環境を俯瞰した様子

3 歩行者シミュレーション

本報告では、まず最も基本的な流れとなる対向流について検証するため、歩道 A,C からアバターを流入させ、向かい側の歩道を目的地として歩行させた。1回のシミュレーションでは、同じ種類の歩行モデルを持つアバターのみを扱った。モデル 1,2,3 についてそれぞれシミュレーションを行った。

3.1 シミュレーションの進行

アバターを用いたシミュレーションについて、時系列で述べる。

1. アバターの生成を止めるための制限時間 t_{stop} と、シミュレーションを終了させる制限時間 t_{end} をあらかじめ設定しておく。アバターの生成は、シミュレーション経過時間が t_{stop} になると停止させ、その後は交差点内に残留している歩行者のみでシミュレーションを進行させる。
2. アバターは、あらかじめ設定した流入頻度 f_{in} に従うように、流入位置および目的地、円形領域の半径、基本的な歩行速度などを独立に一定の確率分布を与えて決定したうえで、歩道上に生成する。
3. アバターは、生成時に設定した目的地を目指し、交差点内を歩行する。
4. 途中で他のアバターに衝突すると、衝突の回避行動をとった後、再び目的地を目指す。
5. 目的地に到着したアバターは、空間から退出する。

アバターの流入頻度 f_{in} を変化させながら、平均旅行時間 t_{travel} 、平均速度 v_{ave} 、微小時間における直前の進行角と現在の進行角のずれの標準偏差 $devi$ 、衝突回数 n_{coll} を計測する。

なお、衝突回数は異なる目的地を目指すアバターの間ののみ数えることとする。

3.2 シミュレーションのパラメータ

評価実験を行う際のシミュレーションのパラメータを表1にまとめて示す。

アバターが t_{stop} を経過すると生成されなくなった後、交差点内に残留しているアバターのみでシミュレーションを行う。そのため、 t_{stop} は、交差点内に残留しているアバターをなくすために、十分長い時間を経過させることが重要である。今回は、 t_{stop} の10倍程度の時間であれば十分な時間経過であるとみなし、 $t_{stop} = 200[s]$ として設定する。

また、アバターの流入位置および目的地、円形領域の半径、基本的な歩行速度などの各初期パラメータを決定する際に与える確率分布の平均と分散を表2に示す。与える確率分布は、いずれもメルセンヌ・ツイスター法による一様分布とする。

表1 評価実験を行った際のシミュレーションのパラメータ

| | |
|--|------------------------|
| 微小時間間隔 DT | 0.1[s] |
| シミュレーション領域 $\omega_x \times \omega_z$ | 10[m] × 10[m] |
| 歩道幅 $\omega_A, \omega_B, \omega_C, \omega_D$ | 4[m], 4[m], 4[m], 4[m] |
| アバター生成制限時間 t_{stop} | 20 [s] |
| シミュレーション終了時間 t_{end} | 200 [s] |

表2 アバター生成時の初期パラメータ決定時に与える確率分布の平均と分散

| | 平均 | 分散 |
|-------------|----|------------------|
| X 座標 | 0 | $\frac{1}{3}$ |
| Z 座標 | 0 | $\frac{25}{3}$ |
| 目的地の X,Z 座標 | 2 | $\frac{1}{3}$ |
| 円形領域の半径 | 0 | $\frac{1}{4800}$ |
| 基本的な歩行速度 | 0 | $\frac{1}{300}$ |

3.3 評価項目

本研究では、1章で述べたように歩行モデルの評価項目として人間らしさという点について考慮したうえで、効率性、安定性、安全性、見え方の自然さの4つの観点から評価を行うこととする。

効率性の観点では目的地に到達するまでの移動時間(効率性指標1)と平均速度(効率性指標2)、安定性の観点では平均速度・微小時間における現在の進行角と直前の進行角の差の標準偏差(安定性指標)、安全性の観点では衝突回数(安全性指標)、見え方の自然さという観点では経路選択と移動軌跡の視覚的評価・VRビューアでの挙動の視覚的観察を用いる。

3.4 歩行モデルの特徴と評価項目への影響

ここで評価に用いるモデル(2.2参照)の特徴と評価項目への影響について考察する。

モデル1はすべてのアバター間の斥力について計算をして移動するという特徴があり、安全性指標について優れた結果を示すとともに、空間中のアバターの数が増加した際にも効率的に振る舞えることが可能であるため、効率性指標1,2共に優れた結果になると予想される。

一方で、全てのアバターについての考慮を行うために、動きが人間とかけ離れてしまっ結果として人間が観察した際に動きの見た目が不自然になってしまうことも予想される。また、他のアバターの状況によって逐一

進路選択を変更するため、特に空間中のアバターの数が多い状況においては安定性指標が低い結果となることが予想される。

モデル2は同一の目的地を目指すアバターに追従するという特徴があり、効率性指標1,2において優れた結果になると予想される。しかし、前方のアバターの状況に左右されやすいため、空間中のアバターの数が多くなった場合には、うまく動けずに渋滞のようになることが予想される。またそれに伴い、動きの見た目が不自然になる恐れがある。

モデル3はなるべく目的地の方向へ進もうとする特徴があり、効率性指標1,2において優秀な結果を示すことが考えられる。また、視野の範囲で目的地の方向からはずれないように衝突回避を行うという特徴があり、安定性指標についても優秀な結果になると予想される。しかし、衝突を避けるための考慮は視野の範囲内であり、視野の外に存在するアバターについては考慮を行わない。さらに、進路の変更が必要最小限であるために、ゆずりあい起きづらく、特に空間中のアバターの数が多い状況において、安全性指標は低い結果になると予想される。

3.5 実験結果と考察

アバターの流入頻度 f_{in} を変化させながら、それぞれの指標について計測した結果を示す。

結果の図の横軸は1秒間にひとつの横断歩道に流入する歩行者の人数を表す歩行者の流入頻度であり、縦軸は各評価項目を表す。モデル1はポテンシャルモデル、モデル2は追従型モデル、モデル3は効率重視型モデルを指す(2.2参照)。

参考として、流入する歩行者の数が最も少なくなる設定である $f_{in}=1$ [人/s] のときのある時間の混雑の様子を図5に、流入する歩行者の数が最も多くなる設定である $f_{in}=5$ [人/s] のときのある時間の混雑の様子を図6に示す。

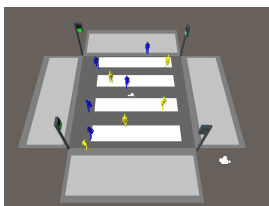


図5 $f_{in} = 1$ [人/s] のときの様子

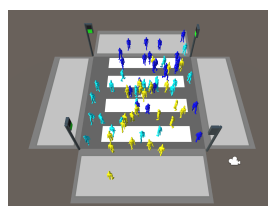


図6 $f_{in} = 5$ [人/s] のときの様子

3.5.1 効率性指標の計測結果

平均移動時間 t_{travel} を測定した結果を図7に示す。図7から、モデル1とモデル2は大きな違いが見られないことが分かる。また、モデル3の平均移動時間は、流入頻度が1から2程度と少ない条件においてはモデル1,2と大きく変わらないが、流入頻度が高くなると急激に長くなることが分かる。これは、モデル3が図8に示す状態のように、交差点内で渋滞が発生してしまい、結果的に時間がかかってしまうことが理由であると考えられる。

アバターの流入頻度 f_{in} を変化させながら、平均速度 v_{ave} を測定した結果を図9に示す。図9から、モデル

3はモデル1,2に比べ平均速度が低いことが分かる。また、モデル2,3は共に流入頻度が高くなっても平均速度に大きな変化はなく、流入した歩行者の人数に影響を受けていないことがわかる。

また、いずれのモデルも平均歩行速度は0.8[m/s]から1.4[m/s]の範囲にあり、人間が実際に歩行する際と大きく変わらないために、突出した違いは見られないといえる。

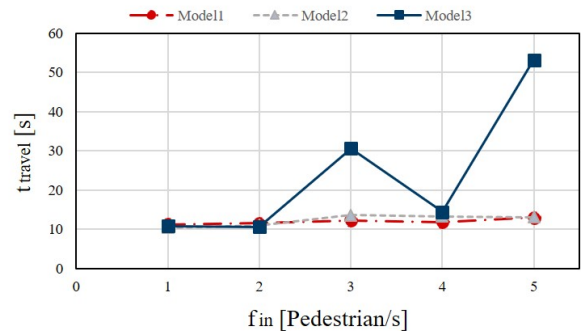


図7 流入頻度対平均移動時間



図8 渋滞が発生している様子

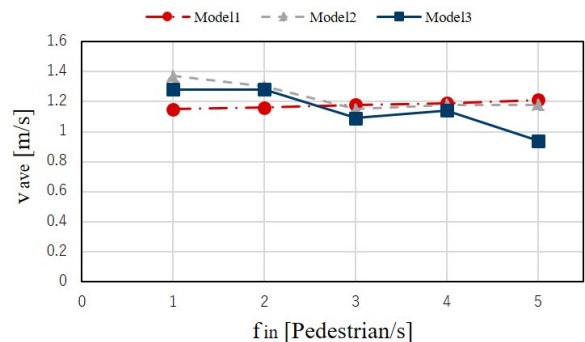


図9 流入頻度対平均速度

3.5.2 安定性指標の計測結果

アバターの流入頻度 f_{in} を変化させながら、微小時間における現在の進行角と直前の進行角の差の標準偏差 $devi$ を測定した結果を図10に示す。図10から、特に流入頻度が低い状況においてモデル3の標準偏差が小さいことが分かる。しかし、モデル3は流入頻度が高い状況で、標準偏差が大きくなっており、流入頻度に大きな影響を受けることがわかる。また、モデル1が全体的に標準偏差が小さく、流入頻度による影響もあまり受けていないことがわかる。

3.5.3 安全性指標の計測結果

アバターの流入頻度 f_{in} を変化させながら、衝突回数 n_{coll} を測定した結果を図11に示す。図11から、モデル

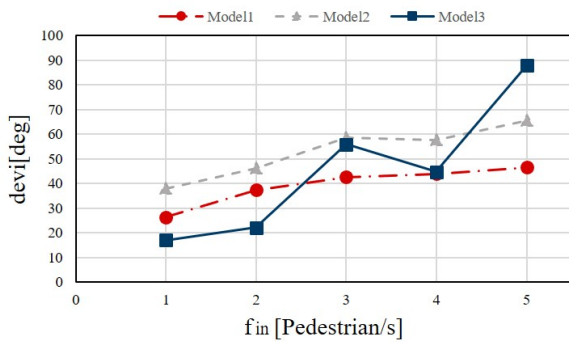


図10 流入頻度対微小時間における現在の進行角と直前の進行角の差の標準偏差

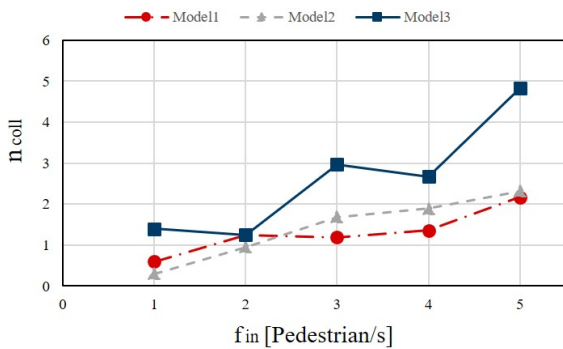


図11 流入頻度対衝突回数

3は特に流入頻度が高い状況において、衝突回数が多くなる傾向にあることがわかる。また、モデル1,2は流入頻度が高くなってもあまり影響を受けていないことがわかる。

ここで、実験の結果をもとに、各モデルに対する本論文で用いている評価指標についての特徴をまとめる。

モデル1は、効率性についてはモデル3に比べ優れており、流入する人数の変化に左右されづらい。安定性については、モデル2に比べ優れており、流入する人数が増えても影響されにくい。安全性については、モデル3と比べて優れており、流入する人数に左右されづらい。

モデル2は、効率性については、モデル3に比べ優れており、流入する人数の変化に左右されづらい。安定性については、モデル1,3と比べて全体的に低い。安全性については、モデル1と同様に優れており、流入する人数に左右されづらい。

モデル3は、効率性についてはモデル1,2と比べ優れておらず、流入人数の増加に影響を受けやすい。安定性については、流入人数が低いとモデル1,2と比べて高いが、流入人数が増加すると低下する。安全性については、全体的に低く、流入人数が増加すると低下する。

また、動きの見た目について観察を行ったが、モデル1,2は衝突を回避する際の動きが人間に比べて大げさに感じた。モデル3は、衝突を回避する際の動きは大げさには感じなかったが、動きが慎重すぎるように感じた。また、いずれのモデルも衝突から復帰する際の動きは不自然であった。図10の結果、流入頻度が低いとき

に衝突回避の動きの自然さが反映されていると考えられる。

以上の結果より、効率性や安全性において、モデル1や2のような歩行モデルが有効であると分かった。また、安定性についても全体的にモデル1が有効であるが、流入頻度が低いときにはモデル3も有効であることがわかった。見た目の観点から、モデル3がわずかに有効であることがわかった。

4 おわりに

本研究では、人間らしい歩行モデルを持つアバターを扱うシミュレータを作成することを最終的な目標とし、歩行者交通流シミュレータを作成した。さらに、モデル1,2,3の歩行モデルを用いて、効率性・安定性・安全性・見え方の自然さの4つの観点から歩行モデルの人間らしさの評価を行った。結果として、本研究で新たに用いた効率重視型モデルは、効率性や安全性という観点からは優れているとは言えない結果となったものの、安定性という観点からは流入頻度が低いときに限って優れていることがわかった。また、ポテンシャルモデルは効率性、安全性という観点から優れており、安定性という観点からも特に問題がないことがわかった。また、追従型モデルでは、効率性や安全性という観点からは問題がないが、安定性においては課題が多いことがわかった。各モデルの持つ特徴や利点をうまく取り入れて、人間らしい歩行モデルを設計する必要がある。今後の課題として、視覚評価について、アンケート調査を行うなどより調査を重ねる必要がある。また、他の評価項目についてもより適切な指標を求めて検討を進める。アバター操作モードの実験結果をふまえた歩行モデルの設計には至ることができなかったため、評価を行う。そして、歩行モデルの衝突後の対処方法についても問題があるため、改善を行う。

参考文献

- [1] 清野 純史, 三浦 房紀, 瀧本 浩一 “被災時の群集避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について”, 土木学会論文集 1996 巻 537 号, pp233-244 (1996)
- [2] Ren-YongGuoa, S.C.Wong, Hai-JunHuang, PengZhang, William H.K.Lamd “A microscopic pedestrian-simulation model and its application to intersecting flows”, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications Volume 389, Issue 3, pp515-526 (2010)
- [3] 井料美帆, 長島愛 “歩行者交差交通流の性能評価に関する研究”, 生産研究 67 巻 4 号, pp369-373 (2015)
- [4] Yu HASEGAWA, Miho IRYO-ASANO “Development of Pedestrian Model for Experiments in Virtual Reality Environment”, 生産研究 70 巻 2 号, pp131-135 (2018)
- [5] Miho Iryo-Asanoa, Yu Hasegawa, Charitha Dias, “Applicability of Virtual Reality Systems for Evaluating Pedestrians’ Perception and Behavior”, Transportation research procedia Volume 34, pp67-74 (2018)
- [6] Takamasa Iryoa, Miho Asano, Shinta Odani, Shogo Izumi “Examining factors of walking disutility for microscopic pedestrian model - A virtual reality approach”, Procedia - Social and Behavioral Sciences Volume 80, pp940-959 (2013)
- [7] 阿久澤あずみ “駅構内における群衆歩行シミュレーションモデルの研究”, 日本オペレーションズリサーチ秋季研究発表会 2005, pp192-193 (2005)
- [8] 笹川匠也 “人工現実感を用いた横断歩道における歩行者交通流シミュレータの開発”, 平成 29 年度長岡工業高等専門学校卒業論文 (2018)