情報処理学会論文誌 **Vol.60 No.3 934–944 (Mar. 2019)**

推薦論文

測域センサを利用した高精度な路線バス乗降計測システム

山田 遊馬[1,a)] 廣森 聡仁[1,b)] 山口 弘純[1,c)] 東野 輝夫[1,d)]

受付日 2018年6月7日, 採録日 2018年12月4日

概要：地域交通の要である路線バスにおいて，乗降者数や乗降に要する時間などの乗降情報を把握することは，地域公共交通の利用状況を正しく理解し，それらに基づく改善に貢献するものである．しかし，赤外線ビームなどを用いた既存の乗客カウンタでは混雑時などにおける正確な人数計測が難しいという課題がある．また，乗降者数や乗客トリップ（乗降停留所）の把握には交通系 IC カードなどの情報が有効であるものの，乗降時間の計測はできず，また定期券や特別パスなどの乗客には対応できない．本研究では，測域センサを用いて路線バスの乗降者数や乗降に要する時間を正確に計測するシステムを提案する．測域センサは広範囲にわたり物体までの距離データ（点群）を出力するセンサであり，提案システムはそれらの点群からリアルタイムに人体を識別しトラッキングを行う．一般に測域センサは大量の点群を生成するため，高精度な計算機による処理が必要となるが，提案手法では近接する点群データを集約して人体位置を大まかに予測することで計算量削減を図っており，安価なシングルボードコンピュータでもリアルタイム動作する軽量なアルゴリズムを実現し，小型省電力化に寄与している．大阪大学のキャンパス間を運行する路線バスに本システムを設置する実証実験を行い，3 日間にわたる計測を行った結果，乗車人数推定では誤差率 5.3%（平均絶対誤差 0.94 人），降車人数推定では誤差率 7.5%（平均絶対誤差 1.9 人）と十分高精度な推定精度を達成できた．また，1 フレームあたりの平均処理時間は Raspberry Pi 3 Model B で 3.4 ms であり，安価なコンピュータでもリアルタイム計測が可能であることが示された．

キーワード：測域センサ，路線バス，通行カウンタ，リアルタイム処理

Development of Bus Passenger Counter Using LiDAR Sensors

Yuma Yamada[1,a)] Akihito Hiromori[1,b)] Hirozumi Yamaguchi[1,c)] Teruo Higashino[1,d)]

Received: June 7, 2018, Accepted: December 4, 2018

Abstract: Counting the passengers and recording their getting-on/off time is essential for regional bus operators to discontinue lines without sufficient utilization and design/provide more convenient and effective lines for many citizens. However, it is usually difficult for infrared beam-based low-cost people counters to accurately count them in crowded situations. Although the IC card utilization logs are often useful to obtain such information, there still remain significant issues that those passengers using the commuter passes cannot be counted and the bus operation logs cannot be obtained. In this paper, we propose a system to obtain the number of passengers as well as the arrival and departure of buses at/from each bus stop using LiDAR sensors, which can output distance data (2D point cloud) from themselves to the surrounding objects. The proposed system identifies each human body in the scan range from a point cloud at each moment to track the target. We design a lightweight algorithm, which deals with a large number of points generated by the LiDAR sensor in real-time, running on an inexpensive single board computer. Our method reduces the computational overhead incurred by processing such a large amount points by roughly predicting the human body position via aggregation of the neighboring point groups. We conducted experiments with a bus running between two campuses of our university and achieved 5.3% or lower error (the average absolute error was 0.94%) for coming passengers and 7.5% (the average was 1.9%) for leaving ones. The average processing time per frame was 3.4 ms in Raspberry Pi 3 Model B. This has shown the capability of our algorithm for real-time measurement.

Keywords: LiDAR sensor, route bus, passenger counter, real-time operation

© 2019 Information Processing Society of Japan

1. はじめに

鉄道や路線バスなど地域交通による人の行動把握は，交通最適化による地域活性化や動線効率化，災害シミュレーションなど，より安全で豊かな社会を実現するうえで重要である．特に，大都市だけでなく地方都市や郊外・過疎地域など，あらゆる地域において公共交通の主軸である路線バスの利用状況把握は，地域公共交通の利用状況の理解と正しい改善プロセス実現のためにはきわめて重要である．特に，何名が乗降したかの乗降数カウントは，乗客数を正確に把握できていない交通事業者にとって貴重なデータとなる．加えて，たとえば混雑路線で多数の乗客が一度に降車し停留所での停車時間が増大したり，多数の観光客が現金利用や支払い方法で戸惑い，1 人あたりの降車時間が増加したりする現象などは，乗降に要する時間を計測し解析することで把握できる．そういったデータはスムーズな運行が実現できているかの指標となり，それに基づき事業者が改善を図るための基礎データとなりうる．さらに，リアルタイムに車両ごとの乗車人数を把握できれば，地震などの突発的な災害発生時に即座に車両の乗車人数を把握し，避難誘導計画や車両閉じ込め時に救助隊の救出計画などに役立てられる．それだけではなく，イベントなどが開催される場合にはリアルタイムに乗降者数を確認しつつ臨時便の本数の決定に役立てることができる．

主要都市においては，人々の交通機関の利用実態を把握するため，約 10 年に 1 度の頻度でパーソントリップ調査（PT 調査）[1] が実施されているものの，PT 調査は人手に頼っているために人的コストが高く，時間帯や曜日，季節に応じて時々刻々と変化する人々の行動を把握することが困難である．また，地方都市では PT 調査そのものが実施されない現状がある．一方，交通系 IC カードの利用履歴を用いることで，トレース（各乗客の乗降停留所）を含んだバストリップ調査を行うことも不可能ではない．しかし特に赤字路線をかかえる地域交通においては経営上の理由により IC カードを導入していないことも多く，導入していても一部路線に限られる場合も少なくない．また，IC カードを所持していない乗客の計測は不可能である．IC カードのほかに乗車時に整理券を取得し，降車時に回収することで乗降人数の把握は可能であるが，整理券を取得し忘れた際に計測ができず，整理券取得の徹底が課題である．さらに，リアルタイム性がないため上述した突発的な災害発生時やイベントの開催などに対応できないといった課題もあげられる．

バスにおける乗降計測のため．赤外線センサを用いたシステムが開発されている [2]．赤外線センサを 2 台並べて用い，それらの通過検知時刻の差を利用することで，乗車・降車別の乗降数カウントを実現する．しかし，複数人が同時にセンサを通過する場合は正確に計測できず，また乗降に要する時間も計測できない．また，バスの乗降口付近の天井に RGB カメラを設置し，画像処理をすることで乗降者を検出する手法やシステムも開発されている [3]．そういったシステムではセンサ視野における乗客同士の重なりによるオクルージョンを回避でき，より精度の高い乗降客検出を実現するが，天井設置や（一般に高負荷である）画像解析の必要性といった点でシステム設置や運用にかかるコストが無視できない．また，安全監視以外の目的で画像を取得することはプライバシ侵害のリスクがあるため，容易には導入できないというデメリットもある．

本研究では，導入に関する労力やコストの障壁を低減させ高精度な検出を実現するため，測域センサ（LRS; Laser Range Scanner）の検出データを Raspberry Pi のようなシングルボードコンピュータでリアルタイム処理する，軽量かつ高精度な路線バス乗降計測システムの提案する．具体的には，乗降検出精度は PT 調査の担保精度である ±20%，1 スキャンあたりの処理時間は LRS の走査時間である 100 ms 以内を目標とする．測域センサは周囲の物体との距離を広範囲で正確に把握することができるセンサであり，北陽電気株式会社製の測域センサ（URG-04LX-UG01）では，検出保証距離 5.6 m，走査角度 240 度，測距精度 ±30 mm，走査時間 100 ms/scan と，広範囲を高速かつ正確にスキャンできる．消費電力も最大 2.5 W と非常に省電力である．また，測域センサの計測データはセンサから見た方位角と距離で表させる計測対象の位置情報のみであり，人々のプライバシを侵害する恐れが少ないといった利点もある．提案手法は，システムを適切な箇所に設置し，扉を開いた状態（開扉状態）および扉を閉じた状態（閉扉状態）の背景データを取得するだけでセンサ補正が実施でき，乗降計測時には背景差分法を用いて路線バスの扉の開閉を自動で検知する．開扉検知後，背景差分法を用いて物体表面に相当する点群を抽出するとともに，その点群から人体表面に相当する点群を検出する．それに基づき各乗降客の点群を追跡し，扉通過を検知することで乗降者数の計測を実現している．扉の開閉を自動で検知するため，各停留所で乗降者に要した時間と乗降者数が同時に計測でき，各停留所の到着時刻や停車時間も把握できるため，路線バスの運行計画にも利用することができる．

[1] 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Suita, Osaka 565–0871, Japan
[a] yuma-ymd@ist.osaka-u.ac.jp
[b] hiromori@ist.osaka-u.ac.jp
[c] h-yamagu@ist.osaka-u.ac.jp
[d] higashino@ist.osaka-u.ac.jp

本論文の内容は 2017 年 10 月の第 25 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ（DPSWS2017）で報告され，同プログラム委員長により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である．

© 2019 Information Processing Society of Japan

提案手法の有効性を評価するために，大阪大学の複数のキャンパス間で運行されている学内連絡バスに本システムを導入し，性能評価を行った．路線バスが停車し，扉が開いてから閉じるまでを1ピリオドとして，1ピリオドごとの乗降者人数の推定値と真値を比較した結果，乗車人数推定では誤差率5.3%（平均絶対誤差0.94人），降車人数推定では誤差率7.5%（平均絶対誤差1.9人）を達成し，PT調査の担保精度20%と比較して高精度に乗降計測が行えることが示せた．

2. 関連研究

屋内外の人の通行を把握する取り組みが多数実施されており，様々なセンサが活用されている [4], [5], [6], [7]．代表的な取り組みとして，赤外線センサを用いた取り組み，カメラを用いた取り組み，測域センサを用いた取り組みがあげられ，それらについて以下で紹介する．

2.1 赤外線センサを用いた通行者カウント

安価な赤外線センサを用いて，通行者を計測する手法がいくつか提案されている [8], [9]．文献 [8] は，空港内の代表的なボトルネックである保安検査場における乗客数と通過時間の計測を，赤外線センサとマット型の圧力センサを組み合わせた安価なシステムで実現できることを示している．また，文献 [9] では，人が通過する専用のゲートに集電型赤外線センサを設置し，そのゲートを通行する人の数と方向を計測する手法が提案されている．複数人が間隔30 cmの近接縦列で通行する評価実験では，ほぼ100%の精度で人の通行を検知ができること，講義室への入退出する人を対象とした評価実験では，88%以上の精度で入退出する人の数を計測できることを示している．また，赤外線センサを用いた通過人数計測システムが製品化されている [2]．この製品では，壁面に2台の赤外線センサを設置し，人が通過した際に生じるセンサ検知の差分から，人が通行する方向を判断している．これらの手法は，小型の赤外線センサを利用しており，様々な場所に簡単に設置できる一方，赤外線センサの検知範囲が限定されているため，ある程度広い領域での計測は適しておらず，また，個々の人の通行を区別することはできないため，バスへの乗降を計測することは困難である．たとえば，近年は幅の広い乗降口を持つノンステップバスが広く普及しており，乗客の1人1人が列をなして乗降するような状況だけでなく，複数人が並んで乗降する場合も少なくない．また，整理券の取得やICカードの接触のために，乗降口付近にしばらく立ち止まる状況も多く，これらの挙動を2台のセンサだけで検知することは困難であり，センサ間の通行検知時刻の差に基づく通行者検知は必ずしも有効な手法ではない．

2.2 カメラを用いた通行者カウント

通行者の計測のために，RGBカメラやステレオカメラを用いた手法も提案されている [3], [10]．これらの手法では，対象領域における人の位置を適切に把握できるよう，天井にカメラを設置し，通行する人の数を計測している．文献 [3] では，天井に設置された監視カメラで撮影された映像に基づき，通行者の数を計測する手法が提案されている．この手法は，HOG記述子に基づき，映像内の歩行者を検出するとともに，カルマンフィルタによって歩行者の移動方向を検出し，人の入退室を計測する手法で，91%以上の推定精度を達成している．また，RGBカメラを用いた乗降者数カウントシステムも製品化されており，推奨環境下では約95%の推定精度を達成している [11]．同様に，赤外線LEDとステレオカメラを用いたシステムも製品化されている [12]．これらの手法では，高い精度で通行者の数を計測できる一方，カメラを天井へ設置するなど，対象領域を見通せる位置へのカメラの設置が求められるだけでなく，画像処理を利用した手法であることから，一定の性能を有する計算機が必要となるなどの制約が生じる．

2.3 測域センサを用いた移動軌跡推定

我々の研究グループでは，水平に設置した複数の測域センサを用いた歩行者の位置推定および移動軌跡推定システム「ひとなび」を開発しており [13]，グランフロント大阪内の展示施設The Lab.において，4年以上継続して人の動きを計測している [14]．また，測域センサから得られる匿名の移動軌跡とモバイル端末のWPAN通信やモーションセンサを用いて，歩行者の端末特定および追跡推定を行う手法などを提案している [15], [16]．これらの手法では，対象エリア内に複数の測域センサを設置し，同一人物を様々な方向から計測することで，人物による点群は楕円および楕円の一部としてとらえ，人の検出および追跡を実現している．同手法では高精度で移動軌跡を得られる一方，複数の測域センサを設置し，高性能な計算機で処理することを前提としており，カメラを利用した手法と同様にアルゴリズムの軽量化が課題となる．

2.4 本研究の位置づけ

提案手法は，単一の測域センサと軽量な点群処理アルゴリズムにより安価なシングルボードコンピュータでも動作させることができ，機器コストを抑制し，システム全体の小型化を実現している．したがって設置位置に関する制約も少なく，壁や台座などにも設置できるという利点がある．また，測域センサは広範囲のセンシングが可能であるため，この特長を活用し，乗客同士の重なりによるオクルージョンの影響を低減させるとともに，ドアの開閉，乗降車数，乗降時間など，バス乗降に関わる様々な行動を計測してバスの利用状況を詳細に把握することを可能とする，独自の

© 2019 Information Processing Society of Japan

情報処理学会論文誌　Vol.60　No.3　934–944 (Mar. 2019)

取り組みであるといえる．

3. 想定環境

3.1 システム概要

本研究で提案するシステムの概要を図 1 に示す．測域センサ，シングルボードコンピュータ（以下，簡単のため単にコンピュータとよぶ），GPS センサを組み合わせたものを 1 計測システムとし，3.3 節で後述する設置条件に基づき，計測システムを路線バスの前後の乗降口 2 カ所に設置する．個々の計測システムでは，測域センサとコンピュータが接続されており，センシングされたデータを逐次コンピュータへ送信する．センシングデータを受信したコンピュータはリアルタイムで乗降計測を行う．また，GPS センサから停留所を検出し，停留所と計測情報をあわせて記録する．そして，一定量の計測情報が蓄積されるたびに計測情報をデータサーバへアップロードし，各停留所の乗降情報を集約する．なお，バスの停留所情報と連携できれば乗降している停留所が取得できるが，バスの停留所情報を提案システムに入力するための配線や工事の手間を考慮すると GPS で停留所を検知したほうが合理的なため，提案システムでは GPS で停留所の検知をしている．また，バスの位置情報をリアルタイムに把握することでバスロケとして情報を配信することも可能であり，バス自体の遅延具合を把握するだけでなく災害発生時に車両の位置を即座に特定できるといった利点もある．

3.2 路線バスの乗降口

現在，日本で運行しているバスの乗降口はノンステップバスとワンステップバスに大別される．ノンステップバスは床面高さが 350 mm の低床構造であり，高齢者や障がい者でも乗降がしやすいように設計されている．最近ではノンステップバスが増加しつつあるものの，2016 年時点での導入割合は 37.6% [17] と半数には至っていない．一方，ワンステップバスは床面高さが 530 mm 程度であり，現状では全体の半数以上を占める．そのようなバスでは，地上の乗降者と床面上の乗降者では測位面の高低差が最大で 530 mm に及ぶが，この高低差のために，地上で胴体部付近をセンシングされる乗客は，車内ではその脚部付近がセンシングされることになる．乗降検出ではこれらの測位位置の差を考慮し，適切なアルゴリズムを設計する必要がある．

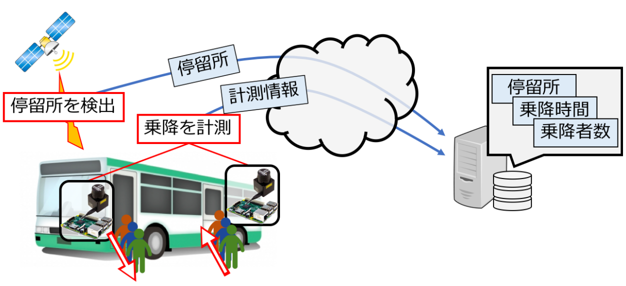
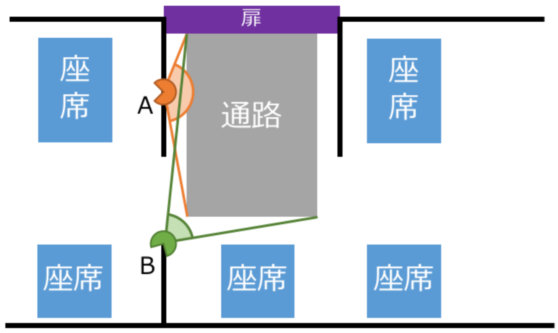


図 1　提案システムの概要
Fig. 1　System overview.

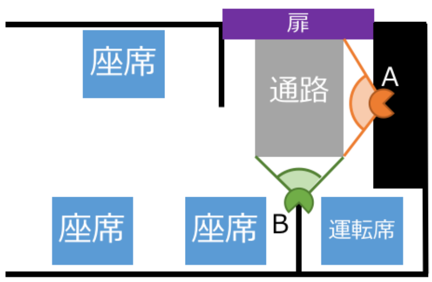
3.3 測域センサの設置条件

計測処理の簡単化のため，測域センサは床面に対して水平に取り付けることを想定する．提案手法では背景差分法を利用しているため，測域センサは計測中に移動しないように完全に固定する．扉の開閉を検知するため，測域センサの測定範囲には扉が含まれるようにするとし，乗客同士でセンサ視野を遮るオクルージョンの影響を低減させるため，乗降口の通路に対する測域面の中心角が可能な限り大きくなるような位置に設置する．**図 2** に測域センサの設置例を示す．位置 A および B が測域センサの設置位置の候補である．図 2 (a)，図 2 (b) ともにセンサ A の方が通路の測域面の中心角が大きいため，図 2 の例では位置 A に設置することが望ましいといえる．また，測域センサの設置高は，乗降者の身長の高低にかかわらず地面上および床面上の乗降者ともにセンシングできるような高さに設置することとする．

なお，現実の設置では乗客の乗降の障害にならず，急ブレーキ時でも安全に支障がない設置個所を慎重に選ぶ必要がある．本研究で実施した実証実験では，事業者と協議の上，安全に影響のない場所を選んでいる．また，使用した LRS が発するレーザ光は “FDA レーザ安全クラス 1（危険なものと見なさない）” に分類されているため，乗客の目に入射しても問題はない．



(a) 後部扉の設置位置



(b) 前部扉の設置位置

図 2　測域センサの設置位置の例
Fig. 2　Example of the LiDAR sensor position.

© 2019 Information Processing Society of Japan

4. 提案手法

提案手法の概要を図 3 に示す．はじめに導入フェイズではデバイスの設置を行い，路線バス車内における背景データを取得する．この際，開扉時および閉扉時の背景データを取得し，コンピュータに保存する．次に，乗降計測フェイズでは 2 つの背景データを利用して開扉を検知する．開扉が検知できれば，開扉時の背景データを用いて乗降者の追跡を行い，乗降者数の計測を行う．その後，閉扉が検知できれば，乗降に要した時間および乗降者数をサーバに記録する．なお，バスの開閉スイッチの情報を取得できれば扉の開閉の様子が取得できるが，停留所検出と同様に配線や工事の手間を考慮すると LRS で扉の開閉を検知したほうが合理的なため，提案システムでは LRS で扉の開閉検知をしている．

4.1 測域センサの特性

本節では，本研究で利用する測域センサの特性，および測定データの表現方法について述べる．測域センサの一例として，本研究で利用した北陽電気株式会社製の URG-04LX-UG01 [18] の仕様を表 1 に示す．測域センサはレーザ光が対象物に反射して戻ってくるまでの伝搬時間を用いて，測域センサから対象物までの距離を測定するセンサである．表 1 からも分かるとおり，測域センサは小型であるにもかかわらず，検出距離 5.6 m，走査範囲 240 度の広範囲を非常に小さい誤差（数センチ以下）で測定することが可能である．さらに，測域センサから得られる測定データは対象物の方向と距離から算出される位置情報のみであり，データサイズが小さく扱いやすいという利点がある．ただし，ガラスのようなレーザ光を透過する物体の距離測定はできない．また，黒色や紺色など光の反射率が低い衣服は検出距離が短くなるが，バスの乗降口の幅はたかだか 2 m であり，事前に当該衣服で検出距離を調査した結果短くとも 3 m の距離で検出できることを確認しているため，衣服による影響はないといえる．

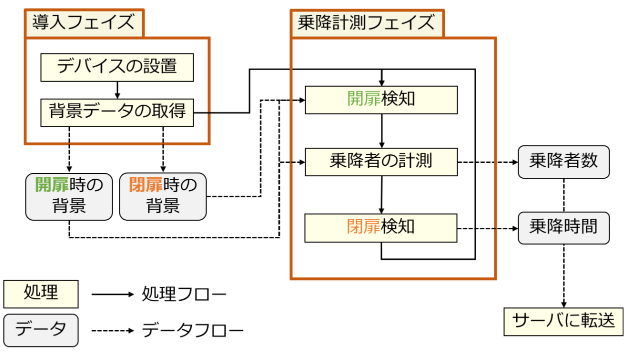


図 3 提案手法の概要

Fig. 3 Proposed method overview.

表 1 URG-04LX-UG01 の仕様 [18]

Table 1 Specification of URG-04LX-UG01 [18].

項目	仕様
検出距離	0.02–5.6 m
測距精度	0.06–1 m：±30 mm，1–3 m：距離の 3%
走査角度	240 度
角度分解能	約 0.36 度
走査時間	100 ms/scan
外形寸法	W50 × D50 × H70 mm
質量	160 g
光源	半導体レーザ（905 nm）
安全性	FDA レーザ安全クラス 1（危険なものと見なさない）

本研究では，測域センサから得られる 1 計測（センサの視野角における全方位を 1 度ずつ計測した状態）のデータを $\mathcal{D}$ で表す．測域センサの視野領域を時計回りでセンシングしたときに最初に得られる計測データを 0 番目とし，i 番目の距離データを $\mathcal{D}(i)$ で表す．なお，本論文では，この i を方位ステップとよぶ．計測データ $\mathcal{D}$ は xy 平面上の点 (x, y) として表現する．ここで，測域センサの座標系を図 4 に示す．測域センサの位置が座標平面の原点に対応し，走査範囲を 2Φ とすると，x 軸の正方向に対して $\pm\Phi$ の扇形領域が測域センサの測定範囲である．一計測で得られるデータ数を N_{scan} とすると，角度分解能 $\Delta\theta$ は $\frac{2\Phi}{N_{scan}-1}$ で表される．ゆえに，方位ステップ i の方位角 θ_i は，$-\Phi + i\Delta\theta$ で表せる．したがって，式 (1) より測域センサの計測データから xy 座標平面上の点群 $\mathcal{P}$ が得られる．

$$\mathcal{P} = \{p_i = (x_i, y_i) \mid x_i = d_i \cos\theta_i,\ y_i = d_i \sin\theta_i,\ i \in \mathbb{Z} \cap [0, N_{scan})\} \tag{1}$$

4.2 扉の開閉検知

前述のように，本手法では背景差分を利用して扉の開閉検知を行う．扉の位置を把握するため，乗客がいないときに開扉時および閉扉時の背景データを取得しておき，それらの計測データをそれぞれ $\mathcal{D}_{open}$ および $\mathcal{D}_{close}$ で表す．そして，図 5 のように閉扉時の計測データ $\mathcal{D}_{close}$ から開扉

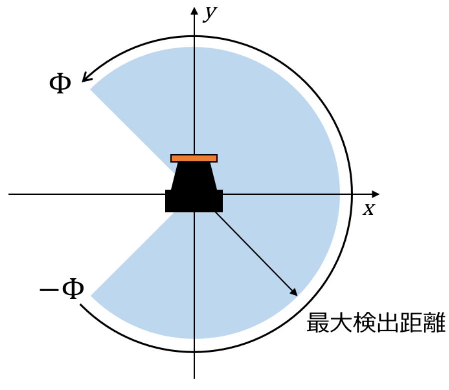


図 4 測域センサの座標系

Fig. 4 Coordinate system of LiDAR sensor.

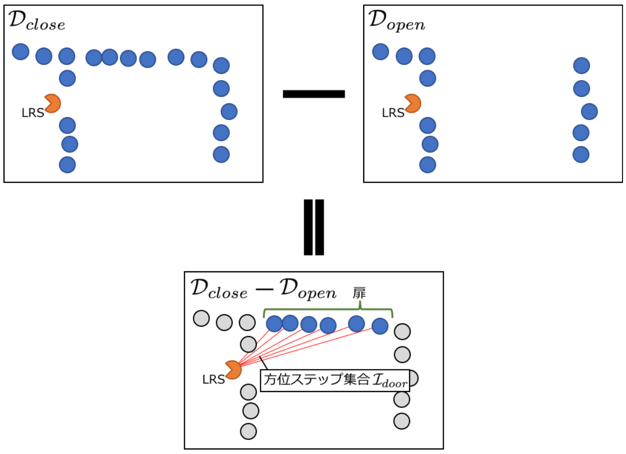


図 5　$\mathcal{I}_{door}$ の算出例
Fig. 5　Example of calculating $\mathcal{I}_{door}$.

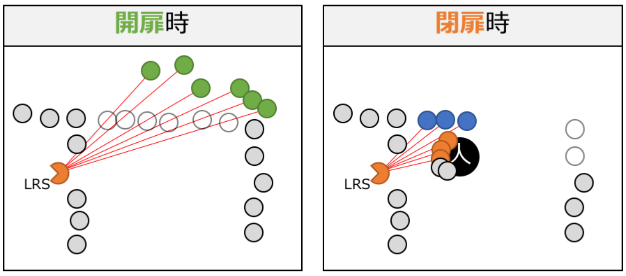


図 6　扉の開閉時の計測データの例
Fig. 6　Example of measurement data when opening and closing the door.

時の計測データ $\mathcal{D}_{open}$ との差分を算出することで，扉が存在する方位ステップの集合 $\mathcal{I}_{door}$ を算出する．開扉時の扉方向の距離データ $\mathcal{D}(i)$（$i \in \mathcal{I}_{door}$）は，閉扉時と比較して非常に大きくなるため，$\mathcal{I}_{door}$ を式 (2) のように定義する．ここで，th_{door} は開扉時と閉扉時の扉方向の距離データの差の閾値であり，性能評価では $th_{door} = 200\,\mathrm{mm}$ とした．

$$\mathcal{I}_{door} = \{i \mid \mathcal{D}_{open}(i) - \mathcal{D}_{close}(i) \geq th_{door}\} \tag{2}$$

そして，扉が開いているときは車外の点群を多く検出するといった特徴を利用し，車外の点群数 N_{out} に基づいた扉の開閉検知を行う．計測データ $\mathcal{D}$ の車外の点群数 N_{out} を式 (3) で定義する．ここで，$U(x)$ は $x \geq 0$ であれば 1，$x < 0$ であれば 0 となる単位ステップ関数，$th_{outside}$ は車外の点群と見なす扉と検出点の距離の差のしきい値であり，扉方向の計測距離が閉扉時の扉までの距離より $th_{outside}$ 以上大きければ，当該計測点は車外であると見なす．

$$N_{out} = \sum_{i \in \mathcal{I}_{door}} U\left((\mathcal{D}(i) - \mathcal{D}_{close}(i)) - th_{outside}\right) \tag{3}$$

そして，扉の状態を“開扉状態（Opened）”，“閉扉状態（Closed）”の 2 状態の状態遷移で表現する．**図 6** のように開扉時は車外の点数が増加し，閉扉時は車外の点数が減少する傾向があるため，車外の点群数が増加すれば開扉状態に遷移させ，車外の点群数が減少すれば閉扉状態に遷移させることで扉の開閉を検知する．しかし，**図 7** に示すように開扉時に人が扉を通過する際，車外の点群数が減少し，扉が閉じたと誤認識する可能性もある．そのため，ある計測時の車外の点群数を用いて扉の開閉を検知するのではなく，過去数秒間の平均を用いることで誤認識を低減させる．一方で，平均する期間が長くなると誤認識が減少するものの，開閉検知に遅延が生じる問題が生じる．閉扉時の検知遅れは乗降者計測に支障をきたさないが，開扉時の検出遅れは実際に開扉してから開扉を検知するまでの間に乗降した人の検出漏れを発生させる恐れがある．また，閉扉時に車外の点群を計測することはほぼ皆無であり，開扉状態への遷移の誤認識は発生しないため，車外の点群数を平均する時間幅を，開扉検知時と閉扉検知時で別に設定し，開扉検知時はこの時間幅を非常に短くすることで，上述した問題を解消する．

具体的な扉の開閉検知手法をアルゴリズム 1 に示す．ここで，R_{open}，$R_{close} \in (0, 1)$ は車外の点群数のしきい値となる係数，$N_{out}^{(t)}$ は時刻 t における N_{out}，N_{open} および N_{close} は，それぞれ開扉検知および閉扉検知時に車外の点群数を平均する過去のフレーム数を表している．なお，性能評価では $R_{open} = 0.50$，$R_{close} = 0.25$，$N_{open} = 10$ (1 sec. × 10 Hz)，

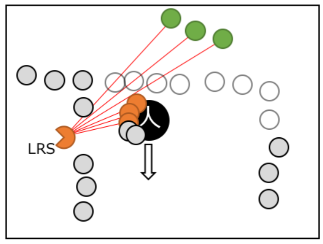
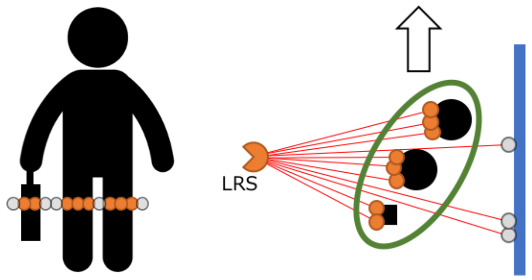


図 7　開扉時に生じる誤認識の例
Fig. 7　Example of false recognition occurring at door opening.

Algorithm 1 扉の開閉検知

Input: $\mathcal{D}$, $\mathcal{I}_{door}$, N_{out}, $PrevState$
Output: $State$

```
/* Initialization */
State ← PrevState
N_door ← |I_door|
/* Detection */
if State = "Opened" then
    if R_close N_door > (1/N_close) Σ_{k=0}^{N_close} N_out^(t-k) then
        State ← "Closed"
        Stop ingress and egress measurement
    end if
else if State = "Closed" then
    if R_open N_door < (1/N_open) Σ_{k=0}^{N_open} N_out^(t-k) then
        State ← "Opened"
        Start ingress and egress measurement
    end if
end if
```



(a) 側面図　(b) 俯瞰図

図 8　脚部の計測点の様子
Fig. 8　State of measuring point of leg.

$N_{close} = 50$ (5 sec. × 10 Hz) とした．

4.3　乗降者の計測

この節では得られた点群データから乗降者の計測をする手法について述べる．乗降者を計測するにあたり，各フレームごとに人物を検出する必要がある．まず，得られた計測データ $\mathcal{D}$ から開扉時の計測データ $\mathcal{D}_{open}$ の背景差分を算出し，背景を除いた計測データを $\mathcal{D}'$ とする．図 7 のように，方位角が隣り合ったレーザ光は同一人物に当たるため，方位角が隣り合い計測距離が類似している点群は同一人物を表していると考えられる．しかし，3.2 節で述べたように，測域センサの測位面は乗降者の腰より高い位置にあるとは限らず，**図 8** のように両足を検出する場合がある．ゆえに，1 人の乗降者を誤って 2 人と認識してしまう恐れがあるため，近接した点群の方位角にゆとりを持たせる必要がある．そのため，方位角がある程度類似かつ計測距離が類似している計測データをグルーピングし，グルーピングした点群数がしきい値以上であれば，その点群を人の点群であると見なす．具体的なグルーピング手法をアルゴリズム 2 に示す．ここで，th_D，N_{skip} は同一人物であると見なす計測距離および方位ステップの差のしきい値，$th_{groupNum}$ は人と見なす点群数のしきい値，$\mathrm{maxDist}(\mathcal{G})$ は与えられた点群間の最大距離を返す関数，$th_{humanSize}$ は人と見なす最小の大きさ，$\mathcal{H}$ は検出された人の集合であり，要素はそれぞれの人を検出した方位ステップの集合を表している．なお，性能評価では $th_D = 200$ mm，$N_{skip} = 5$，$th_{groupNum} = 10$，$th_{humanSize} = 200$ mm とした．

そして，検出された人の集合 $\mathcal{H}$ を用いて，人のトラッキングを行う．それぞれの方位ステップの集合 $\mathcal{G}$ ($\in \mathcal{H}$) から得られる点群の重心をその人の位置であると仮定する．人の移動速度を v，測域センサの走査時間を Δt としたとき，連続する 2 フレーム間の人の移動量はたかだか $v\Delta t$ であるため，連続した 2 フレーム間の人の集合 $\mathcal{H}^{(t)}$，$\mathcal{H}^{(t+1)}$ において，それぞれのフレームで検出した人 $\mathcal{G}$ ($\in \mathcal{H}^{(t)}$)，$\mathcal{G}'$ ($\in \mathcal{H}^{(t+1)}$) の距離がしきい値 th_{track} 以下であれば，$\mathcal{G}$，$\mathcal{G}'$ は同一人物であると見なす．なお，このとき複数の人が th_{track} 以内に存在する場合は，最も距離が近い人を同一人物であると見なす．そして，同一人物であると見なされた $\mathcal{G}$，$\mathcal{G}'$ の重心を結ぶ線分がバスの乗降口（扉）と交差していれば，移動方向に応じて乗車・降車のカウントをする．また，扉付近に人が立ち止まった際に計測のノイズなどの影響で同一人物が乗降口を何度も往復する場合がある．その場合においても重複してカウントさせないために，すべてのトラッキングしている人に乗降口を通過したか否かの状態を持たせておき，すでに乗降口を通過済みであれば，再度乗降口を通過してもカウントしないようにすることで，前述の誤検出を防ぐことが可能である．なお，性能評価ではバス車内の人の移動速度を 1 m/s と仮定し，走査時間 100 ms と計測ノイズを考慮して，トラッキングのしきい値を $th_{track} = 300$ mm とした．

Algorithm 2 人の点群の検出

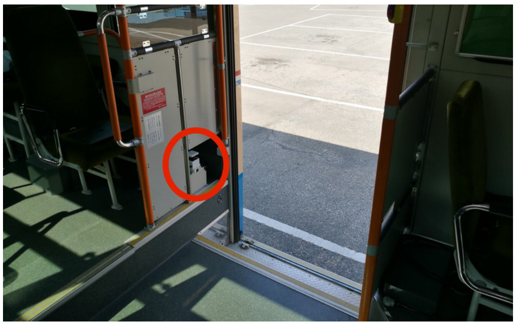
```
Input: D, D'
Output: H
  /* Initialization */
  G ← ∅ /* Temporary New Group */
  PrevI ← NULL
  for all i such that 0 ≤ i < N_scan do
    if D(i) ∉ D' then
      /* D(i) is background */
      continue;
    end if

    if PrevI ≠ NULL ∧ |D(PrevI) − D(i)| < th_D ∧ (i − prevI) ≤ N_skip then
      /* 計測距離および方位角が類似していれば，G に追加 */
      /* add previous group */
      G ← G ∪ {i}
      PrevI ← i
    else
      /* D(i) is new group */
      if |G| ≥ th_groupNum ∧ maxDist(G) ≥ th_humanSize then
        /* G is human */
        H ← H ∪ {G}
      end if
      /* create new group */
      G ← {i}
      PrevI ← i
    end if
    if |G| ≥ th_groupNum ∧ maxDist(G) ≥ th_humanSize then
      /* G is human */
      H ← H ∪ {G}
    end if
  end for
```

5.　性能評価

5.1　評価環境

阪急バス株式会社が運営する大阪大学学内連絡バスで実証実験を行い，提案方式に対する性能評価を実施した．**図 9** の赤丸に示すように，連絡バスの前方および後方乗降口付近に計測デバイスを設置し，3 日間（乗降回数 145 回）の乗降の様子を測定した．連絡バスの乗車時には後方の乗降口のみ

(a) 前扉に設置した計測デバイス



(b) 後扉に設置した計測デバイス

図 9 計測デバイスの設置の様子

Fig. 9 State of installation of measuring system.

表 2 Raspberry Pi 3 Model B の性能

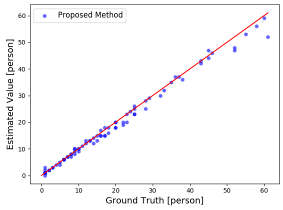
Table 2 Spec of Raspberry Pi 3 Model B.

項目	仕様
OS	Raspbian 8.0 Jessie
CPU	Quad Core 1.2 GHz Broadcom BCM2837 64 bit
RAM	1 GB
消費電力	7 W（最大 12.5 W）
質量	45 g

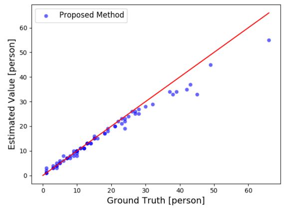
が利用され，降車時には双方の乗車口が利用される．また，測域センサは北陽電気株式会社製の URG-04LX-UG01，シングルボードコンピュータは Raspberry Pi Foundation の Raspberry Pi 3 Model B を利用した．**表 2** に Raspberry Pi 3 Model B の性能を示す．性能評価として，連絡バスの扉が開いてから閉じるまでを 1 ピリオドとして，ピリオドごとの乗降者人数の推定値と真値を比較した．比較手法として，2 台の赤外線センサを並べて利用した手法を模したナイーブな手法と比較をする．実験で用いた測域センサの方位角 $\pm 10°$ の 2 つの計測データを赤外線センサの計測データとし，それらの通過検知時刻が 0.5 秒以内に人を検知した場合に，検知した時刻が早かった方位角に応じて乗車および降車の計測を行うものとする．また，提案手法の計算量の評価として，各フレームの処理時間を計測し，測域センサの 1 計測あたりの走査時間である 100 ms 以内に収まっているかを検証した．

5.2 評価結果

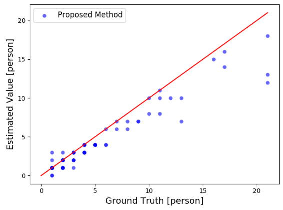
提案手法および比較手法のピリオドごとの乗降者人数の



(a) 乗車人数（後扉）



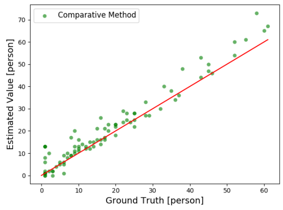
(b) 降車人数（後扉）



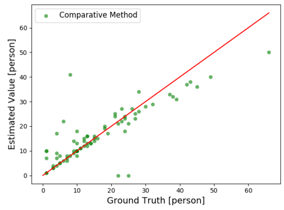
(c) 降車人数（前扉）

図 10 提案手法による乗降人数推定

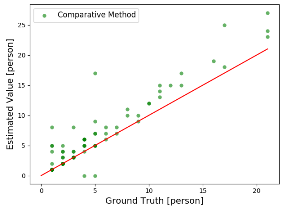
Fig. 10 Result of passenger estimation by proposed method.



(a) 乗車人数（後扉）



(b) 降車人数（後扉）



(c) 降車人数（前扉）

図 11 比較手法による乗降人数推定

Fig. 11 Result of passenger estimation by comparative method.

推定結果を**図 10**，**図 11** に示す．グラフの横軸が真値，縦軸が推定値を表しており，赤色の直線は真値=推定値の直線である．図 11 に示すように，赤外線センサを用いた比較手法では，扉付近で立ち止まる乗客の影響で同一人物が二重に計測されてしまい，全体的に真値より多く推定している．また，乗車人数推定では誤差率 25%，降車人数推定では誤差率 17%であり，正確に通行人数を推定できているとはいえない．一方，図 10 に示すように，提案手法では，ほとんどのプロットが直線付近にあり，正確に推定できていることが分かる．乗車人数推定では誤差率 5.3%・平均絶対誤差 0.94 人，降車人数推定では誤差率 7.5%・平均絶対誤差 1.9 人と高い精度で通行人数を推定できている．1 章で述べた PT 調査は統計学的に相対誤差 20%以内を担保しており，提案手法はそれを大きく上回っているため，提案手法は十分に有用性があるといえる．しかしながら，後扉

© 2019 Information Processing Society of Japan

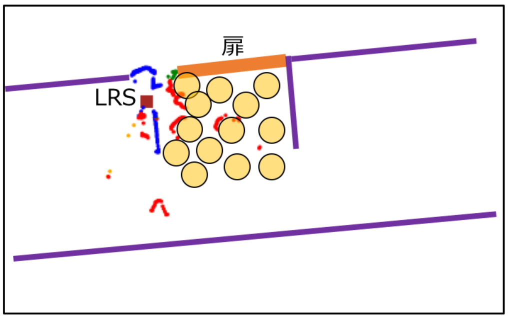


図 12　多数の乗客が乗降口付近で密集している状況
Fig. 12　State where many passengers are densely near the entrance.

表 3　1 フレームの処理時間の結果
Table 3　Result of one frame processing time.

項目	結果
最大処理時間	12.5 [ms]
平均処理時間	3.4 [ms]

の降車人数推定（図 10 (b)）では，最も降車人数が多かった 66 人のときの推定値が 55 人であり，11 人の誤差が生じている．このピリオドでは，車内に 80 人以上の乗客が乗車しており，乗客が密集している状況であった．**図 12** に，バスが停車し扉が開く前の状態を示す．測域センサの位置を赤色の四角，測域センサにより計測された背景データを青の点，人を赤の点，扉を緑の点で表す．また，これらの結果から推定されるバスの外形を紫色の線，後扉を橙色の線，扉付近に乗車している人を黄色の丸で表す．このように，多数の乗客が乗車している状況においては，後扉が開いた瞬間に扉付近の乗客がなだれ込むように降車したため，密接している 2 人を 1 人として認識し，検出漏れが発生したと考えられる．扉付近で乗客が密接する現象はバス車内が満員かつ降車時に発生しやすいが，扉付近まで乗客がいるような満員な状況は発生しにくく，実際に乗降計測データを運行ダイヤ改正に利用する際，乗客が大量に乗車・降車する停留所においては乗降人数の要求精度が低く，正確に計測できないほど乗降人数が多い（大混雑）といったことが把握できればよいため，実用上は問題ないといえる．一方，バスに乗車する際は，整列して 1 人ずつ乗るケースが多く，誤検出はほとんど発生していない．

次に，提案手法の 1 フレームあたりの処理時間を**表 3** に示す．1 フレームの最大処理時間は 12.5 ms であったが，測域センサの走査時間 100 ms を下回っており，Rapberry Pi 3 Model B のような安価で小型なシングルボードコンピュータでもリアルタイム計測が十分可能であることがこの結果から分かる．なお，処理時間が最大であったフレームでは，乗客が多く，測定された点群のうち，背景の点群が少ないという特徴があった．これは，背景以外の物体の点群が多くなると，乗客の検出やトラッキング処理に時間を要するためである．しかし，実証実験では満員の車内における乗降ケースも含まれており，処理時間がこれ以上に増大することはないと考えられる．これらの評価実験の結果から，本システムは，高い推定精度を低い処理負荷で実現しており，実用性の高い取り組みであるといえる．

6.　おわりに

本研究では，導入に関する労力やコストの障壁を低減させ，高精度な検出を実現するため，測域センサから得られる計測データを安価なシングルボードコンピュータでリアルタイム処理をする，高精度な路線バス乗降計測システムを提案した．乗客が立っている床面によって，計測される体の部位が胴体・脚部と様々である状況下において，人を正確に検出し，乗降の様子を計測する手法を確立した．また，実際に運行しているバスで 3 日間の実証実験を行った結果，誤差率 5.3%（平均絶対誤差 0.94 人），降車人数推定では誤差率 7.5%（平均絶対誤差 1.9 人）を達成し，PT 調査の担保精度 20%と比較して非常に高精度に乗降計測が行えることが示せた．さらに，本手法はポータブル性に優れており，屋内外問わず利用可能であるため，路線バスの乗降者計測以外にも催事場の入場者数の計測への活用も期待できる．

今後の課題として，乗客同士の重なりによるオクルージョンに耐性を持った手法の構築があげられる．提案手法では，測域センサの設置位置を工夫することでオクルージョンの発生を低減させているが，車内が満員の場合など，非常に混雑している場合には，オクルージョンの発生は免れられない．そのため，人のトラッキング推定において，人の移動方向や移動速度を考慮して，オクルージョンによって検出できなくなった人の位置を補完することで，オクルージョンによる検出漏れを防ぐ手法を検討している．

また，本論文の性能評価では大学生を対象とした評価を実施したが，子連れの親子やベビーカーや杖などを所持している人といった様々な乗客に対する性能評価が実施できていない．そのため現在，実運用に向けて実際の路線バスで実証実験を実施中である．

謝辞　本研究の一部は JSPS 科研費 JP15H02690 および JP26220001 の助成を受けたものです．

本研究を行うにあたり，実証実験にご協力いただきました阪急バス株式会社にお礼を申し上げます．

参考文献

[1] 国土交通省：PT 調査とは？，入手先 ⟨http://www.mlit.go.jp/crd/tosiko/pt.html⟩（参照 2018-10-01）．
[2] Fanbright：通行カウンター，入手先 ⟨http://www.fanbright.jp/service/movingcounter/⟩（参照 2017-06-22）．
[3] Pore, S.D. and Momin, B.F.: Bidirectional people counting system in video surveillance, *2016 IEEE Interna-*

tional Conference on Recent Trends in Electronics, Information Communication Technology (*RTEICT*), pp.724–727 (2016).

[4] Scheunert, U., Cramer, H., Fardi, B. and Wanielik, G.: Multi sensor based tracking of pedestrians: A survey of suitable movement models, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp.774–778 (June 2004).

[5] Greene-Roesel, R., Diogenes, M.C., Ragland, D.R. and Lindau, L.A.: Effectiveness of a commercially available automated pedestrian counting device in urban environments: Comparison with manual counts, *Safe Transportation Research & Education Center* (2008).

[6] Yang, H., Ozbay, K. and Bartin, B.: Investigating the performance of automatic counting sensors for pedestrian traffic data collection, *Proc. 12th World Conference on Transport Research, Lisbon, Portugal*, Vol.1115 (2010).

[7] Qian, H.-B. and Han, H.: The applications and methods of pedestrian automated detection, *2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation* (*ICMTMA*), Vol.3, pp.806–809, IEEE (2010).

[8] Bauer, D., Ray, M. and Seer, S.: Simple sensors used for measuring service times and counting pedestrians: Strengths and weaknesses, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No.2214, pp.77–84 (2011).

[9] 秦　淑彦：集電型赤外線センサを用いた 1 人用ゲートにおける通行判定，日本知能情報ファジィ学会誌，pp.887–898 (2016)

[10] Del Pizzo, L., Foggia, P., Greco, A., Percannella, G. and Vento, M.: A versatile and effective method for counting people on either rgb or depth overhead cameras, *2015 IEEE International Conference on Multimedia Expo Workshops* (*ICMEW*), pp.1–6 (2015).

[11] 技研トラステム：Passenger counter，入手先 ⟨http://www.trastem.co.jp/product/passenger_counter.html⟩（参照 2017-06-22）.

[12] Eurotech: Pcn-1001, available from ⟨https://www.eurotech.com/en/products/PCN-1001⟩ (accessed 2017-06-22).

[13] 上嶋祐紀，藤田和久，樋口雄大，廣森聡仁，山口弘純，東野輝夫：ひとがつながるなび—位置と気持ちと空間の共有，マルチメディア，分散，協調とモバイル（DICOMO2013）シンポジウム論文集，pp.2105–2115 (2013).

[14] ひとなび，入手先 ⟨https://youtu.be/noSHVvBQd_Q⟩（参照 2017-06-22）.

[15] Wada, Y., Higuchi, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Accurate positioning of mobile phones in a crowd using laser range scanners, *Proc. 9th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communication* (*WiMob'13*), pp.430–435 (2013).

[16] Takafuji, T., Fujita, K., Higuchi, T., Hiromori, A., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Indoor localization utilizing tracking scanners and motion sensors, *Proc. 11th IEEE International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing* (*UIC'14*), pp.112–119 (2014).

[17] 国土交通省：平成 27 年度末 自動車交通関係移動等円滑化実績等について—ノンステップバス等の車両数の推移（参考資料 1）(2016).

[18] LTD Hokuyo Automatic Co.: Scanning rangefinder distance data output/urg-04lx-ug01, available from ⟨https://www.hokuyo-aut.jp/search/single.php?serial=166⟩ (accessed 2017-06-22).

推薦文

本研究は，DPS ワークショップにおいて，導入に関する労力やコストの障壁を低減させ，高精度な検出を実現するため，測域センサから得られる計測データを安価なシングルボードコンピュータでリアルタイム処理を行う高精度な路線バス乗降計測システムを提案しました．また，実際に運行しているバスで実証実験を行い，非常に高精度な乗降計測を実現しております．今後，乗客同士の重なりによるオクルージョンに耐性を持った手法の構築が期待されます．以上の理由により，本論文を推薦いたします．

（マルチメディア通信と分散処理ワークショップ（DPSWS2017）プログラム委員長　後藤佑介）

山田 遊馬　（学生会員）

平成 29 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了．同年同大学院情報科学研究科博士後期課程進学．人の位置や行動推定を含むモバイルコンピューティングの技術分野に関する研究に従事．

廣森 聡仁　（正会員）

平成 16 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了．平成 17 年株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ入社．平成 20 年大阪大学大学院情報科学研究科助教．平成 26 年同大学院情報科学研究科講師．平成 28 年より同大学院情報科学研究科准教授．博士（工学）．モバイルアプリケーションやモバイルネットワークの設計および性能評価に関する研究に従事．IEEE 会員．

山口 弘純　（正会員）

平成 6 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業．平成 10 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了．同年オタワ大学客員研究員．平成 11 年大阪大学大学院基礎工学研究科助手．平成 14 年同大学院情報科学研究科助手．平成 19 年より同大学院情報科学研究科准教授．博士（工学）．モバイルコンピューティング等に関する研究に従事．電子情報通信学会，IEEE 各会員．

© 2019 Information Processing Society of Japan

東野 輝夫　（正会員）

昭和 54 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業．昭和 59 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了．同年同大学助手．現在，同大学大学院情報科学研究科教授．博士（工学）．分散システム，通信プロトコル，モバイルコンピューティング等の研究に従事．電子情報通信学会，ACM 各会員．IEEE Senior Member，本会フェロー．

© 2019 Information Processing Society of Japan