

# 屋内 SLAM のための LiDAR と偏光カメラを用いたガラスの 3 次元座標推定<sup>†</sup>

荻原 佑介\*・樋口 寛\*\*・伊賀上 卓也\*\*  
浅間 一\*\*・Qi AN\*・山下 淳\*

Estimation of Three-Dimensional Glass Coordinates  
with a LiDAR and a Polarization Camera for Indoor SLAM

Yusuke OGIHARA\*, Hiroshi HIGUCHI\*\*, Takuya IGAUE\*\*,  
Hajime ASAMA\*\*, Qi AN\* and Atushi YAMASHITA\*

This research proposes a method to estimate three-dimensional coordinates of glass using a polarization camera and LiDAR. A laser beam passes through glass. Therefore, it is impossible to acquire 3D point clouds of glass when performing 3D measurement of structures with LiDAR. On the other hand, the light reflected from the glass surface has a higher degree of linear polarization. Therefore, the direction in which the glass exists can be measured by using a polarization camera. In the proposed method, a polarized camera is used to determine the glass. After the determination, point cloud interpolation is performed on the point cloud measured from LiDAR, considering the positions of the surrounding window frames. In the indoor experiment, we successfully complemented the position of the glass that could not be measured by LiDAR.

**Key Words:** Glass detection, polarization camera, SLAM

## 1. 序 論

近年では、警備ロボットや案内ロボットといった用途のために、オフィスをはじめとする室内環境を自律走行するロボットの需要が高まっている。移動ロボットの走行を実現するための技術として自己位置推定と地図生成を同時に行う Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) がある。SLAM において地図生成が正常に行われないことは移動ロボットの走行に悪影響を及ぼす。地図生成に問題がある場合、障害物のある領域を非占有領域と誤認して障害物に衝突する可能性や自己位置推定の誤差が大きくなる可能性がある。

また、室内環境には窓や柵などのガラス物体が多く存在し

ている<sup>1)</sup>。それゆえ、室内環境での移動ロボットの走行のためには、ガラスが存在する環境下であっても正常に地図生成が行われることが必要とされている。ガラスの存在する領域と通行可能な領域を区別することができなければ、自律走行のための経路生成において、衝突が生じるような経路が選ばれてしまう。

SLAM に用いられる外界センサとしては単眼カメラ、ステレオカメラ、LiDAR などが挙げられる。LiDAR は物体表面で反射した光をセンサで検出することで、Time of Flight 方式での測距を行うセンサである。LiDAR は他のセンサと比べて高価であるものの、距離情報を高精度に得ることができることや照明変化の影響を受けにくいことから、外界センサとして SLAM に広く用いられている<sup>2)</sup>。

一方で LiDAR は以下の理由からガラスの検出を苦手としている。ガラスは透明かつ表面が滑らかなため、ガラス表面に入射した光のうち、大部分は透過または鏡面反射をする。鏡面反射では入射角と反射角の大きさはほぼ等しい。LiDAR はレーザー光を投光する部分とセンサが近くに配置されているため、鏡面反射したレーザー光は入射角と反射角が $0^\circ$ となる領域の近傍でのみセンサに返ってくる。そのためレーザーの入射角がガラス面の法線方向から離れた範囲では LiDAR を用いてガラスの距離を計測することが困難である。Zhao らは

<sup>†</sup> 第 23 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2022・12)

\* 東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

\*\* 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 東京都文京区本郷 7-3-1

\* Department of Human and Engineered Environmental Studies, Graduate School of Frontier Sciences, the University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 2778563, Japan

\*\* Department of Precision Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 1138656, Japan

レーザのガラスへの入射角が小さい際には反射光の強度が大きくなる性質と LiDAR のデュアルリターン機能を用いて、1 方向に複数の距離が計測された場合にはガラスが存在するとみなし、ガラスの検出を行った<sup>3)</sup>。ただし、この手法を用いてガラスを検出するためには、レーザ光がガラスに垂直に入射する位置に移動する必要がある。

複数のセンサを組み合わせた先行研究としてガラス面においても音波は反射することを活用し、超音波センサと LiDAR を組み合わせた手法がある<sup>4) 5)</sup>。これらの手法は LiDAR から得られる距離とソナーから得られる距離の差がしきい値以上であるときにガラスを検出し、ソナーの距離を実際の距離として扱うものである。LiDAR よりも分解能が低いソナーによる計測距離を SLAM に使用するため、SLAM の精度が悪化する恐れがある。

山口らは 2D LiDAR に加えてガラスの検出に偏光カメラを用いた<sup>6)</sup>。ガラス表面で鏡面反射した光は偏光度が高くなるため偏光カメラを用いることでガラス検出が可能である。この手法では偏光カメラを用いることで入射角が  $0^\circ$  から離れた範囲からガラスの検出を行っている。一方で山口らの手法で得られる地図は 2 次元の地図に限定される。しかしながら、4 足歩行ロボットや、マニピュレータを搭載した移動ロボットは、機体の地面に対する高さに変化する。このようなロボットが走行する際の地図として 2 次元の地図は不十分である。

以上より、本論文では入射角の大きい領域を含む広範囲からガラスの検出を行い、3 次元の地図を生成する手法を構築することを目的とする。3 次元地図生成の中でも、LiDAR から得られた点群をもとにガラスの 3 次元座標を推定する手法を提案する。

## 2. 提案手法

### 2.1 提案手法の概要

本論文が提案する手法では LiDAR から得た点群と、偏光カメラから得た偏光度画像を入力として、ガラスを含む 3 次元の点群を出力する。構築したシステムの流れを Fig. 1 に示す。

LiDAR のみを用いてガラスの存在する環境の 3 次元計測を行った場合では、レーザがガラスを透過し背後の物体までの距離を計測するため、ガラスの 3 次元座標のみならず、ガラスが存在するか否かの判定も不可能である。一方、偏光カメラを用いると、ガラスの直線偏光度が高いことから画像上でガラスの存在する領域を判定できる。ただし、偏光カメラのみでは、ガラスの存在する方向は計測できるものの距離を計測できないため、3 次元座標の取得は不可能である。そこで提案手法では、偏光カメラと LiDAR を組み合わせることでガラスの 3 次元座標を推定する。

まず、計測前に偏光カメラ座標系と LiDAR 座標系との間の座標変換行列を求めるためのキャリブレーションを行う。キャリブレーション後、ガラスの 3 次元座標の推定を行う。

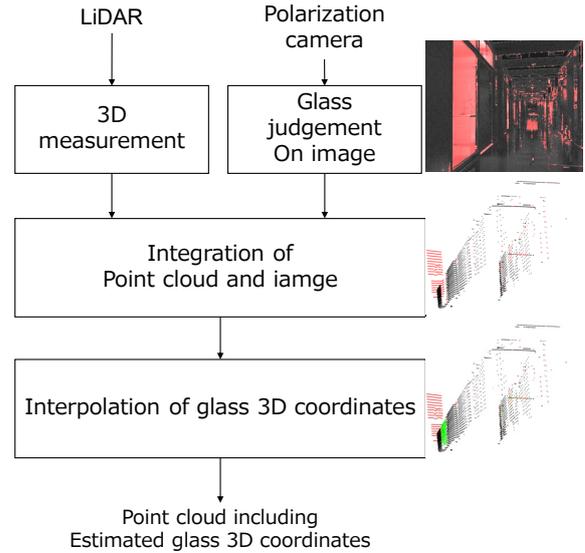


Fig. 1 Flow diagrams of the proposed method.

ガラスの 3 次元座標の推定では、まず偏光カメラで取得した偏光度画像をもとに、画像平面上でガラスが存在する領域を判定した 2 値画像を生成する。そこに、LiDAR で計測した 3 次元点群を投影することで、計測点群のうちレーザがガラスに入射している点とガラスに入射せず不透明物体を計測している点を判別する。最後に、ガラス周囲の不透明物体を計測していると判定された点からガラスの 3 次元座標を推定する。

本稿では以下、3 次元点群のうち、ガラスに 1 回以上入射し、レーザの経路上でガラスを透過または表面で反射している点をガラス透過・反射点、それ以外のガラスを透過することなく不透明物体を計測した点を不透明点と呼称する。

### 2.2 LiDAR-カメラキャリブレーション

偏光カメラから得られた偏光度の情報と LiDAR から得られた 3 次元点群を統合するために、計測に先立ち、LiDAR とカメラの間の外部パラメータのキャリブレーションを行う。チェッカーボードは交点の数が  $l \times m$  で、ボードの寸法及び余白の大きさも既知であるとする。偏光カメラからはチェッカーボードの 4 つの角を観測可能かつ、LiDAR からは面全体の 3 次元点群が得られるように配置する。あらかじめ内部パラメータのキャリブレーションを行った偏光カメラと LiDAR を用いてチェッカーボードの写った画像と点群を得る。

まず、偏光カメラでチェッカーボードの交点を検出し、カメラ座標系におけるチェッカーボードの同次座標  ${}^C\mathbf{T}_W \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$  を求める。偏光カメラの内部パラメータ  $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  は既知である。チェッカーボード座標系をワールド座標系として  $n = l \times m$  の Perspective-n-Point 問題を解けば、カメラ座標系とチェッカーボード座標系との座標変換  ${}^C\mathbf{T}_W$  が求められる。

次に、チェッカーボードの四隅の座標を用いて、LiDAR 座標系とチェッカーボード座標系との間の外部パラメータを求める。

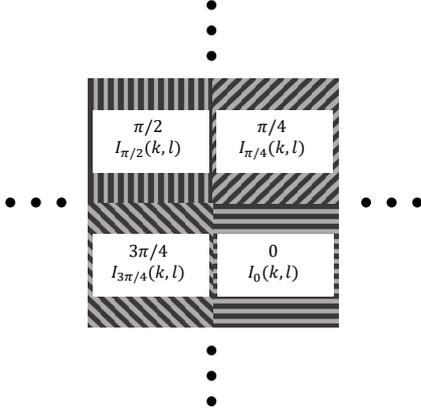


Fig. 2 Polarizer arrangement for each pixel.

LiDAR でチェッカーボードの平面を検出すると、チェッカーボード上に存在している 3 次元点群を抽出することができる。この点群のエッジからチェッカーボードの四隅の点の LiDAR 座標系における同次座標  ${}^L\mathbf{p}_k \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$  ( $k = 1, 2, 3, 4$ ) を求めることができる。チェッカーボードの四隅の点のチェッカーボード座標系での同次座標を  ${}^W\mathbf{p}_k \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ 、チェッカーボード座標系から LiDAR 座標系の座標変換行列を  ${}^L\mathbf{T}_W \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$  とすると、

$$\begin{bmatrix} {}^L\mathbf{p}_1, {}^L\mathbf{p}_2, {}^L\mathbf{p}_3, {}^L\mathbf{p}_4 \end{bmatrix} = {}^L\mathbf{T}_W \begin{bmatrix} {}^W\mathbf{p}_1, {}^W\mathbf{p}_2, {}^W\mathbf{p}_3, {}^W\mathbf{p}_4 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

となる。式 (1) 右辺の  $\begin{bmatrix} {}^W\mathbf{p}_1, {}^W\mathbf{p}_2, {}^W\mathbf{p}_3, {}^W\mathbf{p}_4 \end{bmatrix}$  の逆行列を算出することで座標変換行列  ${}^L\mathbf{T}_W$  が得られる。カメラ座標系と LiDAR 座標系との座標変換  ${}^C\mathbf{T}_L$  は式 (2) のように求めることができる。

$${}^C\mathbf{T}_L = {}^C\mathbf{T}_W \left( {}^L\mathbf{T}_W \right)^{-1}. \quad (2)$$

偏光カメラでは、1 枚の RAW 画像から、カラーまたはモノクロ画像と偏光度画像の両方を得ることができる。従って、カラーまたはモノクロの画像で、LiDAR-カメラキャリブレーションを行って得られたパラメータを、偏光度画像およびガラス判定結果にも用いることができる。

### 2.3 偏光度を用いたガラス判定

光は電磁波であり、空間を伝播する横波としての性質がある。光の電場ベクトルの振動方向が偏る現象あるいはそのような光を偏光と呼ぶ。偏光には直線偏光と円偏光の 2 種類が存在する<sup>7)</sup>。このうち、ほとんどの室内環境においては円偏光の寄与は小さく、直線偏光のみを考慮すれば良い<sup>8)</sup>。

直線偏光は電場ベクトルが 1 方向に振動しており、進行方向に垂直な面上においては直線状に振動するものである。一般に光は、様々な振動方向を持つ偏光の重ね合わせとみなすことができる。この光の振動方向が 1 方向に揃っているものを完全直線偏光、逆に振動方向が完全にランダムな状態を非偏光、中間の状態を部分直線偏光と呼ぶ。光の直線偏光の度合いを表す尺度として直線偏光度 (Degree of Linear Polarization : DoLP) がある。完全直線偏光の直線偏光度

は 1、非偏光の直線偏光度は 0 である。

自然光は非偏光に近い部分偏光であるが、ガラスのような滑らかな誘電体表面で鏡面反射をした際には偏光度が大きくなる<sup>9)</sup>。つまり偏光度画像中で偏光度の高い点はガラスである可能性が高い。そのため偏光度をもとにガラスを検出することが可能である。

偏光度の計測を行うために部分偏光が偏光板を通して光検出器に入射する状況を考える。このとき検出される光の強度  $i_{\theta_p}$  は、偏光板の角度  $\theta_p$  の変化に対して周期  $\pi$  の正弦波状に変化する<sup>9)</sup>。つまり

$$i_{\theta_p} = a \cos(2\theta_p - 2\varphi) + b, \quad (3)$$

と表せる。このときの直線偏光度  $d$  は、式 (3) の直流成分と振幅の比となるので

$$d = \frac{a}{b}, \quad (4)$$

となる。

偏光カメラは  $0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}$  の 4 方向の偏光子を 1 組として Fig. 2 のようにイメージセンサの前に配置している。 $(k, l)$  番目の画素において、偏光子の角度が  $\theta_p = 0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}$  での光の強度  $I_0(k, l), I_{\frac{\pi}{4}}(k, l), I_{\frac{\pi}{2}}(k, l), I_{\frac{3\pi}{4}}(k, l)$  が計測される。式 (3) の未知パラメータは 3 つなので最小 2 乗解を求めると、 $(k, l)$  番目の画素での偏光度  $d(k, l)$  は

$$d(k, l) = \frac{2\sqrt{(I_0(k, l) - I_{\frac{\pi}{2}}(k, l))^2 + (I_{\frac{\pi}{4}}(k, l) - I_{\frac{3\pi}{4}}(k, l))^2}}{I_0(k, l) + I_{\frac{\pi}{4}}(k, l) + I_{\frac{\pi}{2}}(k, l) + I_{\frac{3\pi}{4}}(k, l)}, \quad (5)$$

となる。各画素において直線偏光度を算出することで偏光度画像を得る。

式 (5) によって算出した偏光度画像に以下のような処理を行う。算出した偏光度画像は、ピクセル間の強度の関数である。それゆえ、白飛び黒つぶれして正しい強度を観測できていないピクセルにおいては偏光度を正しく算出することができないため、偏光度を 0 とする。

また、入射光に対する反射光の比を表すアルベドが低い物体は偏光度が高くなるため、黒い不透明物体の偏光度も高くなる<sup>10)</sup>。これにより、偏光度を直接ガラス判定に利用すると誤検出が多くなる。したがって、黒い物体をガラスと誤検出することを防ぐために提案手法では、黒い物体を撮影していないと考えられる輝度値が一定以上の領域のみでガラスの判定を行う。加えて、1 枚のガラスの表面は滑らかであるので、ガラス表面で反射した光の偏光度はなだらかに変化すると考えられる。そこで 2 次元の FFT を用いて周波数領域でローパスフィルタをかけることで高周波成分のノイズを除去する。

以上のように偏光度画像を処理したものに対ししきい値  $t_g$  ( $0 < t_g < 1$ ) を定め、偏光度がしきい値以上のピクセルはガラスを撮影していると判定する。ガラスを撮影していると判定したピクセルを 1、そうでないピクセルを 0 とした 2 値画像をガラス判定結果として出力する。

## 2.4 ガラス判定と LiDAR 点群の対応付け

2.2節の LiDAR-カメラキャリブレーションによって得られた外部パラメータ  ${}^C\mathbf{T}_L$  によって, LiDAR 座標系の点をカメラ座標系へと変換することができる. また, カメラの内部パラメータ  $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  を用いることでカメラ座標系の点  $[x_c, y_c, z_c]^T$  はイメージ座標系の点  $[u, v, 1]^T$  へ投影できる.

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}. \quad (6)$$

$\mathbf{K}$  はカメラの内部キャリブレーションによって求められる既知の行列であり  $s \in \mathbb{R}$  はスケールパラメータである.

式 (6) と  ${}^C\mathbf{T}_L$  を用いて, LiDAR 座標系の点  ${}^L\mathbf{p}_j$  をイメージ座標系に投影すると,

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \end{bmatrix} {}^C\mathbf{T}_L {}^L\mathbf{p}_j, \quad (7)$$

となる. 式 (7) に基づき, LiDAR の 3 次元点群をガラス判定によって得られた 2 値画像に投影する. 投影された点の最近傍のピクセルのガラス判定結果から, その点がガラス透過・反射点であるか不透明点であるかを判定する.

## 2.5 ガラス面上の 3 次元座標の推定

前述の通り, ガラスの 3 次元座標が計測できないことは屋内ロボットの安全な走行に悪影響を及ぼす. 2D LiDAR を用いた先行手法<sup>6)</sup> では, レーザがガラスに垂直に入射した際の距離情報をガラスの座標として使用する. しかし, 3 次元計測においては LiDAR の高さ異なる高さのガラスにはレーザが垂直に入射せずガラスの距離を取得できない. それゆえ, 先行手法を用いて 3 次元の地図を生成することは不可能である. そこで, 本稿ではガラス自体の距離を取得できない場合に対応し, 3 次元でのガラスの計測を行うため, ガラスの周囲に存在する不透明物体の座標を推定に用いる手法を提案する.

室内環境においては, 多くの場合ガラスの周囲には窓枠や壁といった不透明物体が存在する. これらの不透明物体のうちガラスの近傍にあるものは, ガラスとほぼ同一平面上に存在すると考えられる. そこで, 前述の判定手法でガラス透過・反射点であると判定された点群の周囲に存在する不透明点と判定された点群の座標から, ガラスの存在する座標を推定する手法を提案する. 窓枠などを計測した不透明点はガラス透過・反射点を挟むように存在する. ガラス透過・反射点を挟む 2 つの不透明点を結ぶ直線は, 窓枠と窓枠の間を結ぶ直線となり, 室内環境においてはガラス平面と平行かつ距離も近いと考えられる.

メカニカルスキャン方式の LiDAR では垂直方向に複数のレーザモジュールを配置し, 水平方向に回転することで走査し 3 次元計測を行う. したがって, 得られる点群は各レーザモジュールで計測した点群のラインが層状に並んだものと

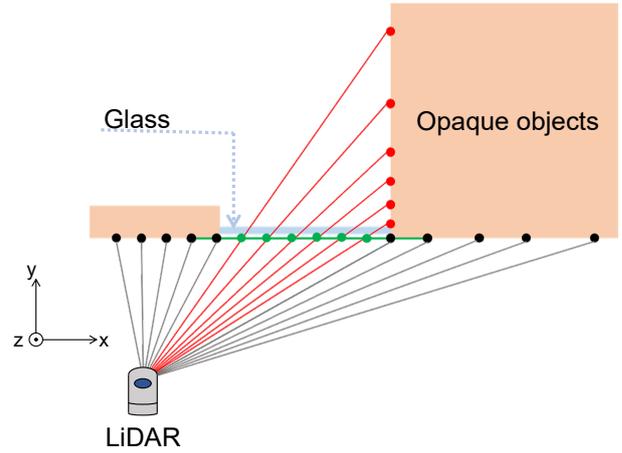


Fig. 3 Estimation of glass coordinates using opacity objects

なっている. 提案手法ではそれぞれのラインごとにガラスの位置の推定を行い, それらを統合することでガラスの 3 次元座標を推定する. あるラインにおける提案手法によるガラス座標推定の模式図を Fig. 3 に示した. 黒い点が不透明点, 赤い点がガラス透過・反射点, 緑の点が推定したガラス点である.

ガラス透過・反射点はガラスを透過した背後の物体の座標, またはガラスを反射して計測しガラス面を挟んで対称側の座標を得ていると考えられるため, Fig. 3 の赤色の直線のように, 計測原点とガラス透過・反射点の座標を結ぶ直線上にガラス点が存在する. Fig. 3 における緑色の直線は, ガラス透過・反射点を挟む不透明点間を結んだ直線である. 提案手法では, これら 2 直線の交点をガラスの 3 次元座標であると推定する.

ガラス検出の誤判定により実際には不透明物体を計測している点が誤ってガラス透過・反射点としてラベリングすることが考えられる. このような誤判定の影響を抑制するためにガラス座標の推定はガラス透過・反射点が水平方向に 3 点以上連続して並んでいるときに行い, それ以下のときは推定を行わない.

逆に, ガラスを透過または反射している点を誤って不透明点とラベリングすることも考えられる. 特にキャリブレーションの誤差などからガラスと不透明物体のエッジ付近でガラス透過・反射点を不透明点であると誤判定することが考えられる. このように不透明点であると誤判定された点は, 実際の不透明物体よりも遠方にあると考えられる. ガラスと判定された点の前後の不透明点と判定された点を 5 点取得し, その 5 点のうち原点からの距離が中央値を取るものを推定に用いることで誤判定の影響を抑制する.

## 3. 実験

### 3.1 実験手順

提案手法によるガラス検出とガラスの 3 次元座標の推定が可能であることを示すために実験を行った. 本実験では LiDAR として Velodyne 社の HDL-32E を, 偏光カメラと

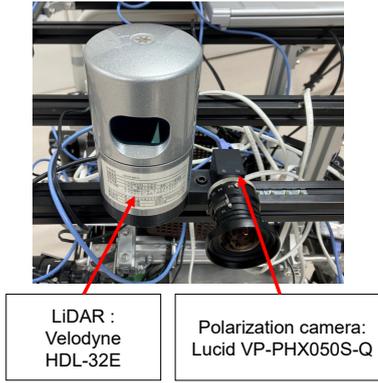


Fig. 4 Experimental devices.

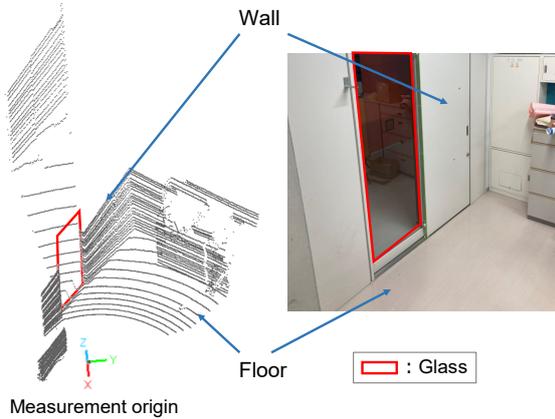


Fig. 5 Experimental environment.

して LUCID 社の VP-PHX050S-Q を用いた。HDL-32E は 32 個のレーザと検出器が縦に並んでおり、それぞれのレーザが水平方向に回転し、ライン状に測距を行う LiDAR である。LiDAR と偏光カメラを Fig. 4 のように固定した状態で、1 視点でのガラスの検出を行った。実験は Fig. 5 右のような屋内、蛍光灯照明下で行った。図中にあるガラス窓は高さ 1.9 m、幅 0.7 m である。ガラスの表面に紙を貼った上で LiDAR で計測した際の座標に対し、RANSAC により近似した平面をガラス平面の真値とした。

LiDAR と偏光カメラの間の視差によって、LiDAR では計測可能なものの偏光カメラでは壁などで遮蔽されている領域、及びその逆が生じる。そのうち LiDAR でのみ計測可能な点については偏光度画像と点群の正しい対応付けができないため、予め除去した。

2.5 節で説明した通り、ガラスの 3 次元座標の推定は、ガラス透過・反射点が水平方向に 3 つ以上連続しているときに行う。ガラス透過・反射点の直前と直後の不透明点を各 5 点ずつ取り出し、それぞれの 5 点のうち観測点からの距離が中央値を取る点を窓枠の座標として用いた。

### 3.2 結果と考察

偏光カメラから得られたカラー画像を Fig. 6(a) に示す。ガラス判定精度の評価のため、手動で実際のガラスの位置のセグメンテーションを行い、図中では赤枠で囲った。

実験環境におけるガラス判定の結果を Fig. 6(b) に示す。偏光カメラで得られた画像に対して、ガラスと判定された領域を赤く着色した。ガラスであるとセグメンテーションされたほぼ全域が正しくガラスであると判定されている。

偏光カメラによるガラス検出の精度を評価する。画像中でガラスの映った領域を手動でセグメンテーションしたデータを、正解データとした。ガラスであると判定され実際にガラスであったピクセルの数を  $TP$ 、ガラスであると判定されたものの実際には非ガラスであったピクセルの数を  $FP$ 、非ガラスであると判定され実際に非ガラスであったピクセルの数を  $TN$ 、非ガラスであると判定されたものの実際にはガラスであったピクセルの数を  $FN$  と表す。分類の性能を表す指標として正解率 (Accuracy)、適合率 (Precision)、再現率 (Recall)、特異率 (Specificity)、F1 スコア ( $F_1$ ) を定義する。

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \quad (8)$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (9)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (10)$$

$$\text{Specificity} = \frac{TN}{TN + FP}, \quad (11)$$

$$F_1 = \frac{2TP}{2TP + FP + FN}. \quad (12)$$

この実験でのガラス検出の正解率は 0.985、適合率は 0.981、再現率は 0.948、特異率は 0.995、F1 スコアは 0.965 となった。正解率がチャンスレベルの 0.5 を大きく上回っており、偏光カメラによりガラスの判定が可能であることが示された。

一方で、画像中で誤判定している領域については、以下のような原因が考えられる。ドアの金属部分や右上のパイプといった光沢のある物体がガラスであると誤判定されている。また、ガラスの中央付近が不透明物体と誤判定されているが、これは映り込みにより反射光の強度がガラス内で一様でないためだと考えられる。

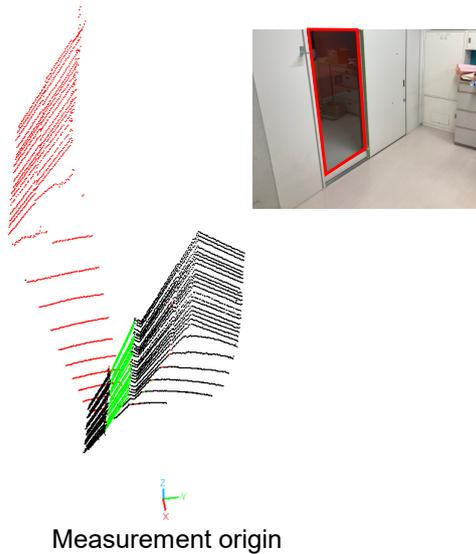
Figure 7 は LiDAR 点群の各点に対してガラス判定を行ったのちに、ガラス透過・反射点と判定された点は赤に、不透明点と判定された点は黒になるように判定結果を可視化し、ガラスの座標の推定結果を緑色の点で表示したものである。右上の写真は実験を行った環境を表す。Fig. 5 左の、LiDAR のみで計測した 3 次元点群においては計測されていないガラスの座標が Fig. 7 中においては、提案手法によって推定され



(a) True location of glass

(b) Proposed method

Fig. 6 Result of glass detection using polarization camera



**Fig. 7** Point cloud measured with proposed method. Red points: Measured points which passed through glass. Black points: Measured points of non-glass objects. Green points: Estimated 3D-coordinates of glass.

ており、ガラスの3次元的な計測に成功した。

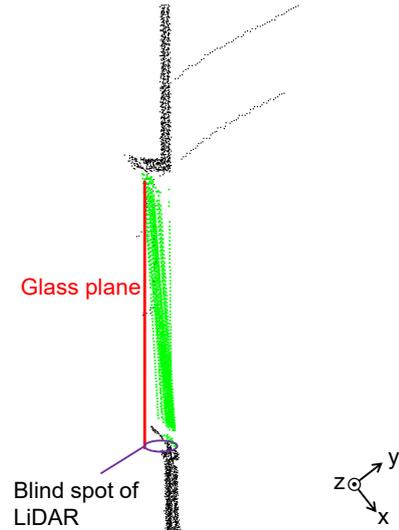
提案手法によって計測した点群を俯瞰視点から見たものが**Fig. 8**である。黒い点が不透明物体を計測した点群を、緑の点が推定したガラスの座標を、赤い線が真値のガラス平面を表す。推定したガラスの座標は**Fig. 8**の上方ほど真値に近く、下方は不透明物体の壁の平面に近い。ガラス周囲の枠の厚みによって**Fig. 8**下方にLiDARの死角が生じており、上方ではガラス周囲の不透明物体が計測できている一方で、下方ではガラスの近傍の不透明物体が計測できていないためこのような結果になったと考えられる。今後の展望としてロボットを走行させ、複数の視点からの点群を統合することで死角を解消しガラス近傍の不透明物体の座標が取得できるようなシステムの構築が望まれる。

真値の平面との絶対距離の平均は46.2mmで、標準偏差は22.9mmとなった。これは、LiDARの距離方向の分解能20mmと同じオーダーであり、SLAMに用いるには十分な精度であると考えられる。

#### 4. 結 論

本研究では偏光カメラを用いることで、LiDARの点からガラスを透過・反射した点を検出し、検出結果に基づき周囲の不透明物体を計測した点群からガラスの3次元座標を推定する手法を提案した。実験においては、LiDARのみでは取得できなかったガラスの3次元座標を、提案手法を用いることで推定することが可能となった。

課題としては、窓枠の位置からガラスの3次元座標を推定するため、誤差が窓枠の存在する平面とガラスの存在する平面の距離に依存するという点がある。今後は、LiDARとカメラを移動ロボットに搭載し移動視点でのガラス検出を行



**Fig. 8** Overhead view of point cloud measured with proposed method.

う。ガラスにレーザー光が垂直に入射する領域で得られたガラスの距離などと組み合わせることでより高精度にガラスの位置を推定可能なシステムの構築を目指す。

#### 謝 辞

本研究の一部はJSPS科研費22H03666の援助を受けた。

#### 参 考 文 献

- 1) P. Foster, Z. Sun, J. J. Park, and B. Kuipers: VisAGGE: Visible Angle Grid for Glass Environments, Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2213/2220 (2013)
- 2) Henok T. Warku, Nak Y. Ko, Hong G. Yeom and Woong Choi: Three-Dimensional Mapping of Indoor and Outdoor Environment Using LIO-SAM, Proceedings of the 2021 21st International Conference on Control, Automation and Systems, 1455/1458 (2021)
- 3) X. Zhao, Z. Yang, and S. Schwertfeger: Mapping with Reflection - Detection and Utilization of Reflection in 3D Lidar Scans, Proceedings of the 2020 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, 27/33 (2020)
- 4) H. Wei, X. Li, Y. Shi, B. You, and Y. Xu: Fusing Sonars and LRF Data to Glass Detection for Robotics Navigation, Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 826/831 (2018)
- 5) Shao-Wen Yang and Chieh-Chih Wang: On Solving Mirror Reflection in LIDAR Sensing, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, **16-2**, 255/265 (2011)
- 6) 山口恵璃, 樋口寛, 山下淳, 浅間一: 偏光カメラの偏光度とLRFの距離情報を用いたガラス環境対応SLAM, 精密工学会誌, **87-1**, 114/119 (2021)
- 7) E. Hecht: Optics 4th Edition, AddisonWesley (2002)
- 8) N. Lefaudeux, N. Lechocinski, S. Breugnot, and P. Clemenceau: Compact and Robust Linear Stokes Polarization Camera, Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing VIII, **6972**, 76/87 (2008)
- 9) 宮崎大輔, 池内克史: 偏光の基礎理論とその応用, 情報処理学会論文誌コンピュータビジョンとイメージメディア, **1-1**, 64/72 (2008)

- 10) M. K. Kupinski, C. L. Bradley, D. J. Diner, F. Xu, and R. A. Chipman: Angle of Linear Polarization Images of Outdoor Scenes, *Optical Engineering*, **58-8**, 082419 (2019)

.....

[著者紹介]

荻原 佑介 (学生会員)



2023年3月東京大学工学部精密工学科卒業。  
2023年4月より東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻修士課程進学。

樋口 寛



2018年3月東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻修士課程修了。同年4月より同専攻博士課程。2019年4月～2021年9月日本学術振興会特別研究員 (DC2)。

伊賀上 卓也



2022年3月東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻修士課程修了。同年4月より同専攻博士課程、及び産業総合技術研究所 RA。

浅間 一 (正会員)



1984年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。1986年理化学研究所研究員補。同研究員、副主任研究員等を経て、2002年東京大学人工物工学研究センター教授。2009年同大学大学院工学系研究科教授。工学博士 (東京大学)。

Qi AN (正会員)



2014年東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。2015年同専攻助教 (2015～2017年は特任助教)、2020年九州大学大学院システム情報科学研究院准教授、2022年より東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻准教授、現在に至る。

山下 淳 (正会員)



1996年3月東京大学工学部卒業、1998年3月東京大学大学院工学系研究科修士課程修了、2001年3月同博士課程修了、博士 (工学)。静岡大学工学部助手、助教、准教授、東京大学准教授を経て、2022年4月東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻教授、現在に至る。この間2006年11月～2007年12月カリフォルニア工科大学客員研究員。

.....