

## EKF-SLAM と拡張状態オブザーバを組み合わせた全方向移動ロボットの制御 Control of an Omnidirectional Mobile Rover Using EKF-SLAM Combined with ESO

○下村潮<sup>1</sup>, 内山賢治<sup>2</sup>, 増田開<sup>2</sup>\*Ushio Shimomura<sup>1</sup>, Kenji Uchiyama<sup>2</sup>, Kai Masuda<sup>2</sup>

This paper describes the controller design method of an omnidirectional mobile rover (OMR) by using the localization and mapping method with the extended Kalman filter (EKF-SLAM) combined with an extended state observer (ESO). A rover needs to estimate itself position and environment map simultaneously for autonomous control without GNSS (Global Navigation Satellite System). EKF-SLAM is one of the useful estimate methods for a rover to be placed at an unknown location. However, this method might be impossible to accomplish the localization and mapping with high accuracy under uncertain disturbances. The proposed method aims to compensate for the uncertain disturbances to improve estimation accuracy. The effectiveness of the proposed method is verified numerically.

### 1. 緒言

全方向移動ロボット(OMR)<sup>[1]</sup>は、定姿勢で移動方向を変えることができることからアンダーステアリングを起こすことなく行動ができるため、未知環境における探査の効率化が期待されている。一方、非GNSS環境のような予め地図が与えられていない状況においてロボットを自律制御させるためには、ロボットの自己位置と周辺環境地図を同時に推定する必要がある。これに対し、車輪回転量から導出するデッドレコニングと、Laser Range Finder (LRF)などの距離センサによって測定したランドマークとの相対位置情報を用いたSLAM (Simultaneous Localization and Mapping)<sup>[2]</sup>が提案されている。とくに、拡張カルマンフィルタを用いたEKF-SLAM<sup>[3]</sup>は、その有用性から多くの適用例が確認されている。しかし、車輪を有するビークルの場合、車輪のすべりを考慮せずに車輪回転量を用いて位置などを推定するため、推定精度の低下は不可避である。この問題に対し本稿では、滑りなどの不確かな外乱に対して拡張状態オブザーバ(ESO)<sup>[4]</sup>を適用し、EKF-SLAMと組み合わせることで推定精度の向上を図る。数値シミュレーションでは、本手法を三輪型OMRに適用し、その有効性を検証する。

### 2. OMRの自律制御系

#### 2.1 OMRの運動方程式

Figure 1(a)に三輪OMRの概略図を示し、Figure 1(b)に慣性座標系のOMRのモデルを示す。OMRの運動方程式は次式のように表せる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{d} \quad (1)$$

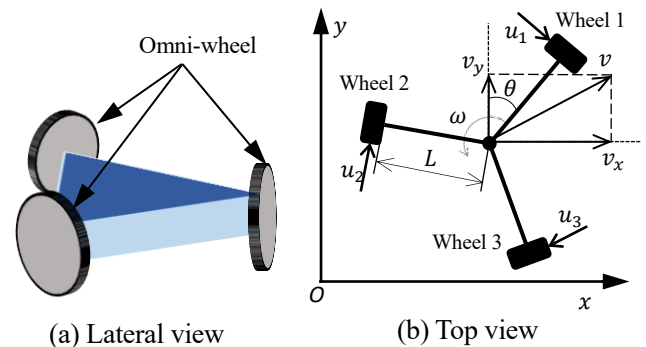


Figure 1. Overview and coordinate frame of the OMR

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -2c\theta & c\theta + \sqrt{3}s\theta & c\theta - \sqrt{3}s\theta \\ -2s\theta & s\theta - \sqrt{3}c\theta & s\theta + \sqrt{3}c\theta \\ 2L & 2L & 2L \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{x} = [x \quad y \quad \theta]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{u} = [u_1 \quad u_2 \quad u_3]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{d} = [d_x \quad d_y \quad d_\theta]^T \quad (6)$$

ここで、 $m$ は機体質量、 $I_m$ は慣性モーメント、 $\mathbf{B}$ は変換行列、 $c\theta$ と $s\theta$ はそれぞれ $\cos\theta$ と $\sin\theta$ 、 $L$ はモーメントの腕の長さ、 $\mathbf{x}$ はOMRの状態量、 $\mathbf{u}$ は各車輪の入力、 $\mathbf{d}$ は車輪に加わる総外乱を表す。

#### 2.2 ESO

SLAMに関する問題に対して、これまで様々な研究がされている。推定アルゴリズムにパーティクルフィルタを用いた例もあるが、計算負荷が大きく実機への適用は難しい。一方、EKF-SLAMは計算コストが低く、推定精度も高い等、利点が多い。しかし、EKF-SLAMは観測ノイズやシステムノイズなどの

ガウス分布に基づく不確かさに対しては推定精度を保証するものの、摩擦抵抗や車輪のスリップなどの不確かさに対しては、推定精度が著しく低下するだけでなく発散する可能性も指摘されている。

そこで本稿では、EKF-SLAM と ESO を併用することで、未知外乱に対して推定精度を改善する手法を提案する。ESO は、非線形オブザーバの一種であり、OMR の各状態量を  $\mathbf{h}_x = \mathbf{x}$ ,  $\mathbf{h}_v = \mathbf{v}$ ,  $\mathbf{h}_d = \mathbf{d}$  と再定義することで次の式が得られる。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{h}}_x = \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{h}_v \\ \dot{\mathbf{h}}_v = \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{d}) = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{h}_d) \\ \dot{\mathbf{h}}_d = \dot{\mathbf{d}} \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{v}$  は慣性座標系における OMR の速度を表している。再定義した状態量の推定値をそれぞれ  $\hat{\mathbf{h}}_x$ ,  $\hat{\mathbf{h}}_v$ ,  $\hat{\mathbf{h}}_d$  とし、 $\mathbf{x}$  の推定値を  $\hat{\mathbf{x}}$  とすると、ESO による推定値は次式を計算することで得られる。

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \dot{\hat{\mathbf{x}}} - \dot{\hat{\mathbf{h}}}_x \\ \dot{\hat{\mathbf{h}}}_x = \dot{\mathbf{h}}_x + \mathbf{l}_x \tilde{\mathbf{x}} \\ \dot{\hat{\mathbf{h}}}_v = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{B}\mathbf{u} + \hat{\mathbf{h}}_d) + \mathbf{l}_v \tilde{\mathbf{x}} \\ \dot{\hat{\mathbf{h}}}_d = \mathbf{l}_d \tilde{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{l}_x$ ,  $\mathbf{l}_v$ ,  $\mathbf{l}_d$  はオブザーバゲインである。

### 2.3 ESO による外乱補償方法と制御則

ESO によって推定した OMR の速度と PID 制御則を用いて次式のように入力  $\mathbf{u}_0$  を求める。

$$\mathbf{u}_0 = \mathbf{K}_P(\mathbf{v}_c - \hat{\mathbf{h}}_v) + \mathbf{K}_I \sum_{m=0}^k (\mathbf{v}_c - \hat{\mathbf{h}}_v) - \mathbf{K}_D \dot{\hat{\mathbf{h}}}_v \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{v}_c$  はポテンシャル関数誘導法によって導出した目標速度、 $\mathbf{K}_P$ ,  $\mathbf{K}_I$ ,  $\mathbf{K}_D$  は入力ゲインを表している。

推定した外乱を入力  $\mathbf{u}_0$  に加え、各車輪の入力  $\mathbf{u}$  を次式で求めることで外乱は補償される。

$$\mathbf{u} = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{u}_0 - \hat{\mathbf{h}}_d) \quad (10)$$

### 3. 数値シミュレーション

非 GNSS 環境を想定し、提案手法を三輪型 OMR に適用する。また、静止摩擦抵抗、動摩擦抵抗と各車輪のスリップを不確かな外乱とする。Figure 2 に本研究における自律制御システムのブロック線図を示す。

Figure 3(a) に EKF-SLAM, Figure 3(b) に提案手法による OMR の移動軌跡の真値と推定値を示す。EKF-SLAM のみでは、外乱の影響により推定値と真値に乖離が生じ、OMR は目的地に到達していない。これに対し、EKF-SLAM と ESO を併用する提案手法では、適正に推定が行われていることが分かる。

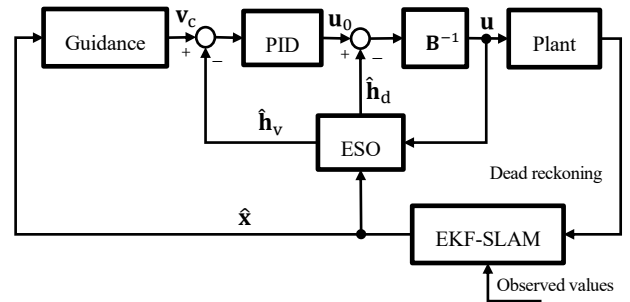


Figure 2. Block diagram of the proposed control system

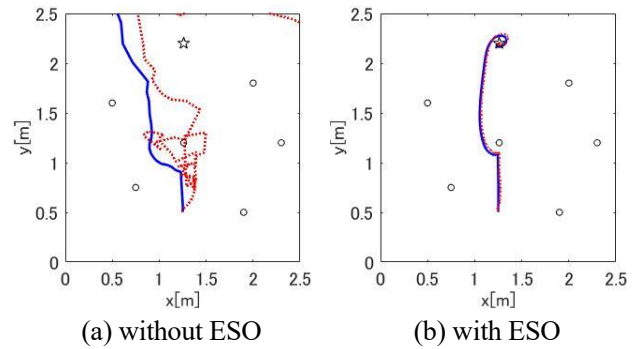


Figure 3. OMR Trajectory (—:True, ···:Estimation, ○:Landmark, ☆:Goal)

### 4. 結言

三輪型 OMR に対して EKF-SLAM と ESO を組み合わせた自律制御システムを提案し、不確かな外乱が存在する場合における推定精度の向上を図った。また、提案手法の有効性を数値シミュレーションにより確認した。

### 参考文献

- [1] Shimada, A. and Kiddee, P. and Nishi, Y : “Obstacle Avoidance Control on Omnidirectional Vehicle Robots Using Range Sensor”, IEEJ Trans. IA, Vol.128, No.6, pp.849-856, 2008.
- [2] 白井 良明 : 「三次元環境認識と行動計画の歴史と展望」, 日本ロボット学会誌, Vol.26, No.4, pp.302-305, 2008
- [3] 森本 祐介, 滑川 徹 : 「拡張カルマンフィルタを用いた移動ロボットの自己位置推定と環境認識」, 日本機械学会運動と振動の制御シンポジウム講演論文集, Vol.11, pp.220-225, 2009
- [4] Cui, R. Chen, L. Yang, C and Chen, M: “Extended state observer-based integral sliding mode control for an underwater robot with unknown disturbances and uncertain nonlinearities”, IEEE Trans. Ind. Electron, Vol.64, No.8, pp.6785-6795, 2017.