

# 人の流れの計測とシミュレーションによる避難誘導方法の伝承 — 新国立劇場における避難体験オペラコンサートを例に —

## Transmission of Knowledge for Evacuation Drill using Pedestrian Tracking and Simulation — Example of Opera Concert with Evacuation Drill in New National Theatre, Tokyo —

大西 正輝<sup>1\*</sup> 山下 倫央<sup>1</sup> 星川 哲也<sup>2</sup> 佐藤 和人<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所 人間情報研究部門

<sup>2</sup> 新国立劇場運営財団

**Abstract:** Facility managers are required to perform an evacuation drill by Japanese law. However, it is difficult to perform the evacuation drill by many people. It is important to transmit the knowledge extracted from the evacuation drill definitely. In this paper we propose a transmission method of a knowledge for evacuation drill using pedestrian tracking and simulation. In the real experiment of the large-scale evacuation drill, the evacuated pedestrian flow was measured by this pedestrian tracking and evacuation time was analyzed by this simulation.

### 1 はじめに

消防法において施設の管理者は消防計画を作成し、定期的に消防訓練を行わなければならないことが規定されている。消防訓練とは消火訓練、避難訓練、通報訓練を指し、法令で定められていることから毎年、多くの施設では訓練が実施されている。例えば、総務省消防庁による避難訓練マニュアルでは火災発生時に火災発生場所を確認し、館内に通知した後、非常口や避難階段から避難誘導を行い、避難確認を行うまでの手順が示されている。しかし、日常業務の忙しさから多くの避難訓練はいわば「やりっぱなし」になっていることが多く、訓練から知見を抽出する作業や得られた知見を後々に効果的に引き継ぐ作業が十分に行われていたとは言い難い。特に大規模な施設においては大人数の人員を動員しての避難訓練は容易ではない。そこで大規模な避難訓練を行う場合にはそこで得られた知見や知識を手軽に伝承するための技術の出現が期待されている。

不特定多数の人が出入りするような大規模空間における避難訓練から得られた知識や知見を正しく伝承するためには、避難訓練中の人の流れを正しく理解する技術 [1, 2, 3] が必要である。また、避難人数や避難経路などの条件を変えて何度も避難訓練を行うのは現実

的ではないことから、条件を変えた場合にどこで混雑が発生するかや避難時間がどのように変化するかをシミュレーションによって予測する技術 [4, 5, 6] が必要である。

筆者らはこれまでに北九州芸術劇場（2009年）と新国立劇場（2014年）において大規模な避難訓練を行い、その避難動線を計測すると共に、様々な条件における避難の様子をシミュレーションすることによってその後の避難誘導計画などに反映させるための研究を行ってきた。

本稿では、混雑した環境において人の流れを計測する技術とシミュレーションする技術について説明した後、2014年に新国立劇場で行った1300人規模の避難体験オペラコンサートについて説明し、これらの技術で解析することによって得られた知見を明らかにする。ここで得られた知見は新国立劇場だけではなく、他の大規模施設においても有用な知見であると考えられる。

### 2 人の流れの計測手法

ここでは、人の流れの計測手法 [2, 3] について簡単に説明する。人を計測するデバイスとしては RGB の色情報と深度 (Depth) 情報が同時に取得できる RGB-D カメラを用いる。RGB-D カメラの代表的なものとしてステレオカメラや Microsoft 社製 Kinect などがあげられる。Kinect は赤外パターンを投影するアクティブ

\*連絡先：産業技術総合研究所 人間情報研究部門  
〒305-8560 つくば市梅園 1-1-1 中央第1  
E-mail: onishi@ni.aist.go.jp



図 1: RGB-D カメラと小型 PC

ステレオ法によって深度画像を得ることができるカメラであり、室内空間においては高精度な三次元情報を得ることができる。本研究では Kinect と同じ原理である Xtion を用いて人の流れを計測する。図 1 に Xtion と得られたデータを処理する小型 PC を示す。Xtion は最大 8~10 [m] 程度の距離まで計測できることや電源が USB 供給であり配線が簡素であることなどから避難訓練の計測のような一時的な実証実験の場での利用に適している。

Xtion はおよそ 30 [フレーム/秒] で RGB-D 画像を取得可能であり、深度画像から 3 次元点群を復元することができる。復元した 3 次元点群から床平面を抽出した後、背景点を除去し、残った点群を二段階のファジークラスタリングをすることによって人の位置が計測可能である。本手法は深度画像を用いることで 2 次元画像からは抽出の難しいような混雑した環境においても正しく人の 3 次元位置を計測することができ、過去の人の位置を初期値として繰り返し演算に利用することで、連続した人の流れの抽出が可能である。これまでのステレオカメラを用いた実験では 0.56 [人/m<sup>2</sup>] 程度の混雑した環境においても 98.5 % 程度の精度で人の流れが抽出できており Xtion を用いた場合にはさらに高精度での抽出が可能であると期待できる。

### 3 人の流れのシミュレーション手法

次に、人の流れのシミュレーション手法 [5, 6] について簡単に説明する。人の流れのシミュレーションには主に避難行動を想定して作成したマルチエージェントシミュレータ CrowdWalk を用いる。CrowdWalk は一人ひとりのエージェント（人）に対して避難経路を設定することによって 1 ステップ毎の全体の避難状況をコンピュータで再現することができる。

CrowdWalk の特徴は避難経路を一次元で表現し、前方の人までの距離によって各エージェントの速度・加速度を決定することで処理を簡素化し、高速実行が可能な点であり、数千から数万、数十万の人の流れをシミュレーションすることができる。本シミュレータは

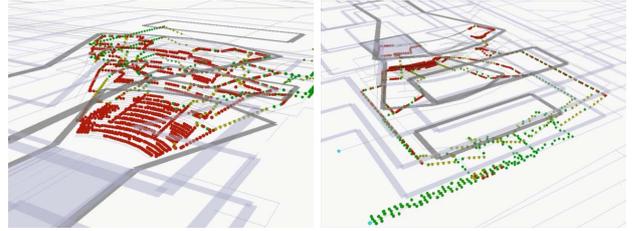


図 2: CrowdWalk によるシミュレーション例

北九州芸術劇場での 570 人の避難訓練を 5% 程度の誤差で再現することができている [7]。

図 2 に新国立劇場のオペラ劇場におけるシミュレーション結果を示す。小さな丸は一人ひとりのエージェント（人）を表しており、通常の場合は緑色、混雑して移動速度が減少している場合には黄色、ほとんど動けない場合には赤色で表現している。左図は避難が開始され始めた段階であり、右図は左下に位置する避難場所に一部の人がたどり着いた段階である。

## 4 実証実験

### 4.1 避難体験オペラコンサート

2014 年 8 月 31 日に新国立劇場で避難体験オペラコンサートを開催した。本コンサートはオペラ鑑賞中に地震を原因とした火災が発生し、舞台責任者によって公演の中止が決定され、誘導員による誘導が行われるという想定でシナリオが進行する。観客は避難体験後に再開されるオペラを鑑賞することができる。なお、予め趣旨を伝えた上で体験希望者を募集した。地震が発生するタイミングについては教えていない。本コンサートの観客はおよそ 1300 人であり、劇場内の主要経路に 41 台の Xtion を設置し、避難の人の流れの様子を記録した。図 3 に地震が発生した直後のオペラ劇場の様子を示す。



図 3: 避難体験オペラコンサートでの地震直後の様子



図 4: RGB-D カメラによる人の流れの計測結果

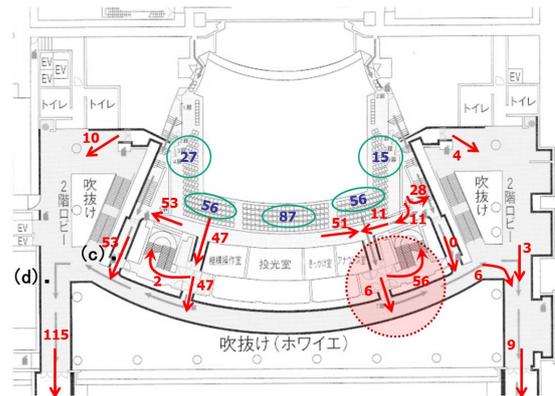
## 4.2 計測とシミュレーションの評価

図 4 に 41 台の RGB-D カメラによって抽出した人の流れの代表的な例を示す。また、フロアマップに通過人数を重畳した例を図 5 に示す。フロアマップの (a) ~ (f) は図 4 の (a) ~ (f) の映像が得られたカメラ設置位置に対応している。

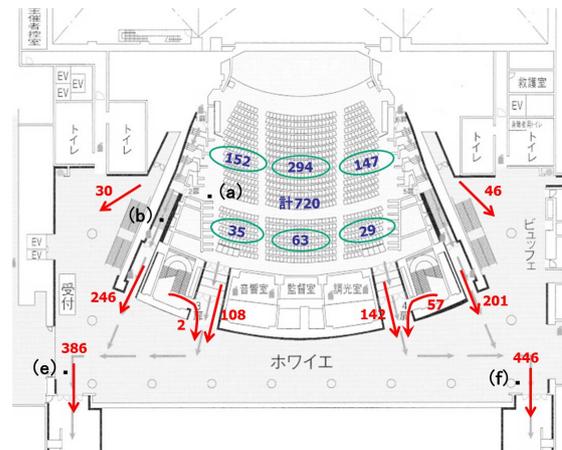
最も激しい混雑が発生した 1 階の出口 1 と出口 2 以外の計測場所の中から 100 人以上の人が通過した経路において本システムが計測した通過人数を目視によって評価した。表 1 に結果を示す。計測値と目視はそれぞれの方法で数えた通過人数を示しており、誤差は % で示している。平均誤差は 1.436% であった。なお、激しく混雑している出口 1 と出口 2 の評価については 4.3.1 で後述する。

表 1: 避難人数の計測結果と目視による評価

計測階	3F	3F	2F	2F	1F	1F	1F	1F
計測値	152	150	113	241	199	248	139	201
目視	158	150	115	246	201	246	142	201
誤差%	3.8	0	1.7	2.0	0.1	0.8	2.1	0



(a) 劇場 2 階の人の流れ



(b) 劇場 1 階の人の流れ

図 5: 新国立劇場にて観測された人の流れ

次に、シミュレーション結果について評価する。出口 1 と出口 2 にはそれぞれ 4 枚ずつ合計 8 枚の扉があり、例えば図 4 (e), (f) では共に 2 枚の扉が開放されている状態である。実際の避難訓練中にはこれらの扉の開放状態が時々刻々と変化するためシミュレーションでその様子を厳密に再現するのは難しい。

そこで、実際の避難訓練と人数や避難経路は同じ条件に設定し、最初から最後まで 1 枚の扉しか開かなかった場合と 4 枚の扉全てが開いていた場合をシミュレーションした。シミュレーションの結果を図 6 に示す。横軸が時間、縦軸が扉から出た人の合計人数（避難完了人数）を表している。最初の人々の避難が完了してから最後の人の避難が完了するまでの時間は 4 枚全ての扉が開いていた場合には 194 秒、1 枚しか扉が開いていなかった場合には 509 秒かかっており、2 倍以上の時間が必要であることが分かった。実際に計測した避難訓練では 238 秒でありシミュレーション結果の扉 4 枚の場合と扉 1 枚の場合の間に収まっていることからシミュレーション結果は妥当であると考えられる。

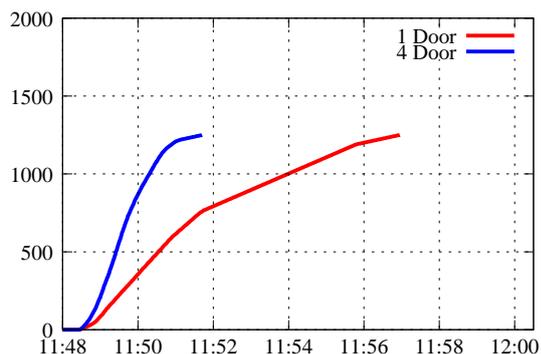


図 6: 扉の開放枚数が異なる場合のシミュレーション

### 4.3 実証実験の分析によって得られた知見

実証実験によって扉の開き方が避難に強く影響していることと一部の避難者が経路選択を誤った様子が確認できた。本節ではこの2つについて詳細に分析する。

#### 4.3.1 扉の開閉状態の影響

火災が発生している場合、火が燃え広がるのを防ぐため扉を開放したままにしないことが求められている。一方で劇場では音漏れなどの防止のために扉は一般的には重い設計になっており閉まっている扉を開けるのは容易ではない。実際の避難訓練でも一度閉まった扉が容易に開かないという状態が散見された。誘導員が強制的に開いた場合にも、何かのはずみで再び閉まってしまおうとすぐに開かれることはなかった。そこで本節では扉の開閉状態が避難時間にどのように影響するかについて検証した。

最も混雑した1階の出口1と出口2について検証した。図7にそれぞれの出口における時間と計測した単位時間あたりの通過人数のグラフを示す。出口2は出口1に比べて4枚の扉が効果的に使われていたため60人程度人数が多いにも関わらず、避難時間が1分程度短くなっていた。

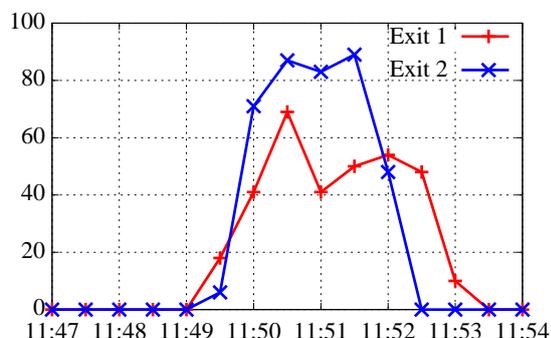
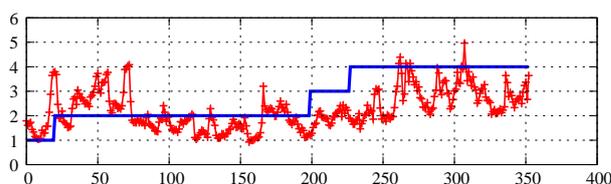


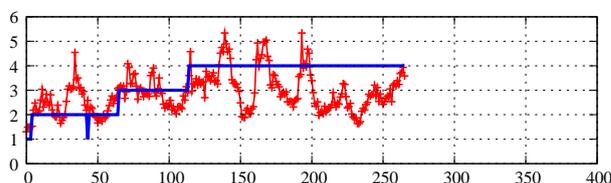
図 7: 出口1と出口2の通過人数(30秒毎)

表 2: 各出口からの避難人数と概算数

	出口 1	出口 2	合計
計測数	331	384	715
概算数	384	446	832
補正係数	1.166	1.161	1.164
取りこぼし率	14.249	13.901	14.063



(a) 出口1の扉の開放枚数と通過人数



(b) 出口2の扉の開放枚数と通過人数

図 8: 出口1と出口2の扉の開放枚数と通過人数

出口1と出口2は図4(e),(f)に示すように非常に混雑しているため目視によって人数を数えるのは困難であった。そこで周辺の通過人数から合計を求めたものを正解値として、抽出精度を評価する。表2に結果を示す。出口1,2共に混雑が大きい時には14%程度の人を取りこぼしているが、複数の地点で同程度の取りこぼし率であることから、現状の計測アルゴリズムは最も混雑している場合には14%程度の取りこぼしが発生するが1.16倍することで真値に近づくことが分かる。

次に訓練中に何枚の扉が避難に利用されているかを目視によって調べた。図8に結果を示す。青い線が避難時間に関いているドアの枚数を示し、赤い線が人の流れの計測技術で抽出した1秒あたりの通過人数を示している。出口1は2枚の扉が開かれている時間が長い一方で、出口2は早い段階で扉が4枚開いていることが分かる。

これらの関係から開放扉の枚数と単位時間あたりの通過人数の相関関係を求めた例を図9に示す。数字に多少の違いがあるものの、出口1(a)でも出口2(b)でも開放扉の枚数が多いほど、多くの人を通過させることができおり、これらの平均(c)を取ると線形の関係に非常に近いことが分かる。扉が4枚使われた場合には1枚の時のおよそ2倍程度の人を通過させることができ、当然のことながら少しでも多くの扉を開放

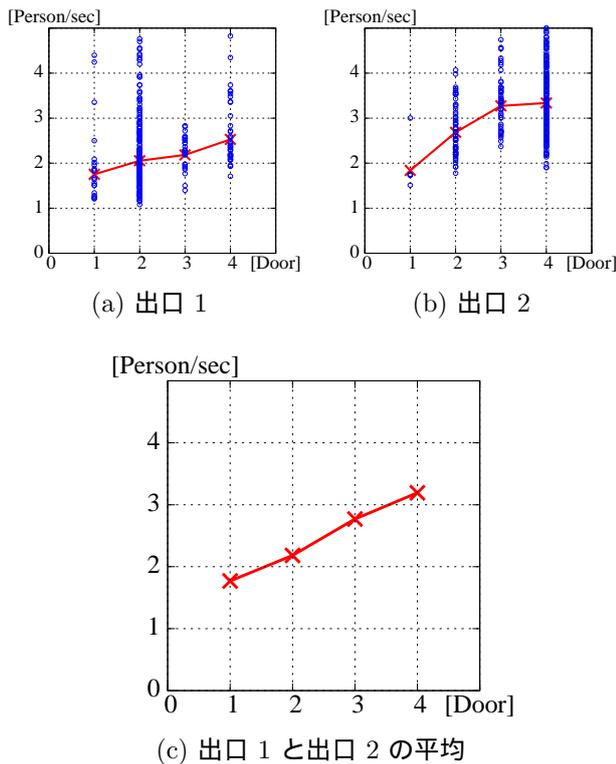


図 9: 扉の開放数と単位時間あたりの通過人数の相関

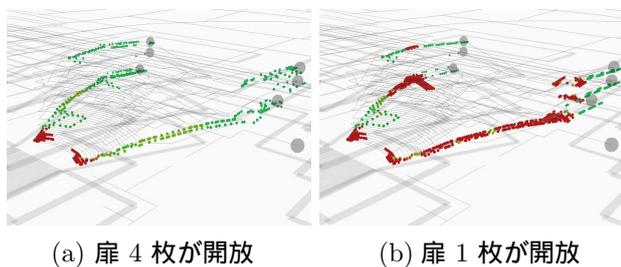


図 10: 同時刻のシミュレーション結果

することが避難時間の短縮には有効である。

以上の結果はシミュレーション結果からも明らかである。扉の開放が 1 枚の場合と 4 枚の場合にどの程度の避難時間に差が出るかについては既に図 6 に示した。また、シミュレーション結果の俯瞰図を図 10 に示す。共に同じ時刻の状態を示しており左図は扉が 4 枚使われていてほとんどの人が劇場内からは避難が完了しているのに対して右図は扉が 1 枚しか使われていない場合でありまだ多くの人が残っており、続く廊下でも混雑が発生していることが分かる。

#### 4.3.2 避難経路の選択誤りの影響

今回の避難訓練において先頭の集団が誤った経路を選択し、後方の人々が全てその人に付いていくという箇

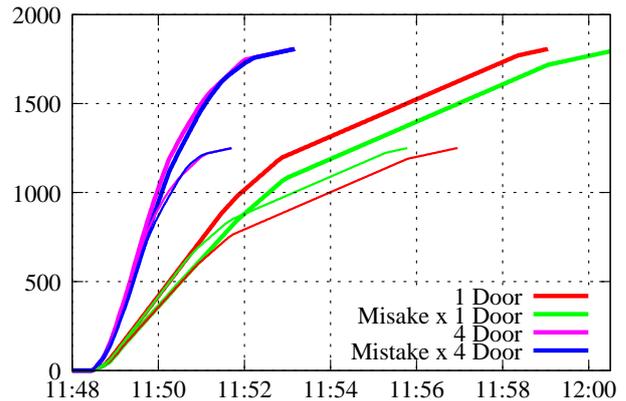


図 11: 様々な条件でのシミュレーション結果

所があった。図 5(a) の赤い網掛けが該当箇所である。その階に非常出口があるにも係わらず、先頭の人々が階段を降りてしまったため、後続の全ての人々が階段を降りてしまうという現象が見られた。

このような経路選択の誤りが全体の避難時間にどのように影響するかを検証するため観客が今回の避難訓練の 1300 人いた場合と満員となる 1800 人いた場合において以下の複数の避難条件を設定しシミュレーション実験を行った。

- (1) 誰も経路を間違えず出口の扉は 1 枚開放 (1 Door)
- (2) 避難訓練と同様に経路を誤り出口の扉は 1 枚開放 (Mistake × 1 Door)
- (3) 誰も経路を間違えず出口の扉は 4 枚開放 (4 Door)
- (4) 避難訓練と同様に経路を誤り出口の扉は 4 枚開放 (Mistake × 4 Door)

これらの組み合わせで合計 8 通りの条件でシミュレーションを行った。結果を図 11 に示す。横軸が時間を表し、縦軸が避難完了人数である。扉が 1 枚しか開放されていない場合は、そこで混雑が発生するため経路を誤った場合には、特に出口付近で混雑が激しくなり避難時間に影響を受ける。しかし、4 枚の全ての扉が開放されている場合には経路を誤ったとしても避難時間の遅れへの影響は極めて小さいことが分かる。

このように条件によっては 1 つのミスでは避難時間は大きく変わらないが、小さなミスが積み重なることによって避難時間が長くなってしまふことがあり、少しでもミスをなくしていくことが避難時間の短縮には有効であることが伺われる。

訓練の後に行ったアンケートでは「何を手がかりに避難する方向を判断したか? (複数回答)」という質問に対して座席ごとに集計したところ表 3 のような結果が得られた。1 階中央、2 階上手のように係員の声

表 3: 何を手がかりに避難する方向を判断したか？

	1 階中央	2 階下手	2 階上手	4 階上手
係員の声	20%	73%	25%	50%
係員の手振り	6%	12%	8%	15%
誘導表示	9%	13%	0%	3%
人の流れ	80%	39%	85%	65%
その他	4%	0%	13%	3%

聞こえにくかったところでは人の流れについて行く傾向がはっきりと出ている。特に 2 階上手は図 5 から分かるように誤った経路を選んだエリアであり、実際に先頭の人を選んだ誤った経路に付いて行っていることが観測されている。誘導には係員の声が大事であり、誘導が聞こえない場合には初期段階で正しい人の流れを作り出すことが大事であることが分かる。

## 5 むすび

本稿では大規模な人数を集めての避難訓練から知見を抽出するためのツールとして人の流れの計測手法と人の流れのシミュレーション方法について説明した。さらに、新国立劇場で行った 1300 人規模の避難体験オペラコンサートの避難動線の計測とシミュレーションを行い、扉の開放状態や経路の選択誤りがどのように避難に影響するかを明らかにした。このような大規模な人員を集めての実証実験は困難であり、実証実験から得られた知見や知識を伝承し、他の施設にも水平展開していく技術は重要な役割を果たす。

筆者らは施設だけではなく花火大会のような駅から街にかけての計測やシミュレーションも行っており [8]、オリンピックなどの大規模イベントを想定してより大規模な誘導支援へと展開していく必要があると考えている。

## 謝辞

本実証実験を行うために新国立劇場の関係スタッフの多大なる支援を得た。ここに感謝の意を表します。また、避難体験オペラコンサートに参加した 1300 人の参加者に心より感謝します。

## 参考文献

- [1] Alessandro Corbetta, Luca Bruno, Adrian Muntean, Federico Toschi, “High statistics measurements of pedestrian dynamics,” The Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics 2014 (PED2014).
- [2] 大西正輝, 依田育士, “ファジィクラスタリングを用いたステレオ画像からの動線抽出,” 電気学会論文誌, vol.128, no.9, pp.1438–1446, Sep. 2008.
- [3] Masaki Onishi, “[Invited Paper] Analysis and Visualization of Large-Scale Pedestrian Flow in Normal and Disaster Situations,” ITE Transactions on Media Technology and Applications, vol. 3, no. 3 pp.170–183, July 2015.
- [4] Alessandro Pluchino, Cesare Garofalo, Giuseppe Inturric, Andrea Rapisarda and Matteo Ignaccolo, “Agent-Based Simulation of Pedestrian Behaviour in Closed Spaces: A Museum Case Study,” Journal of Artificial Societies and Social Simulation, vol.17, no.1, 16, 2014.
- [5] 山下倫央, 副田俊介, 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とその応用,” 情報処理学会論文誌, Vol.53 No.7, pp.1732–1744, July 2012.
- [6] Tomohisa Yamashita, Shunsuke Soeda, Masaki Onishi, Itsuki Noda, “Exhaustive Testing of Evacuation Plan with High-Speed Evacuation Simulator,” International Scientific and Technical Conference Emergency Evacuation of People from Buildings, pp.357–364, March 2011.
- [7] 野中陽介, 大西正輝, 山下倫央, 岡田 崇, 島田敬士, 谷口倫一郎, “大規模な避難シミュレーションのための歩行速度モデルの精緻化,” 電気学会論文誌 C, vol.133, no.9, pp.1779–1786, Sep 2013.
- [8] 山下倫央, 大西正輝, “オリンピックにおける人の流れの解析,” 情報処理, vol.55, no.11, pp.1189–1195, Nov.2014.