

可変切換面に基づく 機械系のTerminalスライディングモード制御

東京都立大学大学院 機械システム工学域
M2 花房 健多 (児島研究室)

1. はじめに

背景

- スライディングモード制御 (SMC) は利点を多数もつ有用な手法だが、**収束性/チャタリング抑制**に課題がある。
- Fixed-time安定化^[1]により追従性の向上が報告されている。
- 制御対象のディスクリプタ表現に基づいた可変切換面を導入することで、**ロバスト安定性条件の緩和**が可能となる^[2]。

研究の目的

機械系の追従制御問題に対して、追従偏差の**fixed-time安定化**し、**ロバスト安定性条件を緩和するTerminalスライディングモード制御**を構築する。

2. 制御系設計

制御対象と制御則

[制御対象: 機械系]

$$M(q)\ddot{q} + f(q, \dot{q}) = \tau + d, \quad \lambda_{\min} I \leq M(q) \leq \lambda_{\max} I$$

慣性 重力/摩擦等 入力 外乱

[切換変数/制御則]

出力 q と目標値 q^r の偏差 $e = q - q^r$ を零にする制御則を導出^[2]

$$s = M(q)\dot{e} + \lambda_1 \text{sig}^\alpha(e) + \lambda_2 \text{sig}^\beta(e),$$

$$\tau = f(q, \dot{q}) + M(q)\ddot{q} - \frac{dM(q)}{dt}\dot{e} - \Lambda_1 D^\alpha(e)\dot{e} - \Lambda_1 D^\alpha(e)\dot{e} - K_{P1} \text{sig}^\gamma(s) - K_{P2} \text{sig}^\delta(s) - K \text{sngn}(s)$$

* 制御則1段目は等価入力, 2段目は切換変数のロバスト安定化入力

[整定時間の上界値]

制御器と慣性行列の固定パラメータのみによって決定

$$T_i < \frac{\lambda_{\max}(M)}{\lambda_{1i}(1-\alpha_i)} + \frac{\lambda_{\max}(M)}{\lambda_{2i}(\beta_i-1)} + \frac{1}{K_{P1i}(1-\gamma_i)} + \frac{1}{K_{P2i}(\delta_i-1)}$$

Settling time of sliding mode Settling time of reaching mode

性能解析

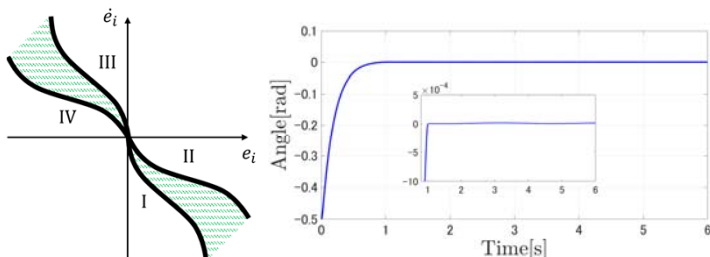
[ロバスト安定性条件]

- デスクリプタ・状態空間表現に基づく切換面をそれぞれ設計し、両手法の切換ゲイン $K, M(q)\bar{K}$ を不等式で比較
- 下式より、状態空間表現に基づく設計は慣性行列のパラメータ変動が過大な系ほど保守的

$$K \leq M(q)\bar{K} \leq \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} K$$

[スライディングモード]

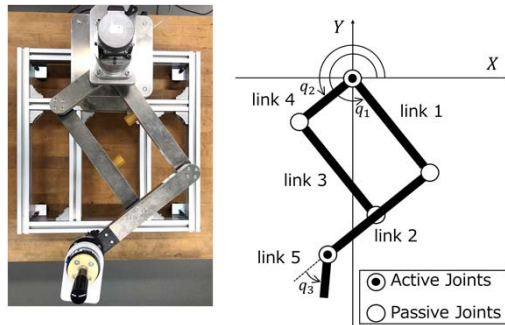
- 慣性行列の変動範囲を考慮すると、可変切換面 $s = 0$ の要素は左下図 (位相平面) の緑領域内で変動
- 切換面に拘束されている限り、状態偏差は縦軸を横切ることがないため、応答はオーバーシュートフリー (右下図)



3. 実機実験

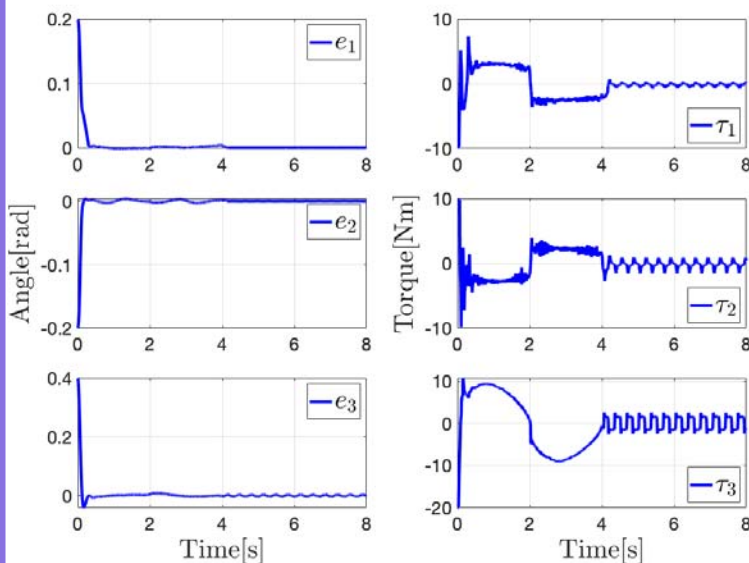
条件

下図の3-DOFマニピュレータに対して軌道追従制御を検討し、提案法の**追従性**と**チャタリング抑制効果**を確認



結果

- 追従偏差: 約**0.3 s**で **10^{-3} rad**のオーダまで, 定常状態では平均して **2.6×10^{-3} rad**まで抑制
- 局所的に振動は観察されるものの、**高周波数帯域の大振幅振動は抑制**



4. まとめと今後の予定

まとめ

機械系の追従制御問題に対して、追従偏差の**fixed-time安定化**し、**ロバスト安定性条件を緩和するTerminalスライディングモード制御**を提案した。

今後の予定

チューニングの労力を削減するため、実験データに基づく制御器パラメータの設計法を開発する予定である。

参考文献

- A. Polyakov: Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear systems, IEEE Transactions on Automatic Control, Institute of Electrical and Electronics Engineers, vol.57, no.11, pp.2106-2110, 2012.
- K. Hanafusa, N. Takesue, and A. Kojima: Fixed-time descriptor terminal sliding mode control with application to 3-DOF robot manipulator, Proceedings of 20th International Conference on Control, Automation and Systems, pp.1248-1249, 2020.