

## 1. はじめに

### 研究背景

- 複数台のロボットによるフォーメーション制御は、作業の効率化などが期待できる。
- 悪路による外乱, 不安定な通信状態など, 不確かな環境下での活動も考えられる。

### 研究目的

- 2輪移動ロボット群のフォーメーション制御問題に着目し通信遅延と外乱抑制性能を検討する。



Fig. 1: フォーメーション制御実験

## 2. フォーメーション形成

移動ロボットの位置・速度情報を用いたフォーメーション制御法を導く<sup>[1]</sup>. そのために, 仮想ロボットモデル (Fig. 2) を利用し, 2輪移動ロボットの速度拘束を表現する。

### 移動ロボットモデル

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\theta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & 0 \\ \sin \theta_i & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix}$$

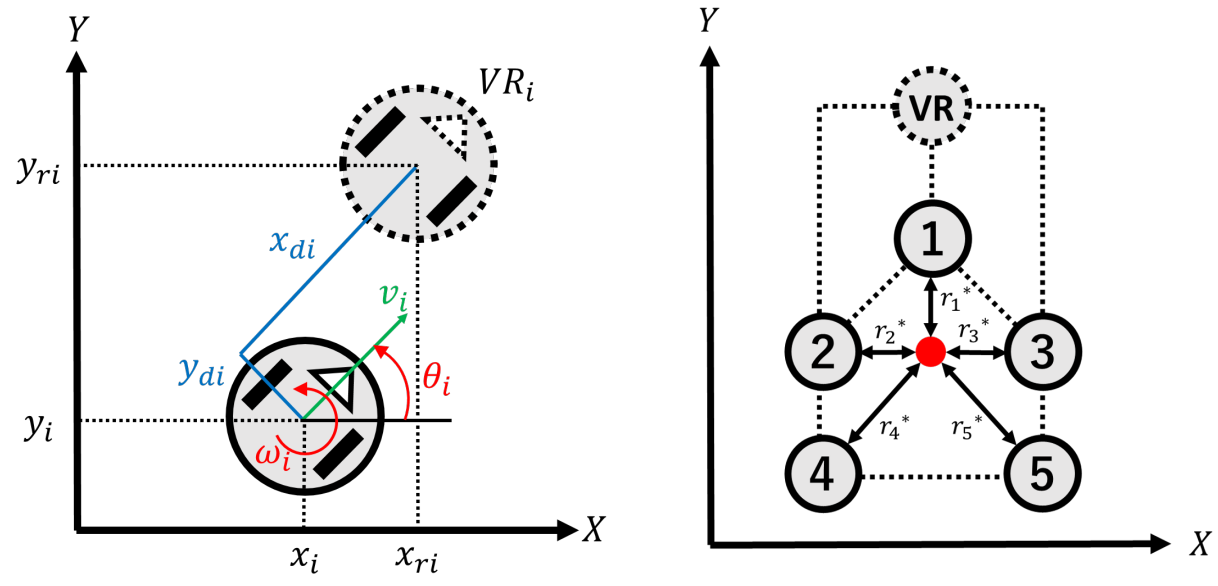


Fig. 2: ロボットモデル Fig. 3: 仮想ロボットの合意

### 仮想ロボットモデル

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{ri} \\ \dot{y}_{ri} \\ \dot{\theta}_{ri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_i \\ B_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} \cdot B_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -x_{di} \sin \theta_i - y_{di} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & x_{di} \cos \theta_i - y_{di} \sin \theta_i \end{bmatrix}$$

- $i$  番目の仮想ロボットについて, 以下のように  $\hat{r}_i$  を設定する。

$$\hat{r}_i = r_i - r_i^*, \quad r_i = [x_{ri} \quad y_{ri}]^T \quad r_i^*: \text{隊列形成時の目標位置}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\hat{r}_i(t) - \hat{r}_j(t)\| = 0 \quad (\text{仮想ロボットの合意問題})$$

全ての仮想ロボットの状態が一致 → フォーメーション形成

**制御則**  $\hat{r}_i$  と  $v_{ri}$  によるフィードバック制御則を与える。

$$u_i = B_i^{-1} v_{ri} \quad (u_i = [v_i \quad \omega_i]^T, \quad v_{ri} = [\dot{x}_{ri} \quad \dot{y}_{ri}]^T)$$

$$\dot{v}_{ri}(t) = -k_{vr}(v_{ri}(t) - v^*) + d_i w(t) - \sum_{j \in N_i} (k_r(\hat{r}_i(t - \tau_{ji}) - \hat{r}_j(t - \tau_{ji})) + k_v(v_{ri}(t - \tau_{ji}) - v_{rj}(t - \tau_{ji})))$$

- $v^*$ : 目標速度
- $w$ : 外乱
- $\tau_{ji}$ : ロボット  $i \rightarrow j$  間の通信遅延
- $k_{vr}, k_r, k_v$ : 固定ゲイン
- $d_i$ : 任意パラメータ (外乱の印加を調節)

## 3. ロバスト安定条件

区間むだ時間系の有界実補題<sup>[2]</sup>の結果を一般化し, 複数むだ時間をもつフォーメーション制御系のロバスト性を評価する。

### 対象の区間むだ時間系

各ロボットの状態の差分に着目した, 収束モード<sup>[3]</sup>を用いる。

$$\dot{\tilde{x}}(t) = A_0 \tilde{x}(t) + \sum_{k=1}^2 A_k \tilde{x}(t - \tau_k) + B_w w(t), \quad \tilde{x} = [\tilde{r}^T \quad \tilde{v}^T]^T$$

$$z(t) = C_0 \tilde{x}(t), \quad \tau_1 \in [0, h_1], \quad \tau_2 \in [0, h_2], \quad h_1, h_2 > 0$$

$$\tilde{r} = [\hat{r}_2 - \hat{r}_1 \quad \dots \quad \hat{r}_n - \hat{r}_1]^T, \quad \tilde{v} = [v_{r2} - v_{r1} \quad \dots \quad v_{rn} - v_{r1}]^T$$

- この収束モードに対し, 次のLMI条件を適用する。
- 区間むだ時間の変動に対し,  $H_\infty$  ノルムを  $\gamma > 0$  未満に抑制できる。
- $\gamma$  が小さくなるように, 固定ゲインを調整する。

### LMI条件

区間むだ時間系がロバスト安定である必要十分条件は, 以下の(a), (b)が成り立つことである。

(a) 行列  $A_0 + A_1 + A_2$  が安定である。

(b) 領域  $[0, 2\pi] \times [0, 2\pi]$  の適当な分割が存在し, 各区間  $[\phi_i, \phi_{i+1}], [\psi_j, \psi_{j+1}]$  で以下のLMIが実行可能解をもつ。

$$\forall z, y \in \mathcal{V}_{[\phi_i, \phi_{i+1}] \times [\psi_j, \psi_{j+1}]} : F(R_{ij}, \phi, \psi, z, y) < 0,$$

$$F(R, \phi, \psi, z, y) = \begin{bmatrix} R^* A_p(z, y) + A_p^*(z, y) R & R^* B(z, y) & C_0^* \\ B^*(z, y) R & -\gamma I & 0 \\ C_0 & 0 & -\gamma I \end{bmatrix}$$

$$A_p(z, y) := A(z, y) - j \cdot \max\left(\frac{\phi}{h_1}, \frac{\psi}{h_2}\right) I, \quad R := P + jQ, \quad P, Q \in \mathbb{H}^n, \quad \phi, \psi \in \mathbb{R}$$

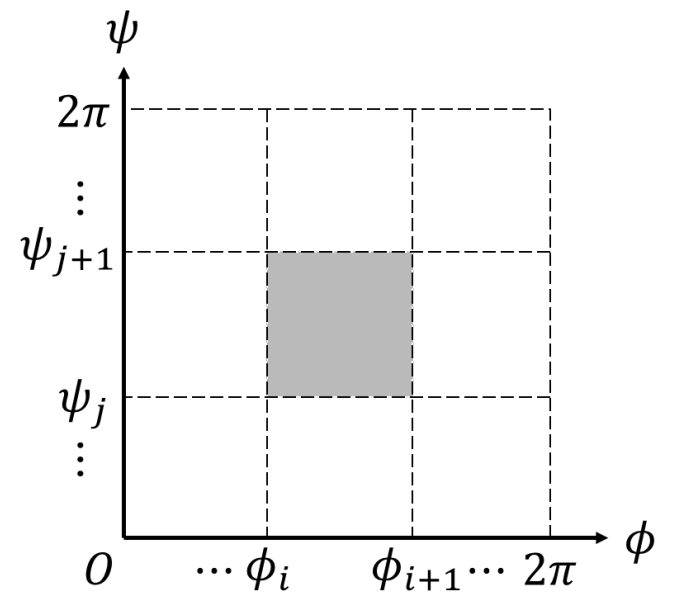


Fig. 4: パラメータ分割区間

## 4. シミュレーション・実験結果

3台の移動ロボットに対しシミュレーションと実機実験を行い, 提案した安定条件を評価する。

- Fig. 5 のような通信構造で, 固定ゲインが異なる Case 1, 2 における  $\gamma$  を求める。
- $\tau_1 = 0.6, \tau_2 = 0.7$  のときの応答をそれぞれ比較する。

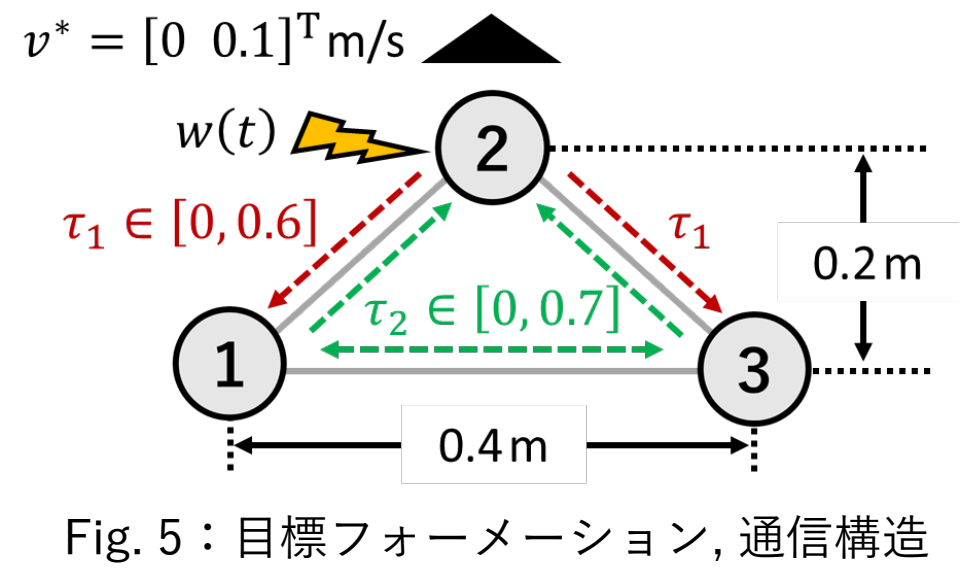


Fig. 5: 目標フォーメーション, 通信構造

### [Case 1]

$$\begin{aligned} k_{vr}: 0.5 \\ k_r: 0.03 \\ k_v: 0.035 \\ \downarrow \\ \gamma: 11.13 \end{aligned}$$

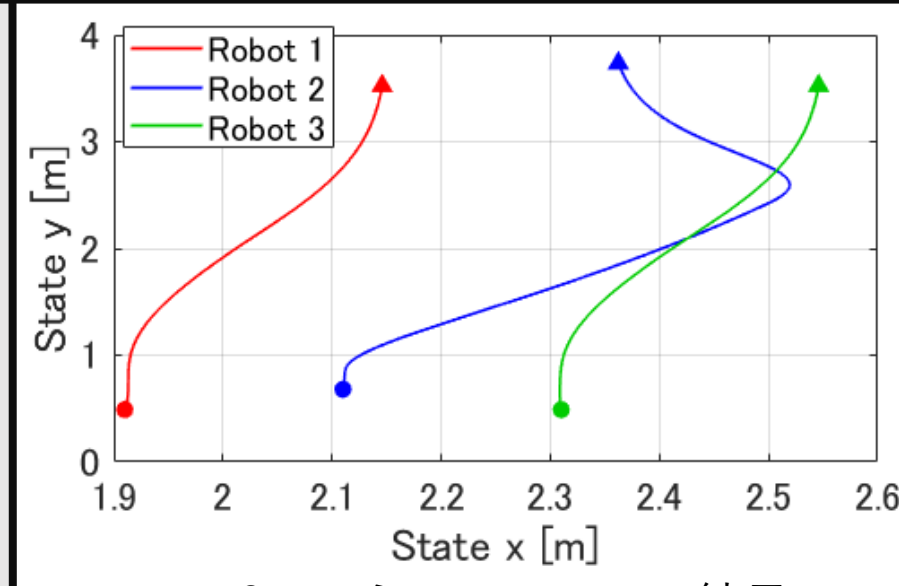


Fig. 6: シミュレーション結果

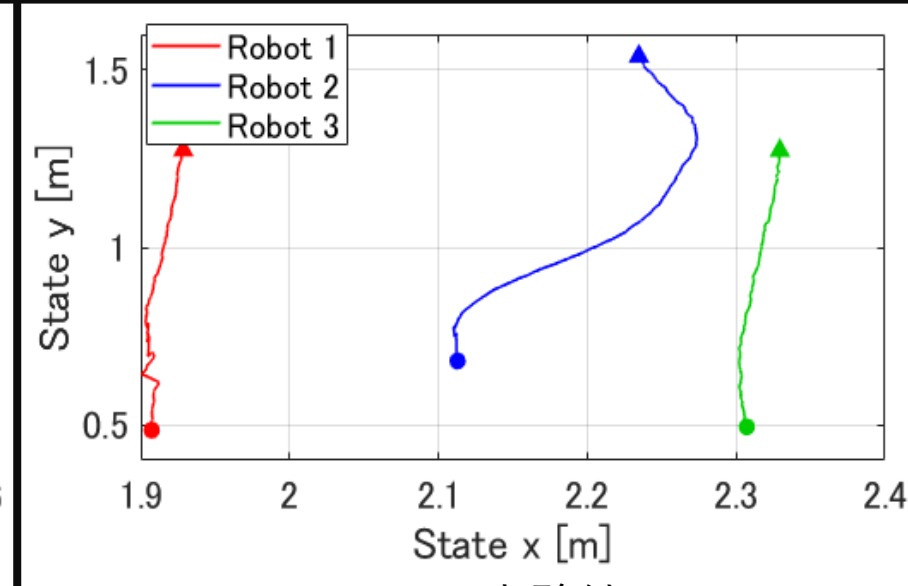


Fig. 7: 実験結果

### [Case 2]

$$\begin{aligned} k_{vr}: 1.0 \\ k_r: 0.1 \\ k_v: 0.01 \\ \downarrow \\ \gamma: 3.351 \end{aligned}$$

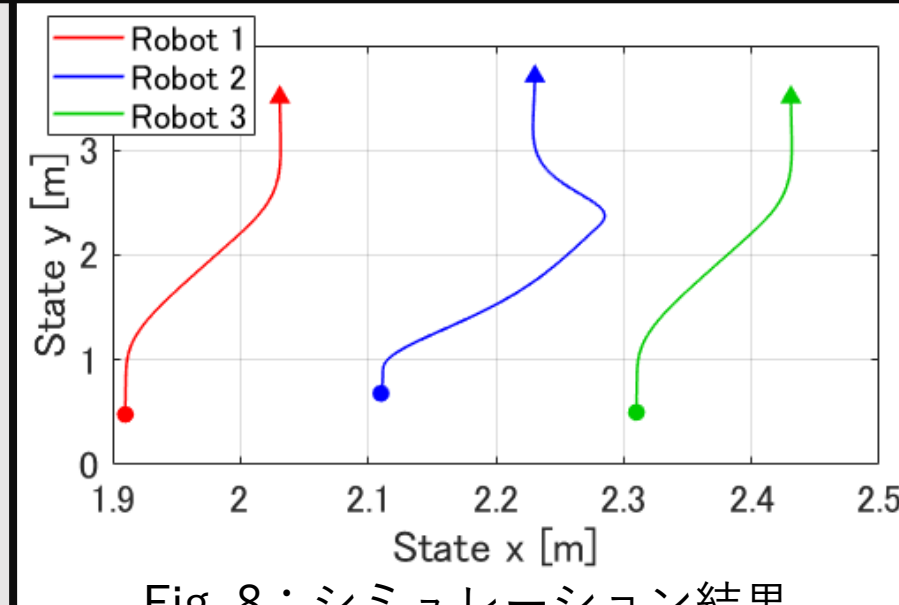


Fig. 8: シミュレーション結果

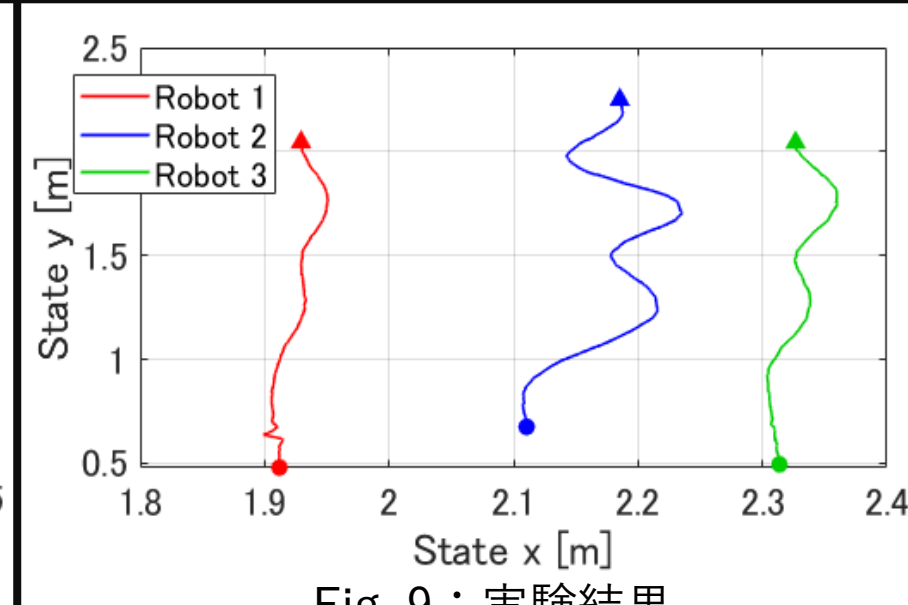


Fig. 9: 実験結果

- $\gamma$  の値が小さい Case 2 のほうが, ロボットの進行方向の変化を抑制できている。
- 一般的には, 相対的に固定ゲイン  $k_v$  を抑えることにより, 通信遅延・外乱抑制性能を高めることができる。

## 5. まとめ

- 通信遅延と外乱を含む2輪移動ロボットのフォーメーション制御に対し, LMIを用いたロバスト安定条件を示した。
- 定数  $\gamma$  が小さくなるように固定ゲインを設定することにより, 通信遅延や外乱の影響を抑制できることを確認した。
- 本研究はJSPS科研費 JP21K04127により行われた。記して謝意を表します。

## 参考文献

- [1] C. Yoshioka, J. Namerikawa: "Formation control of nonholonomic multi-vehicle systems based on virtual structure", *Proceedings of 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, pp. 5149-5154 (2008)
- [2] 児島, 端倉: "区間むだ時間系に対する有界実補題の導出", *計測自動制御学会論文集*, Vol.56, No. 10, 1/8 (2020)
- [3] 滝澤, 児島: "遅延を考慮した2重積分器型マルチエージェントシステムの収束性解析", *第62回自動制御連合講演会*, 114-04 (2019)