

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

○荻原 佑介, 樋口 寛, 伊賀上 卓也, 浅間 一, 山下 淳 (東京大学)

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

○Yusuke OGIHARA, Hiroshi HIGUCHI, Takuya IGAUE, Hajime ASAMA,
Atsushi YAMASHITA (The University of Tokyo)

Abstract : 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, and based on that 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.

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 [1]。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いことで、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を選んでしまう可能性が生じる。

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反射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も距離情報を高精度に得ることができるため、外界センサとして SLAM に広く用いられている。

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光は入射角と反射角が 0° 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測定することが困難である。Zhao らはレーザがガラスに垂直に近い角度で入射する際には強度が大きくなる点と LiDAR のデュアルリターン機能を用いてガラスの検出を行った [2]。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 Wei らはガラス面でも音波は反射することを活用し、ソナーと LiDAR を組み合わせたシステムを構築した [3]。この手法は 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。ソナーの分解能は LiDAR に劣るが、この手法ではガラスの距離としてソナーから得られた値を用いるため SLAM の精度が悪化する恐れがある。

山口らは 2 次元の LiDAR に加えてガラスの検出に偏光カメラを用いた [4]。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広い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が変化する。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図1に示す。

LiDAR のみを用いて3次元測定を行った場合では、レーザがガラスを透過し背後の物体を測定するため、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スケール不定であるため、ガラスの存在する方向は測定できるものの、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次元座標の推定を行った。

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。ガラス座標の推定では、まず偏光カメラで取得した偏光度画像をもとに、ガラスである度合いを算出し、そこから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、計測点群のうちガラスを透過して背後の物体を測定している点とそうでない点を判別する。最後に、ガラスを透過していないと判定された点群の3次元座標をもとにガラスの3次元座標を推定する。

本稿では以下、ガラスである度合いをガラス度と呼称する。また、3次元点群のうち、ガラスを透過してガラス以外の対象を計測した点をガラス透過点、それ以外の、ガラスを透過することなく対象を測定した点を非透過点と呼称する。

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ガラス度の情報と 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。LiDAR-カメラキャリブレーションの概略を図2に示す。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つの角が見え、LiDAR か

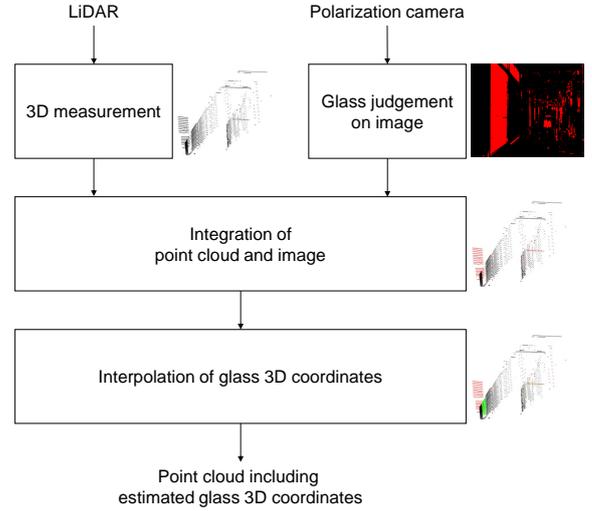


Fig. 1: Flow diagrams of the proposed method.

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間の座標変換 ${}^C\mathbf{T}_W$ 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。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、

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

となる。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。図2に示したようにチェッカーボード座標系を経由することでカメラ座標系と LiDAR 座標系との間の座標変換 ${}^C\mathbf{T}_L$ を求めることができる。

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

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。

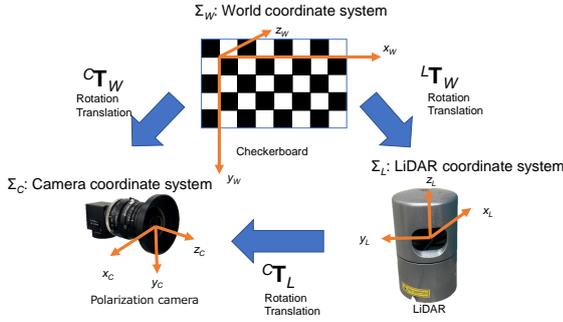


Fig. 2: Overview of LiDAR-camera calibration.

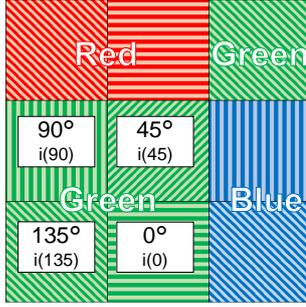


Fig. 3: Polarizer arrangement for each pixel.

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度画像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。逆に振動方向が完全にランダムな状態を非偏光、中間の状態を部分偏光と呼ぶ。このうち、偏光の情報はストークスベクトル

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

を用いて表すことができる [5]。ストークスベクトルは4つのパラメータを持つベクトルである。ここで S_1, S_2, S_3 は直線偏光に関するパラメータであり、 S_3 は円偏光の度合いを示すパラメータである。円偏光は特殊な状況で発生するものであり、ほとんどの状況では最初の3つのパラメータのみを考慮すればよい [6]。

偏光カメラは0度、45度、90度、135度の4方向の偏光子を1組として図3のようにイメージセンサの前にアレイ状に配列している。偏光カメラを用いることで、次式のように直線偏光に関する3つのストークスパラメータを

計測することができる。

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(0) \\ i(90) \\ i(45) \\ i(135) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

ここで、角度 θ の偏光子が光路上に設置されたピクセルでの、光の強度を $i(\theta)$ と表す。直線偏光の度合いを示す直線偏光度 (Degree of Linear Polarization) は

$$DoLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}, \quad (5)$$

と表される [6]。直線偏光度は0から1の値をとり、1に近いほど偏光の割合が大きいことを意味する。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表面で鏡面反射をした際には偏光度が大きくなる。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。

偏光度画像は、ピクセル間の強度の差の比をとるものである。したがって、ベイヤー画像で白飛び、黒つぶれしている領域は測定できない。白飛び、黒つぶれしている領域は測定不可能であり、ガラス確率は0とする。

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、黒い物体の偏光度は高くなる [7]。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、ガラスの誤検出を防ぐために本手法では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をガラスである度合いを示すガラス度画像として定義する。そして、ガラス度画像において画素値の大きい領域ほどガラスである可能性が高いものとして扱う。最後に、天津の手法 [8] を用いてしきい値を定め、ガラス度がしきい値以上の領域にはガラスが存在すると判定する。入力画像に対し、ガラスが存在すると判定された領域とそうでない領域に分けた2値画像を生成する。

2.4 ガラス判定と LiDAR 点群の対応付け

前述の 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^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.

以上から LiDAR 座標系の点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. 本式に基づき, 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. 投影された点の周囲の画素から, その点がガラス透過点であるか非透過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

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非透明物体が存在する. これらの非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であると判定された点群の, 周囲の非透過点群の位置から, ガラスの存在する座標を推定する. 窓枠による非透過点はガラス透過点を挟むように存在する. ガラス透過点を挟む 2 つの非透過点を結ぶ直線は, 窓枠と窓枠の間を結ぶ線分となり, 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を配置し, 水平方向に回転することで走査し 3 次元測距を行う. したがって, 得られる点群は水平ライン上の点群が垂直方向にならんだものとなる. そこでそれぞれのラインごとにガラスの位置の推定を行う.

ガラス透過点はガラスを透過して背後の物体の距離を得ていると考えられるので, 原点とガラス透過点の座標を結ぶ線分上に実際のガラスが存在する. よってこれら 2 直線の交点をガラスの 3 次元座標であると推定する. 本手法では誤検出の影響を抑えるため, ガラス透過点が水平方向に 2 つ以上並んでいる領域でガラスの存在する位置を推定し, ガラス透過点が連続していない部分では推定を行わない. また, 非透過点についても, ガラス透過点の前後の複数点を取得し, そのうち原点からの距離が中央値を取る点を用いて推定を行う.

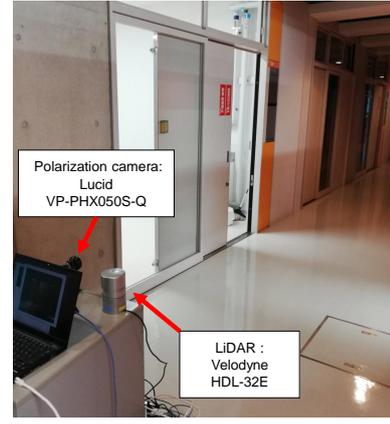


Fig. 4: Experimental environment: A corridor with glass window.

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位置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. 実験は図 4 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 190 cm, 幅 110 cm であり, 廊下の幅は 220 cm である.

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 でのみ測定可能な点については予め除去した.

2.5 節で説明した通り, ガラスの 3 次元座標の推定は, ガラス透過点が水平方向に 2 つ以上連続しているときに行う. ガラス透過点の直前と直後の非透過点を各 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もの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図 5(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った. ガラスとしてセグメンテーションした領域を, 図中では赤枠で囲った. 廊下の両隣には部屋に面したガラス窓が並んでおり, 奥には屋外に面した窓が存在している.

実験環境におけるガラス判定の結果を図 5(b) に示す. 偏光カメラで得られたモノクロ画像に対して, ガラスと判定

された領域を赤く着色した。

図左方の大きなガラスや、その上方のガラスが正しくガラスであると判定されている。図中央付近の、廊下の左右に存在する窓についても、誤判定は存在するもののガラスと判定されている。

図 5(a) においては廊下の奥にあるガラスが写っているが、図 5(b) においては、ほとんどの領域でガラスとして検出されていない。宮崎らによれば、鏡面反射光の偏光度は反射角に依存し、反射角が小さいときに小さい [9]。この実験環境においてはカメラの光軸方向は廊下奥のガラスに対してほぼ垂直であり、反射光の反射角が小さいため、偏光度も低くなっていると考えられる。したがって、補完した点群の LiDAR に対する角度を利用することで誤判定を抑制できる可能性がある。

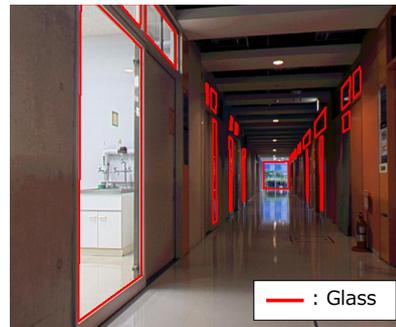
偏光カメラによるガラス検出の有効性を評価した。画像中でガラスの映った領域を手動でセグメンテーションし、正解データとした (図 5(a))。このときの提案手法によるガラス検出の正解率は 0.931、適合率は 0.768、再現率は 0.852、特異率は 0.948、F1 スコアは 0.808 となった。正解率がチャンスレベルの 0.5 を大きく上回っており、偏光カメラによりガラスの判定が可能であることが示された。

図 6 は LiDAR 点群の各点に対してガラス判定を行ったのちに、ガラス透過点と判定されたは赤に、非透過点と判定された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。図 6 左方の大きなガラスの存在する領域が緑の点で補完された。したがって、LiDAR の点群密度の高い箇所において、提案手法によりガラスの補完が可能であることが示された。窓枠の位置をもとにガラスの位置を推定するため、窓枠の存在する平面とガラスの平面の間の距離の分誤差が生じる。この環境での誤差は 5 cm 程度であった。

4. 結論

本研究では偏光カメラを用いることで、LiDAR の点群からガラスを透過した点群を検出し、検出結果に基づきガラスの 3 次元座標を推定する手法を提案した。偏光カメラで取得した偏光度画像を用いて、画像上でガラスの存在する領域の判定ができた。この判定を LiDAR で計測した点群と組み合わせることで、LiDAR 点群を、ガラスを透過して背景を計測している点群と、そうでない点群に分類できた。ガラスを透過していない点群のうち、窓枠に相当するガラス近くの点から、ガラスの 3 次元座標を推定できた。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



(a) Color image from a polarization camera.



(b) Result of glass judgement

Fig. 5: images acquired with polarization camera.

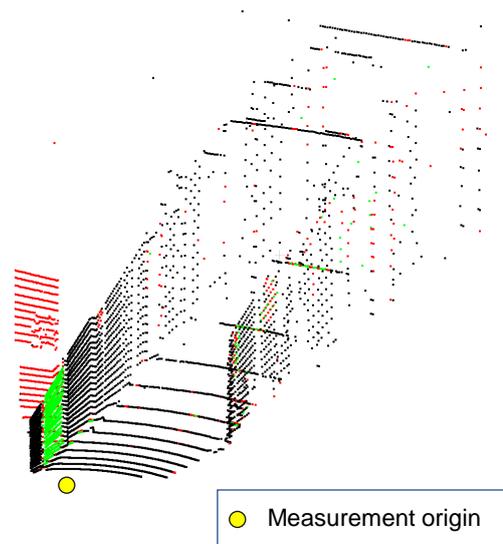


Fig. 6: Point cloud measured with proposed method. Red points: Measured points which passed through glass. Black points: Measured points of non-glass objects. Green points: Estimated 3D-coordinates of glass.

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う。ガラスにレーザ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 “Vis-AGGE: Visible Angle Grid for Glass Environments,” *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2213–2220 (2013)
- [2] 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*, pp. 27–33 (2020)
- [3] 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*, pp. 826–831 (2018)
- [4] 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*, vol. 87, no. 1, pp. 114–119 (2021)
- [5] E. Hecht *Optics*, 4th Edition, Addison Wesley (2002)
- [6] N. Lefaudeux, N. Lechocinski, S. Breugnot, and P. Clemenceau “Compact and Robust Linear Stokes Polarization Camera,” *Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing VIII*, vol.6972, SPIE, pp. 76–87 (2008)
- [7] 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*, vol. 58, no. 8, p. 082419 (2019)
- [8] N. Otsu “A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, pp. 62–66 (1979)
- [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*, vol. 1, no. 1, pp. 64–72 (2008)