

# センサ範囲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 石原隆平 (児島研究室)

## 1. 背景と目的

- データ収集の際にセンサ範囲, センサ数に制限がある場合, **持続被覆制御**により領域を被覆する研究がなされている[1],[2].
- 異方的なセンサ範囲を持つ場合, センサからの距離のみだけでなく, **センサ中心からの角度の影響**も考慮することが考えられる.



Fig.1: Khepera IV

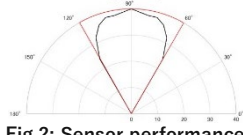


Fig.2: Sensor performance

### 目的

センサからの距離と**角度を考慮した重要度関数更新**に基づいて持続被覆を達成する制御則を導く.

## 2. 制御対象とセンサ範囲

制御対象と有効なセンサ範囲を示す.

- 制御対象: 二輪移動ロボット
- 移動ロボット*i*の先端を基準位置としたときの運動学モデル

$$\dot{z}_i = \begin{bmatrix} \dot{p}_i \\ \dot{\theta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -d \sin \theta_i \\ \sin \theta_i & d \cos \theta_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} = f(\theta_i) \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix}$$

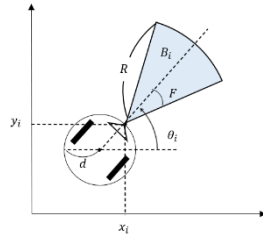


Fig.3: Robot model

- センサ範囲  $B_i$

$$B_i := \{q \in Q : \|q - p_i\| \leq R \cap |\alpha_{iq}| \leq F\}$$

センサ範囲が重複する場合, 地点*q*に最も近いセンサ情報を採用.

- 有効なセンサ範囲  $S_i$

$$S_i := \{q \in B_i : \|q - p_i\| \leq \|q - p_j\| \forall j \in \tilde{\mathcal{V}}\}$$

$\tilde{\mathcal{V}}$ : 地点*q*を観測しているロボットのインデックス集合

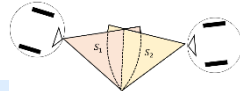


Fig.4: Sensing area

## 3. 持続被覆制御

領域*Q*内の被覆度合いを表す評価関数*J*を最大化するような制御入力により被覆を達成.

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

センサからの**距離と角度を考慮した重要度関数更新式**

$$\frac{d\phi(q, t)}{dt} = \begin{cases} -\underline{\delta} k_1(\|q - p_i\|, |\alpha_{iq}|) \phi(q, t) & \text{if } q \in S_i \\ \bar{\delta}(1 - \phi(q, t)) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_1(x, y) = \left[ 1 - \left(\frac{x}{R}\right)^l \right] \left\{ 1 - \left[\frac{x}{R} \left(\frac{y}{F}\right)^\tau\right] \right\}, \quad (\underline{\delta}, \bar{\delta} > 0, l, \tau \geq 1)$$

時変制御バリア関数 $\tilde{J}$ と制御バリア関数 $h_i$ を導入.

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

$$h_i(z) := \left\| (p_i - dn(\theta_i)) - (p_j - dn(\theta_j)) \right\|^2 - d_{ca}^2 \quad (d_{ca} > 2d)$$

### 定義

$\tilde{J}(z, t) \geq 0, \forall t \geq 0$ が成立するとき,  $\gamma$ レベルの持続被覆が達成され[2], 同様に $h_i(z) \geq 0, \forall t \geq t_0$ が成立するとき, ロボットの中心間距離は $d_{ca}$ 以上離れる.

## 制御則

$$u_i = \arg \min_{(u_i, \rho_i)} \left\{ u_i^T \text{diag}(1, d^2) u_i + \Delta_i E |\rho_i| \right\}$$

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

$$\xi_i := \int_{S_i} \|q - p_i\|^2 (\underline{\delta} k_1(\|q - p_i\|, |\alpha_{iq}|) - k) \phi(q, t) dq + b \left[ \frac{1}{n} \int_Q [\bar{\delta} + (k - \bar{\delta}) \phi(q, t)] dq - \int_{S_i} [\bar{\delta} + (k - \bar{\delta}) \phi(q, t)] dq \right] - \frac{k}{n} \gamma$$

$$\Delta_i [2(P_{ijx} \cos \theta_i + P_{ijy} \sin \theta_i) v_i + \beta h_i(z)] \geq 0$$

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

## 4. シミュレーション・実機実験

シミュレーションで従来法[1]と提案法の比較, 実験で提案法の結果を示す.

Table 1: Parameter

	$\gamma$	$\underline{\delta}$	$\bar{\delta}$	
Sim	$-3 \times 10^7$	1.8	1.5	$3 \times 10^{-3}$
Expt.	$-3 \times 10^7$	1.5		$4 \times 10^{-3}$

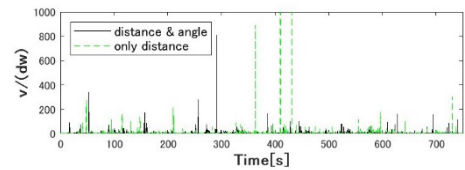


Fig.5: Ratio of  $v$  and  $d\omega$  (Simulation result)

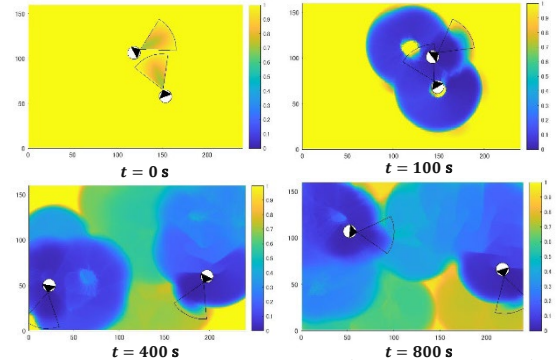


Fig.6: Evolution of density function (Experimental result)

- 重要度関数更新に角度を考慮すると回転速度成分が大きくなりやすい傾向がある.
- 制御則により, 持続被覆制御が達成されている.

## 5. まとめと今後の展望

- シミュレーションにより, 提案法を用いて**直進, 回転を適切に調整した動作が生成可能**であることを確認した.
- 実験により, 持続被覆が達成されていることを確認した.
- 未知の障害物が存在する環境下での持続被覆制御について検討する予定である.

## 6. 参考文献

- H. Sugahara, A. Kojima, "Persistent Coverage Control for a Group of Nonholonomic Mobile Robots Considering Anisotropy of Sensing Area," Proc. Of SICE Annual Conference, pp.110-113, 2022
- H. Dan, J. Yamauchi, T. Hatanaka, and M. Fujita, "Control barrier function-based persistent coverage with performance guarantee and application to object search scenario," 4th IEEE International Conference on Control Technology and Applications, pp.640-647, 2020.