時間軸状態制御形を用いたジブクレーンの振れ止め制御

2016SC101 山内鉄太
指導教員: 陳幹

2021 年 2 月 9 日

1 はじめに

本研究では時間軸状態制御形の時間軸を変更できる性質に注目し、ペイロードの軌道追従性を向上させることを目的としている。時間軸状態制御形を用いた本文献 [4] の制御方法を参考に、研究では 2 段階に分けて制御器を設計する。まず、トロリーの荷振れ抑制を行いつつ目標位置までトロリーを移動させる制御器を設計し、次に制御されたトロリー速度に応じてロープの巻き上げ運動を制御してクレーンペイロードの位置を目標軌道に追従させる。また、文献 [1] の軌道制御では微小の振動が発生してしまうため、これを抑えるロープの巻き上げ制御を行った。

2 ジブクレーンシステムのモデル化

モデリングに用いるパラメータを定義する。

m_p : ペイロードの質量
m_t : トロリーの質量
g : 重力加速度
$r_{j,p}$: ジブモーターのギア半径
$\eta_{g,j}$: ジブモーターのギアボックス効率
$K_{g,j}$: ジブモーターのギア比
$\eta_{m,j}$: ジブモーターの効率
$K_{t,j}$: ジブモータのトルク定数
J_ϕ : ジブモータの等価慣性モーメント
ξ : トロリーの位置
γ : 吊るロープの角度

今研究で使用するジブクレーンシステムのモデル図を図 1 に示す。文献 [2] を参考に次のようにジブクレーンモデルを導出した。
まず、粘性摩擦、クーロン摩擦、最大性摩擦をそれぞれ f_v, f_c, f_s とすると、非線形摩擦 F_n は次のように表される。

$$F_n(\xi,\dot{\xi}) = \begin{cases} f_v\dot{\xi}(t) + sgn(\dot{\xi}(t))f_c(\xi) & (\dot{\xi}(t) \neq 0) \\ sgn(I_j(t))f_s & (\dot{\xi}(t) = 0) \end{cases} \tag{1}$$

クーロン摩擦係数 f_c はトロリー速度 $\dot{\xi}$ に比例しており、粘性摩擦係数 f_v, 最大摩擦係数 f_s はそれぞれ定数である。

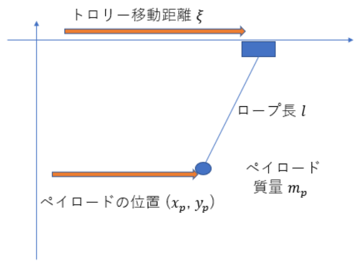

図 1: ジブクレーンのモデル図

また、

$$m_p + m_t + J_\phi \times \frac{K_g, l^2}{r_j, p^2} = m_j \tag{2}$$

$$k_t = \frac{\eta_{g,j}K_{g,j}\eta m, jK_{t,j}}{rj, p} \tag{3}$$

とすると、非線形の数式モデルは次のようになる。

$$E(l)\ddot{q} + F(\dot{l}) + G(\ddot{l})\sin(q) = HI_j - F_n \tag{4}$$

$$E = \begin{bmatrix} m_j & -m_p l\cos(\gamma) \\ -m_p\cos(\gamma) & m_p l^2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 2m_p\dot{l}\cos(\gamma) - m_p l\dot{\gamma}\sin(\gamma) \\ 0 & 2m_p l\dot{l} \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & -m_p\ddot{l} \\ 0 & m_g l \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$H = [k_t 0]^T \tag{8}$$

また、このシステムを状態空間表現で表すと次のようになる。

$$\begin{cases} E_d(\gamma)\dot{x}(t) = F_d(x) + B_d u(t) - F_{nd} \\ y(x) = Cx(t) \end{cases} \tag{9}$$

$$E_d(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_j & -m_p l\cos(\gamma) \\ 0 & 0 & -m_p l\cos(\gamma) & m_p l^2 \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$F_d(x) = \begin{bmatrix} \dot{\xi} \\ \dot{\gamma} \\ m_p \ddot{l} \sin(\gamma) - \dot{\gamma}(2m_p \dot{l} \cos(\gamma) - m_p l \dot{\gamma} \sin(\gamma)) \\ -m_p g l \sin(\gamma) + 2 m_p l \dot{l} \dot{\gamma} \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$B_d = [0 \quad 0 \quad k_t \quad 0]^T \tag{12}$$

$$F_{nd} = [0 \quad 0 \quad F_n \quad 0]^T \tag{13}$$

$$C = [1 \quad -l \quad 0 \quad 0]^T \tag{14}$$

$\dot{\xi} = v_1$, $\dot{l} = v_2$ として次のように時間軸状態制御形を導出する。

$$\frac{d}{d\xi} q = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\dot{\gamma}}{v_1} \\ \frac{\dot{\gamma}}{v_1} & 0 \end{bmatrix} q + \begin{bmatrix} \frac{\dot{\gamma}}{v_1} \\ \frac{1}{v_1} \end{bmatrix} v_2 \tag{15}$$

$$\frac{d\xi}{dt} = v_1 \tag{16}$$

$$q = \begin{pmatrix} l\gamma \\ l \end{pmatrix} \tag{17}$$

(15) 式は状態制御部であり、トロリー位置 ξ に対するペイロードの位置を表し、(16) 式はトロリー速度 v_1 によって時間軸 ξ の変化を表しており、時間軸制御部と呼ばれる。本研究では文献 [3] より時間軸状態制御形を利用した制御方法にのっとって制御を行っている。トロリーの制御は文献 [1] で得られた目標軌道に PD 制御を使って追従制御を行った。

ロープの巻き上げ軌道はペイロードの上げ下げを二回繰り返す正弦波を考える。以下に示す図 2 ではトロリーの位置を示しており赤の点線が目標軌道、青い実線がシミュレーション結果を表している。

また、図 3 では赤い点線が目標軌道、ピンクの点線が従来法、青い実線が提案法になっている。

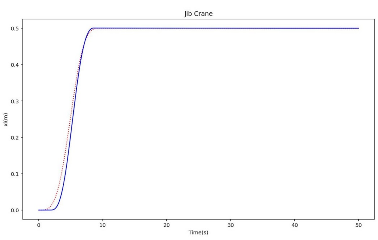

図 2: ジブクレーンのトロリーシミュレーション

3 おわりに

今回の研究では、時間軸状態制御形による振れ止め、また軌道追従性どちらにおいても大きな効果が得られなかったのは、トロリーのレールが直線であることや、トロリーの軌道計画が非常に精度の高いものであるために、もともと非ホロノミックシステムのような複雑なシステムにおいて比較的単純なシステムに変形できるという時間軸状態制御形のメリットが上手くかみ合わなかった結果であると推測する。

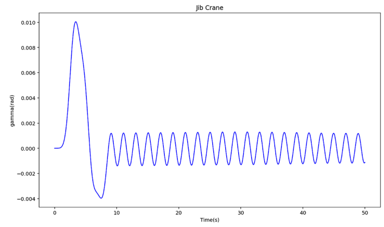

図 3: ジブクレーンロープの触れ角 $K_P l = [0.5, \quad 1.7]^T$

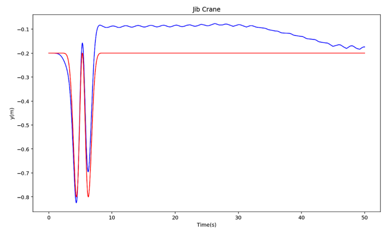

図 4: ロープ巻き上げ軌道 $K_P l = [0.5, \quad 1.7]^T$

参考文献

[1] Z. Liu, T. Yang, N. Sun and Y. Fang, "An Antiswing Trajectory Planning Method With State Constraints for 4-DOF Tower Cranes: Design and Experiments," in IEEE Access, vol. 7, pp. 62142-62151, 2019

[2] T. Kumada, G. Chen and I. Takami, "Adaptive control for jib crane with nonlinear uncertainties," 2016 12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), Kathmandu, 2016, pp. 431-436

[3] M. Sampei, "A control strategy for a class of nonholonomic systems - time-state control form and its application, "Proceedings of 1994 33rd IEEE Conference on Decision and control, Lake Buena Vista, FL, USA, 1994, pp. 1120-1121 vol.2

[4] 山川聡子, 時間軸状態制御形にもとづいた車輪型倒立振子ロボットの軌道追 従制御, 計測自動制御学会論文集, 第 49 巻 10 月 pp.936-943, 2013