

バーチャル・リアリティによる ミクロ交通行動モデルの比較と評価

泉 翔伍¹・小谷 慎太²・井料 隆雅³

¹学生会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail:shogo-izumi@stu.kobe-u.ac.jp

²非会員 京都府丹後広域振興局建設課 丹後土木事務所 道路計画室
(〒626-0044 京都府宮津市宇吉原2586-2)
E-mail: s-odani57@pref.kyoto.lg.jp

³正会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail:iryoy@kobe-u.ac.jp

本研究では、バーチャル・リアリティ(VR)を用いて既往のミクロ歩行者モデルの比較と評価を行った。歩行者モデルは多数提案されているが、本研究では2つのモデルを採用した。1つは歩行者の挙動は力学に基づくとしたSocial Forceモデルである。もう1つは、他者の動きを予測し、最短経路探索するFastest Trajectoryモデルである。これらのモデルには互いに異なる特徴があり、それゆえ、その特徴を理解し、どちらのモデルがより現実的に歩行者の行動を再現しているのか確認する必要がある。

分析の結果、歩行者の行動は2つのモデルのうち一方だけでは表せないという結論が出た。実測値は、両モデルのシミュレーション結果の特性が混ざり合ったものになっていたため、両方のモデルの特性を含んだ新たなモデルを作成することで、より優れたモデルが得られることを明らかにした。

Key Words : *virtual reality, pedestrian simulation, social force model, fastest trajectory model,*

1. はじめに

多数の歩行者の流動が見込まれる駅や空港といった施設的设计や、災害時における人々の避難行動の推定には、シミュレーションにより交通流を生成し定量的な評価を行うことが必要とされる。その際、歩行者モデルとして幅広く用いられているのは Social Force モデル(SF モデル)¹⁾である。SFモデルはニュートン力学の法則に基づき提案されたモデルである。しかしながら、このモデルは、交錯交通の再現に問題があると浅野ら²⁾により報告されている。そこで、交錯交通を想定して作成された、SFモデルと異なるモデルとして浅野らの Fastest Trajectory モデル(FT モデル)³⁾がある。このモデルは、他の歩行者に接触しないことを前提で最短経路探索するモデルとして定式化されている。これらのモデルには互いに異なる特徴があり、それゆえ、その特徴を理解し、どちらのモデルがより現実的に歩行者の行動を再現しているのか確認する必要がある。

本研究では、2つのモデルの比較評価を行うためにバ

ーチャル・リアリティ(VR)装置を用いて歩行者実験を行う。具体的にはミクロ歩行者モデルを実装した仮想空間内に、被験者の動きをリアルタイムに反映する歩行者群衆をシミュレーションにより生成する。そこで、他者との相互作用を考慮した歩行挙動を取得する。VRを利用し歩行者の挙動を分析するメリットには様々なものがあるが、特に歩行者実験では歩行者モデルを実装すれば、実際の人間の動きとモデルシミュレーションによる動きが直接的に比較することが可能になる点が挙げられる。他にも仮想空間内で自在に実験・検証を繰り返すことができ、コスト削減につながるという点も存在する。歩行者挙動取得実験のようにコスト制約が大きく結果の取得に手間がかかる場合においてはVR技術を採用することが有効と考えられる。VRによる歩行者挙動の取得が有効と判断された場合、実験の低コスト化、時間的・空間的制約の縮小、精度の高いデータの取得が可能となるため歩行者の挙動分析の進展に繋がる。

既存の研究⁴⁾ではすでにVRを用いた歩行者行動の分析が行われており、本研究もその類に属する研究である。

2. VR歩行者実験の概要と詳細

(1) 実験概要

歩行者モデルとして幅広く用いられるSFモデルと、交錯交通を想定して作成された浅野らのFTモデルの2つのモデルを対象に分析を行った。実験により歩行者のミクロな動きを取得し、既往モデルとの比較を行うことでモデルの評価を行った。

実験の概要をまとめたものを表-1に示す。被験者は男性53名、女性8名の計61名であり、全て神戸大学工学部市民工学科または工学研究科市民工学専攻の学生である。

実験装置として、半没入型VR実験装置を構築した。図-1のように水平方向に各3面、垂直方向に各2面の全6面で構成されている。下方3画面は下方の視野を補うために表示している。仮想空間での視野と被験者の視野を一致させている。通常歩行する場合には背後の視野を必要としないと考えられるため、前方約180度の視野角を再現している。

実空間での歩行者交通において他者との距離は数十cmまで近づくものであり、近接感の再現は重要な要素である。近接感を再現するために透過型スクリーンを用い、図-2のような1m×1mのサイズの半没入型のVR装置を作成した。また、VR酔いの抑制と臨場感の向上のために、iPod touchをセンサーとして腰と腕に装着し、腰のiPod touchのジャイロセンサーにより体の向きを取得、腕のiPod touchの加速度センサーにより腕振りを感知し、前進を行うことができる。

(2) 実験空間の設定

本実験は交錯交通において動線が垂直に交差する場合の歩行挙動を対象としている。したがって歩行する状況は、歩行者群集の流れと直交する方向にODが存在する場合である。仮想空間は、図-3のような10m×10mの交錯領域を持つ十字路を設定した。



図-1 VR装置での表示画面



図-2 半没入型VR装置

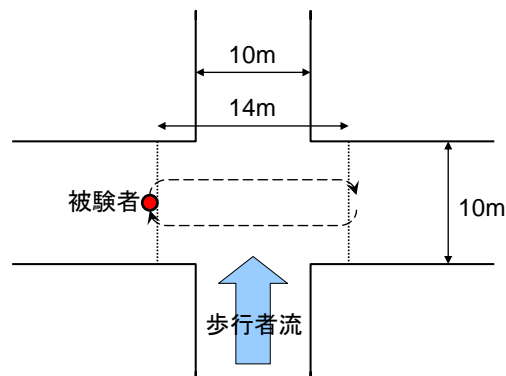


図-3 設定空間

表-1 実験情報

実施日時	2012年6月13日(水)～15日(金), 18日(月)～22日(金)の8日間
被験者データ	61名(うち男性53名, 女性8名) 工学部市民工学科 または工学研究科市民工学専攻の学生
実験機器	パソコン, スクリーン, プロジェクタ, ゲームパッド, iPod touch
取得データ	歩行者軌跡データ, デバイス入力情報, アンケート
内容	VR装置を用い, 4パターンの設定で測定

(3) 実験の流れ

習熟と実測の2部構成で行う。得られるデータに影響を与える要因に「被験者の操作および仮想空間に対する習熟度合い」が含まれることは望ましくない。そこで実験の習熟として操作の練習を行なったのち、データの取得を行うものとした。習熟度合いが完全に一樣になることはないが、可能な限り個人差を縮めることが目的である。

a) 習熟内容

被験者は次の2種類の習熟を行う。自由に空間内を移動してもらい、実験環境に慣れてもらうことを目的とし

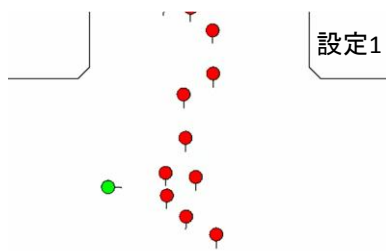


図4 歩行者流が単方向かつ交通量が少ない場合(設定1)

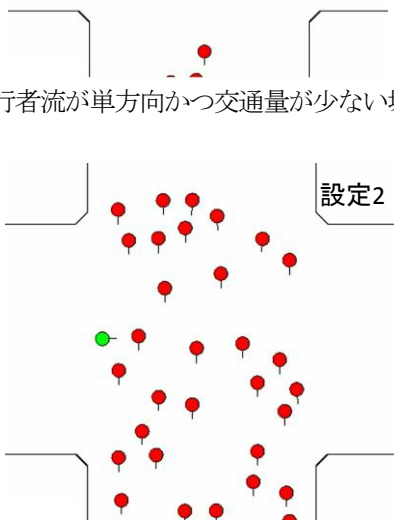


図5 歩行者流が単方向かつ交通量が多い場合(設定2)

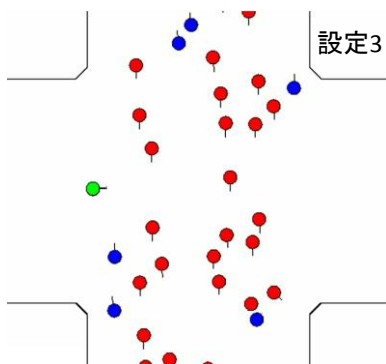


図6 歩行者流が双方向かつ両方の交通量に偏りがある場合(設定3)

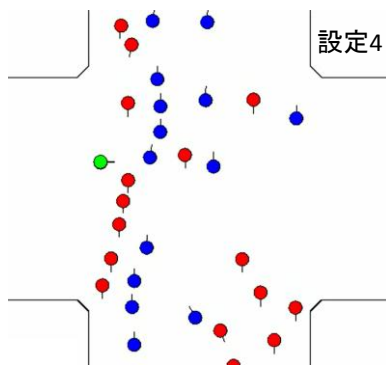


図7 歩行者流が双方向かつ両方の交通量に偏りがない場合(設定4)

ている。特に、他者との距離感を体感してもらった。横断回数4回で終了する。

(習熟1)

静止している歩行者を回避しながら横断する。操作と距離感の習熟を目的としている。

(習熟2)

交通量の少ない歩行者群集を回避しながら横断する。操作と速度感の習熟を目的としている。

b) 実測内容

31人の被験者に対しSFモデルでの測定を行い、30人の被験者に対しFTモデルでの測定を行った。各モデルに対して、図4～図7に示した実験設定の計4種類の実験を行った。横断回数は8回とした。

(4) 実験方法

被験者は図2に示した半没入型VR装置の中心に立ち、その場で足踏みをしてもらう。腕振りと体の向きを変更することで自由に仮想空間内を歩行することが出来る。図3に示したように、人の流れと直交する方向に移動する状況を想定している。被験者は通常歩くとき同様、他者と衝突しないように歩行する。他者と一定時間以上接触すると衝突したと判定される。その後、数秒停止の後、スタートラインに引き戻され、横断を再開する。移動可能区間外(道路の外)に出た場合も衝突と同じ扱いになる。なお、被験者にはシミュレーションで計算されている歩行者の挙動については「実際の動きを再現したものであり、実際の歩行者と同様、被験者の動きに反応して適宜移動方向や速さを決定する。被験者にぶつからないように回避することもあれば、そうでないこともある。」とだけ伝え、モデルに対する具体的な説明は一切していない。

(5) 取得データ

実験の取得結果について述べる。データでは区間を往復した歩行者の軌跡が取得されている。交錯交通での挙動解析に必要となるのは、歩行者との相互作用が発生する区間の軌跡のみである。今回は1回の横断分から歩行者群衆通過区間の軌跡を抽出した。具体的には図8に示したように交差点中央から±5.0mの10m区間における移動軌跡を1データとして分割を行なった。なお、区間を完全に横断したときの軌跡のみを使用し、他者との衝突によって区間端に引き戻されてしまった場合のデータは除外する。

FTモデルの実験では、設定1～4の各パターンで240の実験データを、SFモデルでの実験では、設定1～4の各パターンで280の実験データを取得した。

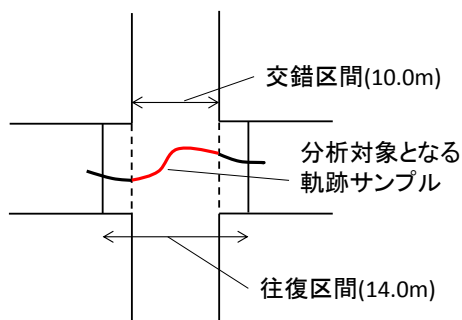


図-8 軌跡サンプル

3. 歩行者モデルとの比較評価

(1) 分析の方針

本実験から得られた歩行者挙動データを分析する上での指標は以下の2つである。

a) 旅行時間

歩行者群集の存在する区間(図-8)の横断に要した時間を指す。タイムステップごとの値である、0.05sec刻みの時間として計算される。また交錯区間は10.0mで被験者の速度は1.3m/secに設定しているため、最短旅行時間は約7.69secであるがタイムステップの関係上7.65secとなっている。主にヒストグラムとして提示を行う。ヒストグラムは1.0秒刻みに集計を行っており、横軸が t の場合は「 t 以上 $t+1$ より小さい」値を加算している。

b) 交通流方向へのずれ(側方変位)

図-8の被験者OD方向に x 軸、歩行者流方向に y 軸を設定した場合、交錯区間進入時と脱出時の y 座標の差を指す(以後この値を側方変位と呼ぶ)。被験者の奇数番目の横断における左方向へのずれを正(偶数番目の横断における右方向へのずれを正)とする。側方変位は被験者が歩行者流の影響でどの程度下流方向へ流されて横断したかを表している。動線が直交する歩行者が相手の希望方向へ流されるという現象は、主にSFモデルで確認される挙動である。一方のFTモデルでは他者の動きを予測しながら空間を探索して移動するため、微小時間後に人が道を塞ぐ下流側ではなく上流方向に移動しやすいという特徴がある。道を横断する際には、道路に直交する軌跡を描いて移動することが空間的な最短経路であり、側方変位が大きいほど長い距離を移動することになる。被験者の速度は一定のため、必然的に旅行時間は比例して長くなる。そのため、旅行時間をできるだけ短くするというインセンティブが作用している今回の場合では、「 y 方向のずれが小さいほど合理的な行動である」といえる。主にヒストグラムとして提示を行う。ヒストグラムは0.5m刻みに集計を行っており、横軸が y の場合は、「 y 以上 $y+0.5$ より小さい」値を加算している。

(2) 評価手法

a) 評価手法の方針

実験により得た歩行者の軌跡と、採用した2つのマイクロ歩行者モデルについて比較することでモデル性能の評価を行う。実験から取得されたデータには、時刻毎の歩行者と被験者の座標が含まれている。したがって歩行者の軌跡データから歩行者流の形を入力データに使用すれば、歩行者が経験したものと全く同様の状況を再現して歩行者シミュレーションを行うことが可能である。シミュレーションから得た軌跡データと実測データをそれぞれサンプルとして、各指標について比較を行う。

b) シミュレーション手順

モデルによるシミュレーションは以下の手順で行う。

- ・ シミュレーションは1サンプル(交錯区間横断一回分)に1回分実行する。
- ・ 被験者が交錯区間に進入した瞬間から開始する。
- ・ 区間に侵入直後の歩行者群衆を再現し、被験者の位置座標から各マイクロ歩行者モデルによる歩行シミュレーションを行う。
- ・ シミュレーションに適用するモデルは歩行者群衆と同一のものとする。

(3) 旅行時間による比較

図-9～図-12に各実験パターンで得られた旅行時間の分布を示す。実測データとシミュレーション結果を集計してヒストグラム化したものである。データラベルの「EXP」で表示されたものが実測データであり、「SIM」がシミュレーションにより計算された軌跡を指している。図中の表には各パターンにおける平均旅行時間及び中央値を示している。

設定1では、FT実測値とSF実測値の形状は類似しているものの、若干ではあるがFT実測値の方が旅行時間は短いことが確認できる。平均旅行時間からもそのことが読み取れる。交通量が少なければ希望方向に進み続けることは容易になるため、旅行時間や変位量は全データにおいて小さくなっていた。

設定2では、FT実測値とSF実測値を比較すると、被験者はFT実測値の方が短い旅行時間をとっている。平均旅行時間ではFTシミュレーション値が最短の値をとっており、その他の値は似通った値となっている。

設定3では、FT実測値とSF実測値を比較すると、被験者はFT実測値の方が短い旅行時間をとっている。平均旅行時間ではFTシミュレーション値が最短の値をとっており、その他の値は似通った値となっている。グラフの形状、平均旅行時間ともに設定2の場合に近い結果が得られた。

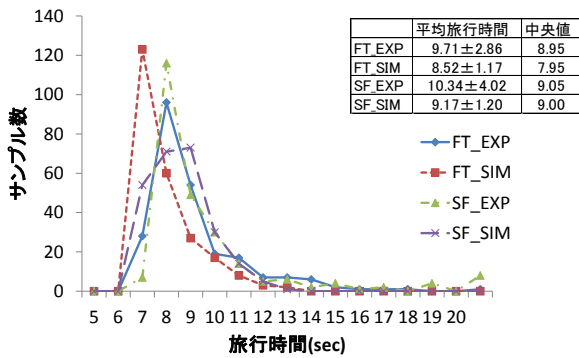


図-9 旅行時間分布(設定1)

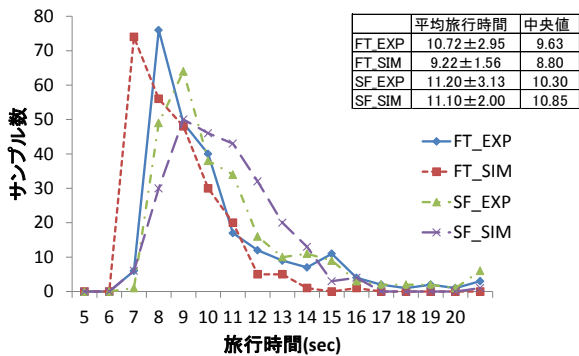


図-10 旅行時間分布(設定2)

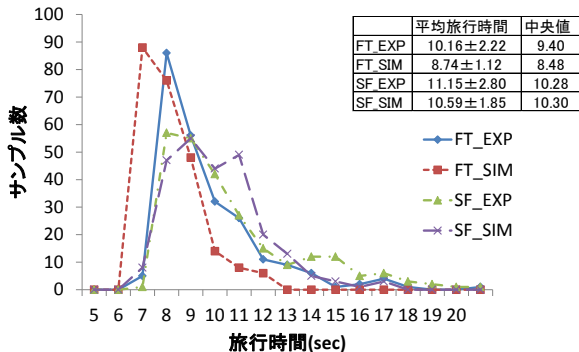


図-11 旅行時間分布(設定3)

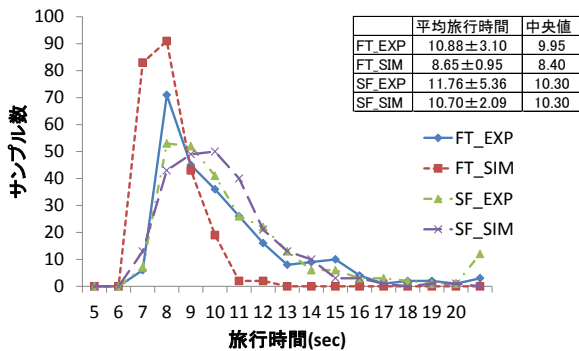


図-12 旅行時間分布(設定4)

設定4では、最も旅行時間が短くなっているのはFTシミュレーション値である。FT実測値とSF実測値に関しては似通った旅行時間分布となっているが、平均旅行時間を確認するとSF実測値の方が大きい旅行時間となっている。

(4) 側方変位による比較

図-13～図-16に各実験パターンで得られた側方変位の分布を示す。実測データとシミュレーション結果を集計してヒストグラム化したものである。データラベルの「EXP」で表示されたものが実測データであり、「SIM」がシミュレーションにより計算された軌跡を指している。図中の表には各パターンにおける平均側方変位及び中央値を示している。

設定1では、FT実測値とSF実測値ともに側方変位は似通った分布となっている。平均側方変位に関してもFT実測値が -0.33m 、SF実測値が -0.39m であり、同様の結果となっている。しかしながら、両者とも実測値とシミュレーション値では大きく異なり、FTシミュレーション値では正方向、SFシミュレーション値では負方向に被験者が流される傾向が見られた。FTモデルでは通行可能な空間を探索しながら進むため、正面の歩行者を回避する場合には相手の後方を移動した方が移動距離が短く、上流へ向かう経路を選択するためと考えられる。SFシミュレーション値では、変位が負方向に分布する傾向が確認できた。SFモデルでは回避は他者との力学的な相互作用によるため、流れてくる歩行者から逃げる方向、すなわち下流方向に移動しやすくなると考えられる。

設定2では、FT実測値とSF実測値ともに 0m を頂点とした山型となっているが、被験者は負の方向に流される傾向がある。平均側方変位に関してもFT実測値が -0.49m 、SF実測値が -0.44m であり、同様の結果となっている。しかしながら設定1の時と同様に、両者とも実測値とシミュレーション値では大きく異なり、FTシミュレーション値では正方向、SFシミュレーション値では負方向に被験者が流される傾向が見られた。

設定3では、FT実測値とSF実測値ともに 0m を頂点とした山型となっているが、負の方向に被験者が流される傾向がある。設定2の場合と比較的近い変位を示しているが、歩行者の流れが双方向なので、負の方向に流された被験者が正の方向に押し返されている。

設定4では、被験者は左右から同量の交通量で流れてくる歩行者の間を横断することを行っているため、側方変位に関してはどのパターンに関しても似通った結果が得られた。平均側方変位を見てみると、どのパターンでも変位が小さく収まっていることが確認できる。

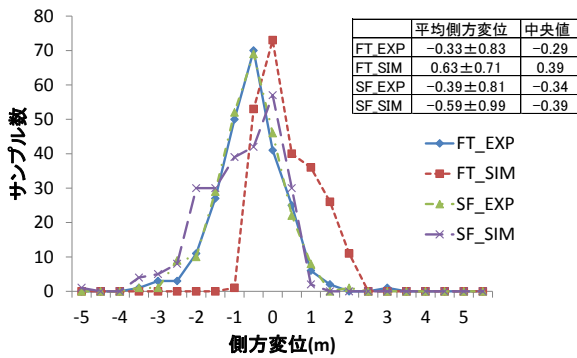


図-13 側方変位分布(設定1)

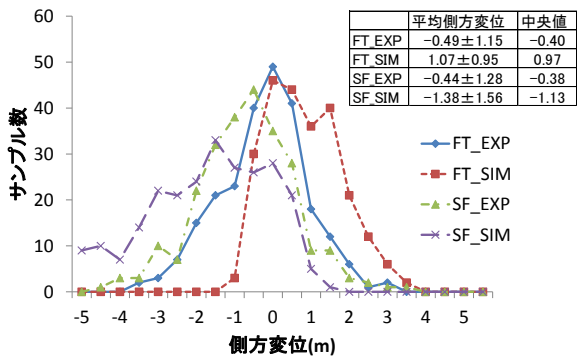


図-14 側方変位分布(設定2)

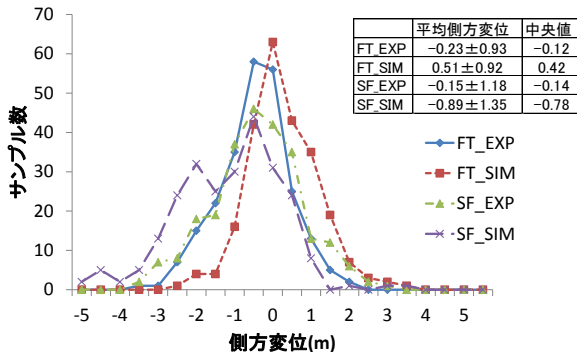


図-15 側方変位分布(設定3)

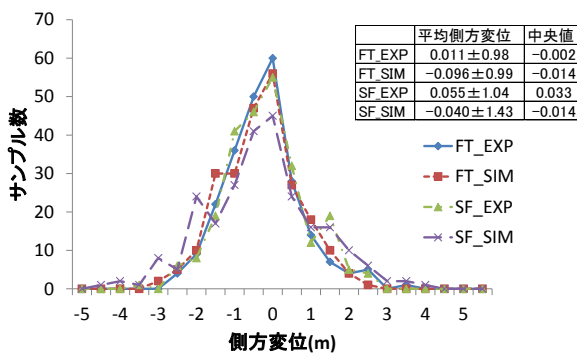


図-16 側方変位分布(設定4)

(5) 双方妨害時間による比較

交通量による比較の結果、横断終了時の座標は下流方向に変位していた被験者が多かった。下流に流されやすいというのはSFモデルに見られる特徴であるが、この結果だけでは下流方向に経路選択しやすい傾向があっただけなのか、SFモデルのように進路を阻まれて流されたのかは判断出来なかった。

そこで実測値とモデルの評価には、「双方妨害時間(Double Obstruction Time; 以下DOT値)」という概念を導入する。双方妨害時間とは、他者の動きに引きずられて希望方向からずれていくというSFモデルに見られる現象を定量的に評価するための指標である。双方妨害時間は同じ相手に近づいていた時間の最大値を示しており、この値が大きいほど相手につきまるとして移動したことを表している。閾値を $R_i = 1.4m$ に設定しており、被験者と歩行者の重心距離が1.4m以内にいる人の最大時間を表している。

図-17～図-20に各モデルの実測値と、シミュレーション値の双方妨害時間を累積図にして示す。

実測値について見ると、FTモデルよりもSFモデル交通流におけるサンプルの方が双方妨害時間は長くなることを確認できる。FTモデルのシミュレーション値が他の条件に比べて双方妨害時間が短いサンプルが多く、一方で、SFモデルのシミュレーション値が全データの中で最も双方妨害時間が長いことが読み取れる。SFモデルでは力学的に挙動が決定されるため、他者との位置関係により力が釣り合った形のまま移動するという現実にはありえない現象が生じていたことが確認できる。SF実測値に関してもFTモデルによるものより双方妨害時間が長いことが読み取れる。被験者以外の歩行者がSFモデルに従って動いているため、被験者に対して周辺歩行者がつかまとうという現象が発生していたと考えられる。

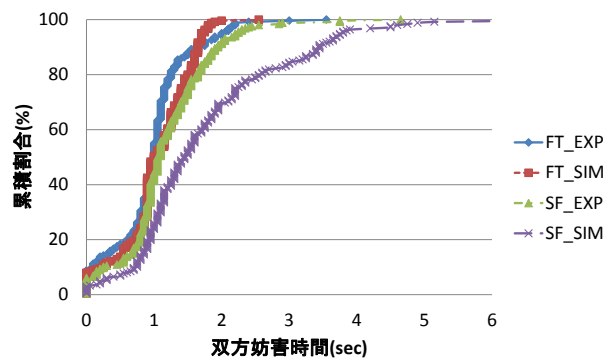


図-17 双方妨害時間(設定1)

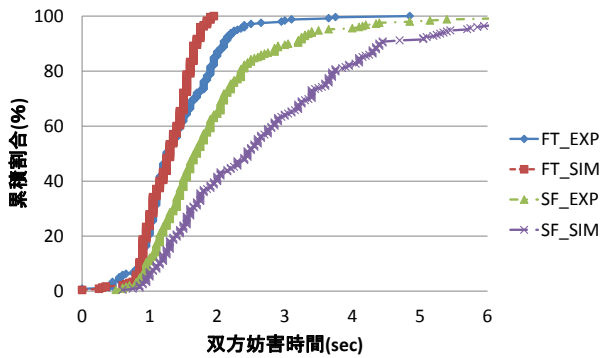


図-18 双方妨害時間(設定2)

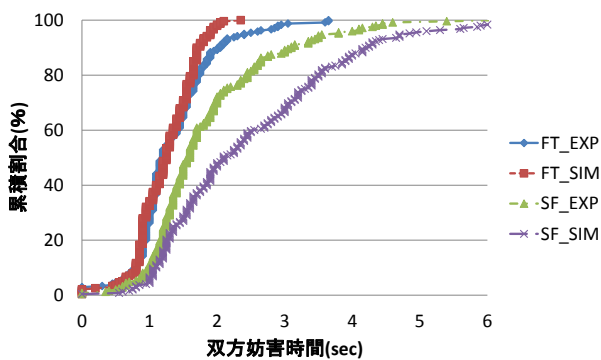


図-19 双方妨害時間(設定3)

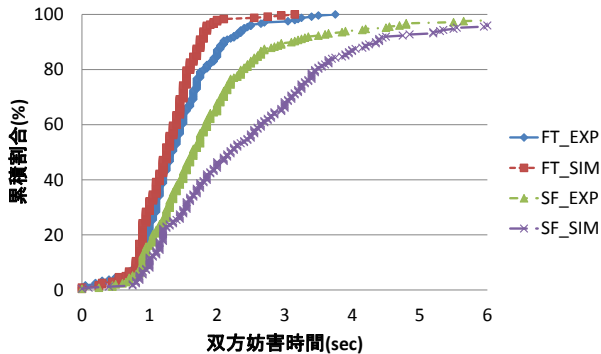


図-20 双方妨害時間(設定4)

4. 結論

本研究では、VR装置を用いて歩行者実験を行い、SFモデルとFTモデルの両モデルの比較を行った。その結果、FTモデルでは、交通量を問わず旅行時間はシミュレーション値の方が実測値より短いことが確認された。また、変位について見るとシミュレーション値では、歩行者流の上流方向へ移動しやすいという傾向が確認された。実測値では下流方向へ移動する傾向があり、実測値とシミュレーション値とのずれを確認した。一方、SFモデルでは、旅行時間、側方変位ともに実測値とシミュレーション値で比較的近い値を取ることが確認できた。旅行時間や側方変位といったマクロ的な指標を用いるの

であれば、FTモデルよりもSFモデルの方が歩行者行動の再現性があるのではないかとと言える。ただし、SFモデルのシミュレーション値では、旅行時間の分布は狭い範囲にサンプルが集まるのではなく、広範囲に散らばって分布していることが確認された。また、変位について見るとシミュレーション値では歩行者流が下流方向に過剰に移動する傾向が見られた。SFモデルでは歩行者の動きが力学的に決定されるため、進路を直行する歩行者同士がお互い必要以上に接触するという現実にはありえない現象が生じている可能性が推測された。そこで、双方妨害時間という指標を用い、歩行者同士が相手にどれだけつきまとっていたかミクロ的な観点で確認を行った。その結果、FTモデルでは実測値とシミュレーション値で似通った値が得られた。一方で、SFモデルではシミュレーション値で双方妨害時間が大きく評価されることが確認できた。SFモデルは双方妨害時間だけを見れば歩行者の行動を十分には再現されておらず、FTモデルと比べてSFモデルの方が歩行者モデルとして優位であるとは言えないことが確認できた。

本研究では、歩行者のマクロ的な特性については分かっていたが、ミクロ的にモデルとの整合性を確認したわけではない。今後はモデルの特性を考慮しながら、ミクロ的な挙動を実験データとシミュレーションを比較することで確認していきたい。

謝辞：本研究は科学研究費補助金（研究種目：若手研究（A）、課題番号：22686048）の援助を受けてなされた。この場を借りて感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Helbing, D. et al., Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations, Pedestrian and Evacuation Dynamics, pp.21-58,2002.
- 2) 浅野美帆, 井料隆雅, 桑原雅夫, :交錯交通の容量評価のためのマイクロ歩行者行動モデル, 交通工学, Vol.43, No. 4, pp80-89, 2008.7.
- 3) Miho Asano, Takamasa Iryo, Masao Kuwahara, A Pedestrian Model Considering Anticipatory Behaviour for Capacity Evaluation, Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee, pp.549-581, 2009.
- 4) Tobias Kretz, Stefan Hengst, Antonia Perez Arias, Simon Friedberger, Uwe D. Hanebeck, Using Extended Range Telepresence to Collect Data of Pedestrian Dynamics, 2012
- 5) Athanasia Louloudi, Franziska Klügl, Visualizing Agent-Based Simulation Dynamics in a CAVE - Issues and Architectures, Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems pp. 651-658, 2011

(2012. 8. 3受付)