

建物内避難行動モデルおよび赤外線人感センサモデルを用いた 建物内滞留者分布の推定

吉行菜津美*・大佛俊泰**・田頭まき**・沖拓弥**・伊山潤***・福島佳浩***

Estimation of Population Distribution in a Building Using Evacuation Behavior Model and Infrared Human Detection Sensor Model

Natsumi YOSHIYUKI, Toshihiro OSARAGI, Maki TAGASHIRA,
Takuya OKI, Jun IYAMA, Yoshihiro FUKUSHIMA

Abstract: We developed evacuation behavior model considering pedestrians' psychological stress and infrared human detection sensor model describing its response to human flow. Besides, we have conducted basic analysis on the relationships between human flow and sensor responses. In this paper, we attempt to estimate population distribution in a staircase based on the sensor responses. For this purpose, we generate human flow data in various situations and estimate sensor responses, using the models we have constructed. Then, we apply machine learning technique to estimate the population distribution in a staircase from the sensor responses.

Keywords: 建物内避難行動 (evacuation behavior in a building), 滞留者分布 (population distribution), 心理的ストレス (psychological stress), 防災訓練 (evacuation drill), 赤外線人感センサ (infrared human detection sensor)

1. はじめに

大地震発生時に、より効果的な避難指示や建物内閉じ込め者の特定などを行う上で、建物内滞留者分布の把握は重要である。筆者らはこれまで、防災訓練において観測調査（田頭ら，2020）を行い、階段室のエリア内滞留者数と赤外線人感センサ（以下、センサ）の連続反応の関係性について検討した（吉行ら，2020）。しかし、観測調査時の限られた人流データおよびセンサ挙動データのみを用いて、建物内滞留者分布を推定することは困難である。そこで本稿では、これまでに構築した建物内避難行動モデル（吉行ら，2019）とセンサ反応モデル（吉行ら，2020）を用いて、様々な状況を想定した豊富な人流データおよびセンサ挙動データを作成し、両者の関係を機械学習させることで、センサ挙動から建物内滞留者分布を推定する方法について検討する。

2. 建物内避難行動モデル

2.1. 観測調査の概要と歩行軌跡データの作成

東京工業大学で行われた防災訓練において、センサユニット¹⁾（計 32 台）およびビデオカメラ（GoPro HERO シリーズ，計 35 台）を用いて、避難行動観測調査を行った（図-1）。その上で、ビデオ映像から、全避難者（198 名）の歩行軌跡デー

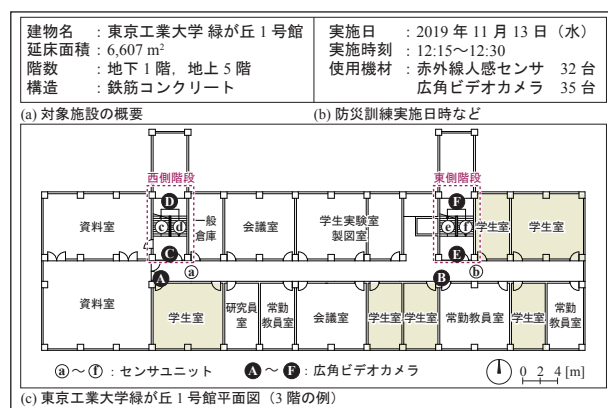


図-1 防災訓練観測調査の概要

* 学生会員 東京工業大学環境・社会理工学院 (Tokyo Institute of Technology)
〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1 E-mail: yoshiyuki.n.aa@m.titech.ac.jp
** 正会員 東京工業大学環境・社会理工学院 (Tokyo Institute of Technology)
*** 正会員 東京大学大学院工学系研究科 (The University of Tokyo)

3. 赤外線人感センサ反応モデル

3.1. センサの概要と防災訓練観測時の観測結果

本研究で用いるセンサ（HC-SR501）の概要を図-5に示してある。本センサは、検知範囲内に歩行者が進入すると反応し、 b [秒] 間反応が継続した後、 d [秒] 間の非検知時間が存在する。また、防災訓練観測調査の結果（吉行ら，2020）から、同一センサであっても、非検知時間 d に揺らぎが生じることが判明している。防災訓練観測調査における、階段室のエリア（図-5(a)）内滞留者数とセンサ反応との関係をみると、エリア内滞留者数が相対的に多い時刻において、センサが連続反応していることが分かる（図-6）。

3.2. センサ反応モデルの概要

センサ反応モデルでは、人流に対するセンサの反応を記述する。具体的には、センサから l [m] の範囲内に歩行者が進入するとセンサが反応し、2.5 秒間反応が継続した後、 d [秒] 間の非検知時間が存在するよう、センサ反応をモデル化した。本稿では、防災訓練観測調査の結果から推定したセンサ反応パラメータ（ $d=6.5$, $l=3.5$ ）を用いる。

4. 建物内滞留者分布の推定

4.1. 避難行動モデルおよびセンサ反応モデルを用いた機械学習用データの作成

人流に対するセンサの挙動から滞留者分布を推定するため、様々な状況を想定した豊富な人流データを作成する。具体的には、建物内避難行動モデルを用いて、避難開始のタイミングの異なる人流データ 4 種を、各 50 回分作成した（表-1）。次に、作成したそれぞれの人流データにセンサ反応モデルを適用し、センサ挙動データを作成した。さらに、エリア（図-5(a)）内滞留者分布を算出し、これを学習用データとした。

4.2. 機械学習を用いた滞留者分布の推定方法

前節で作成した学習用データを教師データとして機械学習を行い、センサの挙動からエリア内滞留者分布を推定する。上階のセンサ挙動からの推定値を下階の入力データとして考慮するため、3 層パーセプトロン（以下、NN）を組み合わせ

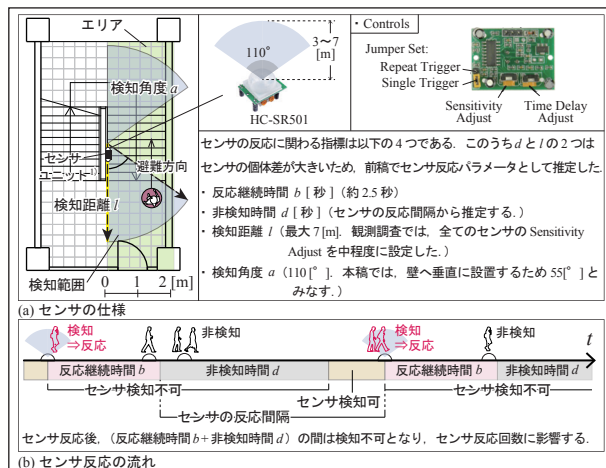


図-5 センサの概要

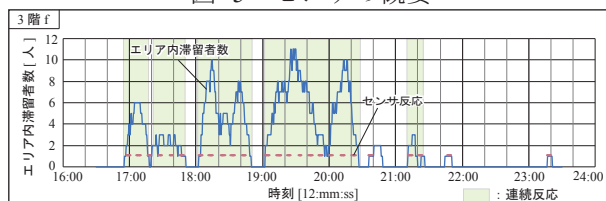


図-6 防災訓練観測時のセンサ反応とエリア内滞留者数
表-1 建物内避難行動モデルを用いて作成した人流データ

	避難人数	避難開始のタイミング
(1) ※1 分散避難 1	各学生室から、 8 名避難 (計 152 名)	12:16:30 ※2 より 4 分以内にランダムに避難開始 ※4
(2) 分散避難 2	各学生室から、 8 名避難 (計 152 名)	12:16:30 より 3 分以内にランダムに避難開始
(3) 分散避難 3	各学生室から、 8 名避難 (計 152 名)	12:16:30 より 2 分以内にランダムに避難開始
(4) 分散避難 4	各学生室から、 8 名避難 (計 152 名)	各階の学生室が、12:16:30 より 10 [s] 刻み ※5 で避難開始

※1 各種 50 回、計 200 回分のデータを作成する。
 ※2 防災訓練観測調査時に合わせ、緑が丘 1 号館学生室（5 階：9 室、4 階：4 室、3 階（図-1）：6 室）とした。
 また、観測調査と状況を合わせるため、合計避難人数を約 150 名に設定し、同じ学生室内の避難者は同時に避難を開始するよう設定した。
 ※3 防災訓練観測調査時の避難開始指示時刻に設定した。
 ※4 避難者の速度は、2.3 節で推定したパラメータを用いてランダムに割り当てる。
 ※5 推定パラメータを用いたセンサ反応モデルが検知不可となる時間（ $b+d=9$ [s]）を考慮し、設定した。

本稿では、1 階から 3 階の計 4 センサを用いた NN を考える。入力量は、センサの情報 $x_{s,i}^t$, $x_{s,j}^t$ と 8.5 秒前の上階の情報 $c^{t-8.5}$ (NN における最上階を除く) の計 3 つとし、出力量として、各センサのエリア（図-5(a)）内滞留者数の 5 秒間の移動平均値 y_s^t を推定する。層間の活性化関数にはシグモイド関数を採用し、各入力値には値域に合わせた正規化を行った。また、層間の計算には、200 回の学習後に更新された重みを採用した。

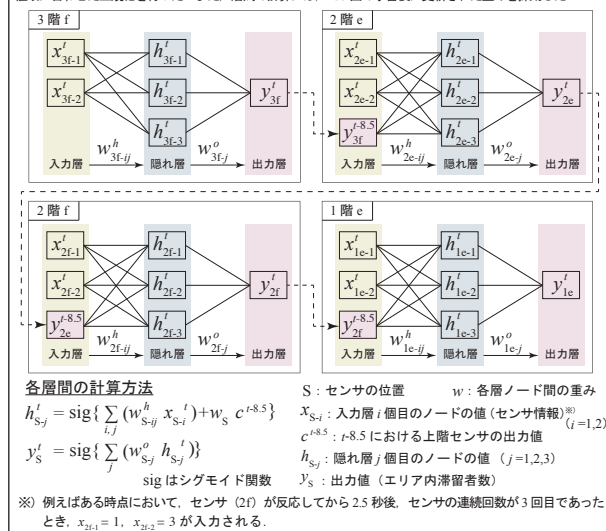


図-7 NN を用いた建物内滞留者分布の推定方法

モデル化した（図-7）。学習方法には誤差逆伝播法を用いる。具体的には、センサごとに、センサ

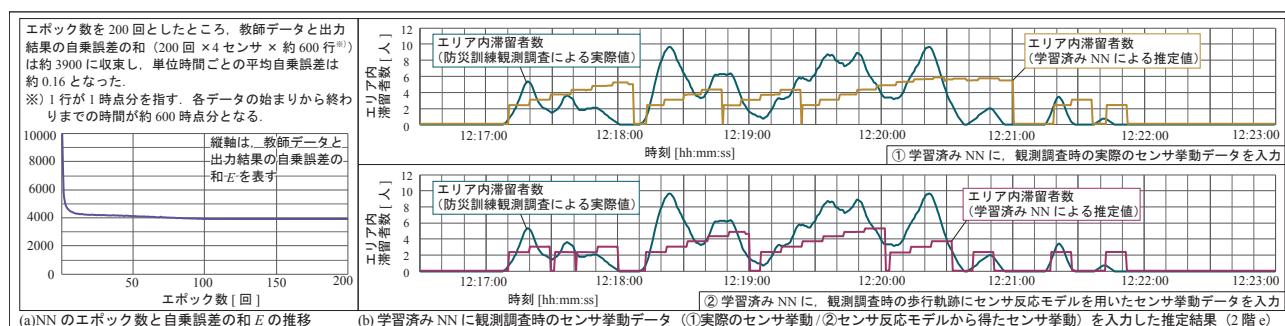


図-8 NNを用いた建物内滞留者分布の推定

挙動データ（センサの反応有無・センサの連続反応回数）と8.5秒⁴⁾前における上階の出力値を入力し、隠れ層を通して、エリア内滞留者数を出力する⁵⁾（図-7）。

4.3. 滞留者分布の推定と精度検証

NNの学習過程を図-8(a)に、学習済みNNに防災訓練観測調査における①実際のセンサ挙動データと②実際の歩行軌跡にセンサ反応モデルを適用して得たセンサ挙動データを用いた推定結果を、それぞれ図-8(b)に示してある。②では、エリア内滞留者数の大まかな時刻推移は再現できているものの、①では、滞留者数のピークが大きすぎる。これは、人流に対するセンサの挙動が遅れることが原因と考えられる。また、エリア内滞留者数を過少推定している点にも改良を加える必要がある。

5. まとめ

建物内避難行動モデルの歩行性状を改善し、センサ反応モデルと併用することで、建物内滞留者分布とセンサ挙動に関して、様々な状況を想定した豊富なデータを得ることができた。次に、機械学習モデル（NN）を用いて、センサの挙動から建物内滞留者分布の推定を試みた。今後は、センサ自体の観測精度を上げるほか、入力データ数を増やし、NNを全階へと拡張することで、さらなる推定精度の改善を図る予定である。

謝辞

本研究は、JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム(JPMJOP1723)によるものです。ここに記して謝意を示します。また、東京工業大学研究倫理審査会の承認を受けて実施しました（承認番号：第2019204）。

注

- 1) 本研究では、歩行者の進行方向を判定するため、各センサユニットに上階下階方向の2つのセンサを設置した。
- 2) 前稿（吉行ら，2019）と同様の手順で、避難者ごとに性別など属性情報を作成した。なお、ビデオカメラで捉えられなかった部分には、歩行軌跡の補間を行った。
- 3) 戻り行動や立ち止まりなど、特徴的な行動を示した64名に関しては、推定の対象外とした（134名が推定の対象）。
- 4) 観測調査におけるエリア間の平均歩行時間を考慮した上で、設定した値である。
- 5) データには多くのノイズが含まれることから、0.5秒間隔の原データを平滑化（移動平均法）し、5秒間隔のデータとした。

参考文献

- 吉行菜津美・大佛俊泰・沖拓弥・岸本まき（2019）防災訓練時観測調査に基づく建物内避難行動シミュレーション。「地理情報システム学会講演論文集」，28.
- 田頭まき・大佛俊泰・沖拓弥・吉行菜津美・伊山潤・福島佳浩（2020）赤外線人感センサを用いた建物内滞留者分布の推定 その1。「日本建築学会大会学術講演梗概集（CD-ROM）」，5444.
- 吉行菜津美・大佛俊泰・田頭まき・沖拓弥・伊山潤・福島佳浩（2020）赤外線人感センサを用いた建物内滞留者分布の推定 その2。「日本建築学会大会学術講演梗概集（CD-ROM）」，5445.