

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24760359

研究課題名(和文)都市広域対する災害避難シミュレーターの高効率化および機能拡張

研究課題名(英文)High performance computing and features enhancement of an emergency evacuation simulator for large urban area

研究代表者

Maddegadara L. (Maddegadara, Lalith)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：20426290

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：津波による大規模避難を迅速化するための様々な方策の効果を定量的に推定することを目的に、高性能計算拡張大規模避難シミュレータを開発した。本シミュレータはマルチエージェントシステムをベースに、目に見える周辺環境の動的変化を検知し、様々な行動主体の役割を模倣することができる高度なエージェントが実装されている。高分解能環境モデルも含まれており、1平方メートルごとの状態をモデル化することができる。本システムは、高性能計算拡張されている。神戸市にある理化学研究所計算科学研究機構の京コンピュータで効率的に動作するよう調整されており、長い沿岸地帯で何百万人もの人が避難する状況をシミュレートできる。

研究成果の概要(英文)：A mass evacuation simulator enhanced with high performance computing was developed with the aim of quantitatively estimating the effectiveness of various strategies to accelerate tsunami triggered mass evacuations. It is based on multi-agent system and included sophisticated agents which sense dynamic changes in their visible surrounding and mimic the roles of different people; residents, pedestrians, car users, police and volunteers. A high resolution model of the environment is included so that state of each square meter can be modelled. The system is enhanced with high performance computing to meet the computational demand of the sophisticated agents and high resolution environment. It is tuned to efficiently run in the K-computer at AICS, Kobe, so that Monte-Carlo simulations of evacuation of millions of people over long coastal stretches of several hundreds of square kilometers can be simulated.

研究分野：工学

キーワード：津波避難 自動車を使用した避難 自動車・歩行者相互作用 ハイパフォーマンスコンピューティング  
スケジューリングと優先順位付け

### 1. 研究開始当初の背景

沿岸都市、とりわけ沈み込み帯付近の都市における津波による避難を迅速化するための様々な方策を量的に推定することは、住民の安全を確保する上で不可欠である。最近の推定によれば、想定される東海・東南海・南海地震により引き起こされる津波は、人口の多い一部の沿岸都市に数十分で到達し、多数の死者が発生すると考えられている。高知をはじめとする多数の沿岸都市は、死者数を可能な限り低減するために、避難過程を迅速化する手段を真剣に模索しているところである。これは、困難な課題であり、こうした都市の避難計画担当者の重大なニーズとして、高度な避難シミュレータが挙げられる。既存の大規模避難シミュレータもある程度は有用であるが、モデルが単純すぎること、発生する避難者間の複雑な交流の大部分はモデル化できないこと、また、環境は多くの場合1次元ネットワークとしてモデル化される、などの強固な限界がある。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、上述のニーズに応えるため、マルチエージェントベースの避難シミュレーションソフトを開発することである。本ソフトの特徴としては、最大数 100 平方キロメートルまでの広域都市部の高分解能モデルを採用していること、高精細環境の細部に至るまで知覚できる高度なエージェントを採用していること、避難者・ボランティア・役人・警察官・自動車などの役割を模倣するために様々な種類のエージェントを採用していること、浸水や地震被害など環境への動的な変化を含むことができること、エージェントは複雑な意思決定を支えるための記憶モデルを持っていること、そして京コンピュータを利用するために高性能コンピューティングで拡張されていることなどが挙げられる。開発したシミュレータを用いて、いくつかの大規模避難シナリオをシミュレーションした。

### 3. 研究の方法

マルチエージェントシステム (MAS) は本開発避難シミュレータで使用されている中心的技術である。システムの詳細については下記に概説する。

#### (1) 集団避難シミュレーションのマルチエージェントシステム

環境は、高解像度のグリッドと位相的なグラフのハイブリッドとしてモデル化される (図 1)。グリッドは、現実の環境を動的な変化を入れてモデル化した高解像モデルを含んで使用される。

#### パラレル動的システムとしてのエージェントシステム

環境  $E$  において、相互に影響するエージェント  $A = \{a_i \mid i = 1, 2, \dots\}$  の組を考える。エージェントは現在状態  $s_i$  と得られる基本構成関数  $G = \{g^1, g^2, \dots\}$  のサブセットで構成される。構成関数  $g^i$ 's はエージェントに似た基本行動を定義する。

システムは、パラレル動的システムとして進化するために設計される。すなわち、エージェントの次の状態はエージェントの更新の連続に依存していない。このことは、結果が並列コンピューティングにおいて使用される多くのプロセッサやスレッドに依存しないことを確実にする。

#### エージェントのローカル更新関数: $f_i$

システムは、精密なエージェントを実行するために基礎的な基盤を用意する。もっとも使いやすいことは、構成要素関数  $g^{see}$  と  $g^{coll.av}$ 、および環境の位相的グラフである。 $g^{see}$  はレーダーのようにエージェントの見通し距離まで高解像でエージェントの周囲を走査する。これによってエージェントが周囲を正確に見ることが可能になる。現在の  $g^{see}$  は、エージェントに両眼視野を与えることさえ容易に拡張できる。 $g^{coll.av}$  はフィールド観察からの基礎的な図式とシミュレーション結果を比較することで2種類の相互作用に有効である。自立的なエージェントの個々の動き

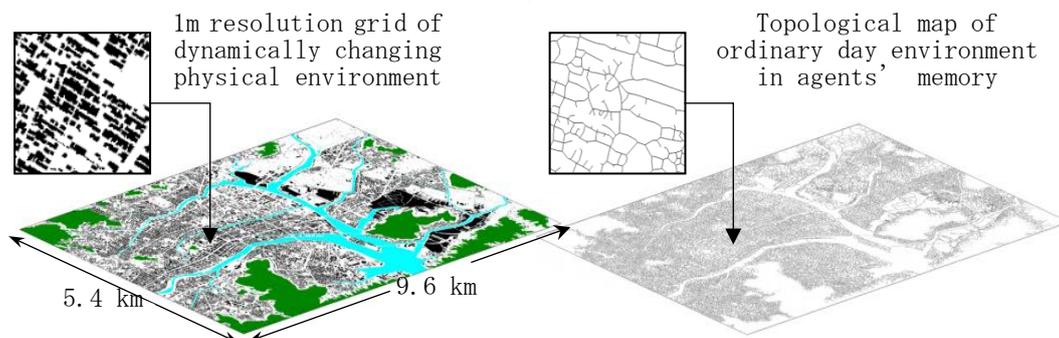


図 1 高解像グリッドと位相的グラフから成る環境のハイブリッドモデル。グリッドは環境変化に応じて動的に変化する。グラフは静的で災害前の経路ネットワークを表わす。

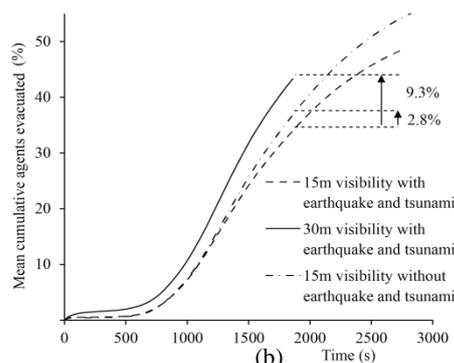
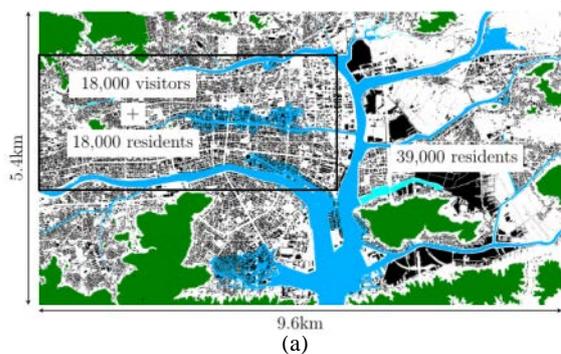


図 2 祭事の場合の検討範囲 (a) と祭事中の夜間移動において避難したエージェントの対時間数 (b)

はフィールド観察から得られる基礎的な図式を再現する。実装された専門家エージェントのタイプそれぞれのエージェント状態の特性を変えるため、 $s_i$  と構成  $f_i$  は、特殊な避難シナリオを真似るために異質なエージェントの組を作り出す。ローカルな更新関数は、主要な役目とモデル化された避難者の特性に従って定義される。

$$\{f^r\} = \{f^{resident}, f^{visitor}, f^{car}, \dots\}.$$

エージェントは  $a_i^r = \{f^r, s_i^r\}$  で定義される一方、それらは個々の  $f^r$  に従って主に分類化される。

#### (2) パラレルコンピューティング拡張

MAS は、多数の複雑なエージェントをシミュレーションするという演算負荷に耐えるため、高性能コンピューティング拡張されている。表 1 に示すように、パラレルコンピューティング拡張には、非常に卓越した拡張性がある。

表 1 エージェント 200 万の秀でた拡張性

number of CPU cores	runtime / (s)	Scalability / (%)
512	1814.318	
1024	965.242	94.0
2048	495.2311	97.5

#### 4. 研究成果

本節では、本開発システムの応用例を示すために、津波による大規模避難について行った複数のシナリオに基づくシミュレーションを紹介する。いずれの例も、細かいレベルの詳細やマルチモード避難を盛り込む必要を浮き彫りにしている。ここで検討したシナリオは、「歩行者のみ」と「歩行者と自動車」という 2 種類に大別される。シミュレーション結果の信頼性は、モンテカルロシミュレーションを用いて向上させた。

##### (1) 歩行者のみの避難シナリオ

本節では、歩行者のみの避難（徒歩による避難）に関するシナリオを示す。ここでは、環境の変化、様々な避難挙動、緩和措置を検討する。

図 2(a) に示す高知市中心部の  $9.6 \times 5.4 \text{ km}^2$  の範囲を対象とする。都市の人口に基づく属性を持つエージェント 57,000 をランダムに配置した。避難までの時間（避難者が最初の揺れから避難開始までに要する時間）を  $1000 \pm 600$  秒でランダムに想定した。

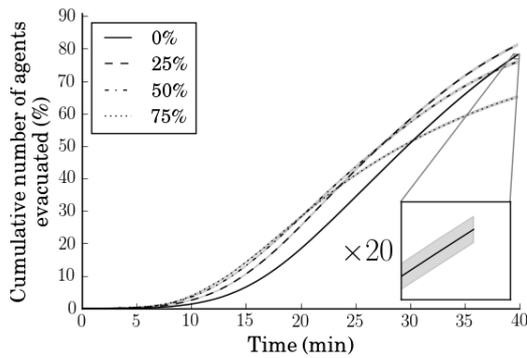
地震による被害は、構造的な地震応答解析シミュレータを用いて推定した。1995 年の兵庫県南部地震をインプットに使用した。津波による浸水を模倣するため、津波浸水シミュレーションに従いグリッドを 5 分毎に更新した。

##### (2) 祭事中の夜間の避難

このシナリオでは多数の観光客を想定した。観光客は全く土地勘がないと想定し、周りの人に追随することだけが安全な場所へ移動する唯一の手段とする。このため、観光客の生存には、周囲の可視環境を知覚する力が決定的に重要なものとなり、この知覚力には、精細な環境モデルと複雑なエージェントが必須となる。

当日は満月で、地震の被害で停電となり、津波は 15 分後に到達すると予想されていると想定した。祭事には 1 万 8 千人の観光客と 1 万 8 千人の住民が参加しており、会場は図 2(a) に示す 14 平方キロメートルに及ぶ長方形の範囲とした。加えて、全域にわたり 3 万 9 千人の住民が分散している。満月による光量は 0.2 ルクス、見通し距離は 15 メートルと想定した。また、通常の街灯と同様に 30 メートル間隔で 15 ルクスの非常照明灯を設置する緩和策を検討するために、見通し距離 30 メートルのシナリオも検討した。

図 2(b) に検討した 2 つの照明条件に基づく結果を示す。図に示すように、避難できたエージェント数は通常時に比べて、照明条件が悪い場合の方が格段に少ない。さらに、15 ルクスの照明を提供することで避難者数は大幅に増加することが伺えた。更に照明条件の影響を調べるため、月光があり地震による被害はないシナリオを追加でシミュレーションした。図 2(b) に示すように、この特定の設定においては、照明条件の影響は、地震による被害のある場合よりも格



(Only people in need car usage.)

図3 マルチモーダル避難の結果。各グラフはシミュレーション100回の平均と標準偏差を示す。

段に大きい。

### (3) 歩行者と自動車のマルチモーダルによる避難

自動車と歩行者間の相互影響を検討する能力を実証するために、自動車を利用した避難をシミュレーションした。架空の設定で、石巻市の6 km × 6.5 kmの範囲を対象とした。既往研究を元に設定した属性を持つ避難者4万人を検討した。津波到達時間は2011年の東日本大震災・大津波で観測された40分と想定した。避難開始までの時間は、900 ± 300秒とした。この地域に住む人口の多くは高齢者であるため、人口を「速い歩行者」(若者)と「遅い歩行者」(高齢者)の二群に分けた。自動車は1台につき避難者2名が乗車しているとする。避難者は最寄りの避難場所への避難を計画するものとする。

### (4) People-in-need 制約

自動車利用を選択的に行うことの効果の評価するために、自動車を必要とする避難者以外の自動車利用を制約(People-in-need 制約)する場合をシミュレーションした。自動車を必要とする避難者は、避難に最も時間がかかる避難者と定義する。図3に見られるように、この制約により総避難者数は元となるシナリオより約7%向上した。

### (5) 避難シミュレータの共有

今回開発したコードは、香川大学、徳島大学、中央大学の研究者と共有している。この大規模避難シミュレータは今後、東京大学地震研究所巨大地震津波災害予測研究センター開発の統合地震シミュレーション(IES)プラットフォームに組み込まれることになっている。

## 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] (10)

- (1) L. Aguilar, M. Wijerathne, M. Hori and T. Ichimura, On a mass evacuation simulator with complex autonomous agents and applications, Journal of Earthquake and Tsunami (in press) (査読有)
- (2) L. Aguilar, L. Wijerathne, M. Hori, T. Ichimura and S. Tanaka, Mixed mode large urban area tsunami evacuation considering car-pedestrian interactions, J. of JSCE, Ser. A2, Vol 71-2, pp I\_633-I\_641, 2015 (査読有)
- (3) L. Aguilar, Maddegedara L., M. Hori, T. Ichimura, and S. Tanaka, A scalable workbench for large urban area simulations, comprised of resources for behavioral models, interactions and dynamic environments, Lecture Notes in Computer Science, Principles and Practice of Multi-Agent Systems, Vol. 8861, pp 166-181, 2014. (査読有)
- (4) S. Jacob, L. Aguilar, L. Wijerathne, M. Hori, T. Ichimura and S. Tanaka, Agent Based Modeling and Simulation of Tsunami Triggered Mass Evacuation Considering Changes of Environment Due to Earthquake and Inundation, J. of JSCE, Ser. A2, Vol 70-2, pp 671-680, 2014. (査読有)
- (5) L. Enrique Aguilar Melgar, Wijerathne Maddegedara L., M. Hori, T. Ichimura and S. Tanaka, On the Development of an MAS Based Evacuation Simulation System: Autonomous Navigation & Collision Avoidance, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 8291, 2013, pp 388-395. (査読有)
- (6) Maddegedara L., L. A. Melgar, M. Hori, T. Ichimura, S. Tanaka, On the development of multi agent system for large urban area evacuation with autonomous navigation, J. of JSCE, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM)), Vol. 69, No. 2, I\_447-I\_456, 2013. (査読有)
- (7) M.L.L. Wijerathne, L.A. Melgar, M. Hori, T. Ichimura, S. Tanaka, HPC Enhanced Large Urban Area Evacuation Simulations with Vision based Autonomously Navigating Multi Agents, Procedia Computer Science, Vol. 18, 2013, pp 1515-1524. (査読有)
- (8) Maddegedara L., Hori M. and Ichimura T., Parallel scalability enhancements of seismic response and evacuation simulations of Integrated Earthquake Simulator, Lecture Notes in Computer

Science, Vol. 7851, 2013, pp 105-117.  
(査読有)

- (9) Maddegedara L., Hori M. and Ichimura T., Parallel scalability enhancements of seismic response and evacuation simulations of Integrated Earthquake Simulator, Lecture Notes in Computer Science, vol 7851, 2013, pp 105-117.  
(査読有)
- (10) R. Dulam, Maddegedara L., M. Hori, T. Ichimura and S. Tanaka, Development of HPC enhanced multi agent code for tsunami evacuation, Journal of Applied Mechanics JSCE, 15, 2012, pp513-521. (査読有)

[学会発表] (9)

- (1) L. Wijerathne, Stephen Jacob, L. Aguilar, M. Hori, T. Ichimura, S. Tanaka, Agent Based Large Urban Area Evacuation Simulation, Considering Earthquake Disaster and Tsunami Inundation, 3<sup>rd</sup> International Conference on Evacuation Modeling and Management, Cheng Kung Univ., Tainan, Taiwan, June 1 - 3, 2015.
- (2) Stephen Jacob, L. Aguilar, L. Wijerathne, M. Hori, T. Ichimura and S. Tanaka, Agent Based Modeling and Simulation of Tsunami Triggered Mass Evacuation Considering Changes of Environment Due to Earthquake and Inundation, Symposium on Applied Mechanics JSCE, Univ. of Ryukyus, Naha, Okinawa, 10-11 May, 2014.
- (3) L. Wijerathne, S. Jacob, L. Aguilar, M. Hori, T. Ichimura, S. Tanaka, Agent Based Large Urban Area Evacuation Simulation, Considering Earthquake Disaster and Tsunami Inundation, 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, Sendai International Center, Sendai, Miyagi, 13-16 April, 2014,
- (4) L. Wijerathne, Jacob S., L. Aguilar, M. Hori, Toshitaka Baba, Simulation of Tsunami Triggered Large Urban Area Evacuation Considering Earthquake Damages, Annual meeting of Asia Oceania Geosciences Society, Royton Hotel, Sapporo, Hokkaido, 28 July to 01 August, 2014.
- (5) L. Aguilar, Wijerathne L., M. Hori, T. Ichimura and S. Tanaka, On the Development of an MAS Based Evacuation Simulation System: Autonomous Navigation & Collision Avoidance, Principals and Practice of Multi-Agent

Systems, Univ. of Otago, Dunedin, New Zealand, December 1-6, 2013

- (6) Maddegedara L., L. and, A. Melgar, and M. Hori, On the enhancements of agents' navigation skills of a multi agent systems based mass evacuation analysis, 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo, March 1-2, 2013
- (7) M.L.L. Wijerathne, L.A. Melgar, M. Hori, T. Ichimura, S. Tanaka, HPC Enhanced Large Urban Area Evacuation Simulations with Vision based Autonomously Navigating Multi Agents, International Conference on Computational Sciences, Center Conventions International, Barcelona, Spain, 5-7 June 2013
- (8) Maddegedara L., L. and, A. Melgar, and M. Hori On the enhancements of agents' navigation skills of a multi agent systems based mass evacuation analysis, 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo, March 1-2, 2013.
- (9) Maddegedara Lalith, Hori Muneo, Ichimura Tsuyoshi, Parallel scalability enhancements of seismic response and evacuation simulation of IES, Proceedings of the 10<sup>th</sup> international meeting on high performance computing for computational science AICS, Kobe, Hyogo, July 17-20, 2012.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

マッデゲダラ ラリット

( Maddegedara L. )

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号: 20426290

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし