

単眼カメラと照明を組み合わせた簡易 3 次元計測法

和多田 昇平^{†1} 長崎 健^{†1}
戸田 真志^{†1} 大塚 聡^{†2}

ロボットや自動車が周囲の環境を把握する手法として 3 次元計測は重要である。3 次元計測の手法には、ステレオ法やレーザー、超音波を用いたものなどがあるが、いずれも計測のための装置にコストがかかることや、一般環境での安全利用が難しいといった問題がある。そこで、本研究では、単眼カメラと照明を組み合わせた安全かつ安価で取り付けのコストの少ない簡易 3 次元計測法を提案する。縦 1 列に並べた複数の LED を照明として物体に対して照射し、照射された物体をカメラで撮影することで複数 LED の光源中心を推定する。ここで推定された光源中心の列をスリット光とみなして、光切断法によって距離の推定を行う。

Simple Three-Dimensional Measurement by Using Monocular Camera and Lighting

SHOHEI WATADA,^{†1} TAKESHI NAGASAKI,^{†1}
MASASHI TODA^{†1} and SO OTSUKA^{†2}

Three-dimension measurement is useful to recognize environment for a robot. There are some methods in three-dimension measurement. For example, stereo vision, laser range finder, ultrasonic sensor. These methods costs much money and much space to set up. In this paper, we propose simple three-dimension measurement using monocular camera and lighting. We use LEDs lined up as lighting. we aim to extract the slit light from the distribution of the diffused light, and to apply a light-section method.

^{†1} 公立はこだて未来大学

Future University-Hakodate

^{†2} ルネサス エレクトロニクス

Renesas Electronics Corporation

1. 背景

ロボットや自動車の周囲の環境を把握する手法として 3 次元計測技術は重要である。3 次元計測の手法には、ステレオ法やレーザー、超音波を用いたものなどがあるが、いずれも計測のための装置にコストがかかることや、一般環境での安全利用が難しいといった問題がある。例えば、ステレオ法では十分な精度を得るために複数のカメラが必要であり、デバイスそのもののコストが高い。また、レーザーによる光切断法は周囲に人がいるような環境での利用は安全という観点から考えると利用は難しい。

本研究では、単眼カメラと照明を組み合わせた安全かつ安価で取り付けのコストの少ない簡易 3 次元計測法を提案する。カメラ 1 台と照明 1 つという簡単な装置を用いて、照明によって照らされた物体までの距離を推定する。縦 1 列に並べた複数の LED を照明として物体に対して照射し、照射された物体をカメラで撮影することで複数 LED の光源中心を推定する。ここで推定された光源中心の列をスリット光とみなして、光切断法によって距離の推定を行う。

一般的な光切断法では得られた画像から光が照射された部分を検出しやすいことからレーザーが用いられるが、周囲の人の有無など環境を選ばずに計測が可能のように、照明としてレーザーの代わりに LED を用いた。

近年、衝突防止技術としてミリ波レーダを搭載した自動車が市場に出ているが、現状のミリ波レーダは他のセンサと比較して価格が高く、主に高級車のオプションとして設定されるにとどまっている。しかし、本稿で提案する簡易 3 次元計測法では、あらかじめ自動車に搭載されている後方確認用の単眼カメラとテールランプを用いて後方を認識することが可能となるため、あたらしいデバイスを取り付けることなく、安価に自動車の周囲を認識する機能を持たせることができる。

2. 関連研究

築山は¹⁾は、固定された 2 個の光源と 1 台のテレビカメラを用いて、面の 3 次元計測を行う手法を提案している。光源を交互に転倒し、2 枚の画像を取り込み、画像の各々の光源による面の輝度分布のピークを抽出し、その画像位置から面の傾きと距離を計算できることを示している。2[m] 離れた対象物を、面の傾きが ± 0.5 度くらい、距離は ± 3 [cm] くらいの誤差で計測でき、移動ロボットのための障害物回避あるいは、障害物地図の作成には十分な精度が得られたという報告があるが、対象物体が面であるという前提がある。

3. 提案手法

3.1 スリット光の推定

拡散した LED 光の分布が正規分布を成すと仮定して、その平均と分散を EM アルゴリズム (Expectation-maximization algorithm) によって求める。EM アルゴリズムは一部が観測不可能な不完全データの最尤推定値を求める

EM アルゴリズムは混合数が指定された混合正規分布に基づいて、多変量の確率密度関数のパラメータを推定する。

特徴ベクトル $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ の集合を考えたとき、 d 次元のユークリッド空間の N 個のベクトルは混合正規分布を用いて、

$$p(x; a_k, S_k, \pi) = \sum_{k=1}^m \pi_k p_k(x), \quad \pi_k \geq 0, \quad \sum_{k=1}^m \pi_k = 1 \quad (1)$$

$$p(k) = \psi(x; a_k, S_k) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2} |S_k|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x-a_k)^T S_k^{-1}(x-a_k)\right\} \quad (2)$$

ここで、 m は混合数、 p_k は平均 a_k 、共分散行列 S_k 、 k 番目の分布の重み π_k をもつ正規分布である。混合数 m とサンプル $x_i (i = 1, 2, \dots, N)$ を与えることですべての混合分布パラメータ a_k, S_k, π_k の最尤推定値 (MLE) を以下のように推定する。

$$L(x, \theta) = \log p(x, \theta) = \sum_{i=1}^N \log\left(\sum_{k=1}^m \pi_k p_k(x)\right) \rightarrow \max_{\theta \in \Theta} \quad (3)$$

$$\Theta = \{(a_k, S_k, \pi_k) : a_k \in \mathbb{R}^d, S_k = S_k^T > 0, S_k \in \mathbb{R}^{d \times d}, \sum_{k=1}^m \pi_k = 1\} \quad (4)$$

3.2 距離の推定

測距には光切断法を用いる。図 1 に山本ら³⁾ が応用している光切断法の構成を示した。光切断法では、物標の前にカメラとスリット光の光源を設置し、スリット光を対象に照射する。カメラに撮影された物標への光の当たり方から図 2 に示した三角測量の原理によって距離を求める。

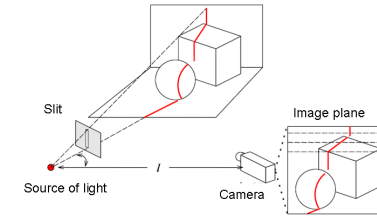


図 1 光切断法

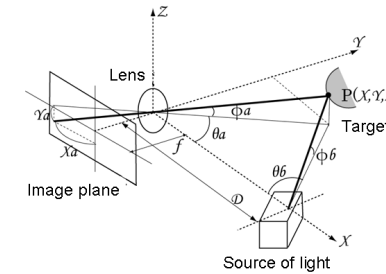


図 2 三角測量の原理

図 2 よりカメラのレンズを原点としたときの物標までの 3 次元座標 (X, Y, Z) はそれぞれ以下の式で求められる。

$$X = \frac{D \cos \theta_a \sin \theta_b}{\sin(\theta_a + \theta_b)} \quad (5)$$

$$Y = \frac{D \sin \theta_a \sin \theta_b}{\sin(\theta_a + \theta_b)} \quad (6)$$

$$Z = \frac{D \tan \phi_a}{\sin \theta_a} \quad (7)$$

ただし、 D は基線長、 f はカメラの焦点距離、 X_a, Y_a は受光素子のスポット光の像の位置である。

4. 実験 I

図 3 の LED 投光機と USB カメラを用いて LED 光を照射された物標を撮影した。カメラと LED 投光機の相対位置は既知とし、カメラは事前にキャリブレーションを行った。実

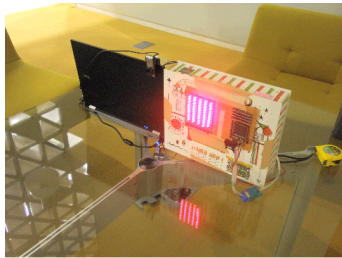


図 3 (左)USB カメラとノート PC (右)LED 投光機

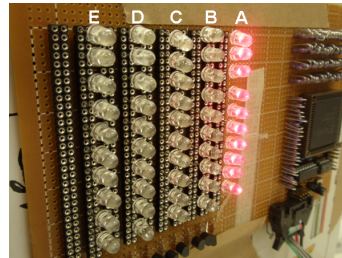


図 4 LED 投光機．右から A, B, C, D, E.

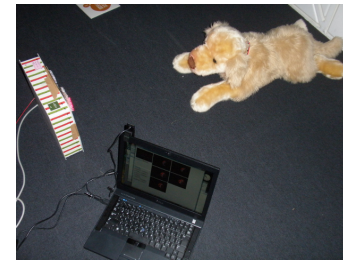


図 7 物標がぬいぐるみするとき

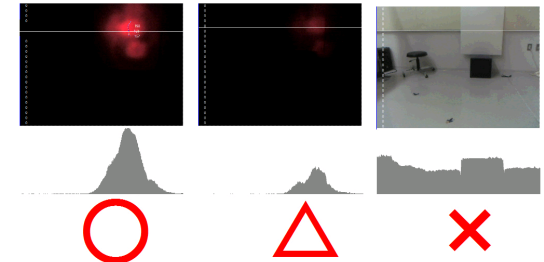


図 8 測距可能判定基準

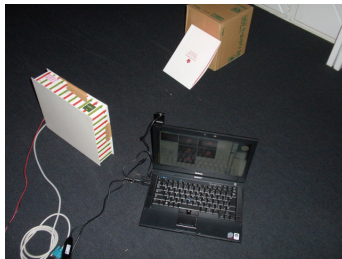


図 5 実験 1:物標を段ボールに立てかけた本するとき



図 6 物標がポリバケツするとき

験では、本(図5)、ポリバケツ(図6)、凹凸のある犬のぬいぐるみ(図7)を用いて、夜間の照明のない環境下で測距実験を行った。LEDマトリクスのA列からE列までの5列(図4)を順に点灯させて撮影した。得られた画像からスリット光を推定し、距離を計算した結果を図9に示した。図9の×は推定されたスリット光を示し、×の右に示された整数はカメラから×までの距離を表している。

4.1 物標が段ボールに立てかけた本するとき

図9の「物標が立てかけた本するとき」は、本と床が設置している箇所が約50[cm]で最もカメラに近く、本と段ボールが接している箇所は約70[cm]である。立てかけてある本は立てかけた角度に応じて、カメラに近い箇所ほど距離が小さく、カメラから遠ざかるほど距離が大きくなり数値として表示されている。ただし、地面に垂直な段ボール面に注目すると、Aで示された段ボール面よりもEで示された段ボール面の距離の方が遠いと判定されている。

ポリバケツの底の最もカメラに近い箇所はカメラからの距離が約50[cm]、ポリバケツの深さは30[cm]である。カメラからポリバケツの底までの距離は約50[cm]と推定されてい

る。また、カメラからポリバケツのふちまでの距離も約80[cm]と推定されている。

4.2 物標がぬいぐるみするとき

ぬいぐるみの最もカメラに近い箇所は、犬の黒い鼻の部分で、カメラからの距離は約50[cm]である。犬のぬいぐるみの顔の凹凸に合わせて距離が推定されている。

5. 実験 II

実験 II では、測距対象を平らな白色の板に固定し、蛍光灯の明るさを変化させて測距を行った。照度は、0[lx]、160[lx]、320[lx]、520[lx]、745[lx]の5種類を用意し、それぞれについて30[cm]の距離から500[cm]までの測距を行った。

提案手法では、観察されたLED光の輝度分布によって測距を行うため、外乱光が測距に影響を及ぼす。各照度での各距離について測距が可能かどうか、外乱光の影響が少なく測距が可能である場合は” ”、外乱光の影響により輝度分布が観測しにくくなっているものを” ”、輝度分布が観測できないものを” x”と図8に従って評価した(表1)。

6. 考 察

実験 I より、段ボールに立てかけた本が物標のとき、ポリバケツが物標のとき、ぬいぐるみが物標のときのいずれもカメラからの実際の距離に応じた値が推定できていることが確認できる。しかし、物標に対してのLED光の当たり方によって、スリット光が正しく推定できないことがある。これは、LED投光機に取り付けられたLEDが手作業で角度を調整していることに起因していると考えられる。LEDマトリクスは基盤の面に垂直な方向に取り付けられ、列ごとに整列していると仮定しているが、実際には均一ではない。LEDの取

表 1 測距可能距離と明るさの関係

	0[lx]	160[lx]	320[lx]	520[lx]	745[lx]
30[cm]	○	○	○	○	△
50[cm]	○	○	○	△	×
100[cm]	○	△	△	×	×
150[cm]	○	×	×	×	×
200[cm]	○	×	×	×	×
250[cm]	△	×	×	×	×
450[cm]	△	×	×	×	×
500[cm]	×	×	×	×	×

参 考 文 献

- 1) 築山俊史, 点光源照明による平面の傾きと距離の計測, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J78-D-II No.7, 1995.
- 2) C.M. ピショップ, 元田 浩/栗田多喜夫/樋口知之/松本裕治/村田 昇 監訳:パターン認識と機械学習 (下), pp.154-156, 2008.
- 3) 山本新, 小関修:光切断法を用いた部品形状の計測と検査, 1990.

り付け時にずれがあると, 推定距離の結果に大きく影響するため無視できない. この問題については, LED の取り付け精度を高めることで推定距離のばらつきは大幅な改善が見込めると考えられる.

さらに, 実験 II より本手法での明るさと距離の関係が示された. 50[cm] 程度の近距離においては 520[lx] 程度の明るさでも測距が可能であるが, 100[cm] を越える距離では測距が難しいということが表 1 からわかる. また, 0[lx] の暗室においては, 450[cm] 程度までの測距が可能である.

7. 結 言

本やポリバケツ, むいぐるみといった凹凸や光沢があるものに対しても測距の可能性を示すことができた. ただし, 推定された距離のばらつきは大きく改善の余地が大きい. 今後は自動車の後方認識などドライバに対してシステムが危険を判定し, アラートを出すといったアプリケーションに適用できるかどうか, 適用するために必要な精度, ばらつきの許容範囲を定め, その精度の向上をはかる. また, 凹凸のある物標や, 表面にチェックパターンを持つような特殊な物標についても高い精度で測距できるようアルゴリズムを改良する.

多少の明るさでも近距離であれば測距が可能なので, 自動車の後方認識に適用できる可能性を示す結果が得られた. さらに, カメラが移動体に取り付けられることを考えると, 移動中の画像から測距ができるかという問題については今後の検討課題である.

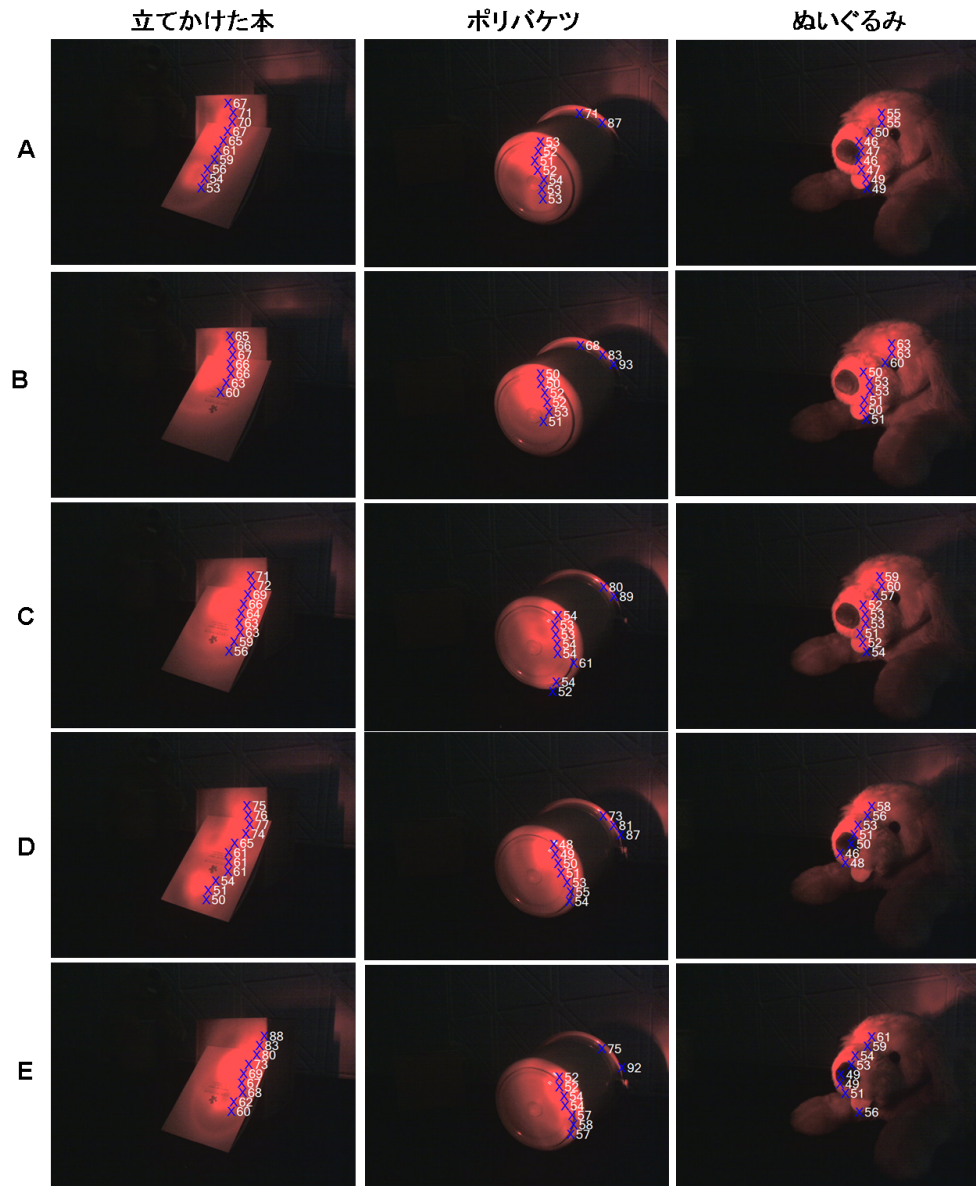


図 9 各物標への測距結果. × は推定された光源中心, 数値はカメラからの距離:単位 [cm]