

## 単眼カメラとLEDテールランプを用いた 測距システムに関する研究

和多田 昇平<sup>†1</sup> 長崎 健<sup>†1</sup>  
戸田 真志<sup>†1</sup> 大塚 聡<sup>†2</sup>

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。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、スリット光投影法の応用によって距離の推定を行う。

### A Study of Range Finder Using Monocular Camera and LED Tail Lamp

SHOHEI WATADA,<sup>†1</sup> TAKESHI NAGASAKI,<sup>†1</sup>  
MASASHI TODA<sup>†1</sup> and SO OTSUKA<sup>†2</sup>

In this study, we propose a system to measure the distance between the rear of the car and a target behind it in order to reduce the number of these accidents. Because it is expensive and time-consuming to develop new devices, this system uses a factory-installed monocular camera, tail lamp that are installed beforehand. The light from the tail lamp diffuses, though, so with this system, we aim to extract the slit light from the distribution of the diffused light, and to apply a light-section method.

<sup>†1</sup> 公立はこだて未来大学

Future University Hakodate

<sup>†2</sup> ルネサス エレクトロニクス

Renesas Electronics Corporation

## 1. 背景

昨年、2010年の日本国内における自動車事故死者数は4,863人で、10年連続の減少となった。また、交通事故発生件数及び負傷者数も6年連続で減少し、負傷者数は16年ぶりに90万人を下回った<sup>1)</sup>。しかし、未だに年間約5千人の命が交通事故の犠牲となっていることを考えると、憂慮すべき事態であると言える。さらに、アメリカでは、車道から自宅車庫への道で我が子を轢いてしまうという死亡事故が年間約300件発生しており、NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration: 米国運輸省道路交通安全局) では、小さい子どもやお年寄りがドライバーの死角に隠れて事故に遭うことを防ぐため、新車への後方車載カメラの取り付けの義務付けを発表した<sup>2)</sup>。発表では、2014年9月までに100%の新車への取り付けを目標としている。このことから、カメラなどのセンサを取り付けることで自動車による事故を減らすことへの関心の高さがうかがえる。

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、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。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、あらかじめ自動車の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

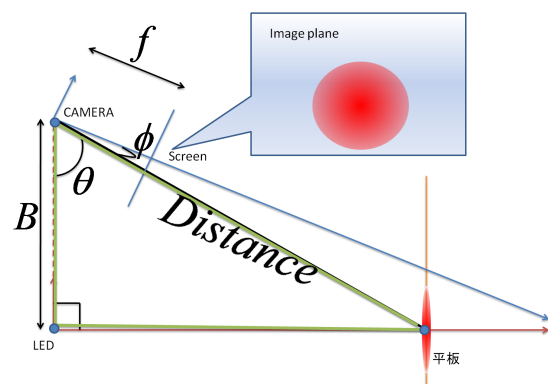


図1 提案手法のカメラ位置とLED光源位置の関係

能を持たせることができる。

## 2. 測距の原理

測距には三角測量の原理を用いる。図1のようにカメラ及びLED光源を設置すると、ワールド座標系でのカメラ位置，LED光源位置，測距対象となる物標の1点を結ぶ三角形が一意に定まる。ただし，ここで  $B$  はカメラとLEDに光源の距離 [m]， $f$  はカメラの焦点距離 [px]， $\theta$  はカメラの視線方向 [度]， $\phi = \tan^{-1}(\frac{v_0 - v}{f})$  でカメラ中心，画像上の注視点  $(u, v)$  を通る直線とカメラの視線のなす角， $v_0$  はカメラの内部パラメータの1つで，画像座標系の  $v$  軸方向の画像中心 [px] である。事前にキャリブレーションを行い，焦点距離  $f$ ，画像中心  $(u_0, v_0)$  はカメラの内部パラメータ，カメラの視線方向  $\theta$  はカメラの外部パラメータを求めておく。

一般的なスリット光投影法では，3次元空間に投影されたスリット光が画像へ撮像された画素から  $Distance$  を計算する。しかし，提案手法ではスリット光ではなくLEDを光源として用いるため，画像中では光の分布がぼんやりと写ってしまうという問題が残る。そこで，スリット光に準ずる測距点をぼんやりとした光の分布から推定することでスリット光投影法の応用を図る。スリット光の推定手法については次節で述べる。

## 3. スリット光の推定手法

一般的なスリット光投影法では，画像中から投影された光を簡単に得られるのに対して，

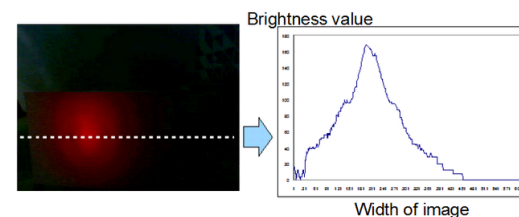


図2 LED光の  $u$  軸方向ラインの分布

光源をLEDとした場合は図2のような分布を取る。ここで，LEDを光源として平面に照射された光をカメラで観測したときの分布を2次元の正規分布に従うと仮定すると，その断面が描く分布は1次元の正規分布となる。図2のようにラインごとに輝度のヒストグラムが，2次元正規分布を切り取った断面にあらわれる1次元の正規分布であると仮定することで，LED光をスリット光に見立てることが可能である。

得られたラインごとの輝度のヒストグラムから，その平均と分散をEMアルゴリズム (Expectation-maximization algorithm)<sup>3)</sup> によって正規分布フィッティングを行う。

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アルゴリズムで，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，

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

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

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  $\pi_k$  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  $a_k, S_k, \pi_k$  の最尤推定値を以下のように推定する。

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

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

EM アルゴリズムは繰り返し処理を行う。各繰り返し処理には二つのステップを含む。第 1 ステップ (Expectation-step, または E-step) では、混合分布 #k に属するサンプル #i の確率  $p_{ik}$  を、その時点の混合分布パラメータの推定値を用いて以下のように求める。

$$p_{ik} = \frac{\pi_k \varphi(x; a_k, S_k)}{\sum_{j=1}^m \pi_j \varphi(x; a_j, S_j)} \quad (5)$$

第 2 ステップ (Maximization-step, または M-step) では以下のように、混合分布パラメータ推定値が、計算された確率を用いて高精度化される。

$$\pi_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_{ik} \quad (6)$$

$$a_k = \frac{\sum_{i=1}^N p_{ik} x_i}{\sum_{i=1}^N p_{ik}} \quad (7)$$

$$S_k = \frac{\sum_{i=1}^N p_{ik} (x_i - a_k)(x_i - a_k)^T}{\sum_{i=1}^N p_{ik}} \quad (8)$$

入力サンプルは、画像の 1 ライン分の輝度値をとったヒストグラムとしてパラメータを推定し、ここで得られた正規分布の平均値をスリット光をなす直線うちの 1 点であるとみなして三角測量を行う。

例えば、図 3 のようにカメラと LED 光源を配置し、横方向のラインの輝度分布について、正規分布推定を行い、距離を計算すると図 4 のような結果が得られた。図 4 では、横 1 ラインの輝度分布から EM アルゴリズムによって正規分布フィッティングを行い、推定されたパラメータである平均値をその列の測距点として 10[px] ごとに X とプロットした。640\*480[px] の画像の場合、縦 480 列に対してフィッティングを行い、得られた測距点を結



図 3 カメラと LED 光源と物標の位置関係



図 4 測距結果 X は横 1 ラインの分布の平均、整数値はカメラからの距離 [cm]

表 1 CY-MCRS70KD の仕様	
有効画素数	約 25 万 [画素]
画角	水平 : 134[度], 垂直 : 103[度]

ぶ線分が本提案手法で推定することができた擬似的なスリット光であり、この点をもとに三角測量を行っている。

#### 4. 測距可能範囲評価実験

図 5 に示すように LED テールランプとカメラ (Panasonic 製 CY-MCRS70KD, 仕様は表 1) を固定し、ロール紙を貼り付けた平面の物標に対して LED を照射し撮影された画像から列ごとの光源中心を推定した。推定された光源中心は事前にプロジェクタで平面に格子を投影して撮影した画像と合成した上で図 6 に X で示した。X が表示されていない列は輝度が閾値未満であるため、光源の推定が不可能だったことを示している。50cm, 100cm, 150cm, 200cm, 250cm, 300cm, 350cm の距離で光源中心の推定を行ない図 7 のような測距可能範囲マップを得た。

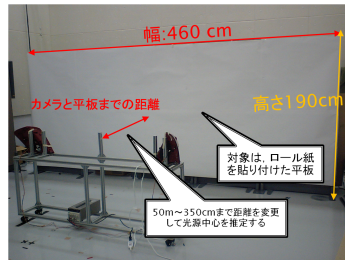


図 5 物標とシステムの位置関係

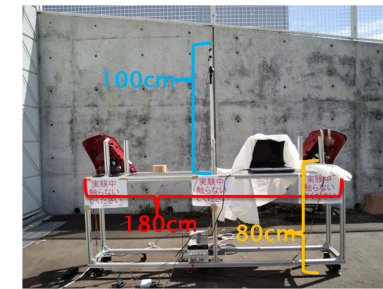


図 8 カメラと光源の位置関係

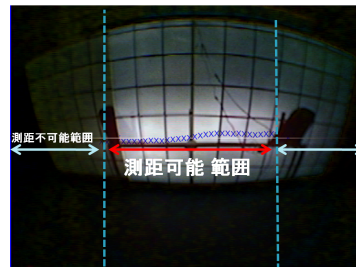


図 6 25cm 幅格子との合成画像

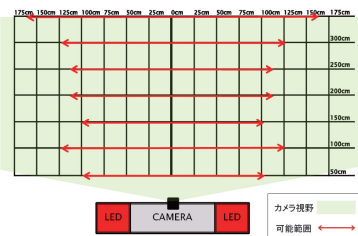


図 7 測距可能範囲マップ

## 5. 測距可能照度評価実験

次に、屋外で測距を行った。測距可能範囲評価実験同様、図 8 に示すように LED テールランプとカメラを固定し、図 9 のようにコンクリートでできた平面の物標に対して LED を照射した。撮影された画像から列ごとの光源中心を推定し、距離を計算した。カメラはコンクリートからの距離が 150cm の場所に設置した。カメラは Panasonic 製 CY-MCRS70KD を用いた。

撮影は 2010 年 8 月 26 日の晴れた日に行った。撮影時間は 12:00 ~ 18:00 まで 1 時間ごと、および、日没時間近くでは 18:30, 18:40, 18:45, 18:50, 18:55, 19:00 に撮影を行った。この日の撮影地（北緯 41 度 46 分 00 秒，東経 140 度 44 分 00 秒）の日没は 18:22 であった。物標は西向きに開かれたコンクリート壁とした。また、時間ごとの照度はカメラ付近でセンサを上方に向けて計測した。

12:00 から 18:00 までは太陽光の下では LED テールランプの光を抽出することができず、測距することができなかったが、日が沈み始めた 18:30 から測距が可能となった。12:00, 18:30, 19:00 に撮影した画像は、図 10, 図 11, 図 12 に示した。

## 6. テクスチャを持つ物標での実験

本手法は、投影した LED 光をカメラで撮影するため、物標の反射特性の影響を受けやすい。例えば、左側が白、右側が黒の紙を貼りつけた板が物標の場合、図 13 のように黒色の紙に投影された LED 光は分布が欠けた形で得られるため、図 14 に示すように推定されるべき光源中心からずれが生じる。



図 9 カメラと物標までの位置関係



図 10 12:00 撮影, 18000lux

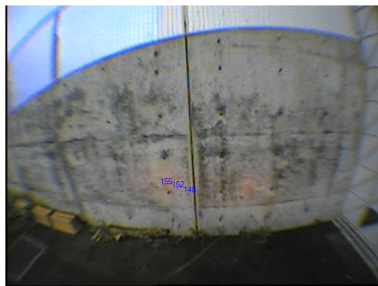


図 11 18:30 撮影, 88lux

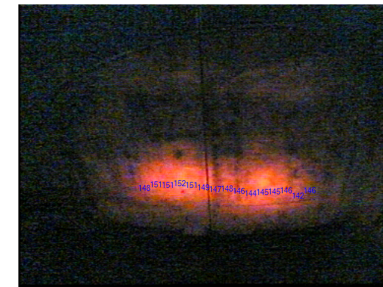


図 12 19:00 撮影, 0.4lux

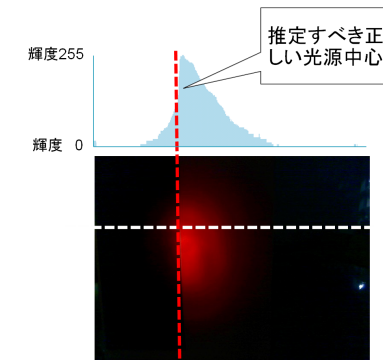


図 13 「黒+白」のテクスチャを持つ平面の輝度分布

そこで、正規分布のパラメータである平均、分散を全探索によって求める。図 15 にしめすように閾値を越える  $a_i, b_i$  の差の 2 乗和  $E$  をとり、 $E$  を最小とする平均、分散を求める。

$$E = \sum_{i=0}^{width} (a_i - b_i)^2 \quad (9)$$

ここで、 $width$  は画像の幅を示す。また、探索の範囲は平均  $0 \sim 639$ 、分散  $0 \sim 5000$ 、サンプル数  $0 \sim 50000$  とした。例えば、入力する輝度分布を平均及び分散が既知の正規分布の平均以下を  $0$  とした場合、図 16 のような結果が得られる。従来手法では、既知の平均からずれが生じているが、全探索の場合入力した輝度分布にフィットしている。さらに、図 13 の



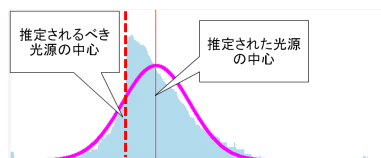


図 14 推定されるべき光源中心からのずれ

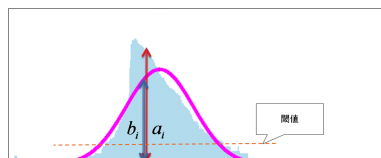


図 15 全探索によるパラメータ推定

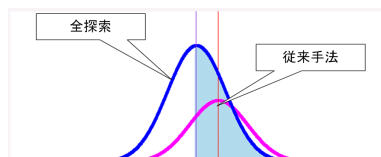


図 16 既知の正規分布の平均以下を 0 とした場合

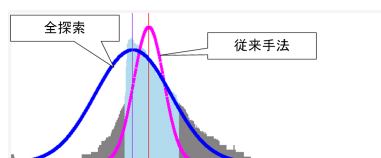


図 17 図 13 の「黒+白」テクスチャの実画像の分布

ような「黒+白」のテクスチャを持つ平面を物標としたときの実画像に適用すると、図 17 のような結果が得られた。こちらも、同様に従来手法では推定される光源中心にずれが生じているが、全探索によって正規分布にフィットしている。ただし、このときの閾値は 100 とした。

## 7. ま と め

測距可能照度評価実験については、図 7 に示したように、提案システムではカメラから 50[cm] 離れた場所では左右幅 150[cm] 程度、カメラから 350[cm] 離れた場所でも左右幅 300[cm] 程度の測距が可能であることがわかる。

例えば、HONDA の超音波センサのリア検知範囲は約 50cm 以下、約 50cm ~ 120cm、約 120cm ~ 150cm の範囲であること<sup>4)</sup> から考えると、測距可能範囲という観点では超音波センサよりも提案システムの方が優位であると言える。

また、測距可能照度評価実験については、正午に撮影された図 10 では、照射された LED 光を観察することができずに測距が不能であったが、18:30 撮影の図 11 から測距が可能となり、日没後 19:00 撮影の図 12 では安定して距離が推定できた。

提案システムは超音波センサよりも測距可能範囲の観点で優位であるとしたが、測距可能な照明条件は厳しく、日中の測距は難しく、日没前後の明るさでは測距が可能であるという結果が得られた。超音波センサが昼夜問わず利用できることを考えると、提案システムを明るい環境で利用するためには、アルゴリズムを改良する必要がある。

さらに、テクスチャを持つ物標に対する光源中心の推定については、全探索によって正規分布のパラメータを推定する手法について提案した。本手法では、既知の正規分布の一部へのフィッティング、及び「黒+白」というシンプルなテクスチャを持つ物標に対して LED 光を照射した場合の輝度分布から、正規分布を推定することができた。ただし、探索の範囲が膨大であり、計算に時間がかかるため、実環境での利用を考えると、推定アルゴリズムを再考する必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) "平成 22 年中の交通事故死者数について ~57 年ぶりに 4 千人台となった前年を下回る". 警察庁交通局交通企画課, 2010
- 2) "Federal Motor Vehicle Safety Standard, Rearview Mirrors; Federal Motor Vehicle Safety Standard, Low-Speed Vehicles". National Highway Traffic Safety Administration, 2010
- 3) C.M. ビショップ, 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.
- 4) HONDA—Honda Access | オデッセイ, <http://www.honda.co.jp/ACCESS/odyssey/carlife/drive/sensor/>, 2011