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

一田 啓介^a 若松 衛^a 池岡 誠太^a 竹中 真也^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劣駆動システムの制御について着目し、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。これまでの研究は、劣駆動マニピュレータをモデル化し、コンピュータシミュレーションを通して数値計算上での有効性を示してきた。しかしながら数値シミュレーションのみでの検証では、設計した制御器を実機に適用した際、実際に想定した動作が行われない可能性がある。ここでは、劣駆動マニピュレータの制御における提案手法の有効性を実機実験で検証するための制御環境構築を試みる。

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

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

である。ただし、 $\boldsymbol{\theta}^T = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]$, $\boldsymbol{\tau}^T = [\tau_1 \ \tau_2 \ 0]$,

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3. MATLAB/Simulink の特徴

MATLAB⁽²⁾とは MATrix LABoratory に由来し、本来は数値計算ライブラリである LINPACK と EISPACK を利用するために作成された。由来に示される通りに、行列計

Construction of Experiment Verification for Three-Link Underactuated Manipulators

Keisuke Ichida^a, Mamoru Wakamatsu^a, Seita Ikeoka^a, Shinya Takenaka^a

^aNational Institute of Technology, Ube College

算を伴う問題に対し最も力を発揮する。また本来は Fortran のみに対応していたが、C 言語ベースに使用変更され、現在では Java 形式および Python 形式にも対応可能である。現在は多くの研究者や技術者に支持されており、その理由としては、行列演算だけでなく、初心者にも容易にプログラムできるインタプリタ方式である事、豊富なグラフィカルユーザインタフェース (GUI) 機能を備えている事などが挙げられる。また Simulink とは動的システムの GUI ベースとしたシミュレーションツールである。本システムは、対象のシステムをライブラリに格納されているブロックを利用して視覚的に表現し、制御システムのモデリング構築やシミュレートを行う事が可能である。MATLAB/Simulink は各種 Toolbox と呼ばれる拡張パッケージを組み込むことで、様々な問題に対し対応可能であり、特に Simulink Real-Time を利用することにより、実時間を考慮した制御を行うことができる。

4. 劣駆動マニピュレータにおける実験環境の構築

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製作を行った。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。

5. Simulink によるモータ制御

Simulink のオプションプロダクトである Simscape Power Systems Toolbox を用いて、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) のモデリングを行う。今回は台形制御とフィードバック制御を採用し、参照軌道に対しモータの回転各速度が追従するように制御を行った⁽³⁾。モデルパラメータとして、定格電圧を 24[V]、回転負荷を考慮したロータ側慣性モーメント $150 \times 10^{-4} [\text{kgm}^2]$ 、逆起電力定数 0.44[Vs/rad]、トルク定数 0.44[Nm/A]、電気子自己インダクタンス $2.2 \times 10^{-2} [\text{H}]$ 、電気子抵抗 10[Ω]とした。Fig. 3 にシミュレーション結果を示す。

6. おわりに

本研究では劣駆動システムの制御を行うために、最も基本的な制御対象である、平面 3 リンク劣駆動マニピュレータに着目した。ここでは平面 3 リンク劣駆動マニピ

Fig. 2. 3-link underactuated manipulator.

Fig. 3. Dynamic characteristics of DC motor.

ュレータのモデル図に従い、実機実験用マニピュレータの製作を行った。また今回は数値解析ソフトウェアの中でも主流である MATLAB/Simulink を用いてマニピュレータの駆動関節部に使用されている DC サーボモータの追従制御を試みた。今後の研究としては、3 リンク劣駆動マニピュレータの実機を用い、切換え制御手法⁽⁴⁾を適用することでの制御を試みる。また切換え制御手法を実機実験で行うには、より精密なタイミングでの切換えが必要となる。そこで実時間 (リアルタイム) 環境下での制御を行う予定である。

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) 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
- (4) Keisuke Ichida, Shun Katayama, and Keigo Watanabe: “Design Parameter Setting by GA with Switching Method for Three-DOF Underactuated Manipulators”, Journal of the Institute of Industrial Applications Engineers, Vol. 3, No. 4, pp. 178-182, 2015