

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 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：2012～2014

課題番号：24760490

研究課題名(和文) スケーラブルな避難解析システムの開発と大規模避難の可視化

研究課題名(英文) Development of a Scalable Evacuation Analysis System and Visualization of Large-scale Evacuation

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：建築物単体から都市空間までのスケーラブルな避難解析システムを開発することを目的としており、建物内の避難時間を短縮するような避難施設配置の検証から、広域地下空間の大規模避難シミュレーションおよびその可視化を行う。避難施設配置の検証事例として、シネマコンプレックスを対象に、GAにより得られた通路幅、階段位置、扉位置において避難安全性向上を確かめた。さらに、大阪梅田地下街における25,000人規模の避難に適用し、大型立体表示システムを用いてその結果を高精細可視化することで、俯瞰視点および一人称視点によって避難安全対策の立案・検討や、防災教育を多人数で議論できる環境を構築した。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop a scalable evacuation analysis system covering from a building to urban space. This system evaluated the GA-generated building plans taking into consideration for crowd movement. As a result of an application to a cinema complex planning, the estimated evacuation time was reduced as the GA generation went by. In addition, this system simulated an evacuation from a large-scale underground shopping mall by using GPU computing and visualized the 25,000 crowd movement on a 3D tiled display wall. This environment enables to review a disaster prevention plan with a group of people.

研究分野：建築工学

キーワード：避難シミュレーション マルチエージェントシステム GPUコンピューティング 大規模可視化

1. 研究開始当初の背景

(1) 東南海・南海沖地震による津波災害、近年の気候変動による集中豪雨の頻発、台風の大規模化による大規模水害は深刻な問題となっている。特に都市部に広がる地下空間は、1999年に発生した福岡水害以降、浸水時の危険性が指摘されはじめ、水害対策が進められてきた。2010年にまとめられた中央防災会議の想定には「地下空間からの逃げ遅れによる人的被害の発生」が予測されており、対策として「具体的な避難誘導方策等の検討を進める」ことが挙げられている。また同会議は「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告」において「円滑な避難行動のための体制整備とルールづくり」「ソフト対策の重視」を掲げている。

(2) 広域な地下街のように複雑な空間の避難計画に対し、コンピュータを利用した避難解析が期待されている。近年の避難解析は、マルチエージェントシステムと呼ばれる手法が用いられており、個々の人間をエージェントとしてある一定のルールでモデル化し、エージェント同士の局所的な相互作用によって巨視的な群集流動特性を再現しようとする。このようなマルチエージェントシステムを用いて、より大規模な避難を扱うことにより、建築物単体から都市空間までの避難解析をスケラブルに行うことができる。

2. 研究の目的

本研究は、建築物単体から都市空間までのスケラブルな避難解析システムを開発することを目的としており、避難時間を短縮するような建物内の避難施設配置の検証から、地下街の大規模避難シミュレーションおよび大型立体表示システムによる避難性状の可視化を行い、避難安全性の評価に適用する。

3. 研究の方法

(1) スケラブルな避難解析システムは GPU コンピューティング技術を活用し、マルチエージェントシステムにより個々の避難者を扱い、Social Force モデルにより局所的な避難行動を再現している。Social Force モデルは、社会心理学的な要素と物理的な力を結びつけた力学モデルであり、各エージェントの歩行速度を算出するため、(A) 移動目標に向かう力、(B) 他のエージェントから受ける反発力、(C) 壁等の障害物から受ける反発力の相互作用で運動方程式を解く(図1参照)。

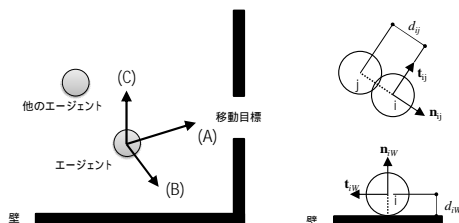


図1 Social Force モデル

(2) 避難解析システムを用いて、建物内の避難施設配置を評価するため、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて避難施設配置候補を生成させる。GA とは、生物が環境に適応して進化していく過程を工学的に模倣したアルゴリズムで、最適解を求めるための一手法である。そのケーススタディとして、シネマコンプレックス型の平面構成を取り上げる。図2にシネマコンプレックス型の平面構成の原型を示す。この原型に対して GA を用いた避難安全性の高い居室出口位置、階段位置、通路幅を求める。GA の評価値となる避難時間は各階段の避難時間の中で最長のものとする。その計算方法は、告示の避難安全検証法に基づいているが、個々の避難者の動きから生じる群集流動の影響までは考慮されていない。そこで、エージェントベースの避難解析システムにより群集流動を考慮した避難施設配置の評価を行う。

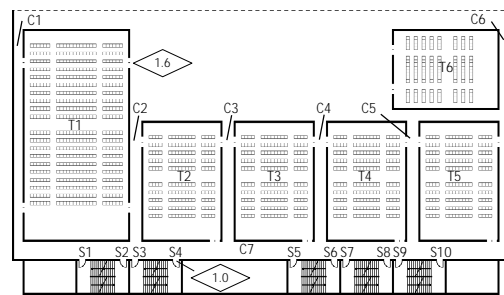


図2 シネマコンプレックス型の平面構成

(3) 広域地下空間における大規模人数の避難解析事例として、大阪梅田地下街に対して避難シミュレーションを適用する。エージェントは2万5000人配置し、地上に通じる最寄りの階段まで一斉に避難させ、全員が避難に要する時間を計測する。また、避難シミュレーションでは、エージェントが上述の Social Force モデルによって、移動目標に向かって歩行するが、計算負荷を軽減するため、格子状のメッシュに移動目標の方向ベクトルをあらかじめ保持させておく。こうすることで、エージェントは現在位置のメッシュから移動方向ベクトルを参照することで、最短経路での避難ができる。格子状のメッシュは、地下空間の平面図を50cmの正方形に分割して作成し、各メッシュに避難出口位置や障害物情報、高低差情報などを保持させ、避難出口までの最短経路は A* アルゴリズムを用いて、すべてのメッシュについて事前に計算している。

(4) 大型立体表示システムは、複数の 3D ディスプレイを格子状に配置して一つの高解像度ディスプレイを構築している。今回導入するシステムは、水平150度程度の超広視野を有する1920×1080 (フルHD) 50インチプロジェクションモジュール24面(縦4面、横6面)およびバックエンドで可視化処理を行う画像処理用PC6台と制御用PC2台で構

成されている(図3参照)。避難解析結果は、あらかじめPC側でシミュレーションを行い、1/30秒ごとの位置データ、速度データをファイルに保存して、可視化プログラムに読み込んで再生を行う。避難解析結果を3Dモデルに重ね合わせると、避難者の移動軌跡データが2次元であることから、格子メッシュデータに格納されている高低差データを参照して、高低差のある3Dモデル上に避難者の3Dモデルを配置している。さらに、歩行アニメーションデータを歩行速度に応じて再生することで、映像にリアリティを与えている。

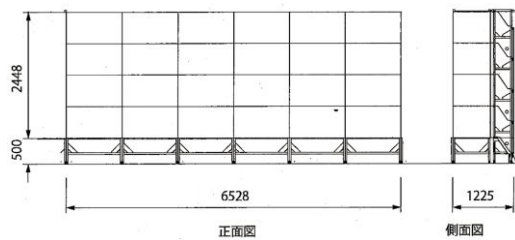


図3 大型立体表示システム

4. 研究成果

(1) 避難解析システムの Social Force 計算にGPUを使用した場合と使用しない場合との計算時間の比較を図4に示す。GPUのほうがよりスケーラビリティは向上しており、1万人のエージェントを計算させる場合には、GPUのほうが約7倍高速に処理できている。また、その計算時間は約5msとなっており、シミュレーションを可視化する際には、画面更新速度よりも大幅に短くなっていることから、実時間でのシミュレーションと可視化ができるシステムであることが確かめられた。

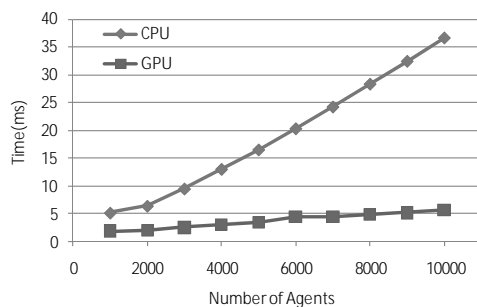


図4 スケーラビリティの評価

(2) GAによる避難施設配置を20回試行した結果、全試行において151世代以降はある一つの解に収束しており、1世代目の解(最大適応度を有するもの)の避難時間と比較して、最終世代の解の避難時間が28.2%から43.9%(平均36.8%)短縮することが確認できた。また、最終世代の解における平均避難時間は105.5秒、標準偏差は6.3秒となったことから、避難時間のばらつきは平均値の±5%程度と予測される。図5は、避難解析システムによる避難シミュレーションを適用し、シミュレーションの避難時間とGAの避難時間を

比較した結果を示している。20パターンの避難施設配置のうち19パターンは、最終世代でシミュレーションの避難時間も短縮している。その短縮率は、1世代目の解と最終世代の解との間で、GAが平均36.8%のに対し、シミュレーションのほうは平均32.0%になっている。また、最終世代になると、1事例を除いて、GAとシミュレーションの避難時間の差が小さくなり、その相関係数が0.80となる。以上のことから、GAで得られた避難施設配置はシミュレーションでもその優劣関係がほぼ保持されることを示した。

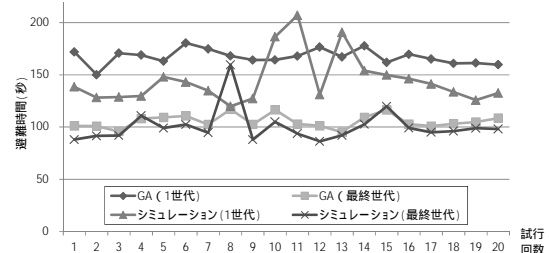


図5 シミュレーションとGAの避難時間(1)

(3) GAにより得られた各世代の避難施設配置に対して避難解析システムによるシミュレーションを適用し、GAとシミュレーションの避難時間を比較した結果を図6に示す。

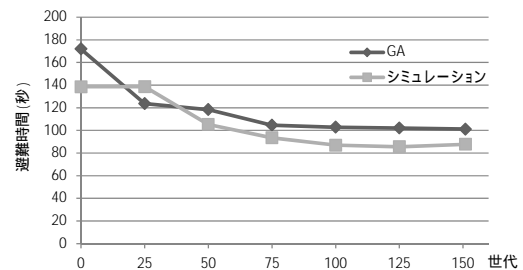


図6 シミュレーションとGAの避難時間(2)

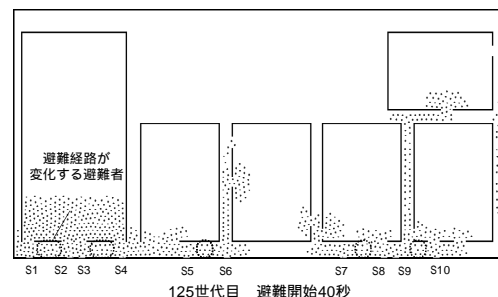
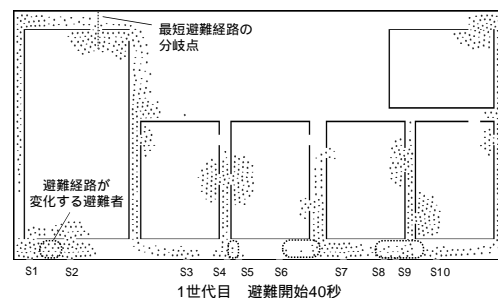


図7 避難解析システムによる評価

シミュレーションの避難時間も GA の避難時間と同様、世代が進むにつれて短縮する傾向を示しており、その相関係数は 0.87 となっている。このことから、GA により得られる避難施設配置は、シミュレーションで群集流動を考慮した場合でも、世代が進むにつれて避難安全性が向上していることが確かめられた。ただし、シミュレーションの避難時間と GA の避難時間との間に差は生じている。その原因としては、群集流動の影響によって避難経路や開口部での流動係数が異なったことが大きな要因である（図 7 参照）。

(4) 広域地下空間における大規模避難シミュレーションの結果として、図 8 上のグラフに避難開始後の経過時間と避難中の人数を示す。これから 2 万 5 千人の避難者全員が避難完了するまでには約 5 分を要していることがわかる。ただし、約 80% の避難者は避難開始約 1 分後には避難を完了している。図 8 下は、避難開始直後の状況（左）と、避難開始 1 分後の状況（右）を示している。これを見ると、既に避難が完了しているエリアと階段前に滞留が発生しているエリアに分かれており、滞留の多いエリアに避難出口が多ければ、避難時間は短くなることが予測できる。ただし、今回のシミュレーションの初期設定としては、2 万 5 千人のエージェントを一定密度で配置しており、また全員が一斉に最短経路で避難開始する条件となっている。このような状況は、現実とはかけ離れている可能性もあるが、当該地下空間の特性を分析するための一つの指標を提供することは可能である。

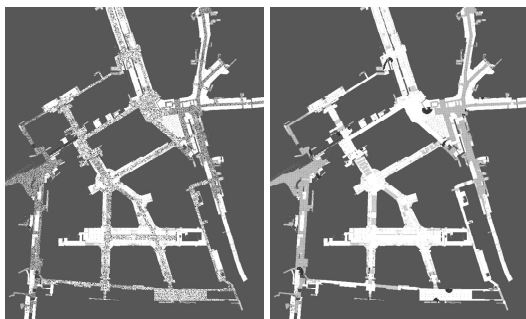
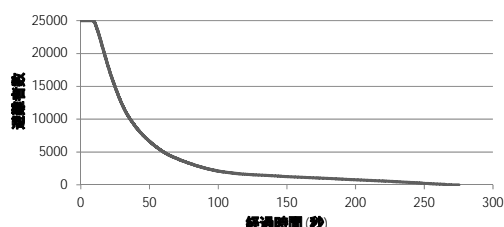


図 8 大規模避難シミュレーション結果

(5) 可視化プログラムを用いて、大阪梅田地下街の避難シミュレーション結果と地下街の 3D モデルを重ねあわせ、大型立体表示システムに避難状況を表示した結果を図 9 に示す。画像は、リアルタイムに 11,520 × 4,320

ピクセルのドットバイドットでレンダリングしており、インタラクティブな視点移動も可能である。ここでは俯瞰視点と一人称視点を自由に切り替えることで、異なる視点で避難安全性を検証することを想定する。俯瞰視点では、大阪梅田地下街 3D モデルは屋根を非表示にして地下 1 階の平面図が表示される。また、避難シミュレーション結果は、その平面図上に避難者の位置が点で表示される。コントローラを使用して、平面図の上下左右移動、拡大縮小表示、避難シミュレーションのタイムサーチができるため、任意の場所の、任意の時間帯のシミュレーション状況を確認することができる。また、高さ約 2.5 m、幅約 6.5 m の大型ディスプレイのため、東西約 1.1 km、南北約 1.1 km の梅田地下街全体を 500 分の 1 のスケールで表示できる。一般的な 1,920 × 1,080 ピクセルのディスプレイを用いた場合、50 cm の格子状メッシュを 1 ピクセルで表示すれば、960 m × 540 m 程度の範囲しか表示できないが、同条件で 11,520 × 4,320 ピクセルという超高解像度で表示すれば、5,760 m × 2,160 m の範囲が表示できるため、地下街全体の把握がより容易に行うことができる。



図 9 大規模避難の可視化(1)

(6) 一人称視点は、俯瞰視点から任意の位置を指定して行う。一人称視点では、コントローラを使ったウォークスルー機能が追加され、壁などの障害物との間の衝突を検出しながら移動できる。大阪梅田地下街 3D モデルをほぼ実物大で表示できており、避難シミュレーション結果は歩行アニメーション付きの 3D 人体モデルが表示されている（図 10 参照）。より没入感を与えるには、ユーザーの視点位置検出とステレオ立体視による正確な実物大表示を行えばよいが、その場合、トラッカー付きの 3D メガネを装着したユーザー 1 人のみ正しい映像表示となる。また、立体視時の身体移動を伴わないコントローラを用いた移動やトラッキングの遅延等が原因で、ユーザーによっては乗り物酔いのような症状が発現しやすいなどの問題がある。特に今回は、多人数での避難計画の検証ができる環境を想定していることから、視点の位置検出は無効にしており、立体視はオプション

ンとした。それでも、壁一面にある高精細のディスプレイの効果によって、実際にその空間にいるような臨場感は体験することができ、避難状況の確認はもちろん、エージェントの動きを観察し、避難シミュレーション自体の妥当性検証も行うことができる。



図 10 大規模避難の可視化(2)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 16 件)

安福健祐、自己駆動粒子による群集流動モデルの特性と建物避難安全性評価、混相流、査読無、Vol. 29、No.1、2015、27-34

安福健祐、瀧澤重志、高木尚哉、谷口与史也、高精細タイルドディスプレイを用いた大規模地下街避難の 3 次元可視化、日本図学会 2014 年度秋季大会(東京) 学術講演論文集、査読無、2014、139-142
Kensuke YASUFUKU、ANALYSIS ON SEQUENCE OF ARCHITECTURAL SPACE BY USING VR WALK-THROUGH SYSTEM、Proceedings of 16th International Conference on Geometry and Graphics、査読有、2014、38-44

Kensuke YASUFUKU、COMPUTATIONAL ANALYSIS OF ARCHITECTURAL VISUAL SPACE ALONG WALKING PATH BY USING VIRTUAL REALITY DISPLAY、Proceedings of the 19th International Conference of the Association of Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA 2014、査読有、2014、709-718

安福健祐、VR ウォークスルーシステムによる建築空間移動時の視覚的シークエンスの分析、日本図学会 2014 年度春季大会(福岡) 学術講演論文集、査読無、2014、1-6

Kensuke Yasufuku、Scalable Evacuation Simulation and Visualization Using GPU Computing、Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012、Springer、査読有、2014、1365-1374

安福健祐、柏木俊弥、阿部浩和、遺伝的アルゴリズムを用いた建物内の避難施設配置システムの開発と群集流動を考慮した避難安全性の評価、日本建築学会

計画系論文集、査読有、第 79 巻 第 697 号、2014、635-642

安福健祐、避難行動シミュレーションの現状と課題、計算工学、査読無、Vol.19、No.1、2014、19-22

安福健祐、VR 技術を用いた群集流動のインタラクティブ可視化、日本図学会 2013 年度秋季大会(盛岡) 学術講演論文集、査読無、2013、67-70

Kensuke YASUFUKU、VISUALIZATION OF CROWD FLOW IN LARGE-SCALE FACILITY USING AGENT-BASED SIMULATION、Proceedings of the 13th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality、査読有、2013、547-555

安福健祐、マルチエージェントシステムによる群集行列歩行の再現、日本建築学会大会学術講演梗概集 E-1、査読無、2013、599-560

安福健祐、ウォークスルーシステムによる歩行経路に沿った視野空間変化の 3 次元分析、日本図学会 2013 年度春季大会(兵庫) 学術講演論文集、査読無、2013、77-82

安福健祐、出来佑也、阿部浩和、ウォークスルーシステムによる歩行経路に沿った視野空間分析ツールの開発と適用、日本建築学会計画系論文集、査読有、第 78 巻 第 684 号、2013、pp.365-372

安福健祐、大規模集客施設における群集行列シミュレーション、日本図学会 2012 年度秋季大会(東京) 学術講演論文集、査読無、2012、107-112

安福健祐、柏木俊弥、阿部浩和、遺伝的アルゴリズムを用いたシネマコンプレックス平面形状の避難安全性最適化、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2、査読無、2012、107-108

Kensuke YASUFUKU、Yuya DEKI、Hirokazu ABE、DEVELOPMENT OF A TOOL FOR ANALYZING ARCHITECTURAL SPACE BASED ON AMBULATORY VISION、Proceedings 15th International Conference on Geometry and Graphics、査読有、2012、6 pages

〔学会発表〕(計 13 件)

安福健祐、高精細タイルドディスプレイを用いた大規模地下街避難の 3 次元可視化、日本図学会 2014 年度秋季大会、2014.11.30、東京藝術大学(東京都台東区)

Kensuke YASUFUKU、ANALYSIS ON SEQUENCE OF ARCHITECTURAL SPACE BY USING VR WALK-THROUGH SYSTEM、16th International Conference on Geometry and Graphics、2014.8.7、Innsbruck(Austria)

Kensuke YASUFUKU、COMPUTATIONAL ANALYSIS OF ARCHITECTURAL VISUAL

SPACE ALONG WALKING PATH BY USING VIRTUAL REALITY DISPLAY、The 19th International Conference of the Association of Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA 2014、2014.5.16、京都工芸繊維大学(京都府京都市)

安福健祐、VR ウォークスルーシステムによる建築空間移動時の視覚的シーケンスの分析、日本図学会 2014 年度春季大会、2014.5.10、九州大学西新プラザ(福岡県福岡市)

安福健祐、VR 技術を用いた群集流動のインタラクティブ可視化、日本図学会 2013 年度秋季大会、2013.11.16、盛岡ホテル大観(岩手県盛岡市)

Kensuke YASUFUKU、VISUALIZATION OF CROWD FLOW IN LARGE-SCALE FACILITY USING AGENT-BASED SIMULATION、The 13th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality、2013.10.31、London(UK)

安福健祐、マルチエージェントシステムによる群集行列歩行の再現、日本建築学会大会、2013.8.30、北海道大学(北海道札幌市)

安福健祐、ウォークスルーシステムによる歩行経路に沿った視野空間変化の3次元分析、日本図学会 2013 年度春季大会、2013.5.12、産業技術短期大学(兵庫県尼崎市)

安福健祐、大規模集客施設における群集行列シミュレーション、日本図学会 2012 年度秋季大会、2012.12.15、東京工科大学(東京都大田区)

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平面形状の避難安全性最適化、日本建築学会大会、2012.9.14、名古屋大学(愛知県名古屋市)

Kensuke YASUFUKU、Yuya DEKI、Hirokazu ABE、DEVELOPMENT OF A TOOL FOR ANALYZING ARCHITECTURAL SPACE BASED ON AMBULATORY VISION、15th International Conference on Geometry and Graphics、2012.8.4、Montreal(Canada)

Kensuke Yasufuku、Scalable Evacuation Simulation and Visualization Using GPU Computing、6th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012、2012.6.7、Zurich(Switzerland)

安福健祐、大規模災害を想定した避難シミュレーションの現状と課題、第 17 回計算工学講演会シンポジウム 2「防災・減災 - 計算工学の現状と課題 - 」、2012.5.29、京都教育文化センター(京都府京都市)

〔図書〕(計 1 件)

エドウィン・ガリア、今村文彦、佐野友紀、安福健祐、足達嘉信、傘木宏夫、フォーラムエイトパブリッシング、行動、安全、文化、「BeSeCu」増補・日本版 ~ 緊急時、災害時の人間行動と欧州文化相互調査 ~、2014、305(252-265)

〔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