

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23310110

研究課題名(和文) 地方都市における防災まちづくり推進のための大規模災害避難訓練シミュレータの開発

研究課題名(英文) Development of a walk-through simulator for evacuation drill estimating a large scale disaster for disaster reduction in a local city

研究代表者

多田村 克己(TADAMURA, Katsumi)

山口大学・理工学研究科・教授

研究者番号：30236533

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：地方都市において地域住民対象の防災ワークショップを開催する際、様々な被災状況を想定して近隣住民が話し合いながら擬似的な避難経験を積むことができれば、実際に被災した際の損害を軽減可能であると考えられる。本研究では、このような目的で使用するための、大震災とそれに付随して発生する同時多発型の火災を想定した、避難訓練用シミュレータを開発した。具体的には、多大規模災害を表現するための要素技術開発と、それにより得られた被災市街地データを組み込んだ仮想空間ウォークスルーのプロトタイプを開発した。

研究成果の概要(英文)：A workshop for disaster reduction which involves local residents, local government officers and disaster prevention experts has been held in the unit of local community. If the local residents stack up pseudo experiences of evacuation at various virtual disasters at that workshop, it seems that we can reduce the damage at the actual disaster. In this study, we have developed a simulator for evacuation drill, which is used for the above mentioned purpose, estimating a large scale earthquake and a large scale earthquake fire. More specifically, we developed elemental techniques for expressing damaged urban area hit by a large scale earthquake and also developed a prototype of walkthrough in a virtual space which consists of objects in a disaster-stricken urban area.

研究分野：コンピュータグラフィックス

キーワード：バーチャルリアリティ 大規模災害シミュレーション 防災・減災 避難訓練シミュレータ

### 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、火災発生時の避難シミュレータは、バーチャルリアリティ(VR)技術を基にしたシステムが国内外で開発されていた。火災そのものに関しては、グリニッジ大学火災安全工学研究グループにより火災の燃え広がり方に関する火災モデリング用のCFD(計算流体力学)ソフトが開発され、火災時の避難行動や煙による視界不良に関する研究も数多く報告されていた。これらの大部分は、閉鎖空間である乗り物や地下街及びトンネル内での火災発生に対する避難を対象としていた。

一方、広域災害の避難を対象とするシミュレータの研究は、防災性能評価や隘路予測を目的とするマルチエージェントモデルを利用したシステムの開発が中心であった。このように、VR技術を初めとするIT技術を防災に活用する研究は盛んになっていたが、臨場感の高い災害現場を再現するシステムは、CAVE(周囲を反射型のスクリーンで囲まれた特殊な部屋)の利用を前提とするか、ヘッドマウントタイプのディスプレイを利用するため、利用者が都心部の専用施設に出向くか特殊な機器を使用する必要があった。すなわち、大地震発生による火災や建物倒壊のために行動危険性が増した状況下での広域避難訓練を、地方都市の地域住民が身近な場所で体験するための可搬性に富んだシステムは開発されていなかった。そのため、臨場感の高い避難訓練システムを有効に使用して、近隣住民の間で防災意識を高めるための方法論も確立されていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、以下の3つの構成要素から成る避難訓練シミュレータを開発する事を第1の目的とした。

#### (1)被災地内ウォークスルーサブシステム

下記第2の目的を達成するため、道路の閉塞や通行危険性及び火災や煙の拡散等による視界不良を表現した臨場感の高い3次元CG画像を利用したVRシステムを開発する。

#### (2)建物倒壊シミュレーションサブシステム

建造物の構造や使用建材に基づく大地震発生による倒壊予測及びその結果もたらされる瓦礫の散乱状況のシミュレーションを行う手法を考案する。また、シミュレーションの結果得られた建物倒壊状況や瓦礫の分布状況を反映した、仮想空間中に表現するための3次元被害市街地生成方法を考案する。

#### (3)延焼シミュレーションサブシステム

建物の内装材に基づく大地震発生に伴う火災の発生予測及び天候・風向きの影響による延焼予測を、適切な根拠に基づき一定時間間隔で行う手法を考案する。さらに、視点近傍

で起きる火災を、計算負荷をできるだけ掛けずに臨場感高く表現するための簡易火災表現手法を考案する。

また本研究では、大地震に対する地域住民の心構えが大きく異なる二つの都市において、この避難訓練シミュレータを用いたバーチャル避難訓練を主たる目的とする住民参加の防災ワークショップ(WS)を実施し、両者の行動特性の違いを明らかにする事を第2の目的とした。

### 3. 研究の方法

避難訓練シミュレータおよび開発は、主に多田村を中心とするグループが担当し、避難訓練シミュレータのプロトタイプのパフォーマンスおよび機能評価、および避難訓練シミュレータを利用した防災まちづくりワークショップの実施自治会の候補選出とその地域の建物情報などの詳細データ作成を大貝と鶴を中心とするグループが担当した。建物毎に建築年代や構造等のデータを入力する必要があるため市販のGISを活用し、政策の手間を最小限にするため、できるだけ独立したプログラムを開発するよりもGISの機能を利用したプラグインプログラムを開発した。また、ソフトウェア開発の規模が大きく継続性の担保が必要な被災地内ウォークスルーサブシステムは、多田村のグループが要素技術の開発と基本設計を行い、実装は外部に発注した。以下にそれぞれのサブシステムの研究方法について説明する。

#### (1)被災地内ウォークスルーサブシステム

研究開始当初は、VRMLデータを利用したウォークスルーシステムと同様の性能および機能を備えるシステムを開発することとした。できるだけ直感的な操作が可能となるように、マウスやキーボード等のポインティングデバイスを用いず、スクリーン状に投影された仮想空間を見ながらKinectTMを利用してジェスチャで仮想空間内の移動を指示する方法を開発した[学会発表\*]。この手法を実装したプロトタイプを評価した所、応答性に問題があることと、移動のためのコマンドに対応するジェスチャを記憶する必要があるので、初めての利用者にとってはおぼつかない使用感であったとの評価を受けた。このため、操作方法はマウスよりは直感的な操作に優れたジョイスティックによることとした。

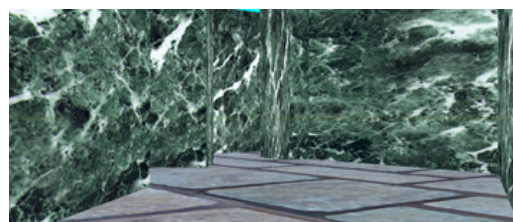


図1 操作テスト用データ(迷路)の例

次に図1に示すような仮想空間を移動するウォークスルーシステムのプロトタイプを開発し、一般市民がどの程度自分の意思どおりに操作可能であるかを調査した。避難訓練用の環境データが整っていなかったため、迷路をできるだけ早く通過する事を要求し、設定時間よりも早く抜けた場合は、賞品を授与することで動機付けを行った。この結果、テレビゲーム等で仮想空間の移動にある程度慣れている被験者は、早い時点でジョイスティックの操作と仮想空間中の移動との間の関係に慣れて思い通りの操作ができるようになっていたが、事前の経験が乏しい場合は、ジョイスティックの倒す量と移動速度の関係や方向転換の方法の把握に困難を来しており、コーナーを曲がる際に蛇行を繰り返したあげく構造物に衝突してしまう傾向が見られた。使用後のインタビューなどから、一旦意図と異なる操作になってしまうと、冷静さを失うことや、実世界では壁に衝突することは無いため、どうすれば正しい経路に復帰できるのかが分からなくなる等が判明した。また、移動操作に困難を感じるほど画面進行方向に注意が集中する事も分かった。以上のことから、当初想定していた仮想空間中を自由に動きながら避難経路を見つける方法では、ウォークスルー操作に習熟していない利用者は避難のための判断よりも仮想空間の移動自体に注意が集中してしまい、所期の目的を果たせないと考えた。そこで、当初の計画には無いウォークスルー操作の習熟度に行う方法に依存せず、仮想空間中を移動可能にする方法をまず考案し、その後移動に関する操作性の評価を行うこととした。

## (2) 建物倒壊シミュレーションサブシステム

このサブシステムは、建物の倒壊判定そのものを行うプログラムと、倒壊状況に合わせた物体の3次元データを仮想空間中に配置するプログラム、および倒壊状況と建物の大きさにより瓦礫の散乱をシミュレートするプログラムとに分けて開発した。それぞれの研究方法について以下に説明する。

### ① 建物倒壊判定プログラム

建物の倒壊状況の判定は、建物被害関数とロシアンルーレットを用いて行うこととした。本研究で開発した手法で用いた建物被害関数は、建物の建築年代と構造、そして地震動最大速度の3つのパラメータによって建物の倒壊確率が求められる関数である。建物被害関数のパラメータに地震動最大速度があるが、地域住民対象の避難訓練シミュレータということ considering、地震動最大速度を地域住民にも分かりやすい計測震度に変換して使用した。建物被害関数のパラメータに建物の建築年代が設けられているのは、日本では建築基準法の施行・改正により、年代ごとに建物の耐震性能が異なるためである。今回用いた建物被害関数は、建物が全壊する確率と建物が全壊もしくは半壊する確率の2つの確率を求

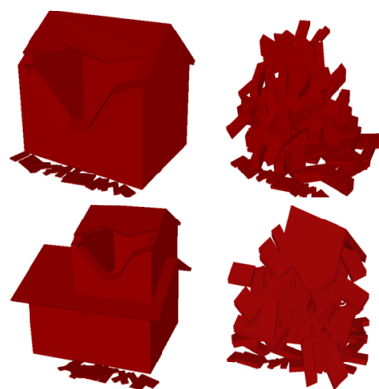


図2. 倒壊建物基本形状の例

めることができる。したがって、建物が半壊する確率は全半壊確率から全壊確率を差し引いた値とした。建物毎の建築年代を予め調査してGISを利用してそれぞれの建物に割当てたので、すべての建物に対する倒壊判定を行うことができる。

### ② 倒壊状況を考慮した物体配置プログラム

①の手順で、建物毎の倒壊状況を求めた後、それに適した物体データを選択して配置する。ここで、全壊および半壊のモデルデータとして図2に示す基本形状を予め作り、健全時の建物の大きさなどに合わせて適宜、スケール、回転、平行移動を組み合わせて適切な位置に配置するようにした。

### ③ 瓦礫散乱シミュレーションプログラム

本研究では、避難訓練の対象領域を一様な正方メッシュに分割し、メッシュの要素であるセル単位に建築もしくは構造上の属性や瓦礫量を与えることとした。瓦礫分布算出処理では、まず、建物から流出する瓦礫の分布を求め、その建物の瓦礫の散乱範囲内に存在するすべての道路属性を持つ道路セル毎に瓦礫量を計算して加算する方法を採用した。この時に利用する建物と道路セルとの間の距離は、建物の1階平面図における各辺の中点を含むセルと道路セルの中心との距離であるとした。建物から流出する瓦礫量の計算モデルとして、中心から離れるほど瓦礫量が少なくなる分布を採用する。具体的には、平面上の座標値(x, y)をパラメータとする2変量正規分布を採用した。

### (3) 延焼シミュレーションサブシステム

研究開始当初は、建物倒壊度を考慮しない延焼シミュレーションモデルを考案した。当初基本にしていた既存の手法が、延焼評価指数という独自の指標を用いて上述のセル単位に一定時間間隔での延焼の状況をシミュレーションしており、この方法を踏襲していた。しかし、物理的にも統計的にも裏付けが乏しく、特に木造建築の耐火性能を延焼に反映できないという問題に遭遇した。そこで、東京消防庁が実際に起きた火災から定式化

した延焼モデルを本研究のシミュレーションにおいて利用可能な形に変形することで、統計的な裏付けのある延焼モデルに基づく一定時間間隔毎の延焼シミュレーションを行う手法を開発した。開発した延焼シミュレーション手法では、セル毎に建物の壁の部分か否かを調べておく必要があるが、これはGISで建物属性とメッシュ分割を行った直後に実施可能であり、延焼シミュレーションの前処理として予め計算結果をデータとして用意しておくことで、延焼シミュレーションの本処理には影響を及ぼさないようにした。

#### 4. 研究成果

本研究により得られた成果を開発したサブシステム毎に説明する。

##### (1) 被災地内ウォークスルーサブシステム

カーナビゲーションの経路生成用に発案されたハイパーレールという考え方を採用することとした。ただし、瓦礫の散乱する道路において最短経路を発見する手法の考案には十分時間が無かったため、瓦礫の分布を与えるセルを利用して利用者が移動可能な経路を限定する事により、操作性の向上を図る手法を開発した。この手法では、瓦礫の散乱により直進が難しい複雑な区間においては、利用者の操作に係わらず移動速度を低く制限することにより、結果としてスムーズな移動を可能とした。図3は開発した手法により得られた移動可能経路を水色で示し、速度制限領域を紫色で示した適用例である。仮想空間移動用のウォークスルーシステムには、移動可能領域、速度制限領域をそれぞれ別のデータとして与えることで、これらを容易に扱えるようにした。これまで開発されたウォークスルーシステムには、壁等の入り込まないように衝突判定を組み込んだシステムは見かけることができるが、経路の複雑さに応じて自動的に速度制限をかけるシステムは見当たらず、本研究で開発した手法の特徴の1つと言える。

##### (2) 建物倒壊シミュレーションサブシステム

瓦礫の分布シミュレーションを、建物の揺れ方に規則性のある直下型地震とそれ以外の地震について分けて行う手法を新しく開発した。本研究では、建物の辺ごとに瓦礫流出係数を定め、それを瓦礫流出量計算の際に用い

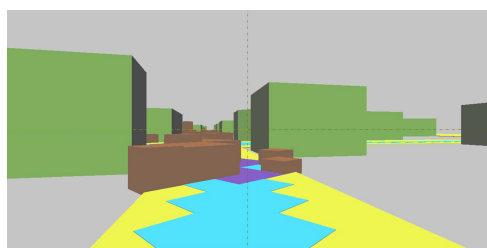


図3. 移動可能領域の例

ることで建物の振動方向を考慮した倒壊建物から発生する瓦礫の表現を行う点に特徴があり、このような手法をとる瓦礫分布シミュレーションは他に見当たらない。さらに、建物倒壊とそれに連動して生じる瓦礫を同時に仮想空間中に表現可能としたシステムも無く、仮想空間を用いて避難訓練を実施する類似のシステムに対するインパクトは高いと考えられる。

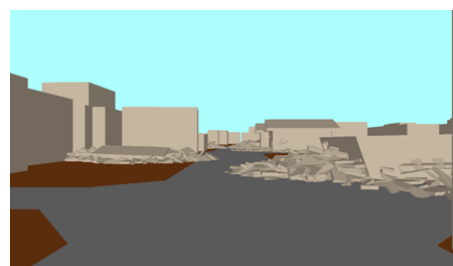
図4(a)は、本研究で開発した建物倒壊シミュレーションサブシステムを宇部市の市街地に対して適用して得られた建物倒壊状況と瓦礫分布を示した図である。図4(b)は、この結果から生成した被災市街地データを(1)の被災地内ウォークスルーサブシステムで表示した例である。

##### (3) 延焼シミュレーションサブシステム

東京消防庁が提案した式を利用し、建物の倒壊状況を反映してセル毎に延焼状況を一定時間間隔でシミュレーション可能とする手法を開発した。建物内部と建物間では異なるアルゴリズムにより延焼するものとし、建物間の延焼では壁の健全性およびの材質（耐火造、防火木造、裸木造）を反映した計算式を用い、建物内部の延焼には建物倒壊状況と倒壊していないときには建物の構造を反映した計算式を用いることとした。従来の延焼シミュレーションが、一定時間間隔の延焼状況の把握では無く、どこまで燃え広がるのか



(a) 瓦礫分布



(b) B地点から見た景観

図4. 建物倒壊シミュレーション適用例

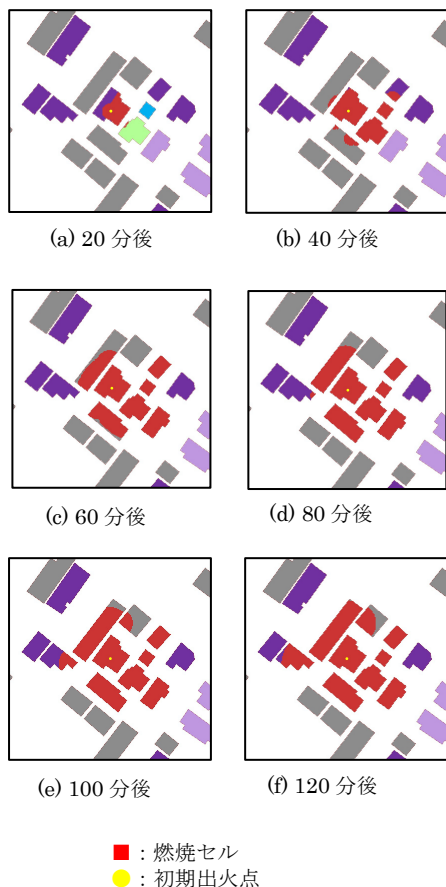


図5. 延焼シミュレーション結果

に注目していたのに対して、本研究により数分間隔での延焼状況が表現可能になった。これにより、延焼シミュレーション結果を反映する形で仮想空間内の燃え広がりを表現可能になるため、煙の分布や火災のために高熱になり通行できない道路などを表現することが可能になる。これは、現実に近い被災状況の再現には不可欠であり、本手法を適用することで統計的な裏付けのある延焼を仮想空間で表現可能になった。

考案した手法を実装して宇部市街地に対して大規模震災の直後に発火した場合を想定して実施した延焼シミュレーション結果を図5に示す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計40件)

① Shohei Morinaga, Yoshiki Mizukami, Shinji Ikaruga, Takeshi Kobayashi, Katsumi Tadamura, Kazuki Karashima, and Akira Ohgai, A Method for Simulating Distribution of Rubble Immediately After The Earthquake, Proceedings of The 2015 International Workshop on Advanced Image Technology, ID:463, 2015, 査読有。

② 辛島一樹, 大貝彰, 多田村克己, WebGISとVRを連動させた密集市街地整備の整備案検討支援ツールの開発, 日本建築学会計画系論文集, 第79巻, 第697号, pp.745-754, 2014,

査読有。

③ Yoshiki Mizukami, Makoto Gomyo, Kyohei Takada, Katsumi Tadamura, RENDERING OF WATER SPLASH, IADIS International Journal on Computer Science and Information Systems, Vol. 7, No. 2, pp. 178-194 2013, 査読有。

④ Meher Nigar Neema, Akira Ohgai, Multi-type Green-space Modelling for Urban Planning using GA and GIS, Environment and Planning B, Planning and Design, 40(3), 447-473, 2013, 査読有。

⑤ 山元隆稔, 大貝彰, 日高圭一郎, 村上正浩, 地域防災力評価ツールの開発と評価, 日本建築学会技術報告集, 19, (41), 329-333, 2012, 査読有。

⑥ Kou Fujiwara, Yoshiki Mizukami, Shinji Ikaruga, Tsuyoshi Kobayashi, Akira Ohgai, and Katsumi Tadamura, Smoke generation method based on fire spread model for evacuation simulator in virtual reality, Proceedings of The 2012 International Workshop on Advanced Image Technology, pp. 878-883, 2012, 査読有。

⑦ Kazuki Karashima, Akira Ohgai, Katsumi Tadamura, and Kazuki Maeji, A Support Tool Incorporating District Disaster Mitigation Performance Evaluation Methods for Examination of Improvement Plans in Built-up City Areas, Proceedings of The 8Th International Symposium on City Planning and Environment Management in Asian Countries, No.48, pp.197-210, 2012, 査読有。

⑧ 古賀元也, 鷗心治, 大貝彰, 多田村克己, 小林剛士, 市街地再開発事業における計画立案に向けた合意形成手法に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第76巻, 第660号, pp. 405-414, 2011, 査読有。

⑨ Takatoshi Yamamoto, Akira Ohgai, Emanuel Leleito, Motoya Koga, Kazuki Karashima, Study Towards Achieving Real Time Use of A Disaster Mitigation Performance Evaluation Support Tool in Community-based Planning, Proceedings of 12th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, CD-ROM, 2011, 査読有。

〔学会発表〕(計20件)

① 吉武佑佳里, 水上 嘉樹, 小林剛士, 鷗心治, 大貝彰, 辛島一樹, 多田村 克己, 電子地図と標高データに基づく3次元道路形状の再構築, 平成26年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, p. 259, 2014. 10. 25 福山大学(広島県・福山市)。

② 末次亮太, 水上 嘉樹, 多田村 克己, 家屋火災データ簡易生成のための支援システムの開発, 画像電子学会第42回年次大会予稿集, S5-1. 2014. 6. 30 早稲田大学(東京都・新宿区)。

③ 辛島一樹, 齊藤結, 大貝彰, 将来人口と災害危険性を考慮した土地利用対策検討のためのGIS支援ツールの開発 - 愛知県豊橋市

を事例として、日本建築学会大会(近畿)、  
学術講演梗概集、F-1、2014.9.14、神戸大学  
(兵庫県・神戸市)。

④森永祥平、水上 嘉樹、大貝彰、鷗心治、  
小林剛士、多田村 克己、GIS と 3DCG を利用  
した大震災直後の市街地自動生成手法の開  
発、画像電子学会第 41 回年次大会予稿集、  
S2-4、2013.6.22、リンクステーションホー  
ル青森(青森県・青森市)。

⑤西川博晃、水上 嘉樹、大貝彰、鷗心治、小  
林剛士、多田村 克己、市街地大規模火災シ  
ミュレーションのための延焼モデルに関する研究、  
画像電子学会第 41 回年次大会予稿集、S2-2、  
2013.6.22、リンクステーションホール青森(青森  
県・青森市)。

⑥藤原翔、水上 嘉樹、多田村 克己、Kinect  
™を利用したウォークスルーシステム操作の  
基礎検討、平成 24 年度(第 63 回)電気・情報  
関連学会中国支部連合大会講演論文集、  
p. 339、2012.10.20、島根大学(島根県・松江  
市)。

⑦兼重直毅、水上嘉樹、大貝 彰、多田村  
克己、震災シミュレーション結果に基づく瓦  
礫表現手法の開発、平成 24 年度(第 63 回)電  
気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文  
集、p. 338、2012.10.20、島根大学(島根県・  
松江市)。

⑧辛島一樹、大貝彰、多田村 克己、多田優一、  
WebGIS と VR を連動させた密集市街地整備の  
ための計画立案支援ツールの試験的開発(そ  
の 2)、2012 年度日本建築学会大会学術講演梗  
概集F-1、pp.995-996、2012.9.12、名古屋大  
学(愛知県・名古屋市)。

⑨古賀あゆみ、辛島一樹、大貝彰、山元隆稔、  
多田村 克己、前地一輝、まちづくり現場で  
の実用化に向けた地区防災性能評価ツールの  
改良 その 1 : ツールの課題整理と改善、  
2011 年度日本建築学会大会学術講演梗概集  
F-1、pp. 577-578、2011.8.25、早稲田大学  
(東京都・新宿区)。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

多田村 克己 (TADAMURA Katsumi)  
山口大学大学院理工学研究科・教授  
研究者番号 : 30236533

### (2) 研究分担者

大貝 彰 (OHGAI Akira)  
豊橋技術科学大学 都市・システム学系・  
教授  
研究者番号 : 10160433

鷗 心治 (IKARUGA Shinji)  
山口大学大学院理工学研究科・教授  
研究者番号 : 30264071