

2 次元視覚フィードバックシステムに対する非線形モデル予測制御

○ 中 曽 裕 次 郎・村 尾 俊 幸・藤 田 政 之
東 京 工 業 大 学

Nonlinear Model Predictive Control for Planar Visual Feedback System

○ Yujiro Nakaso, Toshiyuki Murao and Masayuki Fujita
Tokyo Institute of Technology

This paper deals with a stabilizing receding horizon control for a planar dynamic visual feedback system with an Eye-in-Hand configuration. Firstly, the planar dynamic visual feedback system with the Eye-in-Hand configuration is given. Secondly, a CLF of the dynamic visual feedback system is defined and obtained from a little algebraic manipulation. Next, the stabilizing receding horizon control for the system is proposed. The use of the terminal cost derived from a control Lyapunov function of the dynamic visual feedback system, which is obtained from the inverse optimal control approach, is a key point. Finally, experimental results on the stabilizing receding horizon control are shown.

1 はじめに

化学プラントなどのプロセス制御で既に広く使われているモデル予測制御は、リアルタイムで有限ホライズンの最適制御問題を解くことで得られる制御入力を用いた制御法である。近年では比較的高速なシステムに対するモデル予測制御が特に注目されている¹⁾。このモデル予測制御の大きな問題点としては、リアルタイムで最適制御問題を解かなければならないことから、計算時間が大きくなることが挙げられる。この問題に対して、終端拘束ではなく、終端コストを用いた最適制御問題を扱うことで、計算時間を削減することができる。また、非線形モデル予測制御では、その安定性が特に重要になる。安定性を確保するためのひとつのアイデアが、終端コストとしてシステムの CLF (control Lyapunov function) を用いることであり、その閉ループ系は安定となる²⁾。この CLF を用いる手法は Caltech Ducted Fan や、F-16 戦闘機などのアプリケーションへ応用されている^{3,4,5)}。

一方、比較的高速なシステムのひとつとして、視覚フィードバックシステムがある。視覚フィードバックシステムは、視覚情報をフィードバックループに組み込んだ制御であり、ロボットをリアルタイムで制御することから、化学プラントなどに比べて非常に高速なシステムとして捉えることができる。文献⁶⁾において、筆者らは 2 次元視覚フィードバックシステムに対する受動性に基づく制御を提案している。

本稿では、このような高速なシステムである 2 次元視覚フィードバックシステムに対する安定化モデル予測制御を提案する。また、Fig. 1 に示す SICE-DD アームを用いた 2 次元視覚フィードバックシステムに提案した制御則を適用し、検証実験をおこなう。そして、従来法である受動性に基づく制御則を適用した場合との比較をおこなう。

本稿の構成は以下のとおりである。第 2 章では、本稿で扱う視覚フィードバックシステムについて述べる。第 3 章でモデル

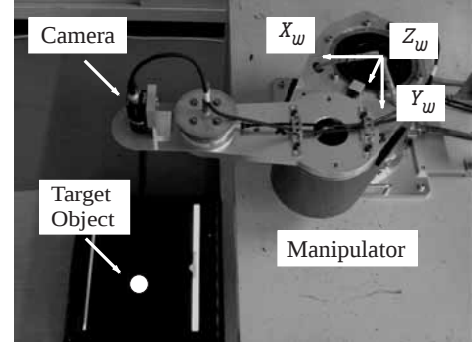


Fig. 1: 視覚フィードバックシステム

予測制御を提案し、第 4 章に検証実験を示す。最後に本稿をまとめる。

2 動的 2 次元視覚フィードバックシステム

2.1 2 次元視覚フィードバックシステム

本稿で用いるマニピュレータダイナミクスは

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (1)$$

で表される。 $q, \dot{q}, \ddot{q} \in \mathcal{R}^n$ はそれぞれ各関節の角度、角速度、角加速度を表し、 τ はトルクである。 $M(q) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ は正定な慣性行列、 $C(q, \dot{q})\dot{q} \in \mathcal{R}^n$ は遠心力・コリオリ力項、 $g(q) \in \mathcal{R}^n$ は重力項を表す。

一方、視覚フィードバックシステムでは、カメラモデルを考慮する必要がある。本システムは Fig. 2 に示すように、カメラがマニピュレータの手先に取り付けられた Eye-in-Hand 構造とする。ここで、マニピュレータの台座を基準座標系 $\Sigma_w = \{X_w \ Y_w \ Z_w\}$ とし、カメラ座標系、画像座標系をそれぞれ $\Sigma_c = \{X_c \ Y_c \ Z_c\}$,

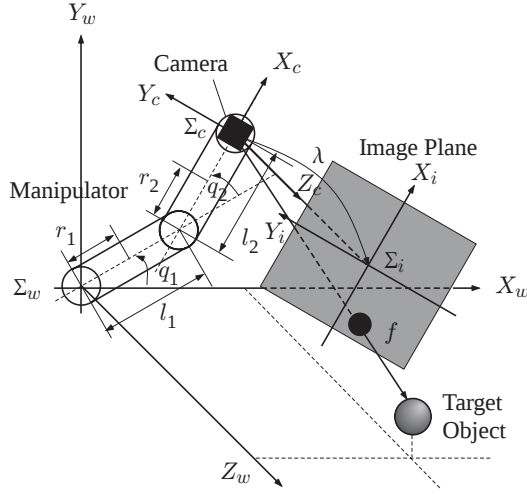


Fig. 2: 2次元視覚フィードバックシステムの概略図

$\Sigma_i = \{X_i \ Y_i\}$ とする。基準座標系からみて、カメラは $p_{wc} = [x_{wc}(q) \ y_{wc}(q)]^T$ の $X_w - Y_w$ 平面上に取り付けられており、観測対象は、 $X_w - Y_w$ 平面上の $p_{wo} = [x_{wo} \ y_{wo}]^T$ から Z_w 方向に z_{wo} だけ離れた点に位置する。本稿では、観測対象は常に静止しており、 $\dot{p}_{wo} = 0$ とする。ここで、透視変換を用いてカメラモデルを導出する。 p_{co} の画像特徴量 $f(q)$ は Σ_i への透視変換により、次のように記述される。

$$f(q) := \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = \frac{s\lambda}{z_{wo}} R_{wc}^T(\theta_{wc}(q)) (p_{wo} - p_{wc}) \quad (2)$$

ただし、 $s > 0$ は単位 pixel/m のスケーリング係数、 λ はカメラの焦点距離、 R_{wc} は回転行列を表している⁷⁾。マニピュレータの角速度 $\dot{q}$ とカメラ速度 $\dot{p}_{wc}(q)$ は、マニピュレータヤコビアン $J_b(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ を用いて次のように表される。

$$\dot{p}_{wc}(q) := J_b(q)\dot{q} \quad (3)$$

したがって、カメラモデルのダイナミクスは以下になる。

$$\dot{f} = -\frac{s\lambda}{z_{wo}} R_{wc}^T J_b \dot{q} - R_{wc}^T \dot{R}_{wc} f \quad (4)$$

本稿で用いる回転行列 R_{wc} およびマニピュレータヤコビアン J_b は以下で与えられる。

$$R_{wc} = \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2) & -\sin(q_1 + q_2) \\ \sin(q_1 + q_2) & \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$J_b = \begin{bmatrix} -l_1 \sin q_1 - l_2 \sin(q_1 + q_2) & -l_2 \sin(q_1 + q_2) \\ l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) & l_2 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2 動的2次元視覚フィードバックシステム

本稿では、ロボットダイナミクス (1) と視覚フィードバックシステム (4) を同時に考慮する動的2次元視覚フィードバックシステムを考える。我々の制御目的は、マニピュレータの手先に取り付けられたカメラが、観測対象のちょうど真上に位置するように制御することである。このとき、画像特徴量 f はゼロとなる。制御目的を達成するために、以下のような制御トルクを提案する。

$$\tau = M(q)\alpha\dot{\eta} + C(q, \dot{q})\alpha\eta + g(q) + u \quad (7)$$

ただし、 $\eta := J_b^T R_{wc} f$ である。 α は正定な行列であり、 u はモデル予測制御によって決定される制御入力であり、詳細は後の章で述べる。この制御トルクを用いることで、動的2次元視覚フィードバックシステムは式 (1), (4), (7) より、次のように表される。

$$\begin{cases} \dot{\xi} = -M^{-1}(q)C(q, \dot{q})\xi + M^{-1}(q)u \\ \dot{f} = -\frac{s\lambda}{z_{wo}} R_{wc}^T J_b \xi - \left(\frac{s\lambda}{z_{wo}} R_{wc}^T J_b \alpha J_b^T R_{wc} + R_{wc}^T \dot{R}_{wc} \right) f \end{cases} \quad (8)$$

ただし、 $\xi = \dot{q} - \alpha\eta$ である。本稿の目的は、この動的2次元視覚フィードバックシステム (8) にモデル予測制御を適用することである。

2.3 受動性に基づく制御

従来研究⁶⁾ では、動的2次元視覚フィードバックシステム (8) に対して、以下のようなエネルギー関数 $V(x)$ によって、漸近安定性が保証されている。

$$V(x) = \frac{1}{2} \xi^T M(q) \xi + \frac{k_p z_{wo}}{2s\lambda} f^T f \quad (9)$$

ただし、 $k_p > 0$ はスカラーである。 $V(x)$ をシステム (8) の解軌道に沿って時間微分すると、

$$\dot{V} = \xi^T u - k_p f^T R_{wc}^T J_b \xi - k_p f^T R_{wc}^T J_b \alpha J_b^T R_{wc} f \quad (10)$$

となる。ここで、制御入力 $u = u_p$ を、以下として考える。

$$u_p = -R\xi \quad (11)$$

ただし、 R は正定な行列である。このとき、式 (10) より、

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\xi^T R \xi - k_p f^T R_{wc}^T J_b \xi - k_p \alpha f^T R_{wc}^T J_b \alpha J_b^T R_{wc} f \\ &= -x^T Q x \end{aligned} \quad (12)$$

となる。ただし、状態 x 、行列 Q はそれぞれ次のように表される。

$$x = \begin{bmatrix} \xi \\ f \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} R & \frac{1}{2} k_p (R_{wc}^T J_b)^T \\ \frac{1}{2} k_p R_{wc}^T J_b & k_p R_{wc}^T J_b \alpha J_b^T R_{wc} \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここで、行列 R を次式で表す。

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{4} k_p (R_{wc}^T J_b)^T (R_{wc}^T J_b \alpha J_b^T R_{wc})^{-1} R_{wc}^T J_b + K \\ &= \frac{1}{4} k_p \alpha^{-1} + K > 0 \end{aligned} \quad (14)$$

ただし、 K は正定な行列である。このとき、行列 Q は正定となり、式 (12) より、 $\dot{V} < 0$ が満たされる。したがって、システムは漸近安定となることがわかる。

3 動的2次元視覚フィードバックシステムに対する安定化モデル予測制御

この章では、動的2次元視覚フィードバックシステムに対する安定化モデル予測制御を提案する。まず、前章で述べたエネルギー関数を利用することで、終端コストとして用いる CLF を導出する。そして、その CLF に対する正定な関数とともに評価関数を構成することで、モデル予測制御を用いた閉ループ系が安定となることを示す。

3.1 モデル予測制御の問題設定

今、サンプリング周期を δ [s] とする。システム (8) に対し、ある時刻 t において、次式で与えられる評価関数を最小とする入力 u を求める最適制御問題を考える。

$$J(u, t) = \int_t^{t+T} l(x(\tau), u(\tau)) d\tau + M(x(t+T)) \quad (15)$$

ここで求められた入力 u が、 δ [s] 間だけ系に加えられる。次のサンプリング周期には、次の時刻を t とした最適制御問題を解いて得られる入力を適用する。これを繰り返すことで得られる閉ループ系の入力 u がモデル予測制御の制御入力となる⁸⁾。次節では、この最適制御問題を与える評価関数の終端コストとして、動的 2 次元視覚フィードバックシステムの CLF を用いることを考える。また、このとき得られる閉ループ系が安定となることを示す。

3.2 動的 2 次元視覚フィードバックシステムに対する安定化モデル予測制御

ここで、CLF を以下のように定義する。

定義 1⁸⁾ 正定関数 $V(x)$ が以下の式を満たすとき、 $V(x)$ は CLF である。

$$\inf_u [\dot{V} + l(x, u)] \leq 0 \quad (16)$$

ただし $l(x, u)$ はある正定関数である。

この条件 (16) を満たす正定関数 $l(x, u)$ とそれに対する CLF $V(x)$ によって評価関数を構成することを考える。

ここで、準備として、式 (12) から以下の数式展開を試みる。

$$\begin{aligned} -4x^T Qx &= -(u + 2R\xi)^T R^{-1} (u + 2R\xi) + u^T R^{-1} u \\ &\quad + 4\xi^T u + 4\xi^T R\xi - 4\xi^T R\xi - 4k_p f^T R_{wc}^T J_b \xi \\ &\quad - 4k_p f^T R_{wc}^T J_b \alpha J_b^T R_{wc} f \\ &= -\|u + 2R\xi\|_{R^{-1}}^2 + u^T R^{-1} u + 4\dot{V} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\therefore 4\dot{V} + 4x^T Qx + u^T R^{-1} u = \|u + 2R\xi\|_{R^{-1}}^2 \quad (18)$$

したがって、以下の不等式が成り立つ。

$$\inf_u [4\dot{V} + l(x, u)] \leq 0 \quad (19)$$

$$l(x, u) := 4x^T Qx + u^T R^{-1} u \quad (20)$$

式 (16) より、上記の $l(x, u)$ を用いると、 $4V(x)$ が動的 2 次元視覚フィードバックシステム (8) の CLF であることがわかる。上記の CLF $4V(x)$ 、正定関数 $l(x, u)$ を用いて、以下の定理が成り立つ。

定理 1 動的 2 次元視覚フィードバックシステム (8) に対し、評価関数を次式とする最適制御問題を考える。

$$J(u, t) = \int_t^{t+T} l(x(\tau), u(\tau)) d\tau + 4V(x(t+T)) \quad (21)$$

$$l(x, u) := 4x^T Qx + u^T R^{-1} u \quad (22)$$

$$V(x) = \frac{1}{2} \xi^T M(q) \xi + \frac{k_p z_{wo}}{2s\lambda} f^T f \quad (23)$$

この評価関数を用いたモデル予測制御は、動的 2 次元視覚フィードバックシステムの安定化制御則となる。

証明 1 式 (18), (22) より、評価関数 (21) は次のようになる。

$$\begin{aligned} J(u, t) &= \int_t^{t+T} l(x(\tau), u(\tau)) d\tau + 4V(x(t+T)) \\ &= \int_t^{t+T} (\|u + 2R\xi\|_{R^{-1}}^2 - 4\dot{V}) d\tau + 4V(x(t+T)) \\ &= \int_t^{t+T} \|u + 2R\xi\|_{R^{-1}}^2 d\tau + 4V(x(t)) \end{aligned} \quad (24)$$

したがって、 $u = -2R\xi$ とすると、評価関数の最小値

$$J^*(t) = 4V(x(t)) \quad (25)$$

が得られる。今、 $J^*(t)$ をリアプノフ関数候補として、動的 2 次元視覚フィードバックシステム (8) の解軌道に沿って時間微分をおこなうと、

$$\dot{J}^* = 4\dot{V} = -4x^T Q' x \quad (26)$$

$$Q' := \begin{bmatrix} 2R & \frac{1}{2} k_p (R_{wc}^T J_b)^T \\ \frac{1}{2} k_p R_{wc}^T J_b & k_p R_{wc}^T J_b \alpha J_b^T R_{wc} \end{bmatrix} \quad (27)$$

となる。ところで、

$$R = \frac{1}{4} k_p \alpha^{-1} + K \quad (28)$$

であり、 $\alpha > 0$ であることから、 $Q' > 0$ が成り立つ。したがって、 $\dot{J}^* < 0$ となり、閉ループ系が漸近安定であることが示された。

定理 1 は、動的 2 次元視覚フィードバックシステムの CLF を終端コストとして用いることで、そのモデル予測制御が閉ループ系を安定とすることを示した。また、モデル予測制御は最適制御の一種であるため、評価関数の状態 x に対する重み行列と入力 u に対する重み行列を調整することで、従来研究⁶⁾の受動性に基づく制御より性能が向上することが見込まれる。

本章では、3 章で述べてきたモデル予測制御を用いた実験をおこなう。受動性に基づく制御と比較することで、その有効性を検証する。

4 実験結果

この章では、Fig. 1 に示す視覚フィードバックシステムに対し、受動性に基づく制御を適用した場合と、前章で提案したモデル予測制御を適用した場合の実験をおこない、比較をおこなう。本実験では SICE-DD アームの手先にカメラを取り付けており、1 軸が 0.2 [m]、2 軸が 0.3 [m] である。カメラは SONY 社 XC-HR57 のカメラを使用する。また、画像入力ボードは、PCI バスモノクロ画像入力ボードの PicPort-Stereo-H4D を使用し、特徴量は画像処理ソフト HALCON を利用して得られる。制御則を実装するデジタル制御装置は dSPACE 社の DS1005 (PowerPC 750 processor, 480 MHz) を用いており、サンプリング周期は 20 [ms] である。また、制御則は MATLAB と SIMULINK により設計し、dSPACE 社のソフトウェアである ControlDesk により DSP に実装する。また、オンラインで最適制御問題を解くために、C/GMRES⁹⁾ というソフトウェアを用いる。マニピュレータの初期状態はそれぞれ、 $q_1(0) = \pi/6$ rad, $q_2(0) = -\pi/6$

rad, $\dot{q}_1(0) = \dot{q}_2(0) = 0$ rad/s である。観測対象は、カメラの初期位置から見て $f(0) = [-120 \ -160]^T$ の位置に設定する。我々の制御目的はカメラを観測対象の真上に位置させることであり、このとき、画像特徴量 f はゼロになる。設計パラメータは受動性に基づく制御、モデル予測制御のどちらの場合も同じ値を用い、以下のように設定した。

$$\frac{s\lambda}{z_{wo}} = \frac{1230}{0.9} = 1367, \quad k_p = 0.13 \quad (29)$$

$$\alpha = \begin{bmatrix} 0.05 & 0 \\ 0 & 0.15 \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix} \quad (30)$$

モデル予測制御ではホライズンの長さ $T = 0.1$ [s] としている。また本実験では、外乱として $t = 3$ s で観測対象の位置をカメラの初期位置から見て $f = [-50 \ -64]^T$ の位置にずらしている。

それぞれの実験で得られた f ならびに ξ の時間応答を Fig. 3 – 6 に示す。それぞれ図中の実線はモデル予測制御を適用した場合、鎖線は受動性に基づく制御を適用した場合の結果を表している。実験結果より、モデル予測制御を適用した場合でも、システムが安定となっていることがわかる。また、受動性に基づく制御を適用した場合と比較すると、より平衡点近傍に収束していることがわかる。

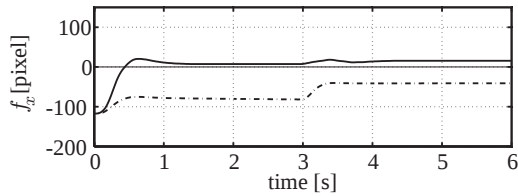


Fig. 3: f_x の時間応答

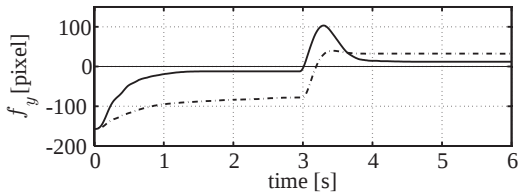


Fig. 4: f_y の時間応答

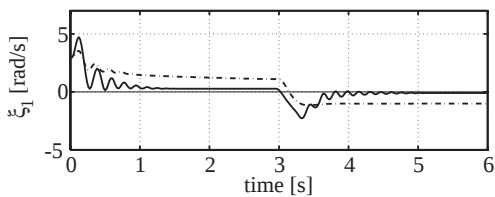


Fig. 5: ξ_1 の時間応答

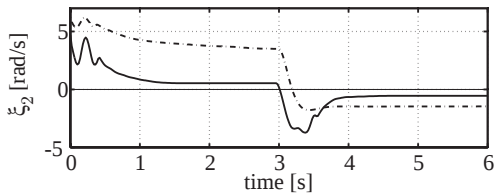


Fig. 6: ξ_2 の時間応答

本稿の目的は、動的 2 次元視覚フィードバックシステムに安定化モデル予測制御を適用することであった。従来研究で得られていた動的 2 次元視覚フィードバックシステムのエネルギー関数から CLF を生成した。この CLF を終端コストとして用いることで、モデル予測制御が安定化制御則となることを示した。さらに、本稿で提案した安定化モデル予測制御を、従来の受動性に基づく制御と実験による比較をおこなった。実験結果から、モデル予測制御が閉ループ系を安定化していることを確認した。

参考文献

- 1) D. Q. Mayne, J. B. Rawlings, C. V. Rao and P. O. M. Scokaert, “Constrained Model Predictive Control: Stability and Optimality,” *Automatica*, vol. 36, no. 7, pp. 789–814, 2000.
- 2) A. Jadbabaie and J. Hauser, “On the Stability of Unconstrained Receding Horizon Control with a General Terminal Cost,” *Proc. 39th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 4826–4831, 2001.
- 3) J. Yu, A. Jadbabaie, J. Primbs and Y. Huang, “Comparison of Nonlinear Control Design Techniques on a Model of the Caltech Ducted Fan,” *Automatica*, vol. 37, no. 12, pp. 1971–1978, 2001.
- 4) A. Jadbabaie and J. Hauser, “Control of a Thrust-vectoring Flying Wing: a Receding Horizon – LPV Approach,” *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 12, pp. 869–896, 2002.
- 5) R. Bhattacharya, G. J. Balas, M. A. Kaya and A. Packard, “Nonlinear Receding Horizon Control of an F-16 Aircraft,” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 25, no. 5, pp. 924–931, 2002.
- 6) 丸山, 藤田, “ロバスト視覚フィードバックシステムの L_2 ゲインによる制御性能解析,” *電気学会論文集 C*, vol. 118, no. 3, pp. 301–309, 1998.
- 7) M. Fujita, A. Maruyama, M. Watanabe and H. Kawai, “Inverse Optimal H_∞ Disturbance Attenuation for Planar Manipulators with the Eye-in-Hand System,” *Proc. 39th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 3945–3950, 2000.
- 8) A. Jadbabaie, J. Yu and J. Hauser, “Stabilizing Receding Horizon Control of Nonlinear Systems: A Control Lyapunov Function Approach,” *Proc. 1999 American Control Conference*, pp. 1535–1539, 1999.
- 9) T. Ohtsuka, “A Continuation/GMRES Method for Fast Computation of Nonlinear Receding Horizon Control,” *Automatica*, vol. 40, no. 4, pp. 563–574, 2004.