

ガラス環境の SLAM における偏光カメラと LRF を用いたガラス検出

○山口恵璃 †, 樋口寛 †, 山下淳 †, 浅間一 †

○ Eri YAMAGUCHI †, Hiroshi HIGUCHI †, Atsushi YAMASHITA †
and Hajime ASAMA †

†: 東京大学, yamaguchi-eri@robot.t.u-tokyo.ac.jp

＜要約＞本研究では、LRF と偏光カメラを組み合わせることでガラスを広範囲に検出する手法を提案する。ガラスの偏光度が大きい性質を使用して、LRF によって検出できない範囲のガラスを偏光カメラにより検出する。実験により、広範囲のガラス検出が可能であることを示した。

＜キーワード＞SLAM, ガラス検出, LRF, 偏光カメラ

1 序論

近年ロボット産業の発展に伴い、自律移動型ロボットの運用が期待されている。ロボットの移動には、環境の地図とロボットの位置姿勢を同時に推定する手法である Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) が広く用いられ、研究されている。

オフィスを始めとする屋内環境ではガラスが多く使用されている（図 1）。屋内環境で安全に運用するためには、ガラスを含む環境でも精度の高い SLAM を行う必要がある。

Laser Range Finder (LRF) は、レーザを照射し障害物で反射してセンサに戻るまでの時間を使用して距離を計測するセンサである。障害物までの距離を高精度に計測可能であることから、SLAM に広く用いられるセンサである。しかし、LRF はガラスを部分的にしか検出することができない（図 2）。ここで、LRF のレーザ光と対象物の法線方向のなす角度を入射角とする。LRF は入射角が小さいときのみガラスを計測可能である。ガラスが検出できないことで、地図生成が不正確になる。ガラスが検出されていない地図を使用することでロボットがガラスに衝突する等安全性の問題が発生する。また、ガラスが部分的にしか検出できないことにより、自己位置推定における位置合わせにおいて局所的に計測されたガラスがノイズとなり、自己位置推定が不正確になる。

この問題を解決するため、Jiang らはニューラルネ



図 1 ガラス環境の例

ットワークを用いて空間中のガラス確率である Glass Confidence Map を作成する手法を提案した [1]。しかし、この手法は、LRF で計測可能な範囲でガラス検出を行う手法であり、LRF では検出不可能な範囲が存在する問題を解決しない。よって、本研究では、ガラス環境における SLAM のための、広範囲なガラス検出手法の構築を目的とする。

透明物体の存在や形状の計測に偏光を用いる研究が

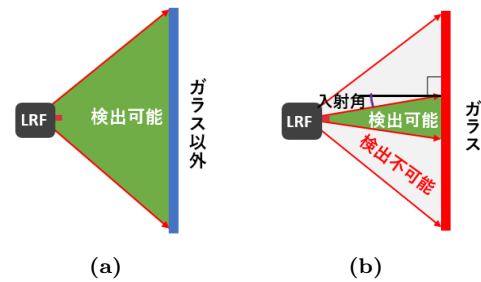


図 2 (a) LRF による壁の検出.(b) LRF によるガラスの検出.

行われている。偏光の割合を使用して、ガラスの検出を行うことができる [2]。偏光の大きさは、カメラ前面に偏光子を貼り付けた偏光カメラを使用することで計測可能である。本研究では、LRF と偏光カメラを組み合わせることで、広域でガラスの存在およびガラスの位置を検出する方法を提案する。

2 提案手法

2.1 概要

本研究では、偏光カメラを使用してガラス確率を計測し、LRF の距離情報と組み合わせ、ガラスの位置を検出する。

まず、手法のアプローチを述べ、偏光カメラを使用したガラス確率の計測手法、LRF との組み合わせによる位置検出について詳しく述べる。

2.2 アプローチ

ロボットを運用する環境は、自然光または照明が存在する状況であるとする。また、存在するガラスが平面であり、ガラスは窓枠等不透明物体で囲われている環境であることを仮定する。

自然光は様々な振動面をもつ波の重ねあわせでできている。振動面が偏った光を偏光という (図 3)。表面が滑らかな物体の反射光は光の振動面に偏りが生じ、偏光となる [2]。表面に細かい凹凸がある物体上の反射光は偏光しない。ガラスの表面は滑らかであるため、ガラス表面の反射光は偏光となる。

入射角が小さいとき、透明物体も不透明物体も LRF で観測することができる。入射角が大きいとき、透明物体は LRF で観測できないが、透明でない物体は LRF で観測することができる (図 2) [1]。

よって偏光の割合の大きさと入射角が大きいときの LRF の計測について以下の 4 つの状態を考えることができる。

- i 偏光の割合が小さく、LRF で計測されない：物体が存在しない
- ii 偏光の割合が小さく、LRF で計測される：不透明物体が存在する
- iii 偏光の割合が大きく、LRF で計測されない：表面が滑らかな透明物体 (ガラス)
- iv 偏光の割合が大きく、LRF で計測される：表面が滑らかな不透明物体 (鏡面)

ガラスであるのは偏光が大きく、LRF で計測されないときである。よって、偏光の大きさをガラス確率として使用することができる。ガラス確率が高い物体がガラスであるか否か検出するとき LRF の計測結果を使用する。

偏光の割合のみを使用してガラス位置を検出することはできない。ガラス位置の予測点を LRF の計測を使用して求め、ガラス確率を使用して予測点がガラスであるか検出する手法を用いる。

2.3 偏光カメラによるガラス確率計測

まず、ガラス確率計測手法を述べる。

特定の振動面を持つ光のみを透過する素子を偏光子という (図 3)。偏光した光は、振動面のなす角度と偏光子の角度が等しいとき、偏光子通過後の光の強度が大きい。偏光した光の偏光子通過後の強度は偏光子の角度に対して三角関数となる [3]。その三角関数の最大値を I_{MAX} 、最小値を I_{MIN} とおく。偏光の割合を示す偏光度 D を以下の式で表す。

$$D = \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{I_{MAX} + I_{MIN}}, \quad (1)$$

入射角は反射平面の法線方向と入射光のなす角で表される。ガラスで反射した光の偏光度は入射角によって異なり、 55° から 60° の間に最大となる [4]。よって、入射角が大きい範囲で偏光度を使用することにより、精

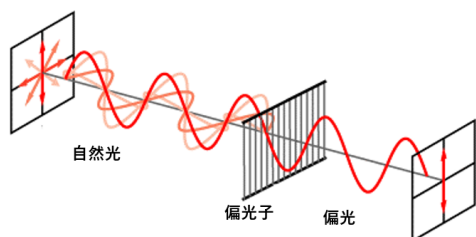


図 3 偏光

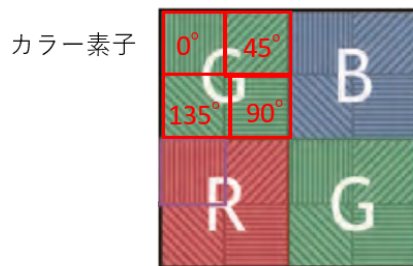


図 4 偏光カメラの構造

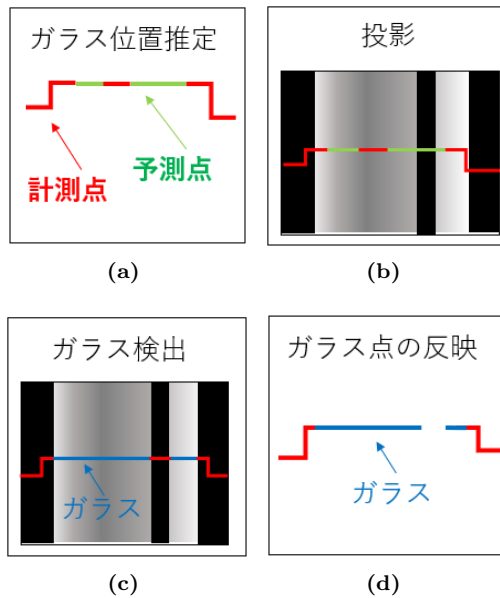


図 5 ガラス位置検出の流れ。(a) は LRF による計測を示したものである。計測点が赤、求めた予測点が緑である。(b) はガラス確率を推定した偏光カメラ画像に計測点および予測点を投影したものである。(c) は投影した計測点、予測点についてガラス確率を使用してガラス検出を行ったものである。(d) は (c) でガラス検出された点を LRF による計測に反映したものである。

度よくガラス検出を行うことができる。LRF がガラスを検出できるのは入射角が小さい範囲であるため、偏光度と組み合わせることにより広範囲でガラス検出を行うことが可能になる。

今回使用する偏光カメラは、4 方向の偏光子をイメージセンサ上に貼り付けた構造であり (図 4)、1 回の撮影で 4 方向の偏光子を通した光の強度を得る。この 4 つの強度を最小二乗法で三角関数に近似し、偏光度 D を求め、ガラス確率として使用する。

2.4 ガラス位置検出

2.3 節で述べた通り、ガラス確率が高い点のうち、LRF で計測不能である点はガラスであると検出可能である。また、偏光カメラではガラスまでの距離を得られないため、LRF から得た距離情報を用いてガラス位置を検出する。ガラスの位置検出は以下の手順で行う。

入射角が小さいとき、LRF でガラスの計測を行うことができ、この LRF での計測からガラス検出を行う手法として Jiang らの手法を使用する [1]。入射角が大きいつき、LRF でのガラスの計測を行うことができないことから、ガラス検出を行ったあとの LRF の計測点について以下の処理を行う。

- (1) LRF で得た計測点から、環境中のガラス位置を検出する (図 5(a))。ガラスが平面である環境を考えていることから、ガラスは LRF 計測内で直線となる。計測可能範囲内に存在するガラスや、窓枠等は LRF で計測可能であることから、計測点が線分をなす。LRF は角度ごとに計測をえられることから、隣接する角度の計測との差が閾値以下であるとき線分の端点として使用する。線分の端点に直線推定を行うことでガラスが存在すると予測される直線を求める。LRF 計測内で直線を求め、ガラスの位置を予測する。
- (2) LRF の計測点および i で求めたガラス予測点を偏光カメラ画像上に投影する。このとき事前のキャリブレーションによって得た偏光カメラと LRF の位置関係を使用する (図 5(b))。キャリブレーションには Vasconcelos らが提案した手法を使用する [5]。LRF 座標と偏光カメラ座標の座標変換および偏光カメラの内部パラメータを使用することで、LRF のガラス予測点の偏光カメラ画像内の位置を得る。
- (3) 2.3 節の手法で求めたガラス確率に対する閾値処理により、投影した予測点のガラス検出を行う (図 5(c))。予測点の偏光カメラ画像内の位置の画素のガラス確率 D を 2.3 節の手法で得る。 D が閾値より大きいときガラスであり、 D が閾値より小さいとき、物体が存在しない点である。
- (4) ガラス予測点のうち (3) でガラスであった点のみ LRF 計測点により作成された地図上に反映する (図 5(d))。LRF 座標と偏光カメラ座標の座標変換および偏光カメラの内部パラメータを使用することで、



図 6 実験環境。

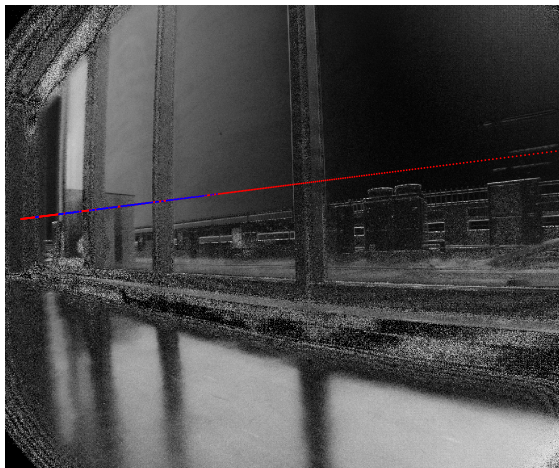


図 7 ガラス確率計測結果。画像はガラス確率の大きさを表し、ガラス確率が小さい点が黒、ガラス確率が大きい点が白である。LRF の予測点のうち、ガラスと検出された点が青、ガラスでないと検出された点が赤である。

ガラスと検出された点の LRF 座標内での位置を求め、Jiang らの手法でガラス検出を行い得られた地図に統合する。

3 実験

提案手法によるガラス検出を検証するために、実際に LRF と偏光カメラを使用し実験を行った。本実験では LRF として HOKUYO UTM 30LX-EW LRF を、偏光カメラとして LUCID 社の VP-PHX050S-Q を用いた。ガラス環境で 1 地点から計測を行った。ガラス予測点のガラス確率を用いたガラス判定の検証を行うため、一番左のガラス戸が開いており、その他が閉まっている状態である（図 6）。

4 結果

ガラス確率検出および投影した LRF の計測点、予測点に対するガラス検出結果が図 7 である。画像はガラス確率が大きい場合白、小さい場合黒である。ガラスである範囲について、入射角が小さいときガラス確率が小さく、入射角が大きいときガラス確率が大きくなった。これは、ガラス確率として偏光度を使用しており、偏光度は入射角が大きいとき精度よく計測されることに合致している。ガラスが開放されており、物体が存在しない領域についてはガラス確率が低くなった。物体が存在しないとき偏光しないことからガラス確率が

低いことに一致する。

偏光カメラ画像に投影された LRF の予測点は、ガラスと検出された点が青、ガラスでないと検出された点が赤である。入射角が大きい領域ではガラスが存在する領域と開放され物体が存在しない領域を分けることができた。

本システムで作成した地図が図 8 である。ガラスと検出された点が青、ガラスと検出されなかった点が赤である。入射角が大きい場合ガラスと検出できており、入射角が小さい場合ガラスと検出できていない。これは偏光度の大きさから正しい結果が得られていると考えられる。また、ガラスが存在しない空間については物体が存在しない地図が作成できている。

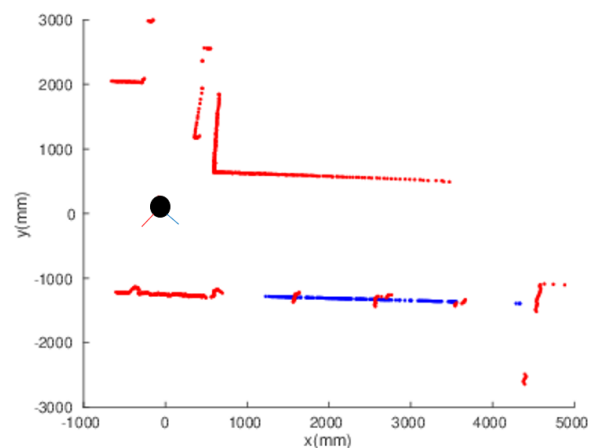


図 8 ガラス検出結果。黒丸はカメラの位置、赤は LRF で得た元データ、青が検出したガラスである。

5 結論

本研究では、偏光カメラと LRF を組み合わせることにより、広範囲のガラスを検出する手法を構築した。偏光カメラによる偏光度を使用することで、LRF では計測することができない入射角が大きいときのガラスを検出することができた。

今後の課題として、本システムによるガラス検出を利用して SLAM を行い、SLAM における有用性を検証する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、大川情報通信基金の助成を受けた。

参考文献

- [1] Jun Jiang, Renato Miyagusuku, Atsushi Yamashita and Hajime Asama, “Glass Confidence Maps Building based on Neural Networks Using Laser Range-Finders for Mobile Robots,” *Proceedings of the 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 405-410, 2017.
- [2] Aroma Mahendru and Mukul Sarkar, “Bio-inspired Object Classification Using Polarization Imaging,” *Proceedings of 2012 Sixth International Conference on Sensing Technology*, pp. 207-212, 2012.
- [3] 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.
- [4] Yoav Y. Schechner and Joseph Shamir, “Polarization and Statistical Analysis of Scenes Containing A Semireflector,” *Optical Society of America*, Vol. 17, No. 2, pp. 276-284, 2000.
- [5] Francisco Vasconcelos, Joao P. Barreto and Urbano Nunes, “A Minimal Solution for the Extrinsic Calibration of a Camera and Laser-Rangefinder,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 34, Issue 11, pp. 2097-2107, 2012.