

動的視覚フィードバックシステムの

L_2 ゲイン 制御性能解析

星名寛人 松田浩義 村尾俊幸 東 剛人 藤田政之
(金沢大学)

L_2 -gain Performance Analysis of Dynamic Visual Feedback System

H. Hoshina, H. Matsuda, T. Murao, T. Azuma and M. Fujita
(Kanazawa University)

1 はじめに

近年、ロボットマニピュレータの視覚フィードバック制御に関する研究は、非線形制御理論の枠組みで急速に発展してきた。文献 [1] では、観測対象が静止している場合の安定性解析は行われているが、観測対象が運動する場合の制御性能解析については十分な議論がなされていない。本稿では動的視覚フィードバックシステムに対し、観測対象が運動する場合の制御性能をシステムの L_2 ゲインを用いて解析し [2]、実システムによりその有効性を検証する。また従来法 [1] との比較実験を行い、各々の特徴や問題点を考察する。

2 動的視覚フィードバックシステム

Eye-in-Hand 構造の平面 2 自由度マニピュレータを用いた動的視覚フィードバックシステムを Fig. 1 に示す。マニピュレータへの入力トルクを

$$\tau = u_\xi + w_f J_p^T R_{wc} f + M \dot{u}_d + C u_d + g \quad (1)$$

とすると、動的視覚フィードバックシステムは次のように表される。

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} -M^{-1}C\xi + w_f M^{-1} J_p^T R_{wc} f \\ \frac{s\lambda}{z_{wo}} R_{wc}^T J_p \xi - R_{wc}^T R_{wc} f \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} M^{-1} & 0 \\ 0 & \frac{s\lambda}{z_{wo}} R_{wc}^T J_p \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} M^{-1} & 0 \\ 0 & -\frac{s\lambda}{z_{wo}} R_{wc}^T \end{bmatrix} w \\ y = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} x = Wx \end{cases} \quad (2)$$

$M \in \mathcal{R}^{2 \times 2}$: 慣性行列 $C \in \mathcal{R}^{2 \times 2}$: 遠心力・コリオリ力項
 $g \in \mathcal{R}^2$: 重力項 $\lambda \in \mathcal{R}$: カメラの焦点距離
 $R_{wc} \in \mathcal{R}^{2 \times 2}$: 基準座標系からカメラ座標系への回転行列
 $J_p \in \mathcal{R}^{2 \times 2}$: マニピュレータヤコビアン
 $s \in \mathcal{R}$: カメラの 1 画素あたりの長さの逆数
 $z_{wo} \in \mathcal{R}$: 観測対象の Z_w 軸方向の位置

ただし状態 $x := [\xi^T f^T]^T$, 入力 $u := [u_\xi^T u_d^T]^T$, 外乱 $w := [\tau_d^T \dot{p}_{wo}^T]^T$ である。 $u_\xi \in \mathcal{R}^2$ は後に決定する入力である。状態 x において ξ は関節角速度 $\dot{q} \in \mathcal{R}^2$ とその目標値 $u_d \in \mathcal{R}^2$ の偏差を表しており $\xi := \dot{q} - u_d$ で定義される。また $f \in \mathcal{R}^2$ はカメラの画像面における特徴量を表す。外乱 w において $\tau_d \in \mathcal{R}^2$ は外乱トルクを、 $\dot{p}_{wo} \in \mathcal{R}^2$ は観測対象の速度をそれぞれ表す。また $w_f \in \mathcal{R} > 0$ は設計に自由度を与えるためのパラメータを表す。

制御目的は、マニピュレータの手先(カメラ)を運動する観測対象に追従させること、つまり $t \rightarrow \infty$ において $x \rightarrow 0$ を達成することである。そこで次の制御入力を提案する。

$$u = -Ky = - \begin{bmatrix} K_\xi & 0 \\ 0 & K_d \end{bmatrix} y \quad (3)$$

ここで $K_\xi \in \mathcal{R}^{2 \times 2}$, $K_d \in \mathcal{R}^{2 \times 2}$ は正定なゲイン行列である。観測対象が静止しており、外乱トルクが存在しない ($w = 0$) 場合、リアプノフの安定定理よりシステムは平衡点 $x = 0$ において漸近安定となることが示される。

3 L_2 ゲインによる制御性能の達成条件

観測対象が運動し、外乱トルクが存在する ($w \neq 0$) 場合、平衡点における漸近安定性について議論するのは困難となる。そこで外乱 w から被制御出力 $z := [(ex)^T (\rho u)^T]^T$ への L_2 ゲインを γ 以下に抑えることを考える。ここで $\varepsilon \in \mathcal{R}^{4 \times 4}$, $\rho \in \mathcal{R}^{4 \times 4}$ はそれぞれ状態と出力に関する重みを表す。 w と z を考慮した一般化プラントを Fig. 2 に示す。この外乱抑制問題は、システムの消散性理論を用いることにより次の命題に帰着する。

命題 行列 P が準正定行列となるように設計パラメータ K_ξ , K_d , w_f を決定すれば、 $w-z$ 間において γ 以下の L_2 ゲインを有する。

$$P = W^T K W - \frac{1}{2} \varepsilon^T \varepsilon - \frac{1}{2} W^T K \rho^T \rho K W - \frac{1}{2\gamma^2} \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & w_f^2 I \end{bmatrix} \quad (4)$$

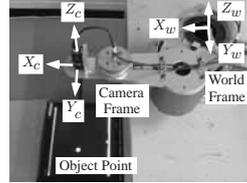


Fig. 1: 動的視覚フィードバックシステム

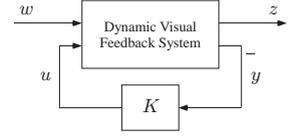


Fig. 2: 一般化プラントシステム

4 実システムによる検証と従来法との比較

SICE-DD アームを用いて構成した動的視覚フィードバックシステムにより、 L_2 ゲイン制御性能解析の有効性について検証する。初期状態 $x(0) = 0$ とし、観測対象を $0 \leq t \leq 13$ の間直線運動させ、それ以降静止させる。設計パラメータとして以下の 2 種類を用いる。

パラメータ A: $K_\xi = \text{diag}\{20, 20\}$, $K_d = \text{diag}\{5, 5\}$,
 $w_f = 0.0025$

パラメータ B: $K_\xi = \text{diag}\{0.1, 0.1\}$, $K_d = \text{diag}\{0.5, 0.5\}$,
 $w_f = 0.02$

この 2 つのパラメータに対して L_2 ゲイン γ を計算すると以下のようになる。

パラメータ A: $\gamma = 25.7$

パラメータ B: $\gamma = 67.7$

被制御出力のノルム $\|z\|$ の時間応答を Fig. 3 に示す。 $\|z\|$ はパラメータ A のときの方が小さいことがわかる。つまり、 L_2 ゲインが小さいときの方が被制御出力において外乱の影響を低減できており、制御性能の指標として L_2 ゲインを用いるのが妥当であることが示された。

また従来法 [1] を用いた場合の実験も同様にを行い、本研究の方法を用いた場合と追従性能について比較する。画像特徴量のノルム $\|f\|$ の時間応答を Fig. 4 に示す。 $\|f\|$ は本研究の方法を用いた場合の方が小さく、手先(カメラ)は観測対象によく追従していることがわかる。従来法では、制御性能の指標が設けられておらず、設計パラメータの決定が困難である。本研究の方法では性能指標が L_2 ゲインにより定められるため、その指標に沿ってパラメータを決定することができ、設計の際に有利であるといえる。

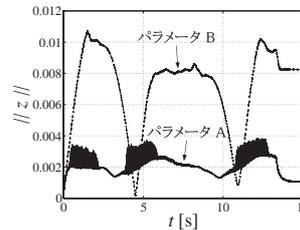


Fig. 3: $\|z\|$ の時間応答

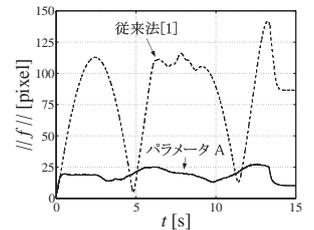


Fig. 4: $\|f\|$ の時間応答

5 おわりに

本稿では、動的視覚フィードバックシステムの L_2 ゲイン制御性能解析について、SICE-DD アームを用いて構成した実システムにより、その有効性を確認した。また、従来法 [1] との比較を行い、各々の特徴や問題点について考察した。

参考文献

- [1] R. Kelly, R. Carelli, O. Nasisi, B. Kuchen, F. Reyes, "Stable Visual Servoing of Camera-in-Hand Robotic Systems," *IEEE Trans. Mechatronics*, vol. 5, no. 1, pp. 39–48, 2000.
- [2] 丸山, 藤田, "ロボト視覚サーボシステムの L_2 ゲインによる制御性能解析," *電気学会論文誌 C*, vol. 118–C, no. 3, pp. 301–309, 1998.