

2次元ソリッドステート LiDAR を用いた人流計測に関する検討

秦淑彦^{†1} 谷川裕一郎^{†1} 好村天晃^{†1}

歩行者の人数や方向といった人流情報は、セキュリティ、歩行者ナビゲーション、空間利用計画等に非常に有用であり、種々のセンサを用いた人流計測技術が開発され実用化されている。本研究では、自動運転車やロボットへの応用で大きな需要が見込まれ、小型で安価な製品の開発が進んでいる LiDAR (Light Detection and Ranging) をセンサとして用いた人流計測を考える。今回は、レーザ照射の回転をソリッドステート方式でメカレス化し、小型・低価格・耐久性向上を実現した 2次元 LiDAR を用いる。従来、センサの測定面を床面と平行に設定し歩行者の移動軌跡を測定していたが、今回のセンサは測定距離が短いこと、歩行者間のオクルージョンの影響を軽減させることから、センサを天井や壁に設置する。測定面を通路方向に対して直交に、真下方向から少し傾きをつけて設置することにより、センサ付近を通行する人数、方向、速度を計測する方式を提案する。計測方式と実験結果について報告する。

Counting Pedestrians with a Two-Dimensional Solid-State LiDAR

TOSHIHIKO HATA^{†1} YUICHIRO TANIKAWA^{†1} TAKA AKI YOSHIMURA^{†1}

Pedestrian traffic information is very useful for security, navigation and spatial planning and the measurement systems using various sensors have been developed for practical use. LiDAR (Light Detection and Ranging) is one of the sensors and the development for motor-less, small and inexpensive devices has been conducted rapidly for a potential big market of autonomous vehicles. Usually the LiDAR is installed setting its measurement plane horizontally to detect pedestrians but there is an occlusion problem in crowded spaces. We use a two-dimensional solid-state type LiDAR which is small, cheap and durable while detection range is several meters long. We propose a novel system using the sensor installed on a ceiling or a wall with an oblique measurement plane to detect numbers, directions and speed of pedestrians. We describe the method and show some experimental results.

1. はじめに

歩行者の人数や方向といった人流情報は、セキュリティ、歩行者ナビゲーション、空間利用計画等に非常に有用であり、種々のセンサを用いた人流計測技術が開発され実用化されている。イメージセンサや赤外線センサがよく用いられるが、前者はプライバシーの問題、後者は温度変化による誤検知の問題があり、広く普及するまでには至っていない。レーザ照射による LiDAR (Light Detection and Ranging) はこのような問題がなく、広範囲に渡って物体の距離を精度よく測定できるが、非常に高価であった。しかし、自動運転車やロボットへの応用で大きな需要が見込まれ、小型で安価な製品の開発が急速に進んでいる。

そこで、レーザ照射の回転をソリッドステート方式でメカレス化し、小型・低価格・耐久性向上を実現した 2次元 LiDAR を用いた人流計測を考える。従来、センサの測定面を床面と平行に設定し歩行者の移動軌跡を測定していたが、今回用いたセンサは測定距離が短いこと、歩行者間のオクルージョンの影響を軽減させることから、センサを天井や壁に設置する。測定面を通路方向に対して直交に、真下方向から少し傾きをつけて設置することにより、センサ付近を通行する人数、方向、速度を計測する方式を提案する。

本報告では、まず LiDAR と従来の人流計測方法について説明する。次に、提案方式の基本アイデア、センサ設置

方法と通行判定方法の詳細を述べ、廊下通行に対する実験とその評価について報告する。

2. LiDAR と人流計測

2.1 LiDAR

LiDAR は、図 2.1 に示すように、物体にレーザ光を照射し反射して戻ってきたレーザ光を受光して、物体までの距離を測定する装置である。測定方法は、照射した光が測定対象で反射して受光するまでの時間を計測して距離を測定する ToF 方式 (Time of Flight) と、反射光が受光部のどの位置に届いたかを測位センサで読み取り三角測量の原理で計測する三角測距方式がある。ToF 方式は遠方まで正確に測定できるが、三角測距方式に比べ高価である。照射位置を走査することにより 2次元平面あるいは 3次元空間における距離画像を測定する。広範囲に存在する物体を高精度で測定でき、照明変化による影響も少ない。車の自動運転における物体計測用として期待され、レーザ光の走査に従来のモータではなく MEMS 等の技術を用いてメカレス化を行い、小型・低価格で耐久性のある製品の実現に向けて開発が加速している。(図 2.2) [1] また、掃除ロボットやドローンには測定範囲が数 m~十数 m の安価な製品が既に使われている。[2]

^{†1} 広島工業大学
Hiroshima Institute of Technologies

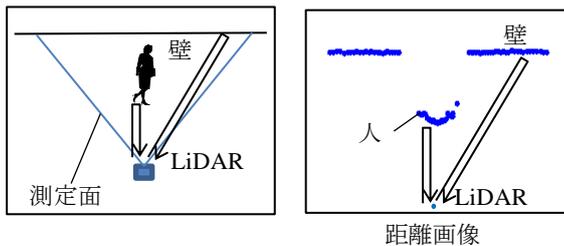


図 2.1 LiDAR による距離測定

Figure 2.1 Distance measuring with LiDAR.



図 2.2 モータ式とソリッドステート型の LiDAR

Figure 2.2 Motor-type and solidstate-type LiDARs.

2.2 従来の人流計測

LiDAR を用いた従来の人流計測では、人の腰や足首の高さに合わせて水平に設置し、距離画像における近傍点の集合を領域として抽出し、さらに連続するフレームにおいて近傍の領域をグループ化することによって歩行者の移動軌跡を抽出している.[3]

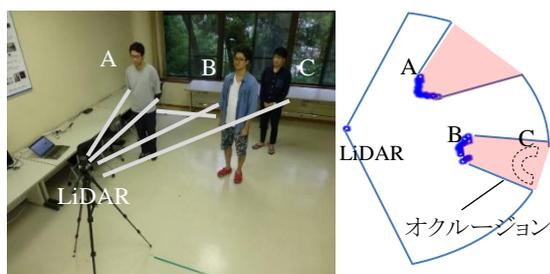


図 2.3 水平な測定面でのオクルージョン

Figure 2.3 Occlusion on a horizontal measurement plane.

オープンスペースにおける歩行者のトラッキングには適しているが、混雑時や廊下のような幅の狭い空間では、図 2.3 に示すように、LiDAR 周辺を通行する人によりレーザ光が遮られ、歩行者の検知率が低下するオクルージョンの問題がある。

3. 提案方式

3.1 基本アイデア

2.2 のオクルージョン問題を低減するため、廊下や出入口

などの天井に 2 次元 LiDAR を取り付け、その下を通行する人数、方向、速度を測定する方式を提案する。歩行者の移動軌跡は抽出できないが、LiDAR を密に設置すれば、動線の推定も可能な通行情報を得ることができる。

図 3.1 に示すように、廊下や出入口の上部に LiDAR を取り付け、測定面の X 軸を通行方向に直交させ、Y 軸は真下から傾きを持たせ、連続するフレームに渡って体の一部が測定されるよう、歩行速度に応じた LiDAR の測定周期を設定する。測定面を通行方向に直交させて人体の正面あるいは背面を測定することにより、連続する近傍の測定点の領域の幅 (X 方向の大きさ) から人数を推定できる。また、測定面に傾きを持たせることにより、通行方向に応じて、測定点の高さの時間変化は増加する/減少するので、移動方向を判定できる。さらに、早く歩くと連続するフレームにおける高さ変化は大きく、遅いと小さくなるため、この変化量から歩行速度を推定できる。

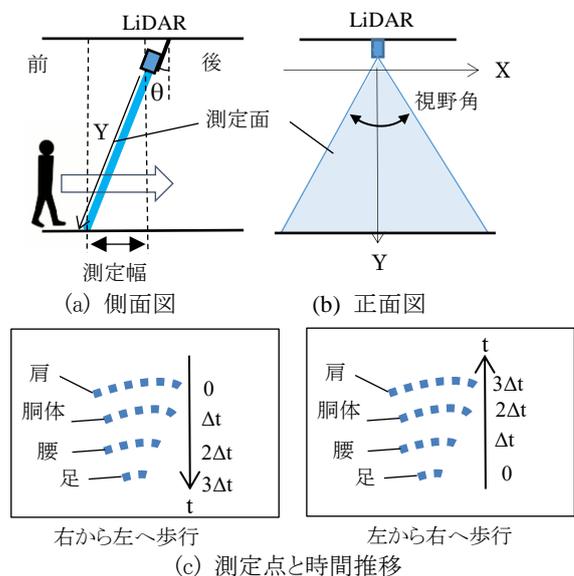


図 3.1 通行方向に直交し傾きを持たせた測定面

Figure 3.1 Measuring surface in an oblique and downward direction.

3.2 廊下通行における設置の仕方

図 3.1 に示すように、LiDAR は廊下天井に取り付けることになるが、対象とする通行、LiDAR の性能、天井の高さにより、測定面の傾き等を決める必要がある。

計測対象とするのは、廊下を横切ることなく、通路方向に沿って、1 人または複数人が横並びで通行する場合を考える。幅 2~5m、高さ 2.6m 程度の廊下で、交差点や出入口付近以外の天井に設置することを想定する。歩行速度は 0.5m/s (非常にゆっくり) ~2m/s (小走り)、通行方向は通路方向 $\pm 30^\circ$ 、横並びは間隔 10cm まで、縦並びは歩行速度に応じて接触しない程度の距離 (1m/s であれば 30cm) を判定対象とする。また、歩行者の身長は 1.4~1.9m とする。

人数、方向、速度を推定するには、ある通行に対して連続する3フレーム以上に渡って、膝から肩の部分までの距離を測定できるようにしなければならない。今回使用したLiDARは視野角 86° 、角度解像度 1° 、走査周波数10Hz（毎秒10フレーム）、測定距離0.1~4mであり、高さ2.5mに設置する場合、測定面の傾き θ は 30° となる。

3.3 出入口通行における設置の仕方

出入口では、図3.2に示すように、出入口上部に設置する方法と出入口近くの天井に設置する方法が考えられる。廊下通行と同様に、測定面を通行方向に対して直交させ、真下方向から少し傾きを持たせる。前者では、取り付け位置が低いと、LiDARの視野角や横並び通行のオクルージョンの問題から、測定可能な通行幅が狭くなる。一方取り付け位置を高くすると、測定位置が出入口から離れてしまい正しく測定できなくなる。後者では、出入口付近に測定範囲を設定できるため、LiDARの測定距離に応じた高さの天井であれば、横並び通行も含めて出入り通行を測定できる。

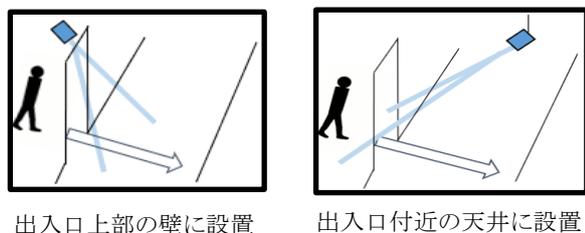


図3.2 出入口におけるLiDARの設置
Figure 3.2 LiDAR installation at a doorway.

幅2m程度で3人が同時に通行できる出入口での通行を考える。出入口に向かう/離れる際の通行方向は広がりがある。ここでは日常、頻度が極めて低いと思われる方向は除外し、 $45^\circ \sim 135^\circ$ を対象とする。また、通行速度は0.5m/s（ゆっくり）~2m/s（少し早い）とする。複数人の通行としては、横並びで通行（並列）、2人がすれ違う（双方向）、複数人が縦列で近接して通行（縦列）を対象とする。さらに、出入口の前を通り過ぎる（通過）場合も考える。

図3.3に示すように、幅2m、高さ2mの出入口において上述のLiDARを2mに高さに取り付けると、測定面の傾き θ は 30° となる。

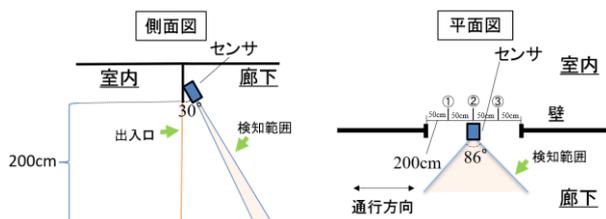


図3.3 出入口におけるLiDARの設置例
Figure 3.3 Example of LiDAR installation at a doorway.

3.4 判定方法

廊下通行における通行判定の処理手順を以下に示す。

① フレーム毎の人領域の抽出

図3.4に示すように、近接する測定点のグループを人領域として抽出する。まず、XY軸方向で測定点をクリッピングする。判定には歩行者の膝から肩までの部位までの測定点を判定に用いる。身長140~190cmを対象とし、高さ50~150cmの測定点のみ処理する。また、横方向（X軸）には廊下の壁から25cm以上離れた測定点を処理する。

角度 $0^\circ \sim 86^\circ$ の順番で物体までの距離が出力されるので、出力順に隣接する2点の距離の差が閾値以下であれば同じグループとし、閾値を越えれば別のグループとする。グループ化された近接点の個数が閾値以上であればそのグループを人領域の候補と判定し、そうでなければノイズとして除去する。

胸より下の部位は概ね隣接する点が近傍に存在し1つの領域としてグループ化できるが、それより高い位置になると、肩の領域と頭部（頭や顔）の領域が離れてしまう。また、今回使用したLiDARは赤外線を照射するため、黒色の毛髪部分は距離を測定できず値0が出力される。そこで、値0の隣接する点の集合も領域として抽出する。領域抽出後に、ある高さ以上の領域の位置関係を調べ、肩と頭部の位置関係にあれば1つの領域として統合する。具体的には、距離0の領域と隣接する領域の高さ（Y軸）の差が閾値以下であれば頭部領域として統合する。次に、隣り合う3つの領域の高さが低-高-低の関係にあり、高さの差が肩と頭の高さ程度であれば1つの人領域として統合する。

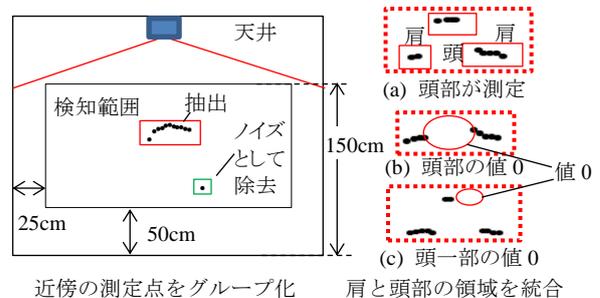


図3.4 人領域の抽出
Figure 3.4 Region extraction for people.

② 連続フレームにおける人領域のグループ化

図3.5に示すように、連続するフレームに渡って近傍に位置する人領域をグループ化し、各歩行者に対する時空間領域として抽出する。

まず、①にて抽出された領域の横幅により人数を推定し、2人以上の大きさであれば、その領域を推定した人数で分割する。今回は測定点の数が同じになるように分割する。

近傍に位置するか否かの判定は2段階で行う。まず、人領域を構成する外接矩形の中心点のX座標を比較し、距離が閾値以下であれば同じグループとする。そうでなければ、

外接矩形の端の X 座標を比較し、矩形領域が互いに重なりを持っていれば同じグループとする。

一定数のフレームにおいて近傍の領域が存在しなければ検知範囲を通過したと判定して、そのグループの処理を終了する。今回は2フレームに渡り近傍の領域がなければグループ化を終了する。

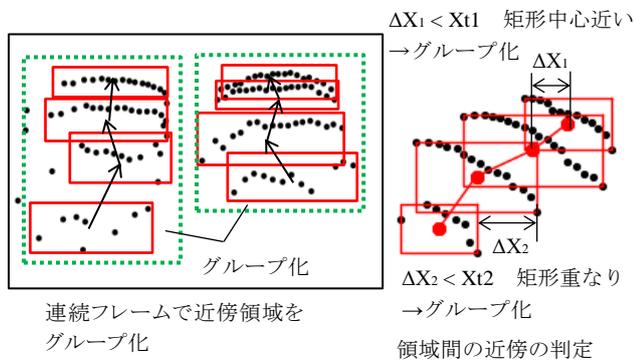


図 3.5 連続フレームにて近傍領域をグループ化
Figure 3.5 Grouping close regions in successive frames.

③ 通行判定

時間方向にまとめられたグループの情報に基づき、通行する方向と速度を判定する。グループに属する最初の領域と最後の領域の高さから通行方向を判定する。また、グループに属する領域の高さの時間的変化から通行速度を推定する。この際に用いる連続フレームの領域は腰から胸までの高さにあるものとする。

4. 実験

4.1 実験方法

提案方式を評価するため、パソコン上で判定処理の実装 (Windows10, Python/C#) を行っている。実装状況は以下の通りである。

- ・フレーム毎の人領域の抽出：肩と頭部に対する領域統合の一部判定が未完成であるが、他は実装完了。
- ・連続フレームにおける人領域のグループ化：完了
- ・通行判定：未実装

実装途中であるが、種々の通行データを測定し判定方法の評価を行った。幅 2m の廊下で高さ 2.5m の天井に、3.2 で記載したように LiDAR を取り付け、その下を通行して距離データを取得した。表 4.1 に使用したソリッドステート型 LiDAR の LS02C (LeiShen Intelligent Systems Co., Ltd) [4] の仕様、図 4.1 にその外観および天井への取り付けと実験の様子を示す。

表 4.2 に通行動作の一覧、図 4.2 に動作のイラストを示す。1人、2人の縦列および2~3人の並列(横並び)で、通路方向に対する向きは0°(直進)と30°(斜め)、歩行速度は0.5, 1および2m/sである。並列は同じ方向(同方)

向)と逆の方向(双方向)、隣との間隔は10cmと50cmとした。また、縦列における前後の間隔は30cmと60cmとした。対象とする身長は1.4~1.9mとし、今回の被験者の身長は1.6mと1.9mであった。

通行データをCSVファイルに記録し、実装プログラムを使ってフレーム毎の人領域の抽出と、連続フレームにおける人領域のグループ化の処理を評価した。

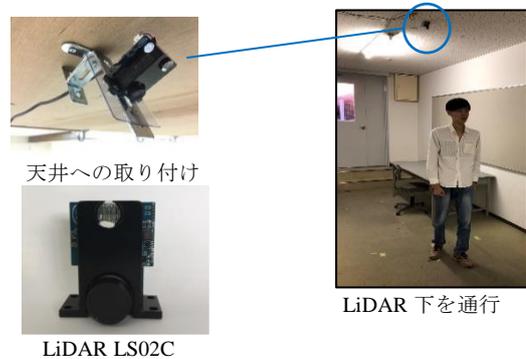


図 4.1 LiDAR と 通行実験
Figure 4.1 LiDAR and actual image in experiment.

表 4.1 LiDAR LS02C の仕様

項目	仕様
計測方法	赤外線レーザー光を用いた三角測距方式 レーザー 波長 788~794nm 出力 0.3mW
計測性能	距離 0.1~4m, 精度 距離×3% 視野角 86°, 角度解像度 1° 走査周波数 10Hz
接続	UART (3.3V, 115.2Kbps)
大きさ・重量	45x37x40mm, 50g

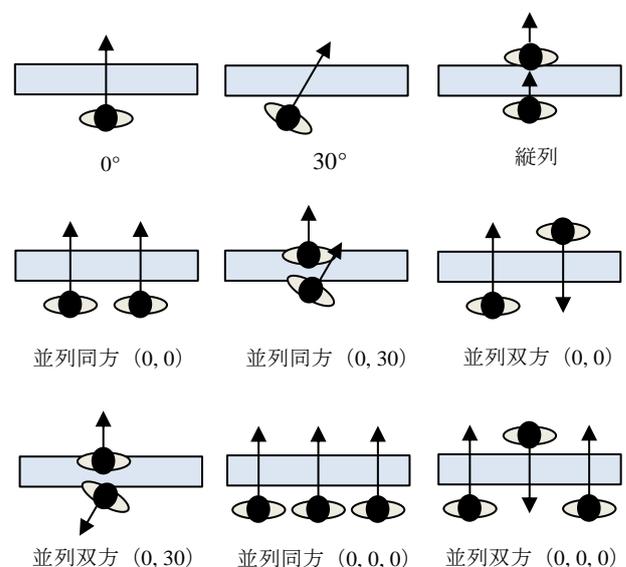


図 4.2 通行動作
Figure 4.2 Walking actions

表 4.2 通行動作と判定結果

通行動作				判定	
人数	角度	方向	間隔(cm)	正	誤
1人	0	—	—	18	0
	30	—	—	16	2
2人縦列	0+0	—	30, 60	36	0
2人並列	0+0	同	10, 50	36	0
		双	10, 50	36	0
	0+30	同	10, 50	25	11
		双	10, 50	31	5
3人並列	0+0+0	同	10	18	0
		双	10	16	2

注：速度は 0.5, 1, 2m/s 各通行動作を 3 往復

4.2 実験結果

フレーム毎の人領域の抽出および連続フレームにおける人領域のグループ化について、概ね想定通りの結果が得られるとともに、幾つかの課題が明らかとなった。図 4.3～図 4.10 に各通行動作において測定点、抽出領域および連続するフレームにおけるグループ化の結果を示す。図において、点が測定点、矩形が抽出領域、点と折れ線がグループ化を示す。表 4.2 における判定は各通行動作を 3 往復実施し、正しく処理された回数と誤って処理された回数であり、誤りの内容は以下で説明する。

図 4.3 に 1 人が向き 0° 、1m/s で通行した場合を示す。フレーム毎に隣接する近傍点の集合が人領域として抽出され、連続するフレームにわたり近傍の領域がグループ化され、1 人通行であると判定できる。領域の高さ (Y 軸) が昇順に変化しており、通行方向を判定できる。頭部が値 0 となっている場合、両側の肩の領域と正しく統合されている。

図 4.4 に 1 人が 0° 、0.5～2m/s で通行した場合を示す。速度が速くなると、連続フレームにおいて領域の高さの変化が大きくなり、グループ化された領域の数が減少している。この高さ変化あるいは領域数に基づき速度を推定することになるが、具体的な推定方法は今後の検討課題である。

図 4.5 に 1 人が向き 30° 、1m/s で通行した場合を示す。グループ化された領域の位置は斜めに変化し、各領域を構成する測定点も斜めを向いている。斜めの向きに速く歩くと近傍点の数が少なくなり、図 4.6 のように小さな領域となって領域が正しくグループ化されない場合がある。

図 4.7 に 2 人が向き 0° 、1m/s、間隔 30cm で縦列歩行した場合を示す。前後 30cm と近接していてもオクルージョンの影響はなく、各人個別にグループ化できている。

図 4.8 に 2 人が向き 0° 、1m/s、間隔 10cm で並列歩行した場合を示す。かなり近接しており、1 つのフレームにおいて、2 人が 1 つの領域として検出されている。しかし、外接矩形の横幅が 2 人分であるため、フレームに渡る領域のグループ化において 2 分割され、各人個別に正しくグループ化されている。今回の実装では、領域の測定点の数が等しくなるよう分割しているため、隣接する人の測定点を

含む場合がある。誤って隣接領域をグループ化する可能性があるため、測定点の位置に基づく分割が必要である。

図 4.9 に 3 人が向き 0° 、1m/s、間隔 10cm で双方向に並列歩行した場合を示す。各人に対してフレーム毎の領域の抽出および連続フレームにおける領域のグループ化が正しく処理されている。

図 4.10 に 2 人が向き 0° と 30° 、1m/s で同方向に並列歩行した場合を示す。途中、2 人が交差する際にオクルージョンが発生し、後ろの人の領域が抽出されなかった。2 人の間隔は、30cm 間隔の縦列より接近していた。また、領域は正しく抽出されても、各人の領域が近くなり、連続フレームにおける領域のグループ化の際に、途中で他の人の領域をグループ化する問題があった。廊下にて 2 人が接近して交差するケースは少ないが、今後の課題の 1 つである。

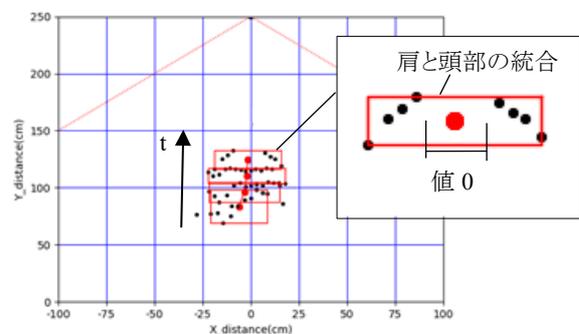


図 4.3 1 人通行 0° 1m/s

Figure 4.3 One person walk 0° 1m/s

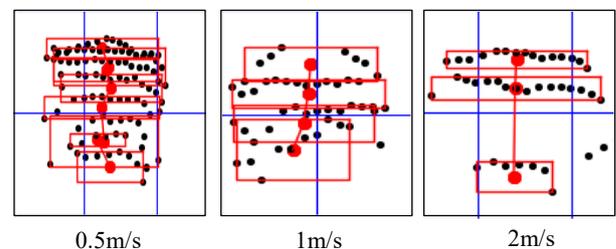


図 4.4 1 人通行 0° 0.5, 1, 2m/s

Figure 4.4 One person walk 0° 0.5, 1, 2m/s

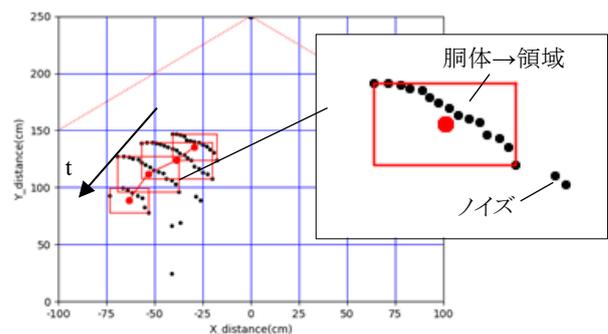


図 4.5 1 人通行 30° 1m/s

Figure 4.5 One person walk 30° 1m/s

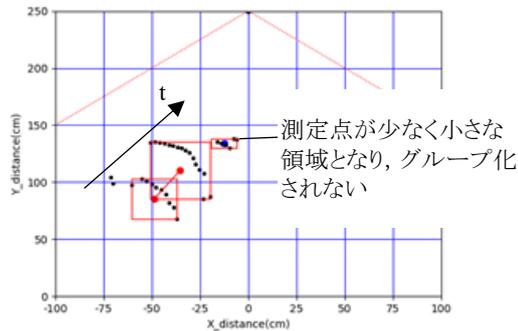


図 4.6 1人通行 30° 2m/s
Figure 4.6 One person walk 30° 2m/s

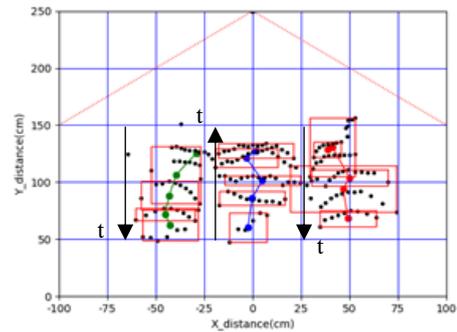


図 4.9 3人並列双方向 0° 10cm 1m/s
Figure 4.9 Three persons abreast walk 0° 10cm 1m/s

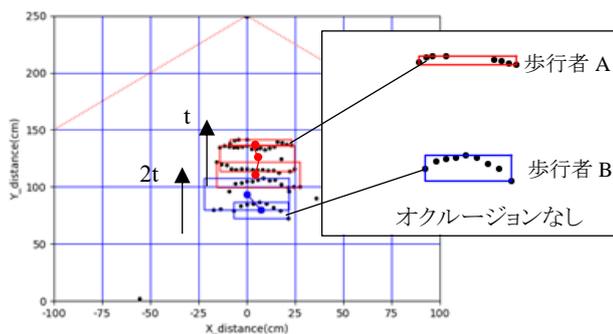


図 4.7 2人縦列 0° 1m/s
Figure 4.7 Two persons walk in a line 0° 1m/s

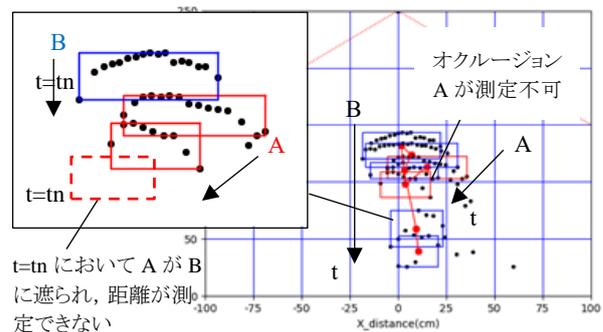


図 4.10 2人並列同方向 0° 30° 1m/s
Figure 4.10 Two persons abreast walk 0° 30° 1m/s

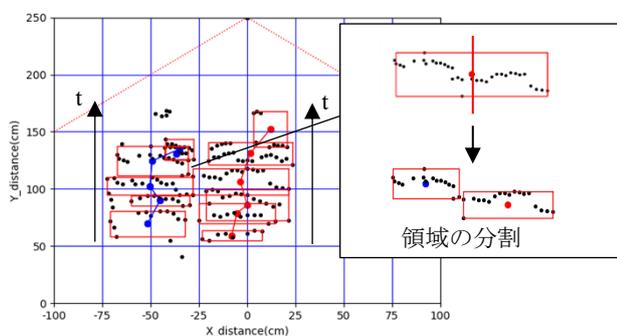


図 4.8 2人並列同方向 0° 10cm 1m/s
Figure 4.8 Two persons abreast walk 0° 10cm 1m/s

5. まとめ

小型で低価格なソリッドステート型 LiDAR を用いて廊下や出入口での人流を計測する方式を提案した. 提案方式ではセンサを天井や壁に取り付け, その測定面を通路方向に対して直交に, 真下方向から少し傾きをつけて設置することにより, センサ付近を通行する人数, 方向, 速度を計測する. フレーム毎の人領域抽出およびフレームに渡る人領域のグループ化の実装し, 通行実験により評価を行った. その結果, 提案方式の有効性を確認するとともに, 判定方法に関する課題を抽出した. 今後, 判定方法の修正, 実装, 実験による評価と改良を継続していく.

参考文献

- 1) 松本則雄, “LiDAR, 価格破壊 50ドル実現へカウントダウン,” 日経エレクトロニクス, 2017/02, pp.49-61, February 2017
- 2) 宇野麻由子, 松本則雄, “中国激安ロボ掃除機を徹底分解 部品の工夫にうなり設計に驚く,” 日経エレクトロニクス, 2018/09, pp.67-74, September 2018
- 3) 高藤巧, 藤田和久, 樋口雄大, 廣森聡仁, 山口弘純, 東野輝夫, “トラッキングスキャナとモーションセンサを用いた高精度屋内位置推定手法の提案,” 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.1, pp.353-365, January 2017
- 4) “LS LIDAR 2D Solid state Laser Scanner Introduction & Specifications,” LeiShen, pp.1-10, February 2018, https://www.robotshop.com/media/files/pdf/rb-lsl-07_-_ls02c_-_specifications..pdf