

センサ特性の違いを考慮した二輪移動ロボット群の持続被覆制御

東京都立大学 システムデザイン学部 機械システム工学科 B4 鈴木稔規 (児島研究室)

1. はじめに

■ 研究背景

- 持続被覆制御は、広域の領域のデータを効率的に取得する方法と知られている。
- 持続被覆制御を二輪移動ロボットに応用する先行研究^{[1][2]}では**センサ特性の違い**が考慮されていない。

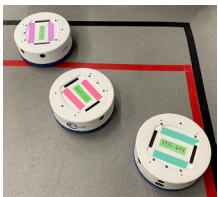


Fig.1: Khepera IV

■ 研究目的

- 異なるセンサ特性を有する二輪移動ロボット群に適用できる持続制御手法を導出する。

2. 制御対象

■ 移動ロボットモデル

制御対象：二輪移動ロボット
ロボットの先端を基準位置したときの運動学モデル

$$\dot{z}_i = f(\theta_i)u_i \quad z_i = \begin{bmatrix} p_i \\ \theta_i \end{bmatrix}$$

$$f(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -r \sin \theta_i \\ \sin \theta_i & r \cos \theta_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad u_i = \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix}$$

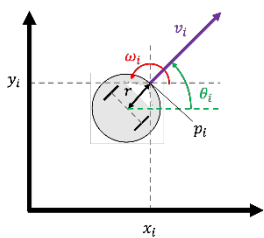


Fig.2: Robot model

3. センサ範囲と重要度更新

持続被覆を行うロボットの行動計画を生成するため、ロボットのセンサ範囲と領域の重要度関数の時間変化を定義する。

■ センサ範囲

$$S_i := \{q \in Q : \|q - p_i\| \leq R \cap |\alpha_i| \leq \psi\}$$

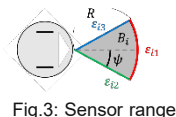


Fig.3: Sensor range

センサ範囲の重複部

提案法では、センサ特性の違いを考慮し、センサ範囲の重複部の分割を行わない。

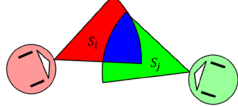


Fig.4: Overlapping area

■ 重要度関数の更新^[1]

センサの距離による性能減衰を考慮した重要度関数の時間変化

$$\frac{d\phi(q,t)}{dt} := \begin{cases} -\delta_{1,i} \left(1 - \frac{\|q-p_i\|}{R_i}\right) \phi(q,t) & \text{if } q \in S_i \\ \delta_2(1 - \phi(q,t)) & \text{if } q \notin \cup_{i=1}^n S_i \end{cases} \quad (\delta_1, \delta_2 > 0)$$

4. 持続被覆制御

■ 領域Q内の被覆度合いを表す評価関数

$$J(z,t) := - \sum_{i=1}^n \int_{S_i} \frac{\|q-p_i\|^2}{R_i^2} \phi(q,t) dq + b \int_{Q \setminus \cup_{i=1}^n S_i} \phi(q,t) dq \quad (b < -1)$$

→被覆達成のために評価関数 J を最大とする制御入力を求める。

持続被覆のための時変制御バリア関数

$$\tilde{J}(z,t) := J(z,t) - \gamma \quad (\gamma < 0)$$

衝突回避のための制御バリア関数

$$h_{i,ca}(z) := \left\| (p_i - r\eta(\theta_i)) - (p_j - r\eta(\theta_j)) \right\|^2 - d_{ca}^2 \quad (d_{ca} > 2r)$$

各制御バリア関数による入力の制約により、**衝突回避**をしながら γ レベルの**持続被覆**を達成できる入力を得る。

■ 制御則

$$u_i = \arg \min_{(u_i^*, \rho_i)} \{u_i^{*T} \text{diag}(1, r^2)u_i^* + \Delta_i E \rho_i\}$$

$$\text{s.t.} \quad \left(\frac{\partial J(z,t)}{\partial z_i}\right)^T f(\theta_i)u_i^* + \xi_i + \Delta_i \rho_i \geq 0$$

$$\xi_i := - \int_{S_i} \frac{\|q-p_i\|^2}{R_i^2} \left(\frac{\partial \phi(q,t)}{\partial t} + k\phi(q,t)\right) dq$$

$$+ \frac{b}{n} \int_Q \left(\frac{\partial \phi(q,t)}{\partial t} + k\phi(q,t)\right) dq - \frac{k}{n} \gamma$$

$$\Delta_i [2(d_{ijx} \cos \theta_i + d_{ijy} \sin \theta_i)v_i + \beta h_{i,ca}(z)] \geq 0$$

$$\Delta_i := \begin{cases} 1 & \text{if } \|d_{ij}\| < D_{ca} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

5. シミュレーション

2台のロボットに対して行ったセンサ範囲半径をロボットごとに異なるものとしたときの実機実験の結果を示す。

ロボット1: $R_1 = 30$ cm, ロボット2: $R_2 = 60$ cm

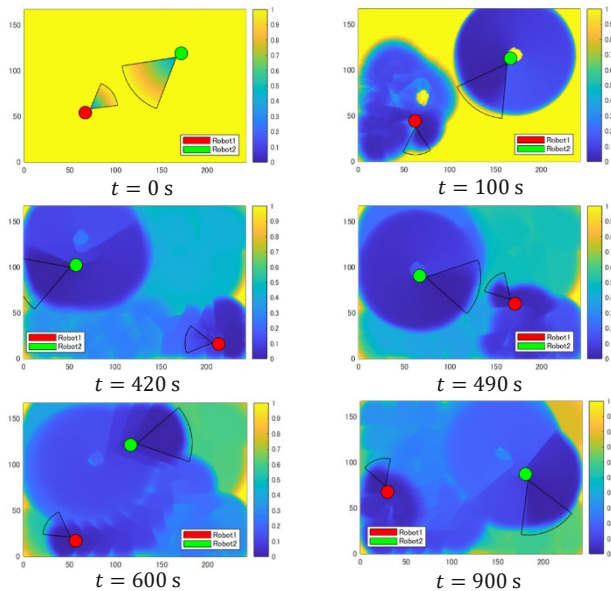


Fig.5: Experimental results

- センサ特性を変えた場合において、**領域内の持続的な被覆行動**が確認される。
- センサ範囲が大きいロボット2の動作が遅い。
➤ **小さな動きで評価関数を大きく上昇**させられるため。
- ロボット2がその場で回転行動を続ける動作が確認される。
➤ センサ範囲が大きいと**回転による被覆**がより**効果的**となるため。

6. まとめと今後の展望

■ まとめ

- センサ特性の違いを考慮した持続被覆制御手法を導出し、実機実験により有効性の確認と、ロボットの動作を考察した。

■ 今後の展望

- 移動物体が存在する環境における持続被覆制御の適用について検討する

7. 参考文献

- 菅原 颯, 児島 晃: 移動ロボット群による持続被覆制御とその複数エリア探索への応用, 第65回自動制御連合講演会, pp. 522-529, 2022
- 石原 隆平: センサ範囲を考慮した二輪移動ロボット群の被覆制御, 東京都立大学卒業論文, 2023