

移動ロボット群の隊列制御 Formation Control for Multiple Mobile Robots

80222758 高橋宏昌 (Hiromasa Takahashi) Supervisor 大西公平 (Kouhei Ohnishi)

1 序論

移動ロボットの代表的な手法として「Leader-Following strategy」[1] が挙げられる。本論文では、この手法を応用して、能力差を考慮した隊列制御 [2] を提案する。そして移動ロボットの可動性 [3] を定義し、隊列の形を定量化した隊列可動性を提案する。

2 能力差を考慮した隊列制御

2.1 Performance Index

モータの最大許容回転数を n_{max} 、最大連続トルクを τ_{max} とすると、移動ロボットの最大加速度 α_{max} 、最大速度 v_{max} は、(1), (2), (3) 式のように定式化される。ただし、 G_r はギア比を、 η は伝達効率を表す。

$$v_{max} = 2\pi R \frac{n_{max}}{60} \frac{1}{G_r} \quad (1)$$

$$\alpha_{max} = \frac{R}{A} \left(\frac{2J}{W^2} + \frac{J_w}{R^2} \right) \eta G_r \tau_{max} \quad (2)$$

$$A = \frac{R^2 M J}{W^2} + \frac{J_w^2}{R^2} + J_w \left(\frac{2J}{W^2} + \frac{M}{2} \right) \quad (3)$$

ロボットの移動距離を L とすると、全移動時間距離 t_{move} は、

$$t_{move} = \begin{cases} 2\sqrt{\frac{L}{\alpha_{max}}} & (0 \leq L \leq \frac{v_{max}^2}{\alpha_{max}}) \\ \frac{L}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{\alpha_{max}} & (\frac{v_{max}^2}{\alpha_{max}} \leq L) \end{cases} \quad (4)$$

と表される。本研究では、 $t_{desire}(= \alpha t_{move})$ をロボットの「Performance Index」と定義する。

2.2 Performance Index を用いた追従制御

本論文で提案する Controller のモデル図を Fig.1 に示す。

今 R_j の軌道が、(5) 式のように与えられるとする。

$$\mathbf{x}_{cmd}^j = \begin{bmatrix} x_{res}^j - l_{cmd}^{i-j} \cos \phi_{cmd}^{i-j} \\ y_{res}^j - l_{cmd}^{i-j} \sin \phi_{cmd}^{i-j} \\ \phi_{res}^{i-j} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここでロボットの急激な追従を避けるため、 l_{cmd}^{i-j} 、 ϕ_{cmd}^{i-j} を (6), (7) 式のように定義した。これにより、 l_{cmd}^{i-j} 、 ϕ_{cmd}^{i-j} が、

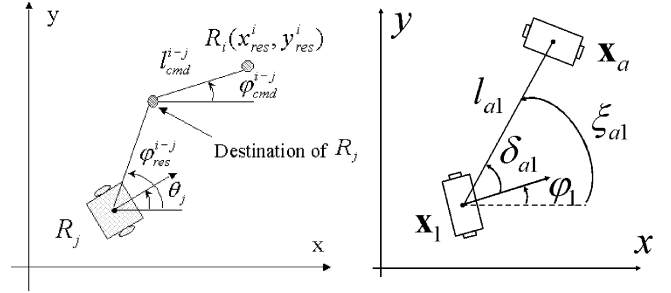


図 1: Controller のモデル図

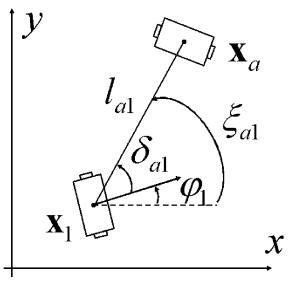


図 2: 可動性のモデル図

t_{desire} だけかけて、 l_{end}^{i-j} 、 ϕ_{end}^{i-j} に収束することができる。ただし、 l_{end}^{i-j} 、 ϕ_{end}^{i-j} は R_i と R_j との相対距離・相対角度を、 l_{ind}^{i-j} 、 ϕ_{ind}^{i-j} は R_i と R_j との初期相対距離・初期相対角度を、 t_{exp} は実験時間を表している。

$$l_{cmd}^{i-j} = \begin{cases} l_{ind}^{i-j} + t_{exp} \frac{(l_{end}^{i-j} - l_{ind}^{i-j})}{t_{desire}} & (t_{exp} < t_{desire}) \\ l_{end}^{i-j} & (t_{exp} \geq t_{desire}) \end{cases} \quad (6)$$

$$\phi_{cmd}^{i-j} = \begin{cases} \phi_{ind}^{i-j} + t_{exp} \frac{(\phi_{end}^{i-j} - \phi_{ind}^{i-j})}{t_{desire}} & (t_{exp} < t_{desire}) \\ \phi_{end}^{i-j} & (t_{exp} \geq t_{desire}) \end{cases} \quad (7)$$

3 可動性

移動ロボットの可動性を定義するために、まず移動ロボットを回転モータに、ロボット間を直動モータの仮想リンクによってつながれていると仮定する。これによって複数台の移動ロボットを仮想マニピュレータと仮定することができる。次に、この仮想マニピュレータの手先速度と各車輪の回転速度を関係付けることで、マニピュレータのヤコビ行列と同じようなヤコビ行列を定義することができる。本研究では、このヤコビ行列を「可動性ヤコビ行列」と呼び、これを用いて隊列状態を定量化した「隊列可動性」を定義する。

3.1 移動ロボットの可動性

本節では移動ロボット 1 台の可動性について述べる。移動ロボットの可動性のモデル図を Fig.2 に示す。

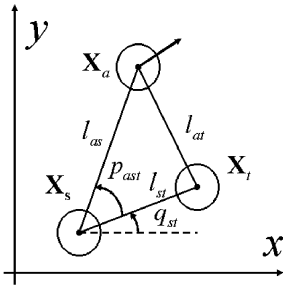


図 3: 3 台移動ロボットのモデル図

ここで図中の X_l は実際のロボットを, X_α は所望の姿勢を示している. さて, このモデル図からロボットの幾何学的関係が (8) 式のように表される.

$$\mathbf{X}_\alpha = \begin{bmatrix} x_\alpha \\ y_\alpha \\ \phi_\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{\alpha 1}(t) \cos(\xi_{\alpha 1}(t)) + x_1(t) \\ l_{\alpha 1}(t) \sin(\xi_{\alpha 1}(t)) + y_1(t) \\ \phi_\alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

(8) 式を用いて, 運動学関係は (9) 式のように与えられる.

$$\dot{\mathbf{X}}_\alpha = \mathbf{J}_{mob}^{\alpha 1} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{r\alpha} & \dot{\theta}_{l\alpha} & \dot{\theta}_{r1} & \dot{\theta}_{l1} \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

ここでは $\mathbf{J}_{mob}^{\alpha 1}$ を可動性ヤコビ行列と呼び, マニピュレータの可操作性の概念を用いて, 移動ロボットの可動性は (10) 式のように与えられる.

$$\omega_{mob}^{\alpha 1} = \sqrt{\det(\mathbf{J}_{mob}^{\alpha 1} \mathbf{J}_{mob}^{\alpha 1 T})} \quad (10)$$

3.2 隊列可動性

本節では前節で定義した移動ロボットの可動性を用いて, 複数台移動ロボットの隊列を定量化した^{*)}「隊列可動性」を提案する. まず複数台移動ロボット群を, 全ロボット間が仮想リンクでつながれたパラレルリンク型仮想マニピュレータと仮定する. そして, その仮想マニピュレータを, Fig.3にある 3 台の移動ロボットを基本単位としたロボット群で構成されていると仮定する. ただし, Fig.3にある 3 台の移動ロボットの 1 つには Leader である X_α は必ず含まれることとする. このモデル図からロボットの幾何学的関係を用いて, 運動学関係は (11) 式のように与えられる.

$$\dot{\mathbf{X}}_\alpha = \mathbf{J}_{mob}^{\alpha sl} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{r\alpha} & \dot{\theta}_{l\alpha} & \dot{\theta}_{rs} & \dot{\theta}_{ls} & \dot{\theta}_{rl} & \dot{\theta}_{ll} \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

次に可動性ヤコビ行列を用いて, 隊列ヤコビ行列 \mathbf{J}_{mob} は (12) 式のように与えられる.

$$\mathbf{J}_{mob} = \frac{1}{j} \sum_{s=2}^{j-1} \sum_{t=3}^j \mathbf{J}_{mob}^{\alpha sl} \quad (12)$$

その結果, (12) 式と可操作性の概念を用いて, ^{*)}「隊列可動性」 w_{mob} を定義できる.

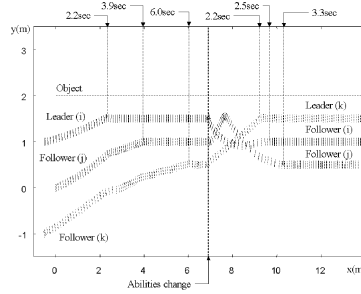


図 4: 能力差を考慮した隊列制御法の結果

4 シミュレーション

能力差を考慮した隊列制御によるシミュレーション結果を Fig.4に, 隊列可動性に関するシミュレーション結果を Fig.5, 6に示した. Fig.4の上部にある数値は各ロボットの Performance Index である. このシミュレーションでは 7.0sec でロボットの能力が変化するようにしてあるが, そうした突然の能力の変化に対しても Performance Index が変化し, うまく軌道が生成されていることがわかる.

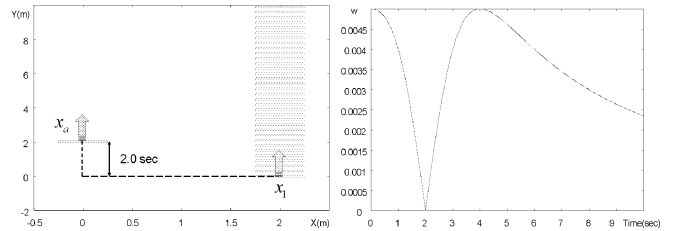


図 5: 移動ロボットの軌跡

図 6: Fig.5 の可動性

また Fig.6は, ロボットが Fig.5のように動いた場合の可動性を示している. 図中の X_l はロボットの姿勢, X_α は目標姿勢をあらわしている. 2.0 秒後の時に非ホロノミック拘束により, 可動性が 0 になり, 非ホロノミックの状態から近づけば近づくほど可動性は大きくなっている. また, 相対角度が $\pm 45^\circ$ になる時に可動性が最大になっている. 以上のことから本論文で提案した可動性という定義の妥当性を確認することができる.

5 結論

本論文では, 能力差を考慮した隊列制御法を提案し, 隊列の形の良さを表す隊列可動性を定量化した. そしてその結果の妥当性をシミュレーションによって検証した.

参考文献

- [1] R.Fierro, etc: "A Vision-Based Formation Control Framework", IEEE Trans. on Robotics & Automation, Vol.18, No.5, pp813-pp825(2002)
- [2] H.Takahashi, K.Ohnishi: "Autonomous Decentralized Control for Formation of Multiple Mobile-Robots Considering Ability of Robot", Proc. IECON'03 IEEE Conf., Vol.2, pp2041-pp2016, Virginia, US(2003-11)
- [3] H.Takahashi, K.Ohnishi: "Mobility of a Mobile Robot", IEEE Workshop on Advanced Motion Control, (to be printed), kawasaki, Japan(2004-3)