

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 4 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21760470

研究課題名（和文）避難行動フレームワークを用いた避難安全性能の最適化に関する研究

研究課題名（英文）Optimization of Evacuation Safety Using Evacuation Behavior Framework

研究代表者

安福 健祐（YASUFUKU KENSUKE）

大阪大学・サイバーメディアセンター・助教

研究者番号：20452386

研究成果の概要(和文): コンピュータを利用して建築・都市空間の避難安全性を検証するため、複数の避難行動モデルを比較検証することで、より信頼性の高い評価手法を確立した。また楕円型の避難行動モデルを新たに開発し、従来よりも高密度な群集の再現を行った。さらに並列コンピューティング技法を用いた大規模避難への対応、遺伝的アルゴリズムを用いた避難経路の最適化を行い、建築・都市空間の避難安全性能の最適化手法を提案した。

研究成果の概要(英文): To verify the evacuation safety of buildings or urban environments using a computer, we provided more reliable evaluation method by comparing the different types of human evacuation model. In addition, we developed a new ellipse-based model which reproduced a high-density crowd walking. Moreover, our system supported large-scale evacuation using parallel computing technique and the optimization of evacuation route using genetic algorithm approach. We proposed those optimization methods of evacuation safety performance.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：建築工学

科研費の分科・細目：建築学・都市計画・建築計画

キーワード：防災計画、避難行動、シミュレーション、避難安全性

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 災害のリスクを考慮し、安全な建築・都市空間を設計するためには、人間の避難行動を予測した防災計画が重要であり、その避難安全性を検証する方法の一つとして、コンピュータを用いた避難シミュレーションが挙げられる。現在では、国内外で商用のソフトウェアが開発されてきており、東京消防庁の優良防火対象物認定表示制度では、審査シ

テムに避難シミュレーションを利用できるとあることから、今後、実用化がさらに進んでいく可能性がある。その一方で、シミュレーション結果の妥当性を検討するための方法や避難行動データは十分に整理されておらず、信頼性の高い評価手法の確立が求められている。

(2) 筆者らはこれまで、細密なメッシュモデルを用いた避難シミュレーションを開発し、

地下空間浸水時の避難に対する適用性の評価を行っている。またインタラクティブな体験型の避難シミュレータを開発し、被験者実験を行った結果、仮想空間内においても人間の避難行動特性が再現される成果が得られている。今後は、上記の避難シミュレーション技術を応用し、複数の避難行動モデル比較検証することで、より信頼性の高いシミュレーションが構築可能となる。またシミュレーション結果を基にして、避難経路の形状を自動的に最適化できるシステムにより、効果的な避難計画立案の支援が可能となる。

## 2. 研究の目的

本研究は、複数の行動特性を一つのシステムで扱う避難行動フレームワークを開発し、信頼性の高い避難安全検証手法を確立するとともに、避難時間が短縮可能となる避難経路形状を提示することで、建築物の避難安全性能を最適化するシステムの構築を目的としている。

## 3. 研究の方法

(1) 一つのシステム上で複数の避難行動モデルを取り扱える避難行動フレームワークを開発し、事例として Social Force モデルおよび RVO モデルを対象に、群集歩行特性の比較分析および建築物の避難シミュレーションによる避難安全性の比較検証を行う。また新たに楕円型 RVO モデルの開発を行い、高密度状態での群集歩行を再現する。

① Social Force モデルは、避難者の歩行速度を計算するために、移動目標、他のエージェント、壁などの障害物から受ける力の相互作用で運動方程式を解く力学モデルである (図 1)。

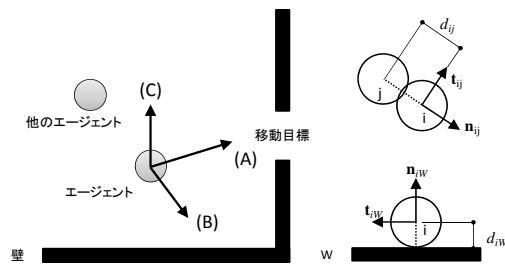


図 1 Social Force モデル

② RVO モデルは、Velocity Obstacles という概念をベースに、群集歩行向けに拡張したモデルであり、RVO とは、Reciprocal Velocity Obstacles の略である。Velocity Obstacles とは、ロボティクス分野で開発された移動物同士の衝突回避を行うアルゴリズムの一つである (図 2)。

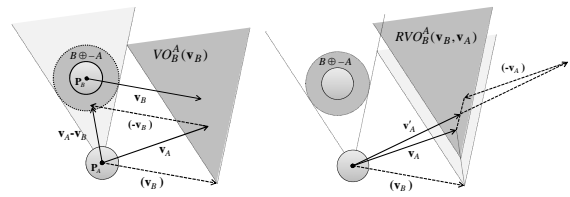


図 2 RVO モデル

③ 従来の避難行動モデルよりも高密度状態の群集歩行を表現するため、RVO モデルをベースに人間の肩幅と体の厚みの違いを考慮し、エージェントの形状を円形から楕円形に変更する。ただし、楕円形は、衝突判定に係わる計算量が円形と比較してはるかに増大するため、ここでは、楕円同士の衝突判定に座標変換行列を利用することで高速な計算を行う (図 3)。

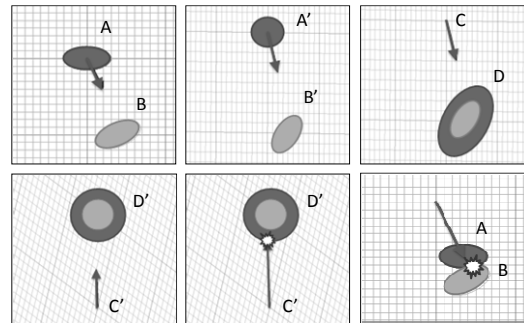


図 3 楕円型 RVO モデル

(2) これまでのマルチエージェント型避難シミュレーションは、各エージェントを逐次処理で計算する場合が多い。一方、近年 GPU を用いた並列コンピューティング技法が注目されており、画像処理以外の汎用計算に利用可能になってきている。このようなプログラム高速化手法を Social Force モデルに適用することで、広域空間からの大規模避難を実時間でシミュレーションするシステムを開発する (図 4)。

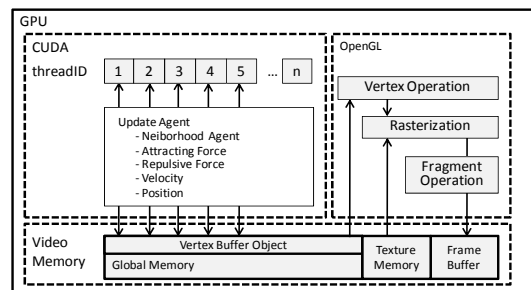


図 4 GPU による Social Force の並列処理

(3) 建築・都市空間の避難時間を短縮するような避難経路形状生成アルゴリズムとして、

遺伝的アルゴリズム (GA) を利用する。また具体的な適用事例として、近年大型商業施設に多く見られるシネマコンプレックスを対象として、その平面構成の避難安全性最適化を行う (図 5)。

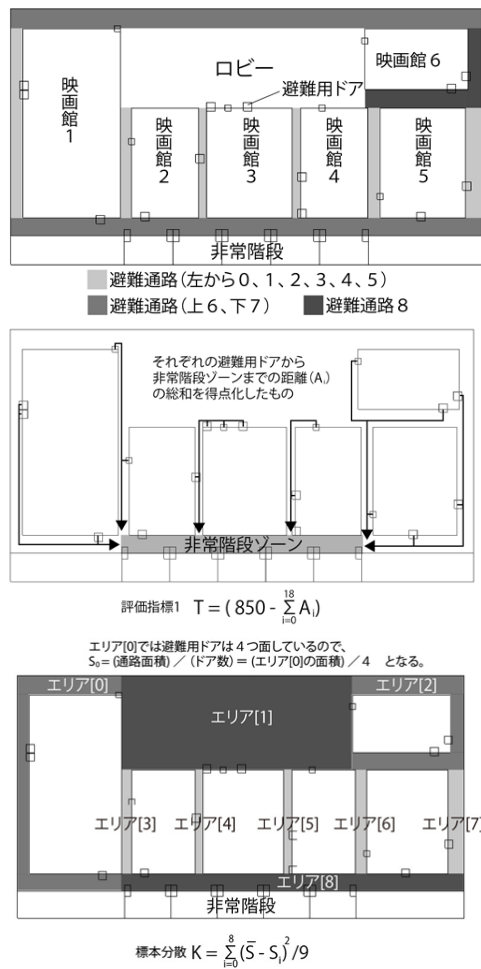


図 5 対象平面と評価指標

#### 4. 研究成果

(1) 避難行動フレームワーク上で、Social Force モデルおよび RVO モデルの避難行動モデルを対象事例として、群集歩行特性の比較分析を行った結果、Social Force モデルのほうが RVO モデルよりも建物出口における群集のアーチアクションが再現されることや、群集流動係数にばらつきが少ない点で避難シミュレーションとして適している一方、群集密度と歩行速度の関係については RVO モデルが実測の値に近づく特性等を示した (図 6, 7)。

また具体的な建物からの避難への適用事例においては、各モデルの群集の大きさ、形、動きの違いにより居室単位での避難時間には差が生じるが、階全体の避難時間には有意な差はみられなかった。建築基準法で定められた避難安全検証法と比較した結果は、シミ

ュレーション初期条件の違いによって結果に差が生じるものの、適切なボトルネックの流動係数が付与されれば、シミュレーションによる避難安全検証が可能であることを示した (図 8)。

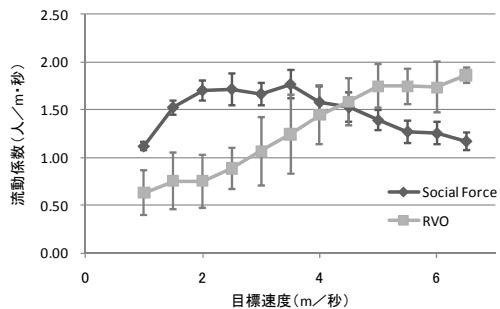


図 6 各モデルの流動係数

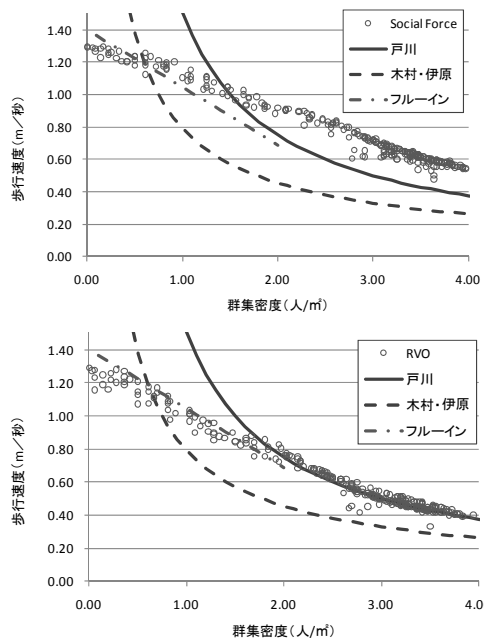


図 7 各モデルの群集密度と歩行速度

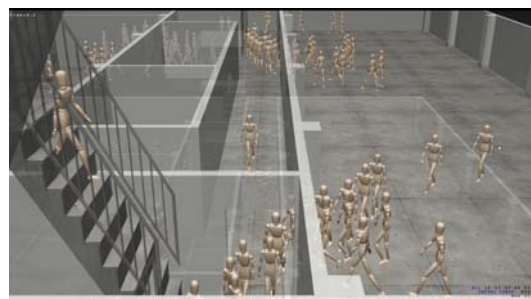


図 8 避難シミュレーション画面

さらに、楕円型 RVO モデルと、従来の円形型とを比較した結果、1 方向の群集流動においては、楕円型 RVO モデルを用いることで群

集密度 5.5 人/m<sup>2</sup> の高密度な状態での群集歩行を再現できること、対向する群集流動においては、対向する群集が帯状の流れを形づくってすれ違う層化現象が現れることを明らかにした (図 9)。

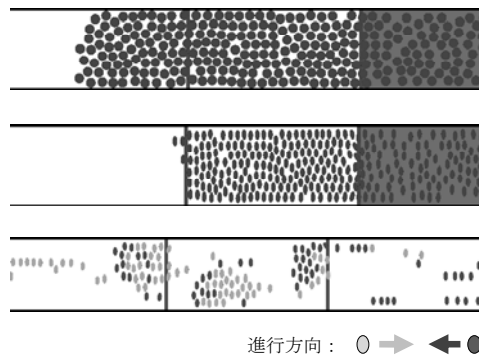


図 9 避難シミュレーション画面

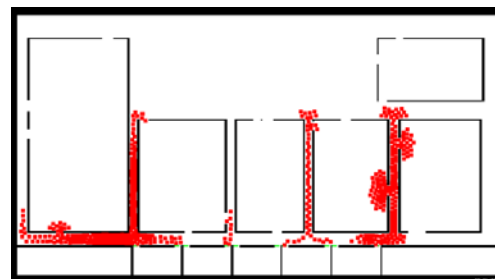
(2) GPU を利用した並列コンピューティング技法を利用し、避難行動モデルの一つである Social Force モデルを並列計算した結果、従来の逐次処理型のアルゴリズムよりもスケーラビリティが向上する結果が得られた。具体的には、広域な地下空間において 2 万 5000 人の避難行動をシミュレーションした場合、一般的な PC よりも約 7 倍計算時間が短縮され、実時間でのシミュレーションが可能となった (図 10)。



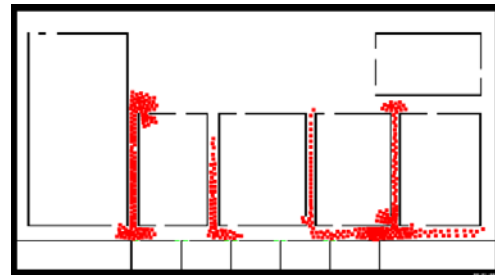
図 10 大規模避難シミュレーション

(3) シネマコンプレックスの典型的な平面図を対象として、建築物の避難安全性に大きく影響を及ぼすと予測される避難経路形状 (扉位置・通路幅等) を、避難距離の短縮と群集の分散という二つの評価指標を用いて、遺伝的アルゴリズムによる最適化を行った。さらに、生成された平面プランに対して、避難行動フレームワークを用いた避難安全性の評価を行った結果、遺伝的アルゴリズムの世代を重ねるごとに避難時間が短縮したことから、本システムの最適化が有効に働いていることが確認されるとともに、二つの評価指標についても、適切な重み係数を設定す

る根拠が得られた (図 11)。



$\alpha=1.0$ , 世代数=1, 避難開始 60 秒後



$\alpha=1.0$ , 世代数=330, 避難開始 60 秒後

図 11 遺伝的アルゴリズムを適用

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 11 件)

- ① 柏木俊弥、安福健祐、遺伝的アルゴリズムを用いたシネマコンプレックスの平面計画の最適化に関する研究、日本図学会 2011 年度秋季大会学術講演論文集、69-74、2011、査読無
- ② Kensuke YASUFUKU、DEVELOPMENT OF LARGE-SCALE EVACUATION SIMULATION SYSTEM USING GPGPU、Proceedings of International Symposium on Disaster Simulation & Structural Safety in the Next Generation 2011、273-278、2011、査読無
- ③ Atsushi NAKAZAWA、Kensuke YASUFUKU、DISASTER SCENE ANALYSIS AND SIMULATION USING LARGE RANGE IMAGES、Proceedings of International Symposium on Disaster Simulation & Structural Safety in the Next Generation 2011、265-272、2011、査読無
- ④ 安福健祐、GPU を利用した大規模避難シミュレーションシステムの開発、日本建築学会大会学術講演梗概集、201-202、2011、査読無
- ⑤ 安福健祐、楕円型 RVO モデルを用いた高密度群集流動の再現、日本建築学会技術報告集、第 17 巻第 35 号、187-190、2011、

- 査読有
- ⑥ 安福健祐、楕円型 RVO モデルによる高密度群集シミュレーションの開発、日本図学会 2010 年度秋季大会学術講演論文集、123-128、2010、査読無
  - ⑦ 安福健祐、避難行動フレームワークを用いた群集歩行モデルの比較分析と避難安全検証への適用性、日本建築学会計画系論文集、第 75 巻第 655 号、2081-2088、2010、査読有
  - ⑧ 安福健祐、マルチエージェントシステムを用いた避難行動モデルの分析 Social Force モデルと RVO モデルの比較、日本建築学会大会学術講演梗概集、1007-1008、2010、査読無
  - ⑨ 安福健祐、Social Force 型避難行動モデルの開発と地図データベースを用いた広域避難への適用、日本建築学会第 32 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集、73-78、2009、査読有
  - ⑩ 安福健祐、避難行動フレームワークの開発と群集流動の可視化、日本図学会 2009 年度秋季大会学術講演論文集、75-80、2009、査読無
  - ⑪ 安福健祐、地図データベースを用いた広域避難シミュレーションシステムの開発、日本建築学会大会学術講演梗概集、515-516、2009、査読無

[学会発表] (計 9 件)

- ① Kensuke YASUFUKU、The Study on the Evaluation of Urban Disaster Prevention Performance Using an Agent-based Crowd Simulation、UIA2011 TOKYO Academic Program Research Papers and Design Works、Tokyo International Forum、2011. 9. 26
- ② Kensuke YASUFUKU、DEVELOPMENT OF LARGE-SCALE EVACUATION SIMULATION SYSTEM USING GPGPU、International Symposium on Disaster Simulation & Structural Safety in the Next Generation 2011、University of Hyogo、2011. 9. 18
- ③ 安福健祐、GPU を利用した大規模避難シミュレーションシステムの開発、日本建築学会大会 (関東) 学術講演会、早稲田大学、2011. 8. 23
- ④ 安福健祐、楕円型 RVO モデルによる高密度群集シミュレーションの開発、日本図学会 2010 年度秋季大会 (東京) 学術講演会、法政大学、2010. 11. 27
- ⑤ 安福健祐、マルチエージェントシステムを用いた避難行動モデルの分析 Social Force モデルと RVO モデルの比較、日本建築学会大会 (北陸) 学術講演会、富山大学、2010. 9. 10

- ⑥ Kensuke YASUFUKU、VISUALIZATION OF CROWD BEHAVIOR USING EVACUATION SIMULATION FRAMEWORK、14th International Conference on Geometry and Graphics、Kyoto University、2010. 8. 8
- ⑦ 安福健祐、Social Force 型避難行動モデルの開発と地図データベースを用いた広域避難への適用、日本建築学会第 32 回情報・システム・利用・技術シンポジウム、建築会館、2009. 12. 3
- ⑧ 安福健祐、避難行動フレームワークの開発と群集流動の可視化、日本図学会 2009 年度秋季大会 (東京) 学術講演会、東京都大学、2009. 11. 28
- ⑨ 安福健祐、地図データベースを用いた広域避難シミュレーションシステムの開発、日本建築学会大会 (東北) 学術講演会、東北学院大学、2009. 8. 27

[図書] (計 1 件)

- ① 安福健祐、FORUM8 VR 開発グループ、先端グラフィックス言語入門～OpenGL ver4.0 & CUDA～、フォーラムエイトパブリッシング、201-283、2011

[その他]

ホームページ等

<http://www.comy.cmc.osaka-u.ac.jp/~yasufuku>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

安福 健祐 (YASUFUKU KENSUKE)

大阪大学・サイバーメディアセンター・助教

研究者番号：20452386