OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	複数のバイナリセンサを用いた複眼センサシステムのためのモンテカルロ法に基づく歩行者数推定手法
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. ASN, 知的環境とセンサネットワーク. 2013, 113(132), p. 183-188
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/71018
rights	copyright©2013 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
ASN2013-81(2013-07)

複数のバイナリセンサを用いた複眼センサシステムのための モンテカルロ法に基づく歩行者数推定手法

藤井　崇渡† 　谷口　義明† 　長谷川　剛† 　中野　博隆† 　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
E-mail: †{f-shuto,y-tanigu,hasegawa,nakano,matsuoka}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし　我々はこれまでに，廊下のように歩行者が 2 方向に移動する屋内環境において，移動方向別の歩行者計数を行うため，歩行者の有無のみを判別可能なバイナリセンサを 2 個組み合わせた複眼センサと，センサからの情報を基に歩行者数推定を行うサーバから構成される複眼センサシステムを提案した．本報告では，歩行者数推定精度の向上のため，3 個以上のバイナリセンサから構成される複眼センサを用いた歩行者数推定手法を提案する．提案手法では，複眼センサを隣接したバイナリセンサのペアとした 2 眼センサの集合として扱い，各 2 眼センサから得られる情報を基にモンテカルロ法に基づく歩行者数推定を行う．それらの結果から最も信頼出来る推定結果を採用する．シミュレーションによる評価の結果，6 個のバイナリセンサを用いることにより，2 個のバイナリセンサを用いる場合と比較して，複数の歩行者が行き交う状況下において推定精度が最大 25 %改善されることが明らかになった．ww
キーワード　歩行者数推定，センサネットワーク，バイナリセンサ，複眼センサシステム，モンテカルロ法

Monte Carlo-based Bi-directional Pedestrian Counting Method for Compound-Eye Sensor Systems composed of Multiple Binary Sensors

Shuto FUJII†, Yoshiaki TANIGUCHI†, Go HASEGAWA†,

Hirotaka NAKANO†, and Morito MATSUOKA†

† Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University,
Yamadaoka 1–5, Suita-shi, Osaka, 565–0871, Japan
E-mail: †{f-shuto,y-tanigu,hasegawa,nakano,matsuoka}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract　To count the number of pedestrians under the situation that a number of pedestrians move bidirectionally such as in a corridor, we proposed a compound-eye sensor system so far. The system is composed of compound-eye sensors that is constructed by two binary sensors and a monitoring server that estimates the number of pedestrians. In this report, we extend the compound-eye sensor to be composed of multiple binary sensors. We propose a method for estimating the number of pedestrians using the extended compound-eye sensor. In the proposed method, the compound-eye sensor is divided into a set of local compound-eye sensors, each having two binary sensors. The number of pedestrians is estimated using a Monte Carlo-based method for each local compound-eye sensor in parallel, and one of the estimation results is selected. Through simulation evaluations, it was shown that the estimation accuracy is improved by up to 25 % compared to a conventional method by using six binary sensors.
Key words　pedestrian counting, sensor network, binary sensor, compound-eye sensor system, Monte Carlo

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，スクランブル交差点や横断歩道等での交通整理，病院や介護施設，工事現場等での安全管理などの様々な分野で，歩行者数の推定に対する需要がある．例えば，時間帯毎の道路の交通量を調査できれば，工事やメンテナンスを行う時間帯を決定できる．また，建物の入退場者数を把握できれば，営業終了後に建物内に人が残っているかどうかを判断でき安全管理に利用できる．スーパーやドラッグストア等では客が頻繁に通過する経路を把握出来れば，その経路上に売りたい商品を多く配置することで店舗の収益向上につながる．手動による歩行者計数は人件費が高く，人通りが

This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.
Copyright ©2013　by　IEICE

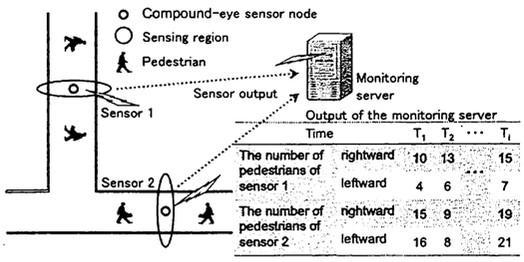


図 1　複眼センサシステム

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，歩行者数の推定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．

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推定する手法を提案した．[13] で対象とするシステムでは，天井に 2 個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．バイナリセンサとしては，焦電型赤外線センサのように単純なパッシブ型バイナリセンサを想定する．歩行者が複眼センサ下を通過することによって得られる複眼センサのセンサ情報は，図 1 に示されるように無線ネットワークを経由して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が行われる．これらのシステム全体を複眼センサシステムと呼ぶ．[13] では，複眼センサから得られる歩行者の有無に関するセンサ情報から複眼センサ下を通過する歩行者数を推定するために，モンテカルロ法に基づいた手法を提案した．具体的には，複眼センサが歩行者を検出している間，モニタリングサーバ上において，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一定回数行う．複眼センサ下に歩行者がいなくなり，複眼センサによる歩行者の検出が終わると，実際の複眼センサの出力履歴とそれぞれのシミュレーション試行における仮想複眼センサの出力履歴を比較し，最も差が小さい出力履歴をもった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．[13] では，提案手法を用いることにより，複数の歩行者が行き交う状況下において既存手法 [11] と比較し推定精度が大幅に改善されることを確認した．しかしながら，2 個のバイナリセンサから得られた歩行者検知の情報のみでは，一定回数のモンテカルロシミュレーションを行なっても複数の歩行者が行き交う状況を再現できず，推定精度が悪化する場合があることがわかった．

そこで本報告では，2 個のバイナリセンサで構成した複眼センサ（2 眼センサ）を，3 個以上のバイナリセンサで構成する複眼センサに拡張することで，複眼センサから得られる歩行者検知の情報量を増加させ，[13] における手法の移動方向別の歩行者数の推定精度を向上させる．複眼センサの拡張に伴い歩行者数を推定する新たな手法を提案する．提案手法では，N 個のバイナリセンサから構成される複眼センサを，隣接した 2 個のバイナリセンサを組み合わせた $(N-1)$ 個の 2 眼センサの集合とみなす．複眼センサが歩行者を検出している間，これら $(N-1)$ 個の 2 眼センサそれぞれにおいて [13] で提案した手法を用いて歩行者数を推定する．複眼センサ下から歩行者が退出し，複眼センサによる歩行者の検出が終わると，歩行者をより少人数の歩行者からなるグループに分割して検出した 2 眼センサにおける推定結果を最も精度が良い推定結果として出力する．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の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. 章で複眼センサシステムを構成するバイナリセンサ，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. 複眼センサシステム

本章では，本報告で対象とする複眼センサ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 システム概要

図 1 のように，屋内環境の所望の位置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複眼センサシステムと呼ぶ．複眼センサは N 個のバイナリセンサから構成され，天井に装着されるものとする．バイナリセンサとしては，自動照明などで広く利用されているパッシブ型赤外線センサを想定する．複眼センサは，無線通信機能を持つ端末に装着されるものとし，複眼センサと端末を合わせたものをセンサ端末と呼ぶ．センサ端末は，複眼センサを構成するいずれかのバイナリセンサの出力が変化した際に，センサ情報を生成し，センサ情報を含むパケットを送信する．センサ情報は各バイナリセンサの出力値と出力が変化した時刻からなる．センサ情報は無線ネットワークを介してモニタリングサーバに収集され，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，簡単のため以降では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，複眼センサシステム中にセンサ端末が 1 台だけある状況を扱う．

2.2 バイナリセンサモデル

本報告で対象とするバイナリセンサのセンシング領域は，図 2 のような長方形の領域とする．このような長方形のセンシング領域は，例えば，赤外線センサのフレネルレンズ部を直線状に露出するよう工夫することで実現できる．センサの位置から左右のセンシング領域の端までの距離をセンシング距離と呼ぶ．歩行者がバイナリセンサのセンシング領域に進入する際と退出する際のセンシング距離は，歩行者毎に異なる．これは，バイナリセンサのセンシング領域周縁部での歩行者の検出は，歩行者の高さや形状等により確率的な挙動を示す [14] ことと，焦電型赤外線センサでは，構造的な要因によりセンサの出力が 1 から 0 に変化する際に遅延が発生することによる．具体的には，バイナリセンサのセンシング領域に歩行者が進入する際のセンシング距離 r_{in} は $r_{min} \leqq r_{in} \leqq r_{max}$ の範囲でランダムに決定され，退出する際のセンシング距離 r_{out} は $r_{min} + r_{off} \leqq r_{out} \leqq r_{max} + r_{off}$ の範囲でランダムに決定さ

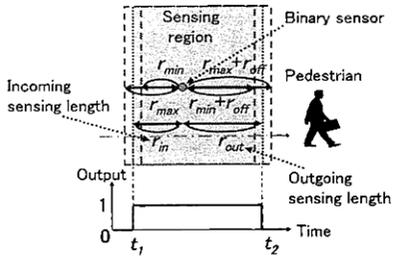


図 2　バイナリセンサのセンシングモデル

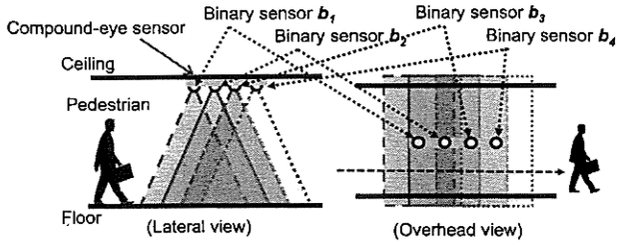


図 3　複眼センサとその設置環境

れる．ここで，r_{max} を最大センシング距離，r_{min} を最小センシング距離と呼ぶ．r_{off} は，バイナリセンサの出力が 1 から 0 に変化する際の遅延時間の間に歩行者が移動する距離に相当し，センサ遅延距離と呼ぶ．バイナリセンサは，自身のセンシング領域内に歩行者が存在すれば 1 を，存在しなければ 0 を出力する．本報告では簡単のため，バイナリセンサの誤検出は考慮しない．

2.3　複眼センサモデル

次に，複眼センサとそのセンシングモデルについて述べる．本報告では，図 3 に示されるように，N 個のバイナリセンサ b_i $(1 \leq i \leq N)$ をそれぞれ距離 d だけ離して設置することにより複眼センサを構成するものとする．各バイナリセンサ間の距離 d をセンサ間距離と呼ぶ．これらのバイナリセンサは，観測領域の中央に直線上に配置される．図 3 は，4 つのバイナリセンサ b_1，b_2，b_3，b_4 から構成される複眼センサの例を示している．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．バイナリセンサ b_1 から b_N に向かう方向を右方向，その逆を左方向とする．時刻 t のバイナリセンサ b_i の出力を $o_t^i \in \{0,1\}$ と表記し，時刻 t の複眼センサの出力を $[o_t^1, o_t^2, ..., o_t^N]$ と表記する．

バイナリセンサはセンシング領域内の歩行者の有無のみを検知するため，複眼センサの出力から歩行者数が確定するのは，複眼センサの出力が $[0, ..., 0]$ 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．複眼センサの出力が $[0, ..., 0]$ でない場合は歩行者が 1 人以上存在することはわかるが，歩行者数まではわからない．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．歩行者が複眼センサ下を通過すると，複眼センサの状態は観測可能な状態と観測不可能な状態間を遷移する．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．

2.4　歩行者の移動モデル

歩行者は右側へ移動する歩行者（右方向歩行者）と左側へ移動する歩行者（左方向歩行者）に分けられるものとする．右方向歩行者は，到着率 λ_r（右方向到着率）のポアソン過程で観測領域の左側から領域に進入する．左方向歩行者は，到着率 λ_l（左方向到着率）のポアソン過程で観測領域の左側から領域に進入する．歩行者の移動速度は平均 v_m，標準偏差 v_σ の正規分布に従うものとする．観測領域に進入後，歩行者は等速直線運動により移動するものとする．

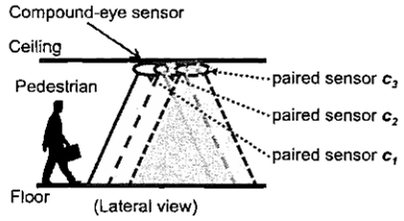


図 4　3 つの 2 眼センサ

3.　モンテカルロ法に基づく歩行者数推定手法

本章では，複眼センサが観測不可能な期間の歩行者数を推定するためのモンテカルロ法に基づく歩行者数推定手法を提案する．提案手法では，複眼センサを隣接した 2 個のバイナリセンサを組み合わせた複眼センサ（2 眼センサ）の集合として扱い，2 眼センサ毎に並列に歩行者数の推定を行う．提案手法は，複眼センサのセンシング領域を通過した歩行者数の推定結果として各 2 眼センサにおける歩行者数の推定結果のうちからひとつを選ぶ処理と，各 2 眼センサのセンシング領域を通過する歩行者数を推定する処理から構成される．

3.1　複眼センサ全体における歩行者数推定

本節では，まず，複眼センサ全体から歩行者数を推定する処理について説明する．

3.1.1　概　　要

提案手法では，複眼センサを隣接した 2 個のバイナリセンサ b_k，b_{k+1} を組み合わせた 2 眼センサ c_k $(1 \leq k \leq N-1)$ の集合として扱う．例えば，図 3 のように 4 つのバイナリセンサから構成される複眼センサは，図 4 のように 3 つの 2 眼センサ c_1，c_2，c_3 から構成されるとみなす．

モニタリングサーバは歩行者を検知したという情報を含んだパケットを受信，すなわち，複眼センサが観測不可能な状態に遷移すると，2 眼センサ毎に並列に歩行者数の推定を開始する．各 2 眼センサの観測不可能な期間における歩行者数推定には，既存手法 [13] を利用する．ここで，歩行者毎に移動速度が異なる場合，複眼センサが観測不可能な期間に 2 眼センサが観測可能な状態と観測不可能な状態を複数回遷移することにより，2 眼センサにおける歩行者数推定は複数回行われることがある．この 2 眼センサ毎の歩行者数推定の回数を歩行者数推定回数と定義する．歩行者推定回数は 2 眼センサ毎に異なる．モニタリングサーバは全ての歩行者が複眼センサのセンシング領域から退出したという情報を含んだパケットを受信，すなわち，複眼センサが観測可能な状態に遷移すると，歩行者数推定回数が最も多い 2 眼センサの推定歩行者数を推定結果として選択する．このようにする理由としては，[13] において，観測不可能な期間が短く，より少人数のグループからなる歩行者に対する推定であるほど 2 眼センサにおける歩行者数推定手法の精度が高いという結果が得られているためである．

図 5 に，提案手法の動作例を示す．図 5 中，実線の円が観測可能な状態を，破線の円が観測不可能な状態を示す．2 眼センサ c_1，c_2，c_3 の状態遷移を，複眼センサの状態遷移の下に示す．複眼センサの状態を示す円の内部には，時刻 t の複眼セン

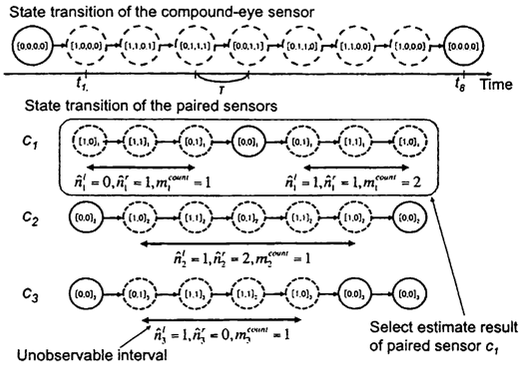


図 5　提案手法の動作例

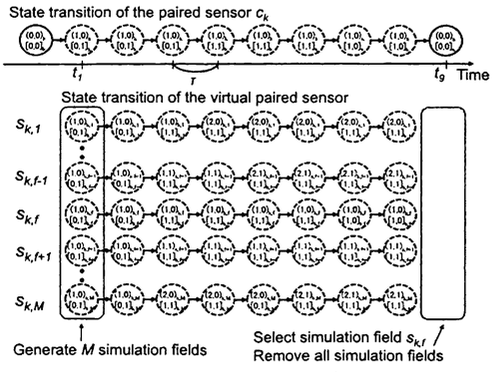


図 6　2 眼センサを使用したモンテカルロシミュレーションの動作例

サの出力 $[o_t^1, ..., o_t^N]$ を，2 眼センサの状態を示す円の内部には，時刻 t の 2 眼センサ c_k の出力 $[o_t^k, o_t^{k+1}]_k$ を表記する．2 眼センサが歩行者数推定を行う観測不可能な期間を，状態の下に矢印で示す．この例では，2 眼センサ c_1 における歩行者数推定回数が最も多いため，2 眼センサ c_1 の歩行者数推定結果が複眼センサの歩行者数推定結果として選択される．

3.1.2 詳　　細

複眼センサにおける歩行者数推定手法の詳細を説明する．モニタリングサーバは一定の間隔 τ 毎に複眼センサの出力を確認する．動作間隔 τ の下限はバイナリセンサのサンプリング間隔やモニタリングサーバの性能等により決まる．複眼センサシステムによる歩行者数推定を開始してから i 番目の時刻を t_i と表記する．モニタリングサーバは，2 眼センサ c_k 毎に累計の推定右方向歩行者数 $\hat{n}_k^r$ と累計の推定左方向歩行者数 $\hat{n}_k^l$，歩行者数推定回数 m_k^{count} を管理する．モニタリングサーバは，時刻 t_{i-1} における複眼センサの出力 $[o_{i-1}^1, o_{i-1}^2, ..., o_{i-1}^N]$ と，時刻 t_i における複眼センサの出力 $[o_i^1, o_i^2, ..., o_i^N]$ に基づいて以下のように動作する．

- 複眼センサが観測可能な状態間で遷移した場合，つまり，複眼センサの出力が $[0, 0, ..., 0]$ から変化しなかった場合，何も行わない．
- 複眼センサが観測可能な状態から観測不可能な状態へ遷移した場合，つまり，複眼センサの出力が $[0, 0, ..., 0]$ から変化した場合，2 眼センサ c_k 毎に累計の推定右方向歩行者数 $\hat{n}_k^r$，累計の推定左方向歩行者数 $\hat{n}_k^l$，歩行者数推定回数 m_k^{count} を 0 で初期化する．
- 2 眼センサ c_k が観測可能な状態から観測不可能な状態へ遷移した場合，つまり，2 眼センサ c_k の出力が $[0, 0]_k$ から変化した場合，既存手法を用いて各 2 眼センサ c_k における歩行者数推定処理を開始する．
- 複眼センサが観測不可能な状態間で遷移した場合，つまり，複眼センサの出力が $[0, 0, ..., 0]$ 以外の出力で変化した場合，各 2 眼センサ c_k における歩行者数推定処理を続ける．
- 2 眼センサ c_k が観測不可能な状態から観測可能な状態へ遷移した場合，つまり，2 眼センサ c_k の出力が $[0, 0]_k$ へと変化した場合，2 眼センサ c_k における歩行者数推定処理を終了し，推定右方向歩行者数 $\hat{n}_{k,f}^r$ と推定左方向歩行者数 $\hat{n}_{k,f}^l$ を取得する．その後，推定右方向歩行者数 $\hat{n}_{k,f}^r$ と推定左方向歩行者数 $\hat{n}_{k,f}^l$ を，それぞれ累計の推定右方向歩行者数 $\hat{n}_k^r$ と累計の推定左歩行者数 $\hat{n}_k^l$ に加算する．そして，歩行者数推定回数 m_k^{count} を 1 増加する．
- 複眼センサが観測不可能な状態から観測可能な状態へ遷移した場合，つまり，複眼センサの出力が $[0, 0, .., 0]$ へと変化した場合，歩行者数推定回数 $m_{k'}^{count}$ が最も多い 2 眼センサ $c_{k'}$ を選択する．2 眼センサが複数選択された場合には，その中から累計の推定歩行者数 $\hat{n}_{k'}^r + \hat{n}_{k'}^l$ が中央値となる 2 眼センサ $c_{k'}$ を選択する．その後，累計の推定右方向歩行者数 $\hat{n}_{k'}^r$ を推定右方向歩行者数 $\hat{n}^r$，累計の推定左方向歩行者数 $\hat{n}_{k'}^l$ を推定左方向歩行者数 $\hat{n}^l$ として出力する．

3.2 2 眼センサにおける歩行者数推定手法の概要

本節では各 2 眼センサのセンシング領域を通過する歩行者数を推定する処理の概要を述べる．詳細は [13] を参照されたい．

各 2 眼センサにおいては，2 眼センサ c_k が観測不可能な期間の状態遷移に関して M 回のモンテカルロシミュレーションを行い，その中からひとつの試行を選ぶことにより 2 眼センサ c_k のセンシング領域を通過した歩行者数を推定する．図 6 に 2 眼センサを使用したモンテカルロシミュレーションの例を示す．図 6 では，実線の円が観測可能な状態，破線の円が観測不可能な状態を示している．円の内部に，2 眼センサ c_k における左方向歩行者数 n_k^l と右方向歩行者数 n_k^r を $(n_k^l, n_k^r)_k$ と表記している．また，その下に 2 眼センサ c_k の出力を表記している．モニタリングサーバは，2 眼センサ c_k 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た際に，サーバ上で M 個のシミュレーションフィールドを生成する．それぞれのシミュレーションフィールド上で，仮想的に 2 眼センサの設置，歩行者の生成及び移動などを行うことで，それぞれのシミュレーション試行における仮想 2 眼センサの出力履歴及び移動方向別の仮想歩行者数を得る．2 眼センサ c_k の状態が観測不可能な状態から再び観測可能な状態に遷移した際に，シミュレーションフィールド上の仮想 2 眼センサの出力履歴と 2 眼センサ c_k の出力履歴とを比較し，最も差の小さい出力履歴をもったシミュレーション試行における移動方向別の仮想歩行者数を推定結果とする．

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，提案手法の基本特性を評価するため，バイナリセンサの最大センシング距離 r_{max}，最小センシング距離 r_{min}，センサ遅延距離 r_{off}，センサ間距離 d，センサ数 N，歩行者の平均速度 v_m，速度の偏差 v_σ は既知であるとした．また，左方向到着率 λ_l と右方向到着率 λ_r は既知，かつ，同一の到着率 λ とした．バイナリセンサとしては，理想的なバイナリセンサと確率的なバイナリセンサの 2 種類を想定する．理想的なバイナリセンサは最大センシング距離 r_{max} と最小センシング距離 r_{min} が共に 0.5 [m]，センサ遅延距離 r_{off} が 0 [m] であるとした．確率的なバイナリセンサは最大センシング距離 r_{max}

が 0.5 [m]，最小センシング距離 r_{min} が 0.4 [m]，センサ遅延距離 r_{off} が 0.1 [m] であるとした．複眼センサのセンサ間距離 d は 0.1 [m] とした．歩行者の速度は平均 v_m=1.39 [m/s]，偏差 $v_\sigma = 0.21$ の正規分布に従うものとした [15]．動作間隔 τ としては 0.01 [s] を用いた．また，2 眼センサにおける歩行者数推定手法で行うモンテカルロシミュレーションの回数 M は，2000 回とした．

本報告では，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．提案手法の性能を測るための評価指標としては，相対誤差と遅延時間の 2 つを使用する．相対誤差 e_{rel} は次式で計算される．

$$e_{rel} = \frac{|\hat{n}^l - n^l| + |\hat{n}^r - n^r|}{n^l + n^r} \quad (1)$$

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．遅延時間は，1 回の性能評価に要する時間であり，複眼センサが観測不可能な期間と等しい．遅延時間が短いほど推定結果を迅速に出力できリアルタイム性が高いとみなせる．

4.2 センサ数に対する性能評価

まず，複眼センサのセンサ数を変化させた場合の性能評価を行った．理想的なバイナリセンサを使用し，センサ数 N および到着率 λ を変化させた場合の相対誤差の変化を図 7(a) に示す．図中，10000 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，到着率 λ によらず，センサ数 N が増加すると相対誤差が減少することがわかる．例えば，到着率 λ が 0.5 の混雑状況下の場合，センサ数が 2 個の場合と比較して，センサ数が 3 個の場合に約 21 %，センサ数が 6 個の場合に約 25 %提案手法の相対誤差が減少し，以降，相対誤差は収束している．一方，到着率 λ が 0.1 の場合，センサ数が 8 個の場合に相対誤差は約 40 %減少し，以降，相対誤差は収束している．本評価においては，歩行者毎に移動速度が異なり，ある歩行者グループが 2 眼センサのセンシング領域に入るタイミングのばらつきは，2 眼センサ毎に異なる．センサ数が増えるほど，複眼センサのセンシング領域および複眼センサ中の 2 眼センサの数が増えるため，より少人数の歩行者グループに分割して歩行者推定を行う可能性が高くなる．2 眼センサによる歩行者数推定では，より少人数の歩行者を推定する方が推定精度は高い [13]．そのため，センサ数が増えると相対誤差が減少する．また，評価指標として複眼センサが観測不可能な期間の歩行者数の相対誤差を使用していることもセンサ数と相対誤差の関係に影響を与えていると考えられる．2 眼センサの複数回にわたる推定歩行者数の合計値を推定結果としているため，2 眼センサにおけるそれぞれの推定に対する誤差が丸めこまれている可能性がある．この点に関するさらなる調査については今後の課題とする．

提案手法において，センサ数を増やすことにより，歩行者をより少人数の歩行者グループに分割することを確認するため，推定結果として選択された 2 眼センサにおける歩行者数推定回数の合計値をシミュレーションに要した時間で割ることにより求めた単位時間当たりの歩行者数推定回数，および，推定結果として選択された 2 眼センサにおいて，その 2 眼センサが観測不可能な期間に通過した歩行者数の平均値を調査した．それぞれを図 7(b) および図 7(c) に示す．図 7(b) に示されるように，センサ数が増えるほど，選択された 2 眼センサにおける歩行者数推定回数が大きくなることが確認できる．また，図 7(c) より，センサ数が増えるほど，歩行者をより少人数の歩行者グループに分割することが確認できる．

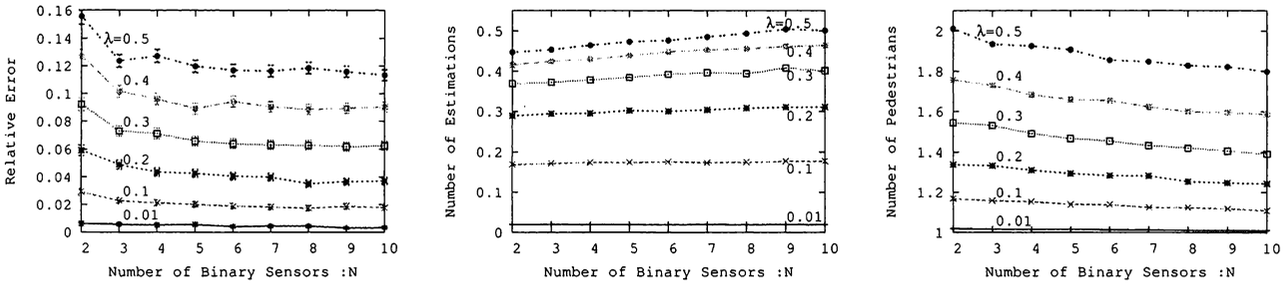
上記の性能評価における遅延時間の変化を図 7(d) に示す．図 7(d) より，遅延時間はセンサ数 N が増えると増加することがわかる．これはセンサ数が増え複眼センサのセンシング領域が大きくなることにより，歩行者がセンシング領域を通過する時間が伸びると共に，歩行者が同時に複眼センサのセンシング領域に存在する可能性が高くなるためである．到着率 λ が高くなる場合においても，歩行者が同時に複眼センサのセンシング領域に存在する可能性が高くなり，観測不可能な期間，すなわち，遅延時間が増加する．例えば，到着率 λ が 0.5 の場合，センサ数が 6 個より多い領域では相対誤差は収束するが遅延時間は増加する．そのため，この場合はセンサ数を 6 より大きな値に設定すべきではないといえる．

確率的なバイナリセンサを使用し，同様の性能評価を行った際の相対誤差の変化を図 7(e) に示す．図 7(e) より，確率的なバイナリセンサを使用する場合においても，理想的なバイナリセンサを使用する場合と同様に，センサ数が増加すると相対誤差が減少することがわかる．また，図 7(a) と図 7(e) を比較すると，確率的なバイナリセンサを使用する場合の相対誤差は理想的なバイナリセンサを使用する場合と比較して大きい．確率的なバイナリセンサを使用する場合，観測領域においてもシミュレーションフィールドにおいてもバイナリセンサのセンシング領域周縁部では歩行者が確率的に検出されるため，より複雑な状況での推定となり，相対誤差が大きくなる．

4.3 バイナリセンサの誤差を考慮した場合の性能評価

前節ではバイナリセンサのセンシング領域が既知であるとして歩行者数推定を行った．しかしながら，バイナリセンサのセンシング領域は設置位置などの設置環境に影響を受けると考えられるため，事前にバイナリセンサの正確なセンシング領域が得られるとは限らない．そこで，観測領域中のバイナリセンサのセンシング領域と，提案手法においてモンテカルロシミュレーションを行うための仮想バイナリセンサのセンシング領域が異なる場合の提案手法の評価を行った．具体的には，観測領域におけるバイナリセンサの最大センシング距離 r_{max} を 0.5 [m] とし，最小センシング距離 r_{min} を 0.25〜0.45 [m] と変化させることにより，歩行者が確率的に検知される領域の大きさを変化させた．このとき，提案手法におけるモンテカルロシミュレーションで用いる仮想バイナリセンサの最大センシング距離は 0.5 [m]，最小センシング距離は 0.4 [m] とした．なお，複眼センサのセンサ数 N は 3 個とした．

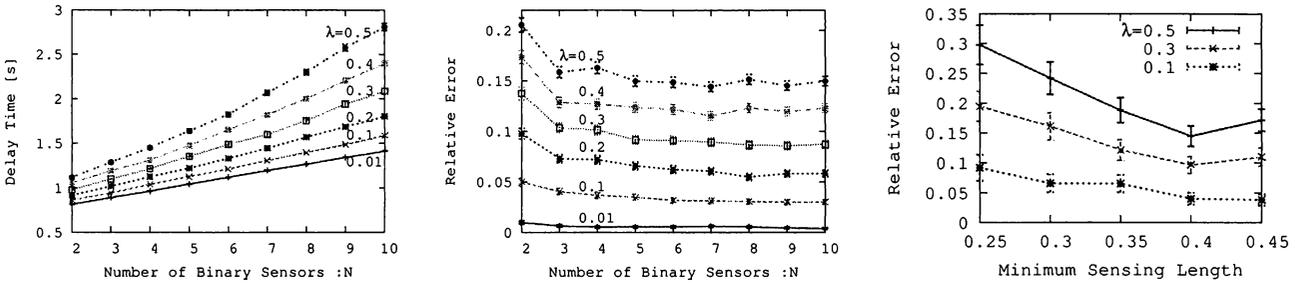
最小センシング距離 r_{min} および到着率 λ を変化させた場合の相対誤差の変化を図 7(f) に示す．図中，1000 回の性能評価から取得した母平均の 95 %の信頼区間を合わせて表示している．図 7(f) より，最小センシング距離 r_{min} が仮想バイナリセンサの設定値と同じである 0.4 の場合が最も相対誤差が小さいことがわかる．最小センシング距離が 0.4 よりも小さい場合は，観測領域において歩行者が確率的に検知される領域が，仮想バイナリセンサにおいて歩行者が確率的に検知される領域より大きくなる．そのため，観測領域における歩行者の移動とそれによる複眼センサの出力がモンテカルロシミュレーションで再現できない可能性が高くなり，相対誤差が大きくなる．一方，最小センシング距離が仮想バイナリセンサの設定値である 0.4 より大きい場合も相対誤差が大きくなるが，最小センシング距離が 0.4 よりも小さい場合と比べると相対誤差の増加の割合は小さい．これは，観測領域において歩行者が確率的に検知される領域が，仮想バイナリセンサにおいて歩行者が確率的に検知される領域より小さく，観測領域における歩行者の移動とそれに



(a) 理想的なバイナリセンサを使用した場合の相対誤差

(b) 理想的なバイナリセンサを使用した場合の単位時間あたりの歩行者数推定回数

(c) 理想的なバイナリセンサを使用した場合の 2 眼センサ下を通過する歩行者数



(d) 理想的なバイナリセンサを使用した場合の遅延時間

(e) 確率的なバイナリセンサを使用した場合の相対誤差

(f) バイナリセンサの誤差を考慮した場合の相対誤差

図 7　性能評価結果

よる複眼センサの出力がモンテカルロシミュレーションで再現可能であるためである．特に到着率 λ が 0.1 の場合は、歩行者数が少なく歩行者数の推定を行いやすいため，最小センシング距離が 0.4 の場合と 0.45 の場合でほぼ同じ相対誤差が得られている．

5. まとめと今後の課題

本報告では，複数のバイナリセンサのセンシング領域が一部重なるように配置した複眼センサから得られるセンサ情報を基に，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，複眼センサを 2 眼センサの集合として扱い，各 2 眼センサ毎に既存手法を用いて並列に歩行者数を推定する．それらの推定結果の中から歩行者をより少人数の歩行者グループに分解して検知した 2 眼センサにおける推定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，複眼センサのパラメータや，歩行者の到着率に対する提案手法の推定精度の基本特性を調査した．また，既存手法との性能比較を行い，複数の歩行者が行き交う状況下で推定精度が最大で 25 %改善されることを確認した．

今後の課題として，実機実験による提案手法の評価，改良や，歩行者が複数方向に移動するような環境下での歩行者数推定手法の提案を行いたい．

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*, 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, 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 bi-directional pedestrian counting with compound-eye sensor," in *Proceedings of ICCSII 2012*, pp. 1–6, Dec. 2012.

[14] N. Shrivastava, R. Mudumbai, U. Madhow, and S. Suri, "Target tracking with binary proximity sensors: Fundamental limits, minimal descriptions, and algorithms," in *Proceedings of SenSys 2006*, pp. 251–264, Nov. 2006.

[15] 日本建築学会, ed., **建築設計資料集成-人間**, p. 59. 丸善, 2003.