The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	格子状に配置したバイナリセンサを用いた歩行者数推定手法
Author(s)	藤井, 崇渡; 谷口, 義明; 長谷川, 剛 他
Citation	電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム. 2014, 113(472), p. 67-72
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/70604
rights	copyright©2014 IEICE
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

一般社団法人　電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
IEICE Technical Report
NS2013-188(2014-3)

格子状に配置したバイナリセンサを用いた歩行者数推定手法

藤井　崇渡†　谷口　義明††　長谷川　剛††　松岡　茂登††

† 大阪大学大学院情報科学研究科　〒 565–0871 大阪府吹田市山田丘 1–5
†† 大阪大学サイバーメディアセンター　〒 560–0043 大阪府豊中市待兼山町 1–32
E-mail: †f-shuto@ist.osaka-u.ac.jp, ††{y-tanigu,hasegawa,matsuoka}@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし　本報告では，商店街の通路や歩道のように複数の歩行者が 2 方向に移動する幅が広い環境において移動方向別の歩行者数を推定する手法を提案する．提案手法では，バイナリセンサを歩行者の移動方向に 2 つ，移動方向の垂直方向に複数配置し，センサから得られる情報をもとに歩行者数の推定を行う．歩行者の移動に伴って得られたセンサ情報と，歩行者の移動に関する複数回のモンテカルロシミュレーションによって得られる情報との差が十分に小さいシミュレーションにおける歩行者数を推定結果として出力する．提案手法の性能評価を行った結果，幅が 8 [m] の領域においては 2×8 のバイナリセンサを配置することで相対誤差が最小となることがわかった．

キーワード　バイナリセンサ，複眼センサ，歩行者数推定，歩行者計数，センサネットワーク，モンテカルロ法

Counting pedestrians on bi-directional walkway using binary sensor array

Shuto FUJII†, Yoshiaki TANIGUCHI††, Go HASEGAWA††, and Morito MATSUOKA††

† Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University,
Yamadaoka 1–5, Suita-shi, Osaka, 565–0871, Japan
†† Cybermedia Center, Osaka University,
Machikaneyama-cho 1–32, Toyonaka-shi, Osaka, 560–0043, Japan
E-mail: †f-shuto@ist.osaka-u.ac.jp, ††{y-tanigu,hasegawa,matsuoka}@cmc.osaka-u.ac.jp

Abstract　In this report, we propose a method for estimating the number of pedestrians walking in opposite directions, as in cases of a shopping street or a sidewalk in a downtown area. The proposed method utilizes a compound-eye sensor that is constructed by placing two binary sensors for the pedestrians' movement direction and multiple binary sensors for the vertical direction of the pedestrians' movement direction. A number of Monte Carlo simulations about the movement of pedestrians are conducted, and the output history of the compound-eye sensor is obtained in each simulation. The simulation scenario with a small difference of the output history of the compound-eye sensor is selected to estimate the number of pedestrians. Evaluation results show that in the field whose width is 8 [m] the relative error in the proposed method is the smallest by using 2×8 binary sensors.

Key words　Binary sensor, Compound-eye sensor, Pedestrian counting, Sensor network, Monte Carlo method

1. はじめに

商業施設やイベント会場における来客数調査やマーケティング調査，駅周辺の通路における通行人数調査，病院や介護施設，工事現場等でのセキュリティモニタリングなどの様々な分野で，歩行者計数に対する需要がある．手動による歩行者計数は人件費が高く，人通りが多い状況下では精度が低下するといった問題がある．そのため，歩行者計数を自動化する技術が注目を集めている [1–6]．中でも，センサを用いて歩行者数を推定する研究 [4–6] は多数行われており，歩行者数を計測する製品 [7–10] も多数存在する．

赤外線センサやピエゾセンサのように，センシング領域内の人物の有無のみを検知できるバイナリセンサは安価で，構造が単純，かつ消費電力も少ないことから，小型化や電池駆動化が容易である．また，バイナリセンサを複数個組み合わせることで，特に少数の歩行者が行き交う状況下で歩行者の移動方向を推定できる．そのため，複数のバイナリセンサを用いることで，移動方向別に歩行者数の推定を行う手法が提案されている [11,12]．しかしながら，これらの手法では 2 個のバイナリセンサが歩行者を検出する間の時刻の差のみから歩行者数を推定するため，複数の歩行者が行き交う状況下では歩行者数の推定精度が大幅に低下する問題がある．

This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.
Copyright ©2014 by IEICE

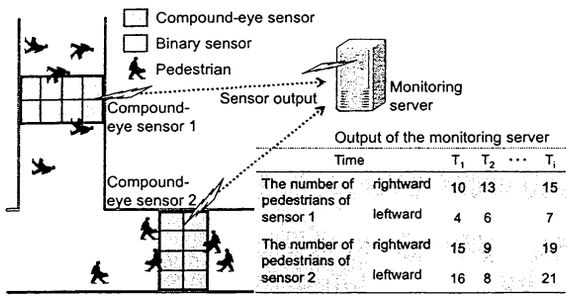


図 1　歩行者計数システム

我々はこれまでに，[13] において，廊下のように歩行者が 2 方向に移動するような環境を対象として，移動方向別の歩行者数をより高い精度で推定する手法を提案した．[13] では，歩行者の移動方向に沿って複数のバイナリセンサをセンシング領域が部分的に重なるように配置することにより複眼センサを構成する．複眼センサが歩行者を検出している間の，歩行者の進入，移動，退出に関する複数回のモンテカルロシミュレーション結果と実際の複眼センサの出力履歴に基づき，歩行者数を推定する．[13] では，既存手法との比較評価を行い，多数の歩行者が行き交う状況における提案手法の有効性を確認した．しかしながら，提案手法は，廊下のような環境における歩行者計数を想定しており，1 つのバイナリセンサのセンシング領域が廊下の幅を覆うような複眼センサを前提としていた．より幅が広い商店街や駅周辺の通路などで行われる歩行者計数 [14,15] においては，通路幅が 10 [m] を超えることもあり，[13] の手法をそのまま適用することはできない．

そこで本報告では，商店街や駅周辺の通路のように歩行者が 2 方向に移動する，より幅の広い環境において移動方向別の歩行者数を推定する手法を提案する．本報告で対象とするシステムを図 1 に示す．本報告では，より幅の広い環境に対応するため，バイナリセンサを歩行者の移動方向に 2 つ，移動方向の垂直方向に複数配置することで構成した複眼センサを使用する．バイナリセンサとしては，圧力を電圧に変換することで歩行者を検知するマット型のセンサを想定する．歩行者が複眼センサのセンシング領域を通過することによって得られるセンサ情報はモニタリングサーバに収集され，モニタリングサーバ上で歩行者数の推定を行う．バイナリセンサを歩行者の移動方向の垂直方向にも配置した複眼センサを使用することで，歩行者が複眼センサの上を通過した際に，歩行者を検知したバイナリセンサのみの集合を取得できる．提案手法では，複眼センサを通過した歩行者数を推定する際に，複眼センサを，歩行者を検知したバイナリセンサ集合（以降，歩行者検知センサ集合と称す）に分割し，それぞれの歩行者検知センサ集合に対して歩行者数の推定を行う．例えば，複眼センサを構成する複数のバイナリセンサが歩行者を検知したという情報のみを使用すると，複眼センサの内部に歩行者が少なくとも 1 人以上存在することのみがわかる．一方，この時，複眼センサから 3 つの歩行者検知センサ集合が得られたとすると，各歩行者検知センサ集合内に少なくとも 1 人以上の歩行者が存在し，複眼センサの内部には少なくとも 3 人以上の歩行者が存在することが確定する．そのため，歩行者検知センサ集合毎に歩行者数推定を行うことで，複眼センサ全体の推定歩行者数の誤差を小さくできる．提案手法では，取得した歩行者検知センサ集合と同じ構成でバイナリセンサを配置したシミュレーションフィールドを生成し，仮想的に歩行者の進入，移動，退出に関するモンテカルロシミュレーションを複数回行う．歩行者検知センサ集合に含まれるバイナリセンサの出力履歴と各シミュレーション試行から得た仮想歩行者検知センサ集合に含まれるバイナリセンサの出力履歴の差が十分に小さいシミュレーション試行の中から歩行者数が中央値となるシミュレーション試行における移動方向別の歩行者数を推定結果とする．本報告では，コンピュータシミュレーションにより，複眼センサを構成するバイナリセンサの数や歩行者の到着率等を様々に変えた時の提案手法における歩行者数推定精度の評価を行う．

本報告の構成は以下の通りである．まず，2. 章で歩行者計数システムで使用するバイナリセンサと複眼センサのセンシングモデルと歩行者の移動モデルを述べる．次に，3. 章で複眼センサを用いたモンテカルロ法に基づく歩行者数推定手法を提案する．4. 章でシミュレーションにより提案手法の性能評価を行う．最後に 5. 章でまとめと今後の課題を述べる．

2. 歩行者計数システムと歩行者の移動モデル

本章では，本報告で対象とする歩行者計数システムの説明を行うと共に，想定する歩行者の移動モデルについて述べる．

2.1 歩行者計数システム

図 1 のように，駅周辺の通路，商店街や街の中心部の歩道等の歩行者が通過する幅が広い領域に複眼センサを設置し，複眼センサのセンシング領域を通過した歩行者数を移動方向別に推定するシステムを歩行者計数システムと呼ぶ．複眼センサはバイナリセンサが歩行者の移動方向に 2 つ，移動方向の垂直方向に複数設置されることにより構成されるものとする．バイナリセンサとしては，歩行者が踏むことで生じる圧力を電圧に変換することで歩行者検知を行うマット型ピエゾセンサ [16] を想定する．複眼センサは，無線通信機能を持つ端末に装着される．端末は，複眼センサを構成するバイナリセンサの出力に変化があると，そのセンサ出力と時刻に関するセンサ情報をモニタリングサーバに送信する．歩行者数の推定はモニタリングサーバ上で行われる．なお，以降では，簡単のため無線ネットワーク部におけるパケットロスは考慮しない．また，歩行者計数システム中に複眼センサが 1 台だけある状況を扱う．

2.1.1 バイナリセンサモデル

バイナリセンサにおいて歩行者の有無を検知可能な領域のことをセンシング領域と呼ぶ．1 つのバイナリセンサのセンシング領域は，図 2 に示す縦が r_y，横が r_x の長方形の領域とし，r_x，r_y をセンシング距離と呼ぶ．バイナリセンサは，自身のセンシング領域内を歩行者の足に踏まれた際に 1 を，足が離れた際に 0 を出力する．

2.1.2 複眼センサモデル

図 3 のように，$2 \times N$ 個のバイナリセンサを長方形領域に敷き詰めることにより複眼センサを構成する．図 3 において，左端から x 個目，上から y 個目のバイナリセンサを $b_{x,y}$（$1 \leqq x \leqq 2$, $1 \leqq y \leqq N$）と表す．1 つ以上のバイナリセンサのセンシング領域に含まれる領域を複眼センサのセンシング領域と呼ぶ．時

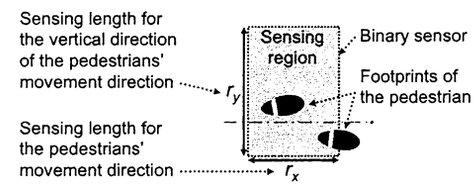


図 2　バイナリセンサモデル

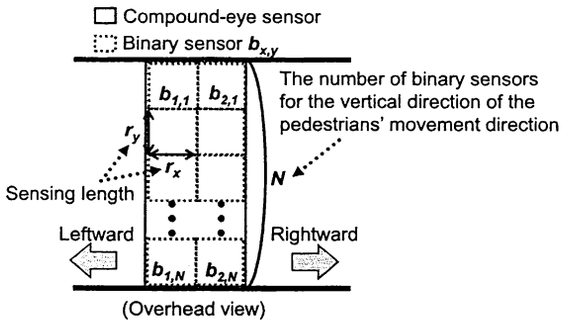


図 3　複眼センサモデル

刻 t におけるバイナリセンサ $b_{x,y}$ の出力を $o_{x,y,t} \in \{0,1\}$ と表記し，時刻 t における複眼センサの出力 O_t を

$$O_t = \begin{bmatrix} o_{1,1,t} & o_{2,1,t} \\ o_{1,2,t} & o_{2,2,t} \\ \vdots & \vdots \\ o_{1,N,t} & o_{2,N,t} \end{bmatrix}$$

と表記する．

バイナリセンサは自身のセンシング領域内の歩行者の有無のみを検出するため，複眼センサの出力から歩行者数が確定するのは，全てのバイナリセンサの出力が 0 となる場合のみで，その場合の歩行者数は 0 人である．この場合の複眼センサの状態を観測可能な状態と定義する．一方，バイナリセンサの出力がひとつでも 1 である場合は歩行者が 1 人以上存在することはわかるが，歩行者数はわからない．この場合の複眼センサの状態を観測不可能な状態と定義する．また，複眼センサの状態が観測可能な状態から観測不可能な状態へ遷移してから，再び観測可能な状態へ遷移するまでの期間のことを観測不可能な期間と定義する．

2.2　歩行者の移動モデル

本報告で使用する複眼センサはマット型バイナリセンサを敷き詰めることで構成されるため，歩行者の足が現在踏んでいる位置から次にどの程度離れた位置を踏むのか，歩行者の足がどのタイミングで地面を踏み，どのタイミングで地面から離れるのかということを考慮しなければならない．そのため，歩行者の移動モデルとして，歩行者の移動速度，歩行者の歩幅，歩行者の足のけり出しと着地のタイミングのモデルが必要となる．

歩行者は，バイナリセンサ $b_{1,y}$ から $b_{2,y}$ に向かう右方向歩行者，その逆方向へ移動する左方向歩行者に分けられるものとし，歩行者は観測領域に進入後，等速直線運動により移動するものとする．各歩行者の移動速度 v は平均 v_m，標準偏差 v_σ の正規分布に従うものとする．

各歩行者は歩行者毎に異なる歩幅 s_l で歩行し，各歩行者の歩幅 s_l は変化しないものとする．各歩行者の歩幅 s_l は平均 $s_{l,m}$，標準偏差 $s_{l,\sigma}$ の正規分布に従うものとする．歩行者の歩隔 s_w と足の大きさ f_l，f_w のばらつきは移動速度 v や歩幅 s_l のばらつきと比較して小さく無視できると考えられるため，本報告では歩隔と足の大きさを固定値とする．図 4 に歩行者の歩幅と歩隔，足の大きさを示す．

次に，歩行者の足のけり出しと着地のタイミングのモデルについて述べる．[17] によると，歩行者の片方の足に注目した場合，歩行動作は図 5 のように 4 つの状態に分類できる．例えば，右足の場合，状態 1 の後足けり出し期で地面をけり出し，状態 2 の遊足期で空中を移動，状態 3 の前足着床期で地面に着

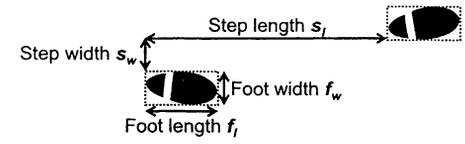


図 4　歩行者の歩幅と歩隔，足の大きさ

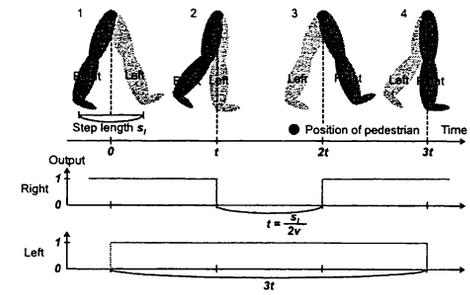


図 5　歩行動作の 4 状態と左右の足のけり出しと着地のタイミング

地し，状態 4 の片足支持期で左足のけり出しを支える．本報告では，本歩行動作を元に，歩行者の足のけり出しと着地のタイミングを以下のように扱う．まず，歩行者の中心位置を両足の付け根の部分とする．歩行者の中心位置が後足の位置よりも歩幅の距離だけ進んだタイミングで後足が地面から離れるものとし，歩行者の中心位置が後足の位置よりも歩幅の半分の距離だけ進んだタイミングで前足が地面に着地するものとする．

3.　モンテカルロ法に基づく歩行者数推定手法

本章では，複眼センサが歩行者を検知している間の歩行者数を推定するための歩行者数推定手法を提案する．

3.1　概　　要

複眼センサは幅の広い環境に設置することを想定しており，また，バイナリセンサを格子状に設置することで構成されるため，歩行者が複眼センサのセンシング領域に進入し退出するまでに複眼センサを構成する一部のバイナリセンサのみが歩行者を検知する．本報告では，歩行者が複眼センサのセンシング領域に進入し全ての歩行者が退出するまでに，歩行者を 1 回以上検知したバイナリセンサを隣接しているバイナリセンサ毎に分割した集合を歩行者検知センサ集合と呼ぶ．

提案手法では，まず，複眼センサで歩行者を検知すると，全ての歩行者が退出するまでの間，歩行者を一度でも検知したバイナリセンサを記録し，歩行者検知センサ集合を特定する．その後，モンテカルロシミュレーションを行い，歩行者数を推定する．具体的には，歩行者検知センサ集合と同じ構成でバイナリセンサを配置したシミュレーションフィールドを生成し，シミュレーションフィールド上で仮想的に歩行者の生成及び移動を行い，シミュレーションフィールドに設置した仮想歩行者検知センサ集合からの出力を得る．シミュレーション試行は，歩行者検知センサ集合から得た出力履歴とシミュレーションフィールド上の仮想歩行者検知センサ集合における出力履歴の差が十分に小さい結果が得られるまで続ける．その後，得られたシミュレーション結果から適切なものを選択し，歩行者数推定結果を得る．以降の節で，歩行者検知センサ集合の特定処理と歩行者検知センサ集合を通過した歩行者数の推定処理の詳細を述べる．

3.2　歩行者検知センサ集合の特定処理

まず，複眼センサから歩行者検知センサ集合を特定す

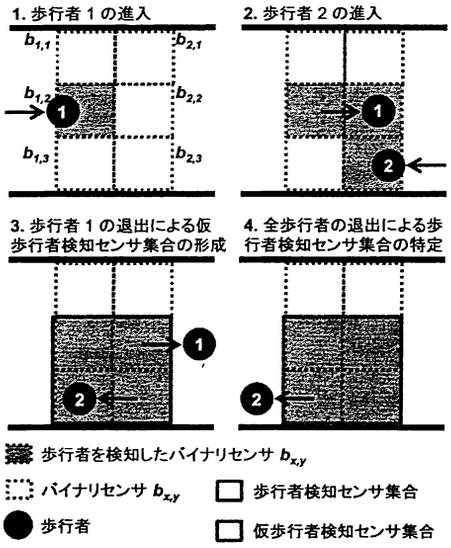


図 6　歩行者検知センサ集合の特定例

る処理について説明する．図 6 に歩行者検知センサ集合 $\mathcal{B}_k = \{b_{1,2}, b_{2,2}, b_{1,3}, b_{2,3}\}$ を特定する例を示す．

提案手法では，各バイナリセンサに対して歩行者検知フラグを管理する．バイナリセンサのセンシング領域内の現時点での歩行者の有無を示すバイナリセンサの出力とは異なり，歩行者検知フラグは現時点までにバイナリセンサのセンシング領域内を歩行者が通過したかどうかを表す．歩行者検知フラグは 0 に初期化されている．歩行者検知フラグが 0 の状態でバイナリセンサが歩行者を検知した場合，該当するバイナリセンサの歩行者検知フラグを 1 にする．

複眼センサを構成しているバイナリセンサのうち，左右の端のバイナリセンサの出力が 1 から 0 に変化した場合，全ての歩行者が歩行者検知センサ集合に含まれるバイナリセンサのセンシング領域（以降，歩行者検知センサ集合のセンシング領域と称す）から退出した可能性があり，歩行者検知センサ集合が特定できる可能性がある．そのため，以下のように，一時的に仮歩行者検知センサ集合を形成し，仮歩行者検知センサ集合に含まれるバイナリセンサの出力を確認することで，歩行者検知センサ集合の特定を行う．

（1）　複眼センサの左（右）のバイナリセンサ $b_{1,y}$（$b_{2,y}$）（$1 \leqq y \leqq N$）の出力が 1 から 0 に変化した場合（図 6 の 3，4 の場合），仮歩行者検知センサ集合 $\mathcal{B}_{k,tmp}$ を生成し，バイナリセンサ $b_{1,y}$ と $b_{2,y}$ を含める．その後，仮歩行者検知センサ集合 $\mathcal{B}_{k,tmp}$ に隣接したバイナリセンサの中に，歩行者検知フラグが 1 であるバイナリセンサ $b_{x',y'}$ が存在する限り，バイナリセンサ $b_{1,y'}$ と $b_{2,y'}$ を仮歩行者検知センサ集合 $\mathcal{B}_{k,tmp}$ に含める．

（2）　仮歩行者検知センサ集合 $\mathcal{B}_{k,tmp}$ に含まれる全てのバイナリセンサの出力が 0 であり歩行者が存在しない場合（図 6 の 4 の場合），仮歩行者検知センサ集合 $\mathcal{B}_{k,tmp}$ を歩行者検知センサ集合 $\mathcal{B}_k$ とし，その後，歩行者検知センサ集合に含まれる全てのバイナリセンサの歩行者検知フラグを 0 にする．一方，仮歩行者検知センサ集合 $\mathcal{B}_{k,tmp}$ に含まれるいずれかのバイナリセンサの出力が 1 であり歩行者が存在する場合（図 6 の 3 の場合），歩行者検知センサ集合を特定できないため，仮歩行者検知センサ集合を削除する．

3.3　歩行者検知センサ集合を通過した歩行者数の推定処理

次に，歩行者検知センサ集合のセンシング領域に歩行者が進入し，全ての歩行者が退出するまでの間に通過した歩行者数を推定する処理について説明する．提案手法は，出力履歴の差が小さいシミュレーション結果における，出力履歴の差と仮想右方向歩行者数，仮想左方向歩行者数を保持するため，サイズ X のシミュレーション結果管理表を管理する．シミュレーション結果管理表中の出力履歴の差は十分に大きな値で初期化されているものとする．

今，歩行者検知センサ集合 $\mathcal{B}_k$ が $2 \times n$（$1 \leqq n \leqq N$）個のバイナリセンサから構成されるものとする．歩行者検知センサ集合のセンシング領域に初めて歩行者が進入した時刻を t_0 とし，その領域から全ての歩行者が退出するまでの間に L 回バイナリセンサの出力変化があったとする．i 回目（$0 \leqq i \leqq L$）に歩行者検知センサ集合 $\mathcal{B}_k$ の出力が変化した時刻を t_i とする．時刻 t_i における歩行者検知センサ集合 $\mathcal{B}_k$ の出力 $\hat{O}_{k,t_i}$ を，

$$\hat{O}_{k,t_i} = \begin{bmatrix} o_{1,1,t_i} & o_{2,1,t_i} \\ o_{1,2,t_i} & o_{2,2,t_i} \\ \vdots & \vdots \\ o_{1,n,t_i} & o_{2,n,t_i} \end{bmatrix}$$

と表記し，歩行者検知センサ集合 $\mathcal{B}_k$ の出力履歴を $\mathcal{O}_k = \{\hat{O}_{k,t_0}, \hat{O}_{k,t_1}, ..., \hat{O}_{k,t_L}\}$ と表す．

歩行者数推定処理は以下のように動作する．

（1）　サーバ上に $2 \times n$ 個の仮想バイナリセンサから構成される仮想歩行者検知センサ集合 $\mathcal{B}'_k$ を配置したシミュレーションフィールドを生成する．その後，シミュレーションフィールド内において，期間 $t_L - t_0$ の間，歩行者の左方向到着率，右方向到着率，歩行者の移動速度の平均，移動速度の偏差，歩行者の歩幅の平均，歩幅の偏差等に基いて，仮想歩行者の生成と移動を行う．これらの歩行者に関する統計情報は，事前に環境内を測定する等により取得しておくものとする．仮想歩行者の移動によって得られる仮想歩行者検知センサ集合の出力履歴 $\mathcal{O}'_k$，仮想歩行者検知センサ集合のセンシング領域へ進入した仮想右方向歩行者数 n'^r_k，仮想左方向歩行者数 n'^l_k をそれぞれ取得する．ここで，仮想歩行者検知センサ集合のセンシング領域に歩行者が進入した時刻を $t'_0 = t_0$，時刻 t_L までの仮想歩行者検知センサ集合の出力変化の回数を L' 回とする．i' 回目（$0 \leqq i' \leqq L'$）に仮想歩行者検知センサ集合 $\mathcal{B}'_k$ の出力が変化した時刻を $t'_{i'}$ とする．時刻 $t'_{i'}$ における各仮想バイナリセンサ $b'_{x,y}$ の出力を $o'_{x,y,t'_{i'}}$，その際の仮想歩行者検知センサ集合 $\mathcal{B}'_k$ の出力を $\hat{O}'_{k,t'_{i'}}$ とすると，シミュレーションフィールドにおける仮想歩行者検知センサ集合 $\mathcal{B}'_k$ の出力履歴は $\mathcal{O}'_k = \{\hat{O}'_{k,t'_0}, \hat{O}'_{k,t'_1}, ..., \hat{O}'_{k,t'_{L'}}\}$ と表せる．

（2）　歩行者検知センサ集合 $\mathcal{B}_k$ の出力履歴 $\mathcal{O}_k$ とシミュレーションフィールドにおける仮想歩行者検知センサ集合 $\mathcal{B}'_k$ の出力履歴 $\mathcal{O}'_k$ の差 $\Delta(\mathcal{O}_k, \mathcal{O}'_k)$ を次式により求める．

$$\Delta\left(\mathcal{O}_k, \mathcal{O}'_k\right) = \sum_{i=0}^{L+L'-1} \left((T_{i+1} - T_i)\,\delta(T_i)\right) \tag{1}$$

ここで，

$$\delta(T_i) = \sum_{y=1}^{n} \left(\left|o_{1,y,T_i} - o'_{1,y,T_i}\right| + \left|o_{2,y,T_i} - o'_{2,y,T_i}\right|\right) \tag{2}$$

である．ただし，時刻 T_i（$0 \leqq i \leqq L + L' - 1$）は，歩行者検知センサ集合の出力に変化があった時刻 $\{t_0, t_1, ..., t_L\}$ と仮想歩行者検知センサ集合の出力に変化があった時刻 $\{t'_0, t'_1, ..., t'_{L'}\}$ を時系列順に並べた際の i 番目の時刻である．式 (2) は時刻 T_i

における歩行者検知センサ集合の出力と仮想歩行者検知センサ集合の出力のハミング距離に相当する値であり，式 (1) はその値に関して出力時間の長さ分の重み付けを行い，全ての時間の値の総和をとったものである．出力履歴の差 $\Delta(\mathcal{O}_k, \mathcal{O}'_k)$ がシミュレーション結果管理表に含まれる最も大きい出力履歴の差よりも小さければ，シミュレーション結果管理表の最大の出力履歴の差を持つエントリを削除し，新たに，出力履歴の差 $\Delta(\mathcal{O}_k, \mathcal{O}'_k)$ と仮想右方向歩行者数 n'^r_k，仮想左方向歩行者数 n'^l_k を記録する．

（3） シミュレーション結果管理表が A 回連続で更新されなければ，十分な回数のシミュレーションが行われたと判断し処理 (4) へ移る．そうでなければ処理 (1) に戻る．A をシミュレーション終了判定閾値と呼ぶ．

（4） シミュレーション結果管理表に含まれる X 個のシミュレーション結果における出力履歴の差の中央値より小さな出力履歴の差を持ったシミュレーション結果を選ぶ．選ばれたシミュレーション結果それぞれに対して合計仮想歩行者数 $\left(n'^l_k + n'^r_k\right)$ を導出し，中央値となる合計仮想歩行者数を持つシミュレーション結果における仮想左方向歩行者数 n'^l_k と仮想右方向歩行者数 n'^r_k をそれぞれ推定左方向歩行者数 $\hat{n}^l_k$，推定右方向歩行者数 $\hat{n}^r_k$ とする．

4. 性能評価

本章では，提案手法の性能評価結果及び考察を述べる．

4.1 評価条件

本報告では，歩行者が通過する観測領域の幅は 8 [m] とし，歩行者の速度と歩幅は [17] に従い，平均速度 v_m，速度偏差 v_σ，平均歩幅 $s_{l,m}$，歩幅偏差 $s_{l,\sigma}$ から計算する．また，歩隔 $s_w = 12$ [cm]，足の大きさ $f_l = 25$ [cm]，$f_w = 10$ [cm] とした．各歩行者の移動速度 v と歩幅 s_l は上記の平均と偏差の正規分布に従うものとした．左方向歩行者の到着率 λ_l と右方向歩行者の到着率 λ_r は既知，かつ，同一の到着率 λ とし，右方向歩行者（左方向歩行者）は到着率 λ のポアソン過程で観測領域の左側（右側）から領域に進入するものとした．

提案手法の性能を測るための評価指標として，推定した歩行者数と実際の歩行者数の相対誤差を使用する．相対誤差 e は次式で計算される．

$$e = \frac{|\hat{n}^l - n^l| + |\hat{n}^r - n^r|}{n^l + n^r} \tag{3}$$

ここで，n^l，n^r は実際の左方向歩行者数と右方向歩行者数である．相対誤差が小さいほど，推定精度が高いことを表す．

4.2 性能評価結果

まず，提案手法のパラメータであるシミュレーション結果管理表サイズとシミュレーション終了判定閾値を変化させた場合の性能評価を行った．この性能評価では，歩行者検知センサ集合ごとの特性を見るため，歩行者検知センサ集合に初めて歩行者が進入してから，全ての歩行者が退出するまでを 1 回の性能評価とする．$\lambda = 0.5$，センシング距離 $r_x = 0.9$ [m]，$r_y = 1.0$ [m]，センサ数 $N = 8$ と固定し，シミュレーション結果管理表サイズ X とシミュレーション終了判定閾値 A を 10，50，100，500，($X = 2, 5, 10$ のみ $A = 1000$ も評価した）と変化させた．この時の相対誤差の変化を図 7(a)，平均のシミュレーション試行回数を図 7(b) に示す．図中，2000 回の性能評価から取得した母平均の 95 %の信頼区間を合わせて表示している．

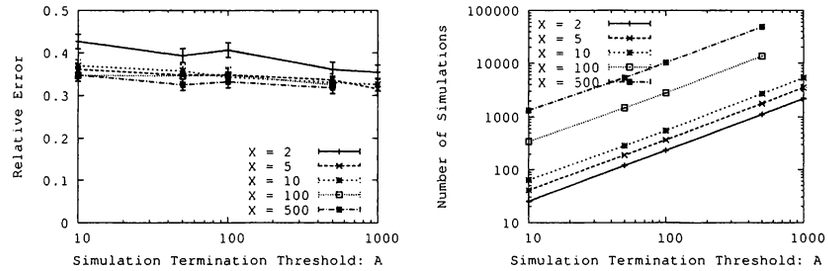
図 7(a) より，シミュレーション結果管理表サイズ X を 2 から 5 へ増加させると相対誤差は減少するが，それ以上増加させても相対誤差が大きく改善されることはないことが確認できる．また，シミュレーション終了判定条件 A が増加するとわずかに相対誤差が減少することがわかる．図 7(b) より，シミュレーション結果管理表サイズ X とシミュレーション終了判定閾値 A が増加すると，シミュレーション試行回数が増加し，特にシミュレーション結果管理表サイズが大きな値であるほど，その増加量が顕著であることがわかる．これらのことから，シミュレーション終了判定閾値 A を増やし，シミュレーション試行回数を増加させると相対誤差が減少するが，数万回のシミュレーション試行を行っても相対誤差が大きく改善されることはないことがわかる．これは，シミュレーション試行回数が 1 万回弱で出力履歴の差が十分に小さいシミュレーション結果が得られているためである．従って以降の性能評価では，平均のシミュレーション試行回数が少なく，相対誤差が小さい $X = 5$，$A = 1000$ の組み合わせを用いる．

次に，センシング距離と歩行者の到着率を変化させた場合の性能評価を行った．以降の性能評価では，複眼センサの状態が観測可能な状態から観測不可能な状態に遷移し歩行者数の推定が開始されてから，複眼センサの状態が再び観測可能な状態に遷移し歩行者数の推定が終了するまでを 1 回の性能評価とする．センシング距離 $r_y = 1.0$ [m]，センサ数 $N = 8$ と固定し，センシング領域 r_x と歩行者の到着率 λ を 0.01，0.1，0.3，0.5 と変化させた．この時の相対誤差の変化を図 7(c) に示す．図中，1000 回の性能評価から取得した 95 %の信頼区間を合わせて表示している．

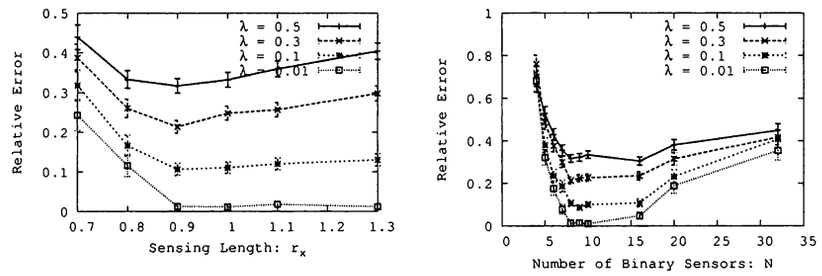
図 7(c) より，歩行者の到着率 λ が大きくなると相対誤差が大きくなることがわかる．これは，歩行者の到着率が増加すると，より多くの歩行者が複眼センサのセンシング領域に進入し，正確な歩行者数の推定が困難になるためである．また，図 7(c) より，センシング距離 r_x を増加させると相対誤差が減少し，その後再び増加することがわかる．歩行者の歩幅がセンシング距離よりも大きくなり左方向（右方向）歩行者が右（左）のバイナリセンサを踏まずに左（右）のバイナリセンサを踏むことがあり，歩行者の移動方向の推定を誤ることが増えるため，センシング距離が小さい場合に相対誤差が大きくなる．また，センシング距離を大きくすると，複眼センサのセンシング領域が大きくなり，歩行者の到着率が 0.3，0.5 と大きい場合に複眼センサが観測不可能な期間に通過する歩行者数が増えるため，相対誤差が大きくなる．

最後に，センサ数を変化させた場合の性能評価を行った．センシング距離を $r_x = 0.9$ [m] と固定し，センサ数 N を 4 から 10，16，20，32 と変化させた．観測領域の幅は固定のため，センサ数の変化に伴いセンシング距離 r_y を 2.0 から 0.25 [m] へと変化させた．この時の相対誤差の変化を図 7(d) に示す．図中，1000 回の性能評価から取得した 95 %の信頼区間を合わせて表示している．

図 7(d) より，センサ数 N が増加すると相対誤差が減少し，その後再び増加することがわかる．センサ数が増加すると，複数の歩行者が複眼センサのセンシング領域へ進入した際に各歩行者が別の歩行者検知センサ集合に検知される可能性が高くなる．そのため，各歩行者検知センサ集合で推定する歩行者数が少なくなり，複眼センサ全体の相対誤差が小さくなる．しかし，センサ数を増加させすぎると，相対誤差は大きくなる．これは，センシング距離 r_y が歩行者の大きさに近くなるにつれ，歩行者がより多くのバイナリセンサを踏むことで複雑な出力履歴が得られ，推定を誤りやすくなるためである．



(a) X と A を変化させた場合の相対誤差　(b) X と A を変化させた場合の平均のシミュレーション試行回数



(c) センシング距離を変化させた場合の相対誤差　(d) センサ数を変化させた場合の相対誤差

図 7　性能評価結果

5. まとめと今後の課題

本報告では，商店街の通路や繁華街の歩道のように複数の歩行者が 2 方向に移動する幅が広い環境において，移動方向別の歩行者数を推定する手法を提案した．提案手法では，複数のバイナリセンサを歩行者の移動方向とその垂直方向の両方の格子状に配置した複眼センサを使用する．歩行者の移動に伴って得られたセンサの出力履歴と，サーバ上で行う歩行者の移動に関する複数回のシミュレーションによって得られる仮想センサの出力履歴を比較し，小さい出力履歴の差を持ったシミュレーション結果の中から最も信頼できるシミュレーションにおける歩行者数を推定結果として出力する．シミュレーションによる評価により，歩行者の移動方向に対するバイナリセンサの大きさは 1 歩で超えられない程度に小さく，歩行者の移動方向の垂直方向に対するバイナリセンサの大きさは歩行者の横幅より大きくすることが有効であることを示した．

今後の課題として，センサ数を歩行者の移動方向に増やしバイナリセンサを格子状に配置した複眼センサでの歩行者数推定手法の提案や，実機実験による提案手法の評価と改良，歩行者が複数方向に移動するような環境で適用できるように歩行者数推定手法の拡張を行いたい．

文　献

[1] R. Dharmaraju, D. A. Noyce, and J. D. Lehman, "An evaluation of technologies for automated detection and classification of pedestrians and bicycles," *Massachusetts Highway Department Report*, 2002.

[2] F. Bu, R. Greene-Roesel, M. C. Diogenes, and D. R. Ragland, "Estimating pedestrian accident exposure: Automated pedestrian counting devices report," *UC berkeley Traffic Safety Center*, Mar. 2007.

[3] R. Greene-Roesel, M. C. Di'ogenes, D. R. Ragland, and L. A. Lindau, "Effectiveness of a commercially available automated pedestrian counting device in urban environments: comparison with manual counts," *TRB 2008 Annual Meeting*, 2008.

[4] A. Leykin and R. Hammoud, "Robust multi-pedestrian tracking in thermal-visible surveillance videos," in *Proceedings of CVPR Workshop 2006*, June 2006.

[5] K. Hashimoto, M. Yoshinomoto, S. Matsueda, K. Morinaka, and N. Yoshiike, "Development of people-counting system with human-information sensor using multi-element pyroelectric infrared array detector," *Sensors and Actuators A: Physical*, no. 58, pp. 165–171, Feb. 1998.

[6] A. Fod, A. Howard, and M. J. Mataric, "Laser-based people tracking," in *Proceedings of IEEE ICRA 2002*, May 2002.

[7] "IRISYS people counter." available at `http://www.irisys.co.uk/people-counting`.

[8] "PCW-2BX03 directional people counter." available at `http://www.sensourceinc.com/`.

[9] "eco counter Pyroelectric Sensor." available at `http://www.eco-compteur.com/Pyroelectric-Sensor.html?wpid=15036`.

[10] "Acoustic slab sensor." available at `http://www.eco-computer.com/`.

[11] B.-R. Son, S.-C. Shin, J.-G. Kim, and Y.-S. Her, "Implementaiton of the real-time people counting system using wireless sensor networks," *Internaitonal Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, vol. 2, no. 3, July 2007.

[12] S.-W. Lee, "A room-level indoor location system for smart houses," in *Proceedings of SeNAmI 2009*, Dec. 2009.

[13] S. Fujii, Y. Taniguti, G. Hasegawa, and H. Nakano, "Monte Carlo-based Bidirectional Pedestrian Counting Method for Compound-Eye Sensor Systems," *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, vol. 4, no. 9, pp. 48–57, Sept. 2013.

[14] "鹿児島市主要商店街歩行者通行量調査結果." available at `http://www.city.kagoshima.lg.jp/_1010/shimin/6keizai/6-3syoutengai/_39507.html`.

[15] "熊本市平成 24 年度商店街通行量調査結果について." available at `http://www.city.kumamoto.kumamoto.jp/content/web/asp/kiji_detail.asp?NW=1&ID=14309&LS=247`.

[16] "Measurement specialties Piezo Film Sensor." available at `http://www.meas-spec.com/piezo-film-sensors.aspx`.

[17] 阿久津邦男, ed., **歩行の科学**, pp. 28,56. 不味堂書店, 1975.