

## 歩行者シミュレータ NetMAS を用いた網羅的分析

岡田 崇<sup>†1,†2</sup> 山下 倫央<sup>†1,†2</sup> 野田 五十樹<sup>†1</sup>

近年、実世界情報の計測や状況の認識、知識の蓄積を可能とする研究が進み、これらを元に社会システムにおけるボトルネックの発見や妥当性を検証する社会シミュレーションに対するニーズが高まっている。本研究では、シミュレーションを特定のルールに基づき網羅的に分析する機構とそれをを用いたシミュレーション例として花火大会における一方通行規制の効果について検証する。多数の歩行者を効率的に誘導し、また群衆事故を引き起こさない様な交通計画を歩行者シミュレータ NetMAS を用いて解析し、最も混雑の少ない交通計画を得ることができた。

### Comprehensive Analysis using Pedestrian Simulator: NetMAS

TAKASHI OKADA<sup>†1,†2</sup> TOMOHISA YAMASHITA<sup>†1,†2</sup>  
and ITSUKI NODA<sup>†1</sup>

In this paper, we propose a structure of comprehensive analysis depending on rules, and verify effects of a one-way traffic control as an example of a simulation using the structure. On a large-scale event such as Japanese fireworks display, we simulate thousands of pedestrians and its navigation using pedestrian simulator: NetMAS. Finally, we could find a least crowded traffic control as the result.

#### 1. はじめに

近年、人、もの、場所に関する様々な情報が情報機器を介し情報システムに利用、蓄積さ

†1 独立行政法人 産業技術総合研究所 サービス工学研究センター

Center for Service Research (CfSR), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

†2 科学技術振興機構 さきがけ

Japan Science and Technology Agency (JST), Precursory Research for Embryonic Science and Technology (PRESTO)

れるようになってきた。これによりこれまで未知であった社会現象が情報化され、社会システムにより観測可能となり、新たな転機を迎えつつある。社会シミュレーションは、このような社会現象を解明する解決手法の一つであり、複雑な社会システムをモデル化し、大量なデータを入力とした再現実験や、実証実験では得る事の困難なシミュレーションが可能である。

大規模な人が参加するイベントにおける混雑を解消する交通計画、誘導計画は、混雑のみならず、それにより引き起こされる群衆事故を回避する非常に重要な課題である。近年の明石花火大会歩道橋事故などの大規模な群衆事故の再発を防ぐため、このようなイベントでは事前に十分な検討が必要であるが、多数の人が参加するイベントでは何時どの程度の人数がどの場所にどのように集結するか明確な数値が分かっておらず、また偶発的に起こるイベントに対しどのような計画が適切であるかを検討することは非常に難しい問題である。このような場合、シミュレーションによりイベントの混雑状況を再現し様々な検証を行なうことは有効な手段である。

しかし、流体力学などのモデルを用いたシミュレーションでは、上記の不明な人の流れや、偶発的に起こるイベントに対し一般的な知見を得るためには非常に長い計算時間が必要となる。またこのような混雑を引き起こす要因が複数ある場合、検証しなければならないパターンは爆発的に増えるため、多種のパターンに対し効率的にシミュレーションを実行する必要がある。

このような問題に対し、本研究では歩行者シミュレータ NetMAS を用いて、河川周辺の典型的地図上において、ルールに基づき交通計画を網羅的に検証し、最も混雑の少ない交通計画を導く網羅的シミュレーションとその結果を検討する。

イベントとして、河川周辺で開催される花火大会を想定し、グリッド状の地図上に駅を配置し約2000人の歩行者が駅、花火の観賞ポイント、橋を移動する様子をシミュレートした。河川周辺には2本または4本の橋があると仮定し、交通規制の例として橋に一方通行規制を敷き、混雑の少ない交通計画の傾向と混雑が発生する交通計画の傾向について調べた。

#### 2. 網羅的分析

##### 2.1 網羅的分析の制御機構

シミュレーションを用いてある事象を再現、検証する際、そのシミュレーションモデルに対し単一のパターンのみを実行することは稀であり、多くの場合パターンを変化させ、それらのパターンに対し比較評価を行なう。特に、このパターンに対しシミュレーションモデル

が持つ一般的性質を調べるためには、シミュレーションを網羅的に実行し、そのパターンと実行結果の組み合わせを解析することが必要である。

このような網羅的な分析を実行するため、本研究では歩行者シミュレーションにおいて網羅的シミュレーションを実現するシミュレーション制御機構を開発した。本節では、シミュレーション制御機構と、スナップショット機能の概要について述べる。網羅的分析を実現する最も簡潔な手法は、あるパターンに対し逐次シミュレーションを実行する方法である。

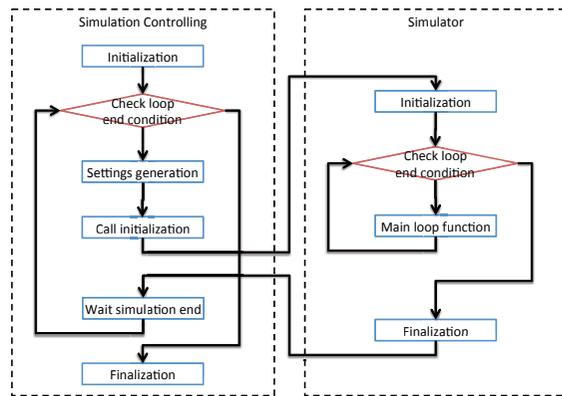


図1 シミュレーションの網羅的执行

図1に示す様に、図左側の破線で囲まれた制御機構はパターンごとの設定を生成し、図右側の破線で囲まれたシミュレーションを実行する。シミュレーションが終了すると、制御機構はログを回収し、次のパターンのシミュレーションを実行し、逐次全てのパターンに対しシミュレーションを実行する。

## 2.2 スナップショットを利用したシミュレーション

パターンごとのシミュレーションが分割可能つまり並列化が可能であり、分割した処理単位が頻繁に通信しない場合、並列化することにより計算時間を短縮することができる。更に、このようなシミュレーションはパターンのみが異なり、モデル自体は同一のシミュレーションであるため、実行時も例えばパターンにより指定されたあるイベントが起こるまで全く同一の計算が行なわれる事も少なくない。このような場合、同一の計算が行なわれる時点

までのシミュレーションのスナップショットを撮ることにより、計算時間を短縮することができる。

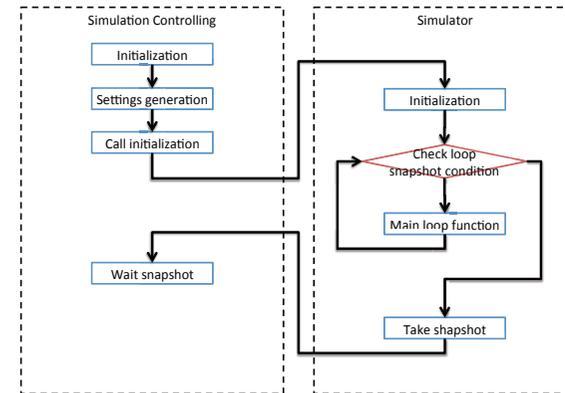


図2 シミュレーションスナップショット

図2の様に、分析対象であるシミュレーションモデルのスナップショットを撮り、図3に示す様に、分散環境においてスナップショットからシミュレーションを再開し、パターンごとの設定を適用することにより、初期化時から分岐部分までの計算時間を短縮した実行が可能である。

またシミュレーションの実行者の、シミュレーションが使用している計算資源を一時的に解放し再度シミュレーションを再開したい様なニーズに対して、またシミュレーションが予期せぬ要因により停止した際などの耐障害の観点から定期的にスナップショットを撮る事によりこれらを解決できる。

更にシミュレーション間で情報共有の支援を行なうI/Oハンドラを開発し、ファイル、パイプ、ネットワークを介した通信を簡略化した。図3の例では、Simulation Controlling コンポーネント(以下CC)と各 Simulator コンポーネント(以下SC)がI/Oハンドラを持ち、CCからSCへスナップショットと設定ファイルを転送し、SCからCCへ実験結果を転送する。

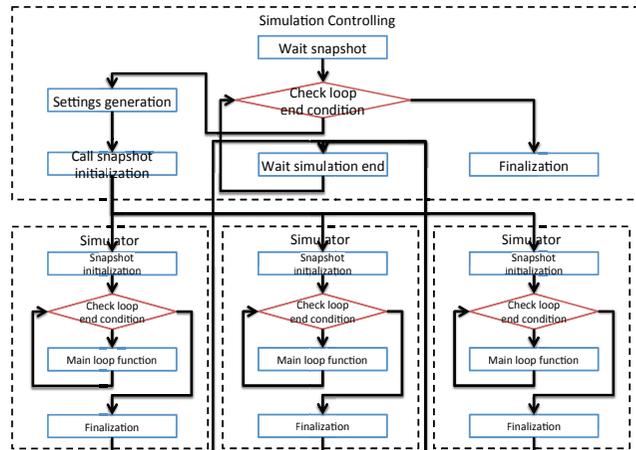


図3 分散環境における網羅的シミュレーション

### 3. シミュレーション実験

本節では、具体例として実施した河川周辺の花火大会を想定したイベントのシミュレーションについて、利用した歩行者モデル、地図、想定シナリオと結果について述べる。

#### 3.1 歩行者シミュレータ NetMAS

歩行者シミュレータ NetMAS<sup>(8)(10)(7)(9)</sup> は、高速な計算が可能な次元歩行者モデルを実装した歩行者シミュレータである。

既存の歩行者シミュレータ<sup>1)</sup>も多数開発されているが、それらの多くは歩行者が移動する空間モデルとして二次元連続空間上を歩行者が移動する二次元連続空間モデル<sup>(6)(5)(2)(3)(4)</sup>、または空間をグリッド状に分割したセル上を歩行者が移動するセルオートマトンモデル<sup>(11)(12)(13)</sup>を採用している。これらのモデルに対し次元歩行者モデルでは、歩行者の移動可能範囲が長さを持つリンクとして表現され、移動速度は直前の歩行者との距離により決定するため、計算量を削減することができる。

NetMAS の次元歩行者モデルに対し、本実験では対向流の再現が必要となるため、空間モデルは NetMAS 従来のモデルを採用し、歩行者の速度計算については岡田ら<sup>14)</sup>のモデルより、一方通行時(1)、対向流時(2)の歩行速度  $v(m/s)$  を、密度  $\rho(人/m^2)$  を用いて、

$$v = 1.2 - 0.25\rho \quad (1)$$

$$v = 1.25 - 0.476\rho \quad (2)$$

とした。

歩行者の経路探索は最短経路をダイクストラ法により解き決定し、距離が同一の経路がある場合、その中からランダムに経路を選択する。

#### 3.2 シミュレーション地図

本シミュレーションでは、河川周辺に数本の橋があり、その近辺で多数の人が集まり、行き来する様子をシミュレートする。このような場合、橋周辺における混雑がボトルネックとなり群衆事故など大きな事故へ発展する事が多い。このような事故の発生を未然に防ぐため、事前に来客数を想定しシミュレーションを用いた予測が行なわれる。

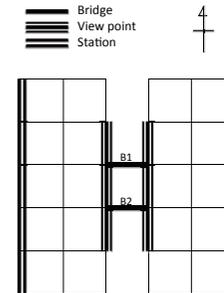


図4 グリッド状地図：2つの橋

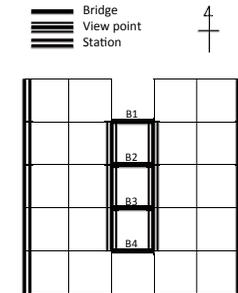


図5 グリッド状地図：4つの橋

本シミュレーションでは、河川周辺で開催される花火大会を想定し、図4、5に示す様な河川、道路、駅、橋、観賞ポイントにより構成される地図を作成し、シミュレーションを行なった。地図はグリッド状の直線で表される道路により構成されており、中心部に2本(B1, B2)ないし4本(B1, B2, B3, B4)の太線で表される橋が架かっている。また地図上の左端及び右端の道は二重線で表される駅と隣接しており、逐次歩行者が地図上に現れる。歩行者は移動経路は地図上の中心の三重線で示されている観賞ポイントを目指し、観測ポイントにおいて花火を観賞した後再び駅を目指し移動する。マップ中の道路は長さ100m、(歩行者が通行する)幅を2mと設定した。

### 3.3 シミュレーションパターン

本シミュレーションでは、河川上の橋が交通のボトルネックとなることが予想されるため、橋に対し一方通行の交通規制を適用し、どのような規制を実施すると最も混雑が解消されるかを調べる。一方通行の規制は、規制なし、一方通行（図の西から東）、一方通行（図の東から西）の3パターンをそれぞれの橋に適用する。全ての橋に対し同様の一方通行の規制を適用すると左側のグリッドから右側のグリッドへの移動手段が無くなるため、橋の本数を  $n$  とすると、パターン数は  $3^n - 2$  で表される。

本実験では、橋が2本の場合の7パターン、4本の場合の79パターンに対しそれぞれ網羅的シミュレーションを実行した。

また歩行者については、1分おきに西側、東側の駅からそれぞれ50人の歩行者が発生するシナリオを設定し、20分間シミュレーションを実行した。

### 3.4 シミュレーション結果

上記の地図、シミュレーションシナリオに従いシミュレーションを実行し、パターンごとにシミュレーション時間内に目的地へ到達した歩行者の数、歩行者周辺の密度 [人 ( $/m^2$ )] が閾値を超えた歩行者の数、異なる閾値ごとの歩行者周辺の密度が閾値を超えた歩行者の数について調べた。閾値は、対向流状態において歩行者の歩行速度が  $0[m/s]$  となる 2.51 を設定した。また異なる閾値として 2.51, 3.0, 4.0, 5.0 を設定した。

図6, 7に、シミュレーション時間内に目的地へ到達した歩行者の数を示す。図のキャプションは Simulation に続きシミュレーションインデックス、2または4本の橋の交通規制の種別となる。交通規制の種別は、X: 交通規制無し、W: 西向き一方通行、E: 東向き一方通行となる。また交通規制の並びは左から図4, 5のB1, B2... と対応する。図では最も目的地へ到達した歩行者の多い上位3つのシミュレーション結果（図7ではSimulation 29, 2, 51）、少ない下位3つのシミュレーション結果（同様にSimulation 73, 63, 77）と規制をかけないシミュレーション結果（同様にSimulation 0）を表している。図の横軸はシミュレーション時間（秒）、縦軸は目的地へ到達した歩行者の数を表す。橋が2本の図では歩行者が目的地へ到達した数が著しく少ない規制は、B1に対し規制無し、B2に対し西向きまたは東向きに規制をかけた場合であった。一方橋が4本の場合橋が2本の場合と比べ西側のグリッドと東側のグリッド間の通路が2倍になった影響で目的地へ到達した歩行者の数が多し。ベストシナリオとワーストシナリオを比較しても、その差は200程度であった。

次に図8, 9に、歩行者周辺の密度が閾値を超えた歩行者数を示す。図の横軸はシミュレーション時間（秒）、縦軸は歩行者数を表す。この図でも、閾値を超えた歩行者数が多かつ

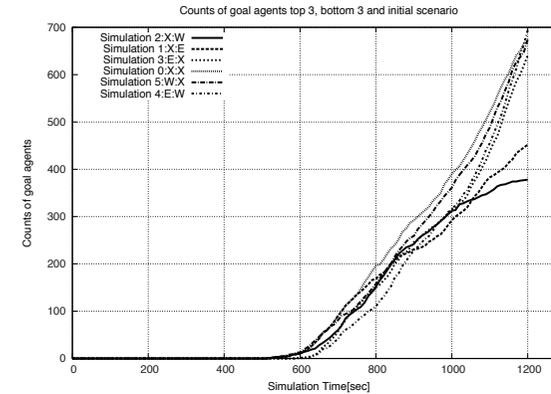


図6 橋が2本：目的地へ到達した歩行者数

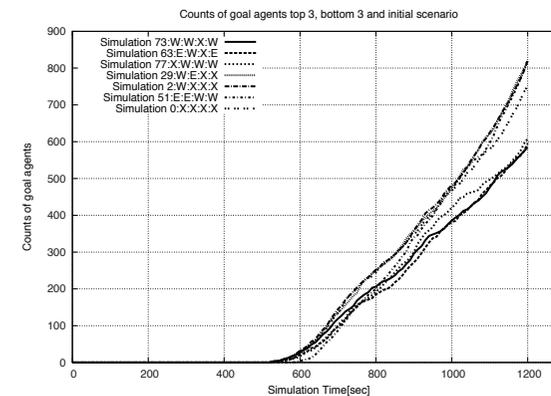


図7 橋が4本：目的地へ到達した歩行者数

た上位3つのシミュレーション、下位3つのシミュレーションと規制をかけないシミュレーションについて図示する。図より橋が2本の場合最も歩行者周辺の密度が閾値を超えた歩行者数が多い規制は、B2のみにに対し規制をかけた場合であった。これは最も混雑が発生した

ことを意味する。一方最も混雑が発生しなかった規制は、B1, B2 に逆向きに規制をかけたインデックス 4, 6 のシミュレーションと B1 のみに西向き規制をかけた 5 の場合であった。橋が 4 本の場合、歩行者周辺の密度が閾値を超えないシミュレーション結果が多く見られた。

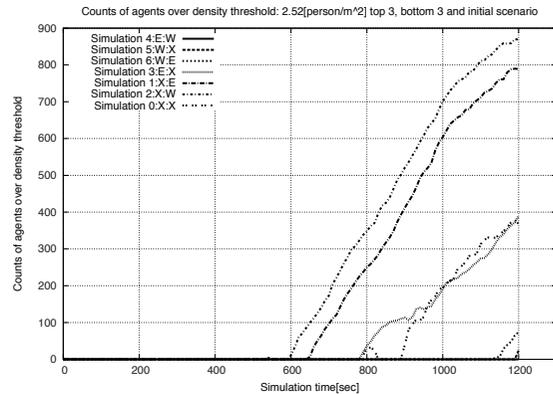


図 8 橋が 2 本：歩行者周辺の密度が閾値を超えた歩行者数

図 10 に、異なる閾値 (2.51, 3.0, 4.0, 5.0 [人 /m<sup>2</sup>]) ごとの歩行者周辺の密度が閾値を超えた歩行者数を示す。図の横軸は閾値、縦軸は歩行者数を表す。この図では上記の図 8 をより詳細化した図である。橋が 2 本の図において、シミュレーションインデックス Simulation 1, 2, 3 では 1000 人を超える歩行者が重度の混雑にあっており、規制として不適切だと分かる。直感的に適切に思える規制 Simulation 6 でも 300 人を超える混雑が発生している。また橋が 4 本の場合でも、ワーストシナリオにおいては 1000 人を超える重度の混雑が発生している。

### 3.5 実験結果に関する考察

橋が 2 本の場合、4 本の場合のシミュレーション結果から、全く規制をしない場合、適切な規制を行なった場合よりも混雑するが、不適切な規制を敷く場合より混雑は少ない。また長さ 100 m、幅 2 m の橋 2 本の観賞地点に 2000 人規模の歩行者が集結する場合、適切な規制を敷いても場合により混雑が発生するが、橋 4 本の場合は規制によりほぼ滞り無く

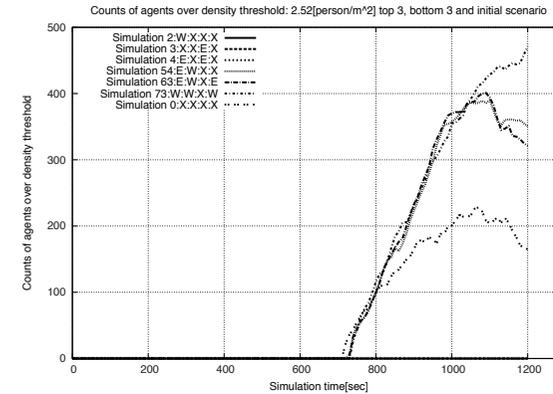


図 9 橋が 4 本：歩行者周辺の密度が閾値を超えた歩行者数

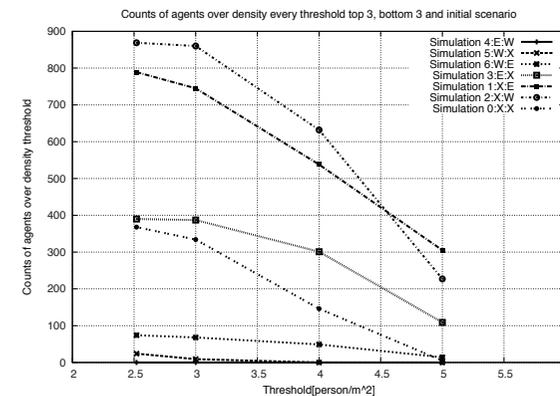


図 10 橋が 2 本：異なる閾値ごとの歩行者周辺の密度が閾値を超えた歩行者数

歩行者を誘導できることが分かった。

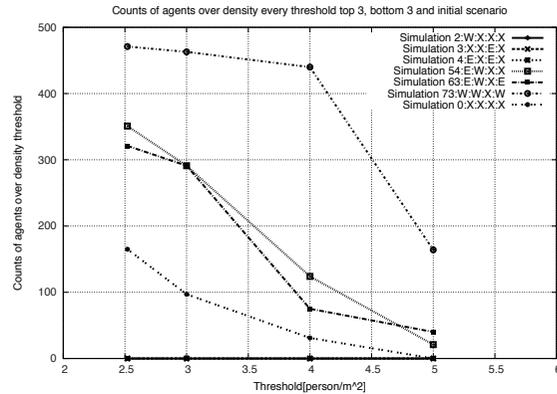


図 11 橋が4本：異なる閾値ごとの歩行者周辺の密度が閾値を超えた歩行者数

#### 4. む す び

本論文では、シミュレーションを網羅的に分析する機構と花火大会を想定したマップにおける一方通行規制の効果について検討した。網羅的な分析では、制御機構とスナップショット機能を用いて分散環境上において計算時間の短縮が期待できる。本シミュレーション実験では、橋に対する一方通行規制を網羅的に分析したが、このルール条件を変更することで様々な問題の分析に適用できる。例えば、隅田川花火大会のような100万人規模の参加者が集まるようなイベントにおいて、適切な一方通行規制の検討や、隅田川近辺の各駅における乗降客の分布を変更しながら混雑が発生する場所を検討する事も可能である。

またシミュレーション対象に関しても、これまで進めて来たスマートシティのシミュレーション<sup>15)</sup>に適用する事も可能であり、今後より大規模なスケールでの社会シミュレーションを実施する予定である。

**謝辞** 本研究は、JST 戦略的創造研究推進事業さきがけの一環として行われたものである。

#### 参 考 文 献

1) 池島由華: シミュレーションベンチマークの結果, 日本火災学会避難シミュレーションモデルの現状とこれからのに関するシンポジウム予稿集, pp.38-55(2010).

2) 杉本太一, 目黒公郎: 楕円形個別要素法を用いた避難行動解析に関する基礎的研究, 土木学会地震工学論文集, 第 27 号, pp.1-4(2003).

3) 劉建宏, 大枝良直, 角知憲: パーソナルスペースを用いた障害物を回避する歩行者の群集流動, 土木学会論文集 D, Vol.64, No.4, pp.513-524(2008).

4) Helbing, D., and Molnar., P.: Social Force Model for Pedestrian Dynamics, Physical Review E51:4282-4287(1995).

5) 木村謙, 佐野有紀, 林田和人, 竹市尚広, 峯岸良和, 吉田克之, 渡辺仁史: マルチエージェントモデルによる群衆歩行性状の表現, 日本建築学会計画系論文集, Vol.74, No.636, pp.371-377(2009).

6) 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, pp.80-89(2008).

7) 山下倫央, 副田俊介, 大西正輝, 依田育士, 野田五十樹: センサデータマイニングを活用した安全安心な避難誘導への取り組み, 電子情報通信学会誌, Vol.94, No.4, pp.188-190(2011).

8) 山下倫央, 大西正輝, 副田俊介, 野田五十樹: 避難シミュレータを利用した避難誘導計画の検証及び立案支援の提案, 情報処理学会研究報告, IPSJ SIG Technical Report, pp.1234-1239(2009).

9) 副田俊介, 山下倫央, 大西正輝, 依田育士, 野田五十樹: 一次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータの開発, 情報処理学会研究報告.MPS, 数理モデル化と問題解決研究報告, pp.1-6(2010).

10) Yamashita, T., Soeda, S. and Noda, I.: Evacuation Planning Assist System with Network Model-Based Pedestrian Simulator, *Principles of Practice in Multi-Agent Systems*, Lecture Notes in Computer Science, Vol.5925, Springer-Verlag(2010).

11) 大鑄史男, 小野木基裕: セルオートマトン法による避難流動のシミュレーション, 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, 51 巻 pp.94-111(2008).

12) 森下信, 中塚直希: セルオートマトンによる緊急避難時の群衆流解析, 機械力学・計測制御講演論文集: D & D, pp.308(2002).

13) Nishinari, N., Kirchner, A. Namazi, A. and Schadschneider, A.: Simulations of evacuation by an Extended Floor Field CA model, Proceeding of Traffic and Granular Flow '03, pp.405-410(2003).

14) 岡田光正: 建築と都市の人間工学, pp.37, 鹿島出版会 (1977).

15) 岡田崇, 牧野義樹, キムジュンスー, 中田潤也, 丹康雄: 住宅におけるエネルギーマネジメントの効果を検証する実証的ホームシミュレータの提案と実装, 情報処理学会論文誌, Vol.53, No.1, pp.365-378(2012).