

# 自律移動ロボット向けのイメージセンサによる 統合的な自己位置推定および可視光通信

小野寺 幸仁<sup>†</sup> 渡辺 博文<sup>‡</sup> 中山 悠<sup>†</sup>  
東京農工大学<sup>†</sup> ソフトバンク株式会社<sup>‡</sup>

## 1. はじめに

近年、人間活動の支援や代替のため、自律移動ロボットが注目されている[1]。その基本的な機能として自己位置推定と通信があるが、従来は LiDAR などを用いた Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) および Wi-Fi などを用いた無線通信が一般的だった。ただし従来の構成では、モジュール数の増加によるコストや故障率の増大が課題だと言える。本研究では、LED とイメージセンサを用いて、自己位置推定と可視光通信を統合的に実施するシステムを提案する。画像内から既知 LED を高精度に抽出し、その画像内座標から測位を行うとともに、光信号として変調されたデータを光カメラ通信により受信する。提案システムは、LiDAR などを用いずに測位が可能であり、さらに他の機器を介さずに制御メッセージなどを直接送信できる利点がある。本稿では、理論検討およびソフトバンク社の自律移動ロボットである Cuboid を用いた実機検証の結果を報告する。

## 2. 提案手法

### 2.1. 概要

提案手法の概要を図 1 に示す。Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) イメージセンサを搭載したカメラを備えたロボットが、複数の光源を設置した環境下を自律移動する。各光源の位置は既知であり、各光源は制御信号を含めた任意のデータおよび自己の ID を光信号として送出する。ロボットはカメラで撮影した画像上から光源を抽出し、光信号を復調し受信する。

さらに受信した ID により光源を特定し、当該光源の画像上での座標から、透視変換を用いてロボットの実世界座標を推定する。さらに、各光源から受信した制御信号を用いて、Robot Operating System (ROS) などを用いて測位結果に応じた制御を行うことを可能とする。

### 2.2. 提案モデル

はじめに、カメラの 3 次元の回転角をそれぞれ  $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 、カメラの水平・垂直方向の画角を  $(\phi_w, \phi_h)$ 、画像の解像度を  $(\alpha_w, \alpha_h)$  と定義する。カメラの内部パラメータ  $K$  と、外部パラメータ  $R$  を次式で表す。

$$R = \begin{pmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{pmatrix} \quad (1)$$

Image Sensor based Integrated Localization and Communication for Autonomous Robots

<sup>†</sup>Department of Computer and Information Sciences, Tokyo University of Agriculture and Technology

<sup>‡</sup>SoftBank Corp.

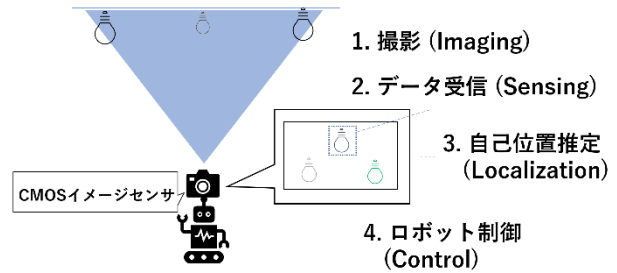


図 1. 提案手法の概要

$$K = \begin{pmatrix} \frac{\alpha_w}{\tan(\frac{\phi_w}{2})} & 0 & \frac{\alpha_w}{2} \\ 0 & \frac{\alpha_h}{\tan(\frac{\phi_h}{2})} & \frac{\alpha_h}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

次に画像上の光源の大きさからカメラと光源の距離を推定する。イメージセンササイズを  $\rho$ 、カメラの焦点距離を  $f$ 、光源  $i$  の実世界における半径を  $r_i$ 、画像上の半径を  $p_i$  と定義し、カメラと光源  $i$  の距離  $z_i$  を

$$z_i = \frac{r_i f}{p_i \rho} \quad (3)$$

により算出する。このとき、ブルーミングエフェクトモデル[2]を用いることで正確に  $p_i$  を抽出し、 $z_i$  の推定精度を向上させる。ブルーミングエフェクトとは、画像上で光源を撮影したときに発生する光の拡散やボケのことである。光源  $i$  の明るさを  $b_i$  と定義したとき、当該光源の中心から距離  $\delta$  までの明るさを次式の関数で定義する。

$$f_i(\delta) = \begin{cases} b_i & (\delta \leq p_i) \\ (b_i - \gamma) \left( 1 - \frac{1}{1 + e^{-\alpha(\delta_i - p_i - \beta)}} + \gamma \right) & (\delta_i > p_i) \end{cases} \quad (4)$$

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  はパラメータであり、環境光などの条件に応じて適切に設定する。(4)式により、画像上での光源中心からの光の減衰および拡散を、ブルーミングエフェクトをも考慮して推定できる。そして閾値を適切に設定することで、画像上の光源領域を正確に抽出する。

光源  $i$  の実世界上の座標を  $(x_i, y_i, z_i)$ 、画像上での座標を  $(u_i, v_i)$  としたとき、光源  $i$  の座標を基準としたときの、カメラの相対的な座標  $(x_{i,c}, y_{i,c}, z_{i,c})$  を

$$(x_{i,c}, y_{i,c}, z_{i,c}) = (x_i, y_i, z_i) + R \cdot K^{-1} \cdot \begin{bmatrix} z_i u_i \\ z_i v_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

と計算する。 $(x_{i,c}, y_{i,c}, z_{i,c})$  は画像上に存在する光源の数だけ算出される。2次元イメージセンサで光を受光し A/D 変換を行っているため、算出された光源の直径は画素数を単位として量子化される。光源  $i$  の半径の量子化誤差を  $\epsilon_i$  とおけば、これは 0.5 画素を単位として量子化されるた

め、以下のように計算できる。

$$\epsilon_i = \left( \frac{r_i f}{\rho(p_i + 0.25)} - \frac{r_i f}{\rho(p_i - 0.25)} \right) \quad (6)$$

結果として、光源ごとに推定したカメラの実世界座標は  $(x_{i,c}, y_{i,c}, z_{i,c}) \pm \epsilon_i$  の範囲に存在する。全光源を用いて測位した結果から、以下の式を用いて最も確からしい座標  $(x, y)$  を算出し、自己位置推定を行う。

$$\begin{cases} x = \frac{\max(x_{i,c} - \epsilon_i) + \min(x_{i,c} + \epsilon_i)}{2} \\ y = \frac{\max(y_{i,c} - \epsilon_i) + \min(y_{i,c} + \epsilon_i)}{2} \end{cases} \quad (7)$$

### 3. 実験

#### 3.1. 実験環境

図 2 に実験環境を示す。ソフトバンク社が開発している自律走行ロボットである Cuboid を用いて、提案手法の実証実験を行った。Cuboid に、解像度が  $1280 \times 1024$ 、イメージセンササイズが  $5.5 \mu\text{m}$ 、画角が  $77.8^\circ \times 105.9^\circ$ 、焦点距離が  $3.5\text{mm}$  のオムロン製のカメラを新たに搭載した。カメラのフレームレートは  $60 \text{ fps}$  である。複数の光源を同時に撮影するために広角レンズを用い、事前に歪み補正を行った。LED64個から構成される半径  $3.25\text{cm}$  の LED パネルを、光源として用いた。検出アルゴリズムには Yolov5 を採用し、上記 LED パネルの学習用データセットを 2000 枚作成、学習した。実験環境としては、 $7 \times 6\text{m}$  の部屋にいくつかの家具を置いた環境を用意した。天井には 4 つの LED パネルを  $(0\text{m}, 0\text{m}, 2.5\text{m})$ ,  $(0\text{m}, 1.8\text{m}, 2.5\text{m})$ ,  $(1.8\text{m}, 0\text{m}, 2.5\text{m})$ ,  $(1.8\text{m}, 1.8\text{m}, 2.5\text{m})$  の座標に貼り付けた。

自己位置推定の精度と可視光通信の 2 項目で評価を行った。自己位置推定の精度に関しては、事前に LiDAR を用いた SLAM[3] と比較した。可視光通信に関しては、ロボット走行中に光源から、進行方向と速度を変更する指示を送信し、正しく制御できることを確認した。

#### 3.2. 実験結果：自己位置推定

提案手法と 2D LiDAR による自己位置推定の精度を比較した結果を図 3 に示す。提案手法により、2D LiDAR を用いた結果と同程度の高精度な推定が可能である。また、提案手法は天井の光源のみを撮影するため環境耐性が高く、周囲の障害物や家具などの配置変更の影響を受けない。以上の結果から、提案手法の自己位置推定の有効性を確認した。

#### 3.3. 実験結果：可視光通信

次にロボット走行中に進行方向と速度を変更する信号を与えた際の軌跡を図 4 に示す。x 軸方向に直進中 (①区間) の A 地点で、減速し  $90^\circ$  右に旋回させる信号を与えた。結果として、A 地点で旋回し y 軸負方向に直進した (②区間)。0.033 秒ごとに測位したため、②区間では減速により測位結果のプロット数が増加した。さらに B 地点で  $90^\circ$  右に回転し加速させる信号を与え、③区間では x 軸負方向に直進し、加速により測位結果のプロット数も減少した。以上の結果より、可視光による統合的な自己位置推定とロボットの制御の有効性を確認した。

### 4. まとめ

本論文では、イメージセンサを用いたロボットの自己位置推定と可視光通信による制御を統合的に行うシステムを提案した。実験結果から、光源位置が既知である環境においては、LiDAR と同程度の高精度測位が可能なこ

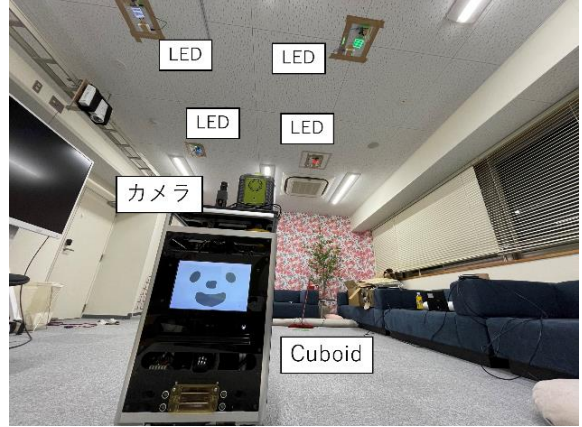


図 2. 実験環境

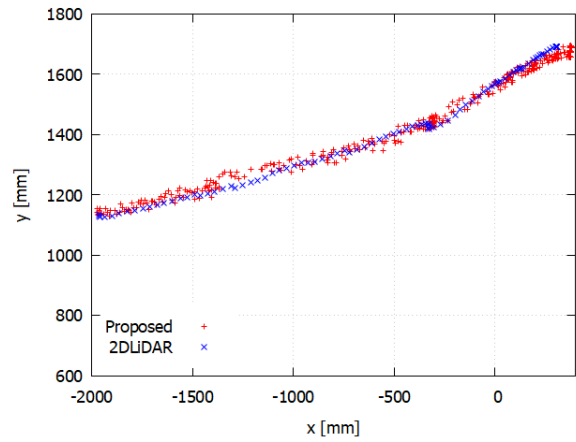


図 3. 自己位置推定の精度

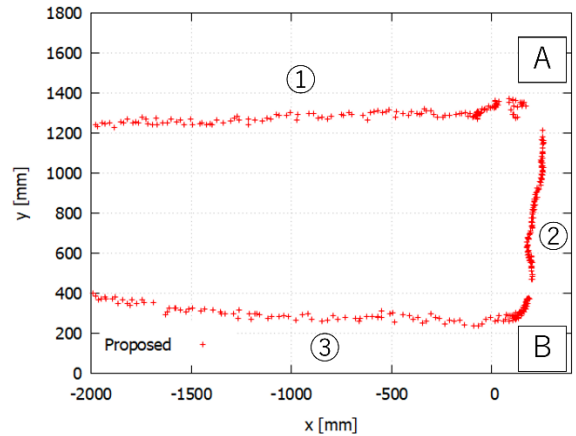


図 4. 制御信号を与えた際の Cuboid の軌跡と、および可視光通信によるローカルなロボット制御を確認した。今後の課題として、光源抽出部分の高速化や信号の種類増加、LED パネル以外の光源の試用があげられる。今後は、多数の人が歩いているオフィスやビルなどの環境で実験していきたい。

#### 謝辞

本研究の一部は、さきがけ(JPMJPR2137)の支援を受けて行われた。

#### 参考文献

- [1] 経済産業省, 自律移動ロボットアーキテクチャ設計報告書
- [2] Y. Onodera, et al. IEEE GLOBECOM, 2021.
- [3] G. Grisetti, et al. IEEE Transactions on Robotics, 2007.