

ひずみセンサを用いた階段室内歩行者の通行量と速度の推定方法

Method for Estimating Pedestrian Traffic and Speed in Stairwell

Using Strain Sensors

○木下 芳郎
KINOSHITA Yoshiro

日本工業大学建築学部建築学科 教授 博士（工学）
Professor, Faculty of Arch., Dept. of Arch., Nippon Institute of Technology, Ph.D.

キーワード: 階段室; 歩行者; 通行量; 速度; 計測; ひずみセンサ
Keywords: Stairwell; pedestrian; traffic; speed; monitoring system; strain sensor.

1 背景と目的

大規模な建物内で階段を移動する人の流れをとらえることは、混雑状況を把握して設備や通路スペース、滞留スペースの規模や配置の検討を行う際に有用である。特に緊急時の高層ビルで人の流れをとらえることは、避難がスムーズに行われているかをとらえ、安全な避難誘導を行うために重要であるが、現在これを精度よく低コストで行うことは難しい。本研究では、一般的な高層ビルに用いられている鉄骨階段を対象として、比較的安価に入手可能なひずみセンサを階段に設置し、歩行者の通行時に生じるひずみから通行量や速度を計測することを試みる。階段室内での歩行者の流動状況の計測については、カメラや各種センサを用いた方法が試みられている。カメラによる計測¹⁾は精度が高いが、機器と計算のコストから汎用性が高いとは言えないと考えられる。赤外線センサ²⁾や加速度センサ³⁾を用いることも試みられているが、混雑時の計測精度には改善の余地があると考えられる。本研究で用いるひずみセンサは橋梁上の車両の通行量を計測する方法として用いられており⁴⁾、階段室内で単独、2人が並んで通過した場合については人の検知や人数の判別ができることが確認されている⁵⁾。本研究では、複数の歩行者が前後に並んで通行した場合の通行量と速度を推定する方法について検討する。

2 歩行者通行時の階段ひずみ計測の実施場所と方法

2-1 階段ひずみ計測の実施場所

階段歩行時に生じるひずみを計測するために実験を行った場所と用いたセンサ、機器などを表1に示す。実験を行った階段室と設置したセンサ位置を図1に示す。対象とした建物は鉄骨造7階の講義棟で、階段室は高層建築物の一般的な避難階段と同等の仕様の鉄骨階段である。ひずみセンサは1枚の段板の裏面、左右2ヶ所に設置した。ひずみはデータロガーを用いて100Hzで計測した。

表1 実施場所と用いたセンサ・機器

・実験場所 日本工業大学5号館（鉄骨造7階建）西側折り返し鉄骨階段4階から6階			
・センサと計測機器			
・ひずみセンサ		長さ90mmのひずみゲージ（ベース長さ104mm）	
・計測機器		データロガーを用いて100Hzでひずみを計測	
・ひずみセンサ設置位置		・センサ位置の記号表記	
4階から5階踊り場、5階から6階			内側 外側
踊り場の階段（12段）の4段目の段板		4-5階	4-5F内 4-5F外
裏側の鉄板の両端に塗装面上から接着		5-6階	5-6F内 5-6F外

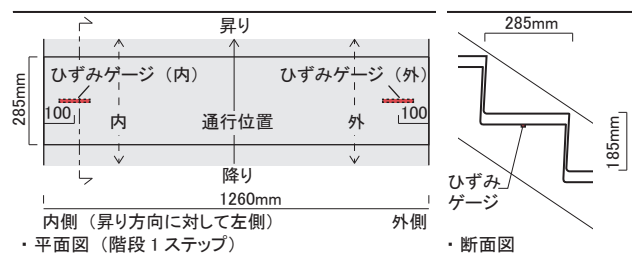


図1 対象階段

表2 実験のケース

・通行位置 と人数	・速度※ [BPM]	・移動階	・方向	・回数
1列 内(6~8人) 外(6~8人)	45 80	4-5階	昇り	1 2
2列(内、外) (4人)	110	5-6階	降り	3 4

※ 速度は階段を昇降する際の1分あたりの歩数で設定した。階段の沿面方向の速度に換算すると以下のようになる。
45BPM:0.26[m/s]、80BPM:0.45[m/s]、
110BPM:0.62[m/s]

2-2 歩行者通行実験の実施ケース

計測したひずみから通行量と速度を推定することを目的として設定した実験のケースを表2に示す。歩行者は複数人が縦に並んで階段を1列ないし2列で歩行する。センサによってひずみにどの程度ばらつきが生じるかを把握するために、1列の場合は内側と外側を通行した場合について計測した。中央を1列で通行するケースについては、2列で通行するケースと判別可能であることを既往の研究で確認している⁵⁾ため、本研究では実施しなかつ

た。計測する階については4-5階間、5-6階間の2ヶ所で行った。1列の場合では6～8人、横2列の場合では前後方向に歩く人数の列は4人として、前の歩行者とは2段分の間隔をあけた。既往の調査⁵⁾から、センサを設置した段とその上下1段分にいる歩行者によって主なひずみが生じる。このため、センサから2段以上離れた歩行者はひずみにほぼ影響しないため、4人といった比較的低人数でも精度を確認する実験として十分であると考えた。速度については1分あたりの歩数による歩行テンポで条件を設定した。通常の歩行テンポの110[BPM]に加えて、混雑している状況を想定して速度がやや遅い80、45[BPM]の2種類を加えた計3種類を設定した。実験は同じケースを4回繰り返し行った。

3 階段通行時のひずみデータ

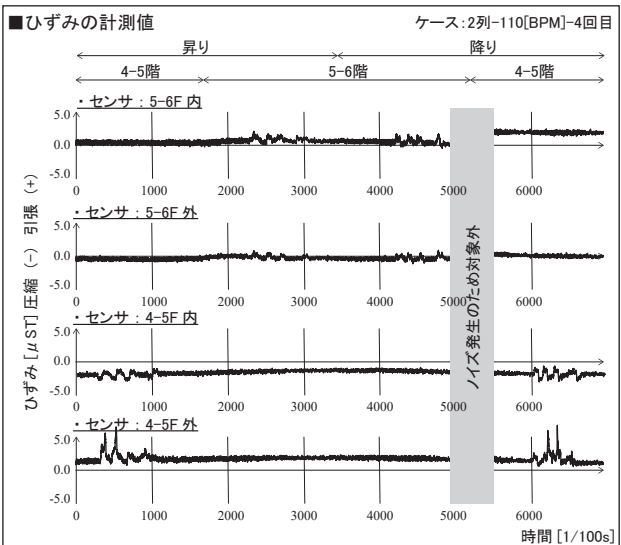
3-1 計測データのノイズ除去と補正

計測したひずみの一例として、2列で歩行テンポを110[BPM]として4階から6階を1往復した際の各センサのひずみを図2の上段に示す。通行時にひずみが大きくみられるが、通行時以外にも短周期成分のノイズがみられる。また、ひずみが時間と共に変化していくドリフトもみられた。通行時のひずみをとらえやすくするために、フーリエ変換で短周期成分と長周期成分の波形を取り除いたデータを図2中段に示す。通行時に生じる引張のひずみが明確にみられるようになったが、センサ「4-5階 外」は通行時に生じるひずみが平均的に大きいのにに対し、センサ「5-6階 外」では比較的小さく、同じ条件でも、センサ位置によって生じるひずみの大きさにはばらつきがみられた。このばらつきを小さくするために、生じる最大引張の値の平均値を基準にして、その値が同程度になるよう各センサのひずみの値を定数倍することでひずみ値の補正を行った。補正したひずみのデータを図2下段に示す。センサ「4-5階 外」とセンサ「5-6階 外」の値は同程度になった。その他のケースについても同様に計測データに対してノイズ処理と補正を行った。

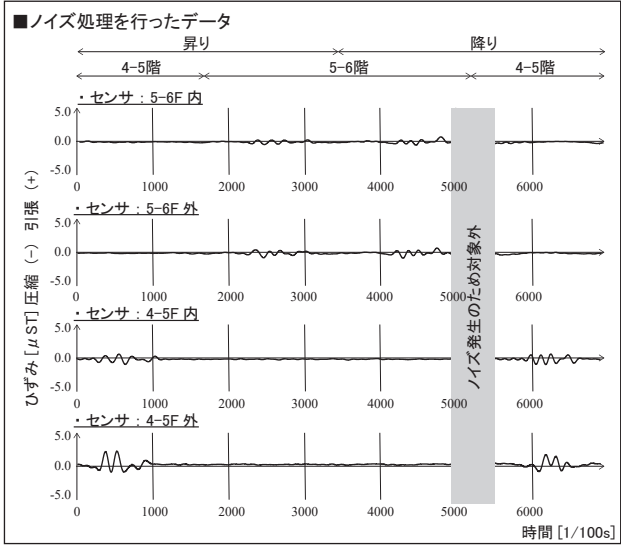
3-2 混雑状況の指標と推定方法

(1) 混雑状況の指標

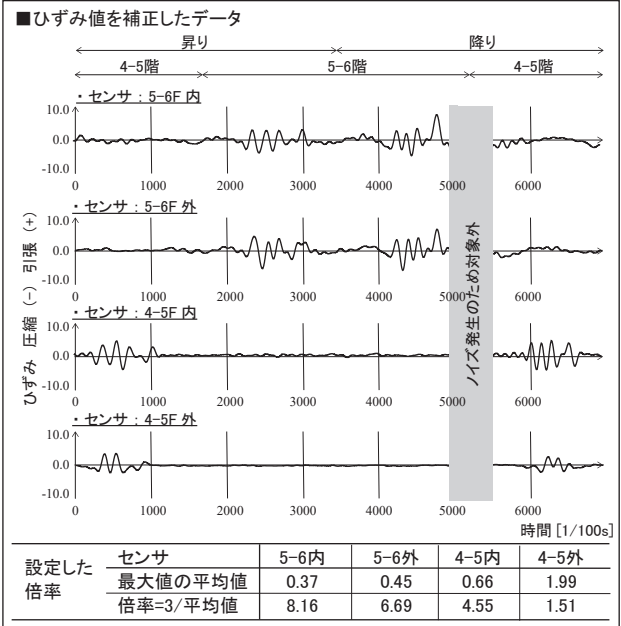
階段室内の歩行者の流動状況を把握するための代表的な指標としては、進行方向についての密度と速度、流率の3つがあげられる。なお、ここでは階段の横方向の2列を単位としてまとめて密度、流率を考えることとする。進行方向に対する密度は階段室内の混雑度を表し、過剰に高くないようにする必要がある。速度はスムーズな移動が行われているかを表す値である。単位時間あたりの通行量を表す流率は効率的な移動が行われているかを表す指標であり、一般的には大きな値であるほど良く、小さな場合は、速度が正常でも密度が低い、または密度が高くて速度が遅い場合を表す。3つの特徴量は



ノイズ処理:フーリエ変換により波長0.1[s]以下、8.0[s]以上の成分を削除



ひずみ値の標準化:引張ひずみの最大値の平均が3となるよう設定した倍率で各センサのひずみ値を補正



設定した倍率	センサ	5-6内	5-6外	4-5内	4-5外
最大値の平均値		0.37	0.45	0.66	1.99
倍率=3/平均値		8.16	6.69	4.55	1.51

図2 計測したひずみのノイズ処理と補正

流率 = 進行方向に対する密度・速度

の関係があることから、2つの値が分かればもう1つの値を求めることができる。ひずみセンサで直接的に計測可能な値は流率と速度である。

(2) 通行量と速度の推定方法

計測したひずみから流率と速度を推定する方法を検討する。まず、流率は単位時間あたりの通行量なので、以下では指定した時間における通行量を求める。速度については1分あたりの歩数を表す歩行テンポで表現する。推定方法の概要を図3に示す。ノイズ処理と補正を行ったひずみのデータに対して、はじめに歩行者が通過したことを判別するためのしきい値を引張側と圧縮側で定める。通行時に引張と圧縮のひずみが生じる原理として、1人が階段を降りた時に生じるひずみを図3右に示す。1人の通過によって、しきい値を超える区間が引張、圧縮それぞれ1つつ生じる。そのため、降りの場合、しきい値を超えた引張の区間と後続する圧縮の区間の時間は、歩行時の1から2歩分の間の時間に相当することになる。このことを用いて、通行量は引張、または圧縮のしきい値を超える区間の数によって推定する。速度を表す歩行テンポは、しきい値を超えた引張と圧縮の間隔を求め、その逆数の定数倍として推定する。

4 通行量と歩行テンポの推計

4-1 しきい値の検討

通行量推定値の誤差を小さくするしきい値を求めた。しきい値の範囲を設定し、推定人数と正しい人数との誤差の2乗和を全ケースについて求め、最小となるしきい値を圧縮、引張で求めた。しきい値はまず広い範囲を0.05単位で調べ、誤差が最小となる値に近い範囲では0.01単位で調べた。引張と圧縮についてのしきい値と誤差の関係を図4に示す。引張では0.27以上、圧縮では-0.28以下を通行によるひずみとみなすことで誤差が最小となる。誤差は引張による推定値の方がやや小さかったことから、引張側によって通行量を推定することとした。

4-2 通行量の推定精度

求めたしきい値を用いて推定した通行量がどの程度の精度を持つかを図5に示す。2列で歩行した場合の4人と、

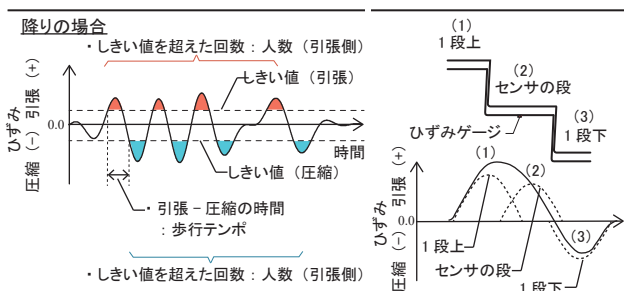


図3 通行量・速度の推定方法の概要

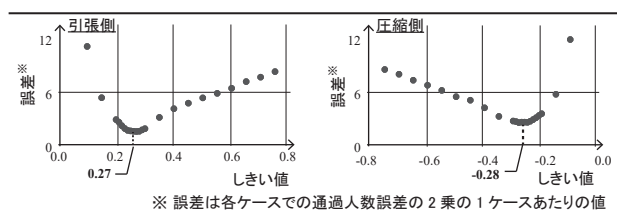


図4 通過判定しきい値の検討

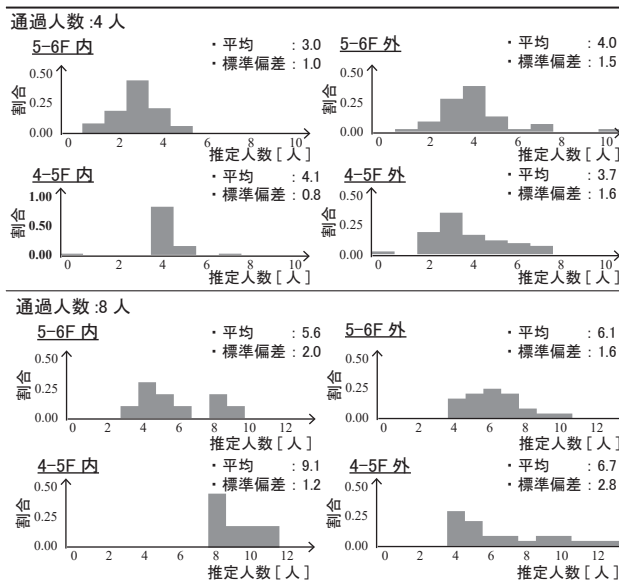


図5 通行量の推定値

・記号

実際の階段通過人数：

i

推計した通過人数：

j

通過人数 i 人の時に推計人数が j となる確率： $P_{j/i}$

通過人数 i 人の時に推計人数が j の回数： $N_{j/i}$

・推計人数分布の求め方

実際の通過人数に対して推計人数にはばらつきが生じる。これを実際の通過人数 i 人の時に推計人数が i となる確率 $P_{j/i}$ として表現する。

通過人数が1人の時の各推計人数の確率は

$$P_{0/1}, P_{1/1}, P_{2/1}, P_{3/1}, P_{4/1}, P_{5/1}, \dots$$

となる。通過人数に対して推計人数が著しく大きな値をとることがないことから、通過人数が1人の時の推計人数は4人までと仮定し、5以上の j について

$$P_{j/1} = 0 \quad (j \geq 5)$$

とする。この時、 $P_{0/1}, P_{1/1}, P_{2/1}, P_{3/1}, P_{4/1}$ で2以上の i についての $P_{j/i}$ を表現する。例えば、通過人数4人の時に推計値が3人となる確率は

$$P_{3/4} = {}_4C_1 P_{3/1} {}_1P_{0/1}^3 + {}_4C_2 P_{2/1} {}_1P_{1/1} {}_1P_{0/1}^2 + {}_4C_1 P_{1/1} {}_3P_{0/1}^1$$

となる。行った実験の全ケースを集計し、通過人数 i で推計人数が j の回数 $N_{j/i}$ を求めた時、この組合せが得られる確率は

$$\prod_{i,j} P_{j/i}^{N_{j/i}}$$

となる。この値は $P_{j/i}$ についての尤度を表す。この値の対数をとった

$$\sum_{i,j} \log P_{j/i}^{N_{j/i}}$$

を最大とする $P_{0/1}, P_{1/1}, P_{2/1}, P_{3/1}, P_{4/1}$ を求める。

図6 推定人数分布の推定方法

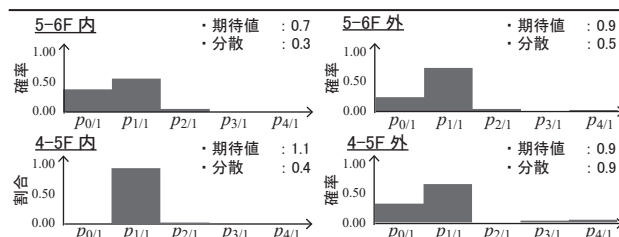


図7 1人通過時の推定人数の分布

1列で歩行した場合でケース数の多かった8人の場合について、推定人数の分布を求めた結果をグラフに示した。

全体的な傾向として、実際の通行人数におおむね近い人数が推定値として得られてはいるが、推定値にはばらつきがみられた。センサごとに誤差の分布の特徴をみると、センサ「4-5F 内」は比較的誤差が少なく、やや過大に推定している。一方、センサ「4-5F 外」では過小に推定しやすいといったように、センサごとに異なる傾向がみられる。また、通過人数が4人、8人の場合を比較すると、センサ位置毎の誤差の生じる傾向はおおむね同様であった。通行人数が多くなるほど、一般的に推定人数の誤差は大きくなるので、確認した4人と8人以外についても、実際の通過人数に応じて誤差がどの程度生じるかを把握しておく必要があると考えられる。そこで、複数人が通過した時の通行量の推定値は、1人が通過した時の推定値の確率分布から表現できると考え、図6に示すように、いくつかの仮定を定めた上で、実験から得られた推定値から、1人が通過した時の推定値の確率分布を求めた。各センサ位置について、1人が通過した時の推定値の分布を図7に示す。センサ「4-5F 内」は誤差が比較的小さく、センサ「4-5F 外」は過小に推計、つまり通行の検出もれをする確率が比較的高いという傾向があり、その結果が4人、8人通行の場合の推定結果にも表れていることが分かる。求めた確率分布を用いると、例えば、実際の人数が20人の場合の推定人数の分布は、中心極限定理から、センサ「4-5F 内」は平均21で標準偏差1.64、センサ「4-5F 外」平均17.6で標準偏差3.97の正規分布に近い値を取るといったことがわかり、得られた通行量の推定値がどの程度確からしいかを把握することができる。

4-3 歩行テンポの推定精度

速度を表す歩行テンポを推定するために、降り方向のケースのみを対象として、しきい値を超えた引張と圧縮のひずみの区間の時間を求めた。この値を歩行テンポごとに各センサで平均した値と実際の歩行テンポの関係を図8に示す。なお、しきい値を超えた引張や圧縮が続けて現れた場合は、隣接する引張と圧縮の区間のみを対象として時間を求めた。

引張と圧縮の時間[s]=定数×60/1分あたりの歩数
のモデル式を用いて、実験の値から定数を求めたところ、定数は1.57となった。この値を用いて推定した歩行テンポの分布を実際の歩行テンポ110、80、45[BPM]ごとに図9に示す。各歩行テンポごとに分布の山の位置が異なり、相対的な違いをとらえることはできていることがわかる。ただし、推定した歩行テンポは全体的にばらつきがあり、誤差が大きい結果となった。歩行テンポ毎にみると、80[BPM]と110[BPM]の場合は過大に推定し、45[BPM]の場合は過小に推定しやすい傾向がみられた。推定した歩行テンポにばらつきが大きい理由として、しきい値を超

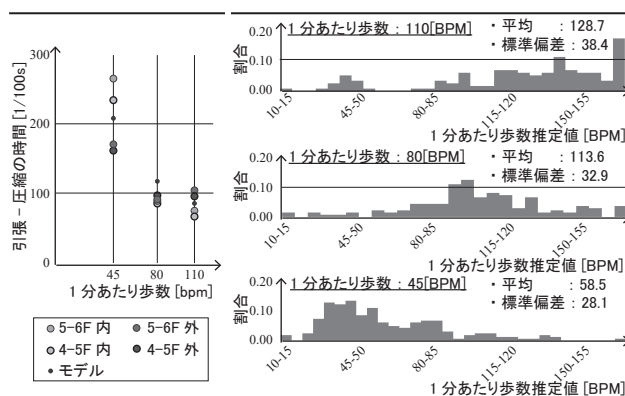


図8 歩行テンポと引張-圧縮間隔

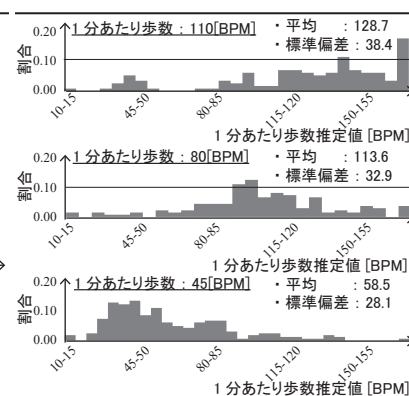


図9 歩行テンポの推定結果

える区間の時間が歩行者の歩き方などによってばらつきがあるためと考えられる。精度よく歩行テンポを推定するためには、ひずみの波形の特徴をより適切にとらえる必要があると考えられる。

5 まとめと今後の課題

本研究では、ひずみセンサを階段に設置し、歩行者の通行時に生じるひずみから通行量と速度を計測することを試みた。計測したひずみについて、ノイズ処理、センサ位置によるひずみの大きさ違いの補正を施したデータから、1人の階段通行時に対応する引張、圧縮ひずみがおおむね明確に得られるようになった。しきい値を超えた引張側の区間数で通行量を推定したところ、4人通行時の誤差は平均約1.5人程度、8人通行時で約2人程度となった。センサ位置ごとに生じる誤差の傾向が異なったため、各センサで1人が通過した際に生じる推定人数の分布を求め、推定人数ごとに正しい通過人数との誤差を統計的に把握できるようにした。速度を表す歩行テンポについては、降り方向を対象にしきい値を超えた引張と圧縮の区間の時間から時間あたりの歩数を推定した。速度の推定結果から3種類の速度の相対的な違いを把握することはできたが、推定値のばらつきが大きく、速度の推定精度向上は今後の課題である。

[参考文献]

- 1) 藤井 皓介、田中 俊成、水野 雅之、佐野 友紀：単独と群集の違いが階段降下時の歩行動作に与える影響 段部における軌跡と歩行距離の分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、建築計画、pp.249-250、2022
- 2) 大佛 俊泰、吉行 菜津美、岸本 まき、沖 拓弥、伊山 潤、福島 佳浩：赤外線人感センサを用いた階段室内歩行者数の推定、日本建築学会計画系論文集、第87巻、第799号、pp.1699-1707、2022
- 3) 羽田 優太、大佛 俊泰、田頭 まき、伊山 潤、福島 佳浩：加速度センサを用いた階段利用者人数の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集、建築計画、pp.1223-1224、2021
- 4) 三木 千尋、水ノ上 敏雄、小林 雄介：光通信網を使用した網橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発、土木学会論文集、No.686、VI-52、pp.31-40、2001
- 5) 木下 芳郎、箕輪 健一：ひずみセンサによる階段歩行者の通行位置と人数の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集、建築計画、pp.1365-1366、2023