3 リンク劣駆動マニピュレータによるリアルタイム制御環境の構築

一田 啓介^a 濱川 透^a 若松 衛^a

^a宇部工業高等専門学校

1. はじめに

劣駆動マニピュレータ⁽¹⁾は一般的に知られているような、各関節にアクチュエータを最低一つ以上装備したものとは異なり、一部の関節に保持ブレーキ等を用いない非駆動関節を装備したマニピュレータを示す。そのため、通常とは異なる制御手法を必要とし、非駆動関節を有するため制御が複雑となる。しかしながら駆動トルクを発生させるアクチュエータが非駆動関節に置き換わることで、軽量化や省エネルギー化、コスト削減等の利点が見込まれる。

本研究ではこれまでに劣駆動システムの制御手法について着目し、特に劣駆動システムの最も基本的な制御対象である劣駆動マニピュレータに対し、所望の動作を行うために研究を行ってきた。現在では平面 3 リンク劣駆動マニピュレータの動力学モデルに従い、実機実験用マニピュレータの製作を行った上で、提案手法である切換え制御手法の有効性について検討を行っている⁽²⁾。ここでは数値計算ソフトウェアの中でも主流である MATLAB/Simulink を用いて、提案手法のシステムへの適用を目指しているが、適用を行った上での問題として、マニピュレータの各関節に搭載されている DC サーボアクチュエータにおける精密なタイミングでの切換えが挙げられる。今回は DC サーボアクチュエータについて、リアルタイム環境を考慮した制御環境の構築を試みる。

2. 平面 3 リンク劣駆動マニピュレータ

Fig. 1 に平面 3 リンク劣駆動マニピュレータのモデル図を示す。対象のマニピュレータは各リンクが地面に対し水平に設置されており、移動あるいは可動範囲が水平であるため重力が影響しない。第 1 関節と第 2 関節にはアクチュエータを装備しており、駆動トルクが発生する。それに対し第 3 関節にはアクチュエータや保持ブレーキを持たない非駆動関節を装備しており、駆動トルクを発生させることができない。動力学モデルは

$$M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) = \tau \quad (1)$$

である。

Construction of Real-Time Control Environments for Three-Link Underactuated Manipulators

Keisuke Ichida^a, Tougo Hamakawa^a, Mamoru Wakamatsu^a

^aNational Institute of Technology, Ube College

Fig. 1. Model of 3-link underactuated manipulator.

ただし、 $\theta^T = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]$, $\tau^T = [\tau_1 \ \tau_2 \ 0]$,

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{12} & M_{22} & M_{23} \\ M_{13} & M_{23} & M_{33} \end{bmatrix}$$

$$h(\theta, \dot{\theta}) = [h_1 \ h_2 \ h_3]^T$$

$$\begin{aligned} M_{11} = & (m_1 l_{g1}^2 + I_1 + m_2 l_1^2 + m_3 l_1^2) \\ & + (m_2 l_{g2}^2 + I_2 + m_3 l_2^2) + (m_3 l_{g3}^2 + I_3) \\ & + 2l_1(m_2 l_{g2}^2 + m_3 l_2^2)\cos\theta_2 + 2m_3 l_1 l_{g3} \\ & \times \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2m_3 l_1 l_{g3} \cos\theta_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{12} = & (m_2 l_{g2}^2 + I_2 + m_3 l_2^2) + (m_3 l_{g3}^2 + I_3) \\ & + l_1(m_2 l_{g2}^2 + m_3 l_2^2)\cos\theta_2 + 2m_3 l_1 l_{g3} \\ & \times \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2m_3 l_2 l_{g3} \cos\theta_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{13} = & (m_3 l_{g3}^2 + I_3) + m_3 l_1 l_{g3} \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ & + m_3 l_2 l_{g3} \cos\theta_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{22} = & (m_2 l_{g2}^2 + I_2 + m_3 l_2^2) + (m_3 l_{g3}^2 + I_3) \\ & + 2m_3 l_2 l_{g3} \cos\theta_3 \end{aligned}$$

$$M_{23} = (m_3 l_{g3}^2 + I_3) + m_3 l_2 l_{g3} \cos\theta_3, \quad M_{33} = m_3 l_{g3}^2 + I_3$$

$$\begin{aligned} h_1 = & -l_1(m_2 l_{g2} + m_3 l_2)(2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2)\sin\theta_2 \\ & - m_3 l_1 l_{g3}(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)\sin(\theta_2 + \theta_3) \\ & - m_3 l_2 l_{g3}(2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_3^2)\sin\theta_3 + \mu_1 \dot{\theta}_1 \\ h_2 = & l_1(m_2 l_{g2} + m_3 l_2)\dot{\theta}_1^2 \sin\theta_2 + m_3 l_1 l_{g3} \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ & - m_3 l_2 l_{g3}(2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_3^2)\sin\theta_3 + \mu_2 \dot{\theta}_2 \\ h_3 = & m_3 l_1 l_{g3} \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_2 + \theta_3) + m_3 l_2 l_{g3}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \sin\theta_3 \\ & + \mu_3 \dot{\theta}_3 \end{aligned}$$

ここで、 τ_i ($i = 1, 2$)を駆動トルク[Nm]とし、 θ_j ($j = 1, 2, 3$)を回転角度[rad]とする。また m_j , l_j , I_j を各リンクの質量[kg]および長さ[m], 慣性モーメント[kgm²]とし、 μ_j は各関節の粘性摩擦係数[Ns/m]とする。

3. 劣駆動マニピュレータにおける実験環境

本研究では **Fig. 2** に示すように平面 3 リンク劣駆動マニピュレータの実機実験環境を構築した⁽³⁾。本マニピュレータはベースと第一リンクとの関節部にハーモニック・ドライブ・システムズ社製の DC サーボアクチュエータ (RH-14D) を装備しており、第一リンクと第二リンクとの関節部には同社製 DC サーボアクチュエータ (RH-8D) を装備している。第二リンクと第三リンクとの関節部には日本電産コパル電子社製光学式エンコーダ (RE30E) を装備しており、角度のみを計測できるが駆動力は発生できない非駆動関節とした。

4. MATLAB/Simulink を用いたリアルタイム制御

平面 3 リンク劣駆動マニピュレータについて切換え制御手法を用いた実験を行うためには、コンピュータで演算した各リンクの関節角度情報を忠実にサーボモータへ伝える必要がある。ここでは、MATLAB/Simulink を用いることで本問題の解決を図る。Simulink は連続および離散システムの信号生成が可能である。また C 言語および C++ 言語をベースとしたコード生成が可能である事に加え、生成したコードをハードウェアに実装し、実時間 (リアルタイム) を考慮した制御が可能である。ここでは、オプションプロダクトである Simulink Real-Time を利用することで、リアルタイム制御の実現を試みる。

5. Simulink によるモータ速度制御

これまでに Simulink のオプションプロダクトである Simscape Power Systems ToolBox を使い、劣駆動マニピュレータの駆動部で使用される DC サーボアクチュエータ (RH-8D) のモデリングを行った。また台形制御とフィードバック制御を適用し、参照軌道に対しモータの回転角速度が追従するようにシミュレーション制御を行った⁽⁴⁾。ここでは、実際の DC モータを用いた速度制御実験を行う。今回は澤村電気工業社製の DC モータ (SS23F-E0) を使い実験を行った。モータの各パラメータは、定格電圧 24[V]、定格回転速度 3000[rpm]、逆起電力定数 5.3[V/rpm]、トルク定数 0.051[Nm/A]、電機子抵抗 10[Ω]、電機子慣性モーメント 2.8×10^{-4} [kgm²]とした (**Fig. 3**)。 **Fig. 4** に速度制御による実験結果を示す。

6. おわりに

本研究では劣駆動システムの制御手法について着目し、現在は平面 3 リンク劣駆動マニピュレータに対し、切換え制御手法を適用した実機実験を検討中である。今回は本手法を実現するために、MATLAB/Simulink を用いたリアルタイム制御システムの構築を試みた。また DC モータの速度制御実験を通して本システムの検証を行った。

Fig. 2. 3-link underactuated manipulator.

Fig. 3. Control system of DC motor.

Fig. 4. Control result of DC motor.

文 献

- (1) 小林啓吾, 井村順一, 吉川恒夫:「自由関節を含む 3 自由度マニピュレータの非ホロノミック制御」, 計測自動制御学会論文集, Vol. 33, No. 8, pp. 799-804, 1997
- (2) 青山貴伸, 蔵本一峰, 森口 肇:「最新 使える! MATLAB」, 講談社サイエンティフィク, 2006
- (3) 一田啓介, 若松衛, 池岡誠太, 竹中真也:「3 リンク劣駆動マニピュレータによる実機実験環境の構築」, 産業応用工学会 2017 講演論文集, pp. 21-23, 2017
- (4) 三田宇洋:「MATLAB/Simulink によるモデルベースデザイン入門」, オーム社, 2013