

Eye-in-Hand システムに対する 安定化予測ビジュアルフィードバック制御

村 尾 俊 幸*・河 合 宏 之**・藤 田 政 之***

Stabilizing Predictive Visual Feedback Control for Eye-in-Hand Systems

Toshiyuki Murao*, Hiroyuki Kawai** and Masayuki Fujita***

Abstract

This paper investigates a vision based robot control based on a receding horizon control strategy for eye-in-hand systems, as a stabilizing predictive visual feedback control. Firstly, the brief summary of the three dimensional(3D) visual feedback system with an eye-in-hand configuration is given. Next, a stabilizing receding horizon control for the 3D visual feedback system, a highly nonlinear and relatively fast system, is proposed. The stability of the receding horizon control scheme is guaranteed by using the terminal cost derived from an energy function of the visual feedback system.

Keywords: Visual feedback control, Receding horizon control, Passivity, Stability, Control Lyapunov function

1. はじめに

近年、視覚フィードバック制御の研究はますます盛んに行われており、工場だけでなくより複雑なシステムや幅広い分野へも適用されるようになってきている[1][2]. 中でも医療分野における腹腔鏡の制御[3]や超音波探触子の制御[4]など、視覚フィードバック制御は少子高齢化社会を迎える日本において必要不可欠な制御技術になりつつある.

著者らは従来研究[5][6]において、腹腔鏡を把持する手術支援ロボットなどに代表される Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバックシステムを幾何学的に表現し、システムの有する受動性に基づくことで、ロボットマニピュレータのダイナミクスを考慮した位置ベース法の3次元視覚フィードバック制御則を提案している. しかし、提案した手法はシステムを安定化させる制御則とはなっていないもの、最適性を考慮した制御則とはなっていない.

一方、オンラインで有限時間区間の最適制御問題を繰り返し解く、モデル予測制御の研究も盛んに行われている[7]. 近年では、ロボットのような非線形でかつ比較的早いダイナミクスを持つシステムに対する応用事例も出始めており、Milam らはその制御則を Caltech Ducted Fan に適用することで拘束条件を満たしながら最適なト

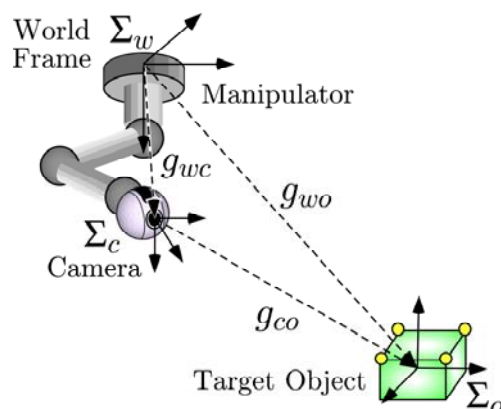


図1 Eye-in-Hand Visual Feedback System

ラジェクトリーと変わらない動きを実現させている[8]. また河合ら[9]はロボットマニピュレータに対して安定化モデル予測制御を適用し、実験的に性能を検証している.

視覚フィードバックシステムにおいて、観測対象の位置を予測し、その予測情報を用いて制御をすることで得られる有益性については古くから述べられてきた[10]. 視覚フィードバック制御とモデル予測制御を結合させた研究として、Sauvée らの角度やトルク、カメラ視野に対する拘束を考慮した手法[11]や Allibert らの反射屈折

Received on October 18, 2008

*産業技術研究科, School of Industrial Technology, AIIT

**金沢工業大学, 工学部, College of Engineering, Kanazawa Institute of Technology

***東京工業大学, 理工学研究科, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

カメラを用いた手法[12]などが挙げられる。しかし、これらの手法は安定性に対しては何も述べられていない。また、著者らは文献[13]で視覚フィードバックシステムに対して安定化モデル予測制御を適用しているが、平面マニピュレータに限定されていた。

そこで、本研究では安定化予測ビジュアルフィードバック制御として、比較的高速で非線形性の強い Eye-in-Hand 構造の3次元視覚フィードバックシステム[6]に対して、安定化モデル予測制御則を提案する。特に、本研究で提案する制御則は、視覚フィードバックシステムのエネルギー関数を評価関数の終端コストに用いることで、安定性を満たしたものとなる。本論文は、文献[9]に対しては視覚情報との融合がされている点と、また文献[13]に対しては平面マニピュレータに限定せず位置だけでなく姿勢も考慮できる視覚フィードバックシステムに適用可能である点から、両研究を発展させた研究となっている。

本論文の構成は以下のとおりである。2節では、従来研究[6]で提案している Eye-in-Hand 構造の3次元視覚フィードバックシステムと、受動性に基づく安定化制御則について述べる。3節では、制御リアプノフ関数を用いることで前節で構成した Eye-in-Hand 構造の3次元視覚フィードバックシステムに対して安定化モデル予測制御則を提案する。最後に4節でまとめを行う。

2. Eye-in-Hand構造の3次元視覚フィードバックシステム

2.1 視覚フィードバックシステムにおける剛体運動の表現

本論文では、図1に示すような、三つの座標系によって表される Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバックシステムについて考える。図中の座標系をマニピュレータの台座に基準座標系 Σ_w 、カメラにカメラ座標系 Σ_c 、観測対象に観測対象座標系 Σ_o として定義する。本システムの制御目的は運動する観測対象にカメラを追従させることである。言い換えると、カメラ座標系 Σ_c からみた観測対象座標系 Σ_o の相対位置姿勢 g_{co} を目標相対位置姿勢 g_d (本稿では一定値であるとする) に常に一致させておくこととなる。ここで、 g_{ab} は同次表現と呼ばれ、任意

の二つの座標系 Σ_a から Σ_b の位置 p_{ab} と姿勢を表す回転行列 $e^{\hat{\xi}\theta_{ab}}$ から構成され、 4×4 行列として以下のように定義される。

$$g_{ab} = \begin{bmatrix} e^{\hat{\xi}\theta_{ab}} & p_{ab} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、演算子 $^{\wedge}(\text{wedge})$ は3次元ベクトルを 3×3 の歪対称行列へ写像する演算子であり、その逆写像は $^{\vee}(\text{vee})$ で定義される[14]。

この相対位置姿勢 g_{co} と目標値 g_d の偏差を、制御偏差 g_{ec} としてつぎのように定義する。

$$g_{ec} := g_d^{-1} g_{co} \quad (2)$$

さらに、この制御偏差に対する制御偏差ベクトルを $e_c := [p_{ec}^T \ e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}})]^T$ と定義する。ただし $e_R(e^{\hat{\xi}\theta}) := sk(e^{\hat{\xi}\theta})^{\vee}$ 、 $sk(e^{\hat{\xi}\theta}) := \frac{1}{2}(e^{\hat{\xi}\theta} - e^{-\hat{\xi}\theta})$ である。

制御目的を達成するために g_{co} の運動について考える。

g_{co} は図1における同次表現の合成則から

$$g_{co} = g_{wc}^{-1} g_{wo} \quad (3)$$

で表される。また、カメラ座標系からみた観測対象の相対速度は、 g_{co} を時間微分することで、

$$V_{co}^b = -Ad_{(g_{co}^{-1})} V_{wc}^b + V_{wo}^b \quad (4)$$

のように導かれる[5]。ここで、 $V_{ab}^b = (g_{ab}^{-1} \dot{g}_{ab})^{\vee}$ は剛体運動のボディ速度を表しており、 $Ad_{(g_{ab})}$ は同次表現 g_{ab} の随伴写像である[14]。

2.2 非線形オブザーバと推定偏差システム

本節は推定偏差システムについて述べる。上述の相対位置姿勢 g_{co} は観測対象の位置姿勢 g_{wo} が測定不可能であるために未知情報となる。そこで、相対位置姿勢 g_{co} を含んでいる視覚情報 f を利用し、非線形オブザーバを構

成することで、相対位置姿勢の推定値 $\bar{g}_{co}$ を得ることを考える。

(4)式に基づき、推定値 $\bar{g}_{co}$ の運動モデルをつぎのように構成する。

$$\bar{V}_{co}^b = -Ad_{(\bar{g}_{co}^{-1})} V_{wc}^b + u_e \quad (5)$$

u_e は推定偏差の振舞いを安定にするために加えられる入力であり、後に制御則の一部として提案する。

ここで、相対位置姿勢の真値 g_{co} と推定値 $\bar{g}_{co}$ の偏差を、推定偏差 g_{ee} として

$$g_{ee} := \bar{g}_{co}^{-1} g_{co} \quad (6)$$

と定義する。さらに、推定偏差ベクトルを $e_e := [p_{ee}^T \quad e_R^T(e^{\hat{\theta}_{ee}})]^T$ と定義する。姿勢推定偏差の回転量 θ_{ee} を十分に小さいとし、さらにカメラの画像特徴量をその推定値の周りで1次テーラー展開することで、この推定偏差ベクトル e_e は、カメラから得られる視覚情報 f と推定モデルにより得られる視覚情報 $\bar{f}$ 、さらには画像ヤコビアン $J^\dagger(\bar{g}_{co})$ を用いることでつぎのように導かれる[5]。

$$e_e = J^\dagger(\bar{g}_{co})(f - \bar{f}) \quad (7)$$

この推定偏差ベクトル e_e が0になれば、相対位置姿勢の真値と推定値が一致することとなる。

g_{ee} を時間微分し、(4)、(5)式を用いることで、推定偏差システムは以下のように導出される。

$$V_{ee}^b = -Ad_{(g_{ee}^{-1})} u_e + V_{wo}^b \quad (8)$$

2. 3 制御偏差システム

つぎに実際に制御目的を達成するための制御偏差システムについて議論する。(2)式を再考すると、推定偏差 g_{ee} を用いることで $g_{co} = \bar{g}_{co} g_{ee}$ と擬似的に計算できる

ため、 g_{ec} は以下のように表すことができる。

$$g_{ec} = g_d^{-1} g_{co} = g_d^{-1} \bar{g}_{co} g_{ee} \quad (9)$$

(9)式において、目標値 g_d と推定値 $\bar{g}_{co}$ は既知情報である

ため、推定偏差 g_{ee} が得られれば相対位置姿勢 g_{co} を得な

くとも制御偏差 g_{ec} は求まることがわかる。文献[6]より、

推定偏差 g_{ee} は $-\frac{\pi}{2} \leq \theta_{ee} \leq \frac{\pi}{2}$ の範囲内で推定偏差ベク

トル e_e から求められることがわかっているため、(9)式よ

り制御偏差 g_{ec} を導出することが可能となる。

(2)式で定義した制御偏差 g_{ec} を時間微分することで、

制御偏差システムは以下のように導出される。

$$V_{ec}^b = -Ad_{(g_{ec}^{-1})} (Ad_{(g_d^{-1})} V_{wc}^b) + V_{wo}^b \quad (10)$$

2. 4 Eye-in-Hand構造の3次元視覚フィードバックシステム

本論文では、さらにつぎのマニピュレータダイナミクスを考慮する。

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau + \tau_d \quad (11)$$

q , $\dot{q}$, $\ddot{q}$ はそれぞれの各関節の角度、角速度、角加速度を表し、 τ は入力トルク、 τ_d はトルク外乱、 $M(q)$ は

正定な慣性行列、 $C(q, \dot{q})\dot{q}$ は遠心力・コリオリ力項、 $g(q)$ は重力項を表す。また、カメラの速度はボディマニピュレータヤコビアン $J_b(q)$ を用いることで

$V_{wc}^b = J_b(q)\dot{q}$ として表される[14]。一方、カメラの速度

の目標値を u_d とし、マニピュレータの関節角速度の目標

値を $\dot{q}_d$ で表すと、 $u_d = J_b(q)\dot{q}_d$ と表すことができる。こ

こで、関節角速度に関する偏差を $\xi := \dot{q} - \dot{q}_d$ と定義す

る。この関節角速度偏差 ξ が0になるとカメラの速度がその目標値に一致することとなる。

このとき、マニピュレータへの入力トルクとして

$$\tau = M(q)\ddot{q}_d + C(q, \dot{q})\dot{q}_d + g(q) + J_b^T(q)Ad_{(g_d^{-1})}^T e_c + u_\xi \quad (12)$$

を考える. $\ddot{q}_d$ は関節角加速度の目標値である. u_ξ は関節角速度偏差をなくすための新たな入力であり, 後に提案する. このとき, (8), (10)~(12)式を用いることで Eye-in-Hand 構造の3次元視覚フィードバックシステムは

$$\begin{bmatrix} \xi \\ V_{ec}^b \\ V_{ee}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M^{-1}C\xi + M^{-1}J_b^T Ad_{(g_d^{-1})}^T e_c \\ -Ad_{(g_{ec}^{-1})} J_b \xi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$+ \begin{bmatrix} M^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & -Ad_{(g_{ec}^{-1})} & 0 \\ 0 & 0 & -Ad_{(g_{ee}^{-1})} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} M^{-1} & 0 \\ 0 & I \\ 0 & I \end{bmatrix} w$$

で表される. ただし, 入力, 外乱, 状態をそれぞれ $u := [u_\xi^T (Ad_{(g_d^{-1})} u_d)^T u_e^T]^T$, $w := [\tau_d^T V_{wo}^T]^T$, $x := [\xi^T e_c^T e_e^T]^T$ と定義している. Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバックシステムにおいて, 状態 x を0にとどめておくことで制御目的が達成される.

2. 5 エネルギー関数と安定化制御則

文献[6]ではさらに, 視覚フィードバックシステム(13)のもつ受動性という概念を用いることで安定化制御則を導出している. 受動性の証明をおこなうために, 次式のエネルギー関数を提案する.

$$V(x) = \frac{1}{2} \xi^T M(q) \xi + E(g_{ec}) + E(g_{ee}) \quad (14)$$

ここで $E(g_{ab}) := \frac{1}{2} \|p_{ab}\|^2 + \phi(e^{\hat{\theta}_{ab}})$ であり, 関数 $\phi(e^{\hat{\theta}_{ab}})$ は回転行列に対する誤差関数を表す正定関数である[15]. 受動性に基づき, 制御則をつぎのように提案する.

$$u = -Kv := u_k, \quad K := \text{diag}\{K_\xi, K_c, K_e\} \quad (15)$$

$$v := Nx, \quad N := \text{diag}\{I, -I, -I\} \quad (16)$$

ここで, $K_\xi := \text{diag}\{k_{\xi_1}, \dots, k_{\xi_n}\}$ はマニピュレータの各関節に対するゲインであり, $K_c := \text{diag}\{k_{c1}, \dots, k_{c6}\}$,

$K_e := \text{diag}\{k_{e1}, \dots, k_{e6}\}$ は x 軸, y 軸, z 軸の並進と回転における制御偏差と推定偏差に対するゲインである. ただし, ゲインにおける各要素はすべて正とする.

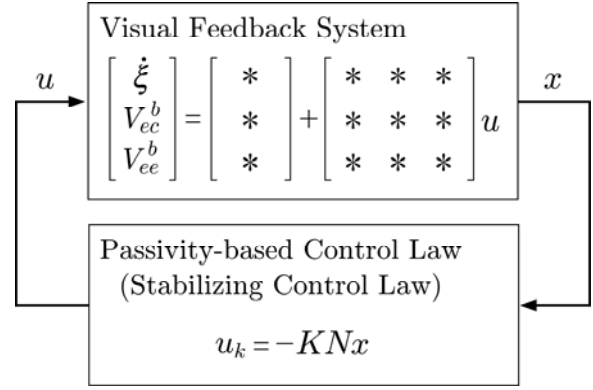


図2 Block Diagram of the Passivity based Visual Feedback Control

エネルギー関数を解軌道に沿って時間微分し, 提案した(15)式の制御則 u_k を代入すると, 外乱がない($w=0$)ときには, つぎのように計算できる.

$$\dot{V} = v^T u = -x^T N^T K N x \quad (17)$$

したがって, エネルギー関数(14)をリアプノフ関数とみなすことで, 外乱がない($w=0$)とき, 視覚フィードバックシステム(13)と(15)式の入力 u_k が構成される閉ループ

系の平衡点 $x=0$ は漸近安定となり, 制御則 u_k は安定化制御則とみなすことができる. 受動性に基づく視覚フィードバック制御のブロック線図を図2に示す.

しかし, 提案されている安定化制御則 u_k は陽に最適性を考慮した制御則ではない. したがって, 次節では最適理論に基づいた安定化モデル予測制御則を提案する.

3. Eye-in-Handシステムに対する安定化予測ビジュアルフィードバック制御

本節は, 視覚フィードバック制御とモデル予測制御を結びつけることで, 最適理論に基づいた安定化予測ビジュアルフィードバック制御について述べる. 視覚情報は現在の瞬間的な情報以外にも多くの情報を含んでいる. この特性を利用することで観測対象の動きを予測できるなら, より有益な制御手法になると考えられる. 本論文では安定化予測ビジュアルフィードバック制御として, 前節で提案した視覚フィードバックシステムに対し, 最適制御理論から発展したモデル予測制御則を提案する.

3. 1 制御リアプノフ関数

本節では, はじめに視覚フィードバックシステム(13)に対するモデル予測制御の問題設定について述べる. 視

覚フィードバックシステム(13)に対し, ある時刻 t のとき, 状態 $x(t) = x_0$, 入力 $u(\tau, x(\tau)), \tau \in [t, t+T]$ に関してつぎの評価関数を最小化する有限時間区間の最適制御問題を考える.

$$J(x_0, u, T) = \int_t^{t+T} l(x(\tau), u(\tau)) d\tau + F(x(t+T)) \quad (18)$$

$$l(x(\tau), u(\tau)) = q_\xi(t) \|\xi(t)\|^2 + E_{q_e}(g_{ec}(t)) + E_{q_e}(g_{ee}(t)) + u^T(t) R(t) u(t) \quad (19)$$

$$F(x(t)) = \rho V(x) \quad (20)$$

$$q_\xi(t) \geq 0, q_{p_i}(t) \geq 0, q_{R_i}(t) \geq 0, R(t) > 0, \rho > 0$$

ただし, $R(t)$ は対角行列とし, $E_{q_i}(g_{ei}(t)) :=$

$$q_{p_i}(t) \|p_{ei}(t)\|^2 + q_{R_i}(t) \phi(e^{\hat{\theta}_{ei}(t)}), i = c, e \text{ である. 初期状態}$$

x_0 に対して, この評価関数を計算することにより求めら

れる最適な入力を $u^*(\tau, x(\tau)), \tau \in [t, t+T]$ と表す. モデ

ル予測制御では, 初めのサンプリング周期である δ [s]

だけシステムに $u^*(\tau, x(\tau))$ を加える. そして δ [s] 後に

は, その時刻を改めて t とし直し, 再び最適制御問題を解く. すなわち, モデル予測制御は

$$u_{RH} := u^*(\delta, x_0) \quad (21)$$

という入力を, 時刻を進めながら繰り返し加えていくことになる[16]. 図3にモデル予測制御の説明図を示す.

本論文では, 視覚フィードバックシステム(13)との閉ループ系を安定化させるモデル予測制御則を提案する. そこで, 安定性に深く関係する制御リアプノフ関数の定義を示す.

定義 1 $l(x, u)$ を正定な関数とし, 微分可能な正定関数 $S(x)$ が以下の条件式を満たすとき, $S(x)$ は制御リアプノフ関数である[16].

$$\inf_u [\dot{S}(x) + l(x, u)] \leq 0 \quad (22)$$

制御リアプノフ関数について, 係数 $q_\xi, q_{p_c}, q_{R_c}, q_{p_e},$

$$q_{R_e} \text{ と重み行列 } Q := \text{diag}\{q_\xi I_n, q_{p_c} I_3, q_{R_c} I_3, q_{p_e} I_3, q_{R_e} I_3\}$$

を用いることで, つぎの補題が示される.

補題 1 外乱がなく ($w=0$), $\|\theta_{ec}\| \leq \frac{\pi}{2}$, $\|\theta_{ee}\| \leq \frac{\pi}{2}$ であ

り, さらに設計パラメータ ρ に関して以下の不等式を満

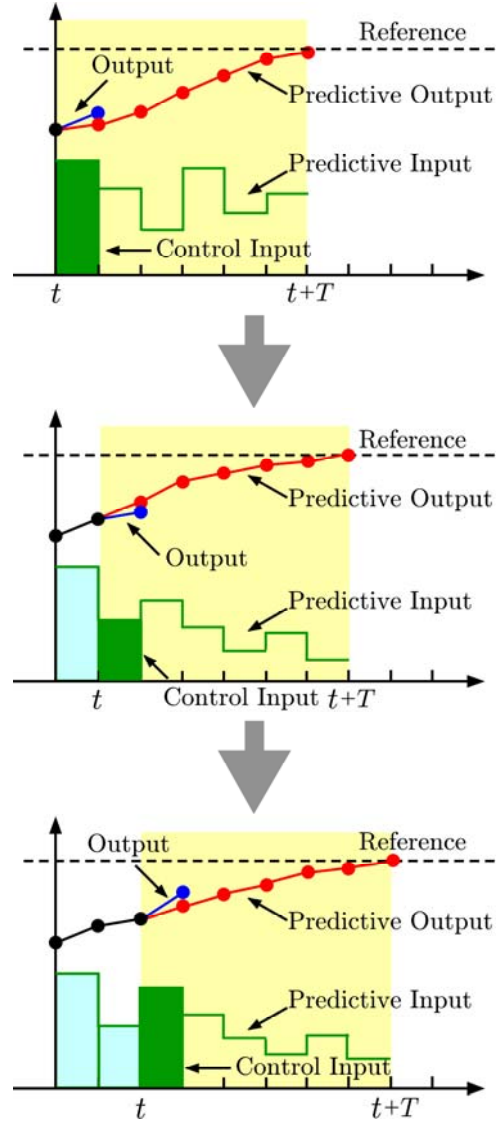


図3 Receding Horizon Scheme

たすように設計する.

$$\rho^2 I \geq 4QR \quad (23)$$

このとき, Eye-in-Hand 構造の3次元視覚フィードバックシステム(13)のエネルギー関数 $\rho V(x)$ は制御リアプノフ関数となる.

(証明) エネルギー関数をシステムの解軌道に沿って時間微分した(17)式と, (19)式の正定な関数 $l(x(t), u(t))$,

さらに $K = \frac{\rho}{2} R^{-1}$ とした(15)式の安定化制御則 u_k を用い

ることにより, (22)式の左辺はつぎのように変形される.

$$\begin{aligned} & \inf_u [\dot{S}(x) + l(x, u)] \\ &= \inf_u \left[\rho \dot{V} + q_\xi \|\xi\|^2 + E_{q_c}(g_{ec}) + E_{q_e}(g_{ee}) + u^T R u \right] \\ &= \inf_u \left[\rho x^T N u + q_\xi \|\xi\|^2 + E_{q_c}(g_{ec}) + E_{q_e}(g_{ee}) + u^T R u \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \inf_u \left[\left(u + \frac{\rho}{2} R^{-1} N x \right)^T R \left(u + \frac{\rho}{2} R^{-1} N x \right) \right. \\
&\quad \left. - \frac{\rho^2}{4} x^T N^T R^{-1} N x + q_{\xi} \|\xi\|^2 + E_{qc}(g_{ec}) + E_{qe}(g_{ee}) \right] \\
&= -\frac{\rho^2}{4} x^T R^{-1} x + q_{\xi} \|\xi\|^2 + q_{pc} \|p_{ec}\|^2 + q_{Rc} \phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}}) \\
&\quad + q_{pe} \|p_{ee}\|^2 + q_{Re} \phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}}) \\
&\leq -\frac{\rho^2}{4} x^T R^{-1} x + q_{\xi} \|\xi\|^2 + q_{pc} \|p_{ec}\|^2 + q_{Rc} \|e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}})\|^2 \\
&\quad + q_{pe} \|p_{ee}\|^2 + q_{Re} \|e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}})\|^2 \\
&= -x^T \left(\frac{\rho^2}{4} R^{-1} - Q \right) x
\end{aligned} \tag{24}$$

この計算過程において, $\|\theta\| \leq \frac{\pi}{2}$ のとき

$$\phi(e^{\hat{\xi}\theta}) \leq \|e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta})\|^2 \text{ となる関係を用いている. } \rho^2 I \geq 4QR$$

のときに $\frac{\rho^2}{4} R^{-1} - Q \geq 0$ となることから,

$\inf_u [\dot{S}(x) + l(x, u)] \leq 0$ が満たされ, (22)式の制御リアプノフ関数の定義式より, エネルギー関数 $\rho V(x)$ は制御リアプノフ関数とみなすことができる. $\square$

この補題 1 は, 視覚フィードバックシステムが有する受動性の性質を用いたものとなっており, ある条件の下で視覚フィードバックシステム(13)のエネルギー関数 $\rho V(x)$ を制御リアプノフ関数とみなせることが示された.

3.2 Eye-in-Handシステムに対する安定化モデル予測制御

評価関数の終端コスト $\rho V(x)$ が制御リアプノフ関数であることを利用し, 視覚フィードバックシステムに対するモデル予測制御の安定性に関してつぎの定理を示す.

定理 1 Eye-in-Hand 構造の 3 次元視覚フィードバックシステム(13)に対して(18)~(20)式の評価関数を考える.

外乱がなく ($w=0$), $\|\theta_{ec}\| \leq \frac{\pi}{2}$, $\|\theta_{ee}\| \leq \frac{\pi}{2}$, $\rho^2 I \geq 4QR$ で

あるならば, 視覚フィードバックシステム(13)と, 評価関数(18)~(20)に対して解かれるモデル予測制御則(21)で構成される閉ループ系の平衡点 $x=0$ は漸近安定である.

(証明) 区間 $[t+\delta, t+T+\delta]$ での準最適な入力として次式を考える.

$$\tilde{u} = \begin{cases} u^*(\tau) & \tau \in [t+\delta, t+T] \\ u_k(\tau) = -\frac{\rho}{2} R^{-1} N x & \tau \in [t+T, t+T+\delta] \end{cases} \tag{25}$$

ただし, 区間 $[t+T, t+T+\delta]$ の入力 u_k は $K = -\frac{\rho}{2} R^{-1}$ と

した視覚フィードバックシステムの安定化制御則(15)である. この入力 $\tilde{u}$ に対する評価関数は

$$\begin{aligned}
&J(x^*(t+\delta), \tilde{u}, T) \\
&= J(x^*(t), u^*, T) + \rho [V(x(t+T+\delta)) - V(x^*(t+T))] \\
&\quad - \int_t^{t+\delta} l(x^*(\tau), u^*) d\tau + \int_{t+T}^{t+T+\delta} l(x^*(\tau+T), u_k) d\tau
\end{aligned} \tag{26}$$

となる. ここで x^* は最適な状態を表している. さらに

$$J(x^*(t+\delta), u^*, T) \leq J(x^*(t+\delta), \tilde{u}, T) \text{ より,}$$

$$\begin{aligned}
&J(x^*(t+\delta), u^*, T) - J(x^*(t), u^*, T) \\
&\leq \rho [V(x(t+T+\delta)) - V(x^*(t+T))] \\
&\quad - \int_t^{t+\delta} l(x^*(\tau), u^*) d\tau + \int_{t+T}^{t+T+\delta} l(x^*(\tau+T), u_k) d\tau
\end{aligned} \tag{27}$$

と計算できる. (19)式のステージコスト $l(x(t), u(t))$ と

(15)式における安定化制御則 u_k を用い, さらに両辺を δ

で割り, $\delta \rightarrow 0$ の極限をとることで, (27)式はつぎのように変形される.

$$\begin{aligned}
&\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{J(x^*(t+\delta), u^*, T) - J(x^*(t), u^*, T)}{\delta} \\
&\leq -\frac{\rho^2}{4} x^{*T}(t+T) N^T R^{-1} N x^*(t+T) - x^{*T}(t) Q x^*(t) \\
&\quad - u^{*T} R u^* + q_{\xi} \|\xi^*(t+T)\|^2 + E_{qc}(g_{ec}^*(t+T)) \\
&\quad + E_{qe}(g_{ee}^*(t+T)) \\
&\leq -x^{*T}(t+T) \left(\frac{\rho^2}{4} R^{-1} - Q \right) x^*(t+T) \\
&\quad - x^{*T}(t) Q x^*(t) - u^{*T} R u^*
\end{aligned} \tag{28}$$

はじめの δ [s] は $u_{RH} = u^*$ であり, さらに $\rho^2 I \geq 4QR$ と

いう条件式により, $J(x^*(t), u_{RH}, T)$ の微分値は負定とな

る. したがって, $J(x^*(t), u_{RH}, T)$ をリアプノフ関数とみ

なすことで, 閉ループ系の平衡点 $x=0$ の漸近安定性が示される. $\square$

定理 1 により, 終端コストに制御リアプノフ関数を用いることで, 比較的高速で高い非線形性を有する Eye-in-Hand 構造の 3 次元視覚フィードバックシステム(13)に対するモデル予測制御の安定性が証明された. モデル予測制御が最適制御理論を発展させた理論であるということに注目すると, 評価関数のパラメータを適切

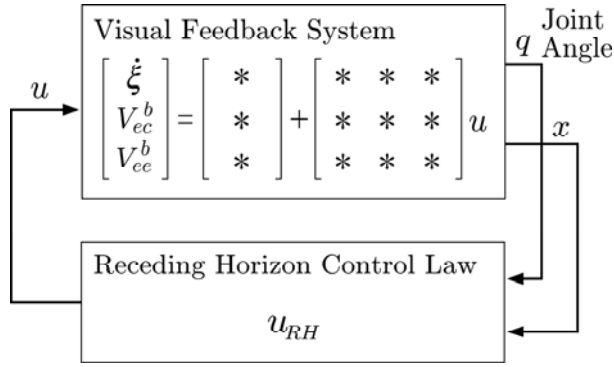


図 4 Block Diagram of the Stabilizing Predictive Visual Feedback Control

なものに選ぶことで、文献[6]の手法に比べ望まれる制御性能を陽に得られると考えられる。本手法では、回転行列の誤差関数 $\phi(e^{\hat{\theta}})$ をステージコスト(19)に直接用いたことも特徴となっている。

さらに、同じ Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバックシステムに対する制御則でも、文献[13]と異なり、平面マニピュレータに限定されず、位置に加えて姿勢も考慮できる制御則となっている点から、適用範囲は格段に広がると考えられる。また、扱っている問題が異なるために一概には比較できないが、文献[9]や文献[13]の安定性の条件式に比べ本手法で課している条件式は非常に単純であり、評価関数の重みや終端コストに対するパラメータが設計しやすくなっている。安定化予測ビジュアルフィードバック制御のブロック線図を図 4 に示す。

本節では、視覚フィードバック制御とモデル予測制御を結びつけた予測ビジュアルフィードバック制御の安定性について述べた。

4. おわりに

本論文では安定化予測ビジュアルフィードバック制御として、比較的高速で非線形性の強い Eye-in-Hand 構造の 3 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則を提案した。はじめに Eye-in-Hand 構造の 3 次元視覚フィードバックシステムについて述べた。さらに、システムのエネルギー関数を制御リアプノフ関数とみなせることを示し、終端コストにおくことで、モデル予測制御の安定性を示した。

参考文献

[1] F. Chaumette and S. Hutchinson, “Visual Servo Control, Part I : Basic Approaches”, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 13, No.

4, pp. 82-90, 2006 (12).
 [2] F. Chaumette and S. Hutchinson, “Visual Servo Control, Part II : Advanced Approaches”, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 14, No. 1, pp. 109-117, 2007 (3).
 [3] K. Omote *et al.*, “Self-Guided Robotic Camera Control for Laparoscopic Surgery Compared with Human Camera Control”, *The American Journal of Surgery*, Vol. 177, No. 4, pp. 321-324, 1999 (4).
 [4] A. Krupa and F. Chaumette, “Control of an Ultrasound Probe by Adaptive Visual Servoing”, *Proc. of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2007-2012, 2005 (4).
 [5] M. Fujita, H. Kawai and M. W. Spong, “Passivity-based Dynamic Visual Feedback Control for Three Dimensional Target Tracking : Stability and L_2 -gain Performance Analysis”, *IEEE Trans. Control Systems Technology*, Vol. 15, No. 1, pp. 40-52, 2007 (1).
 [6] 村尾俊幸, 河合宏之, 藤田政之, “受動性に基づく視覚フィードバックにおける推定と制御の内部構造”, 第 36 回 SICE 制御理論シンポジウム資料, pp. 183-186, 2007 (9).
 [7] 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. 6, pp. 789-814, 2000 (6).
 [8] M. B. Milam, R. Franz, J. E. Hauser and R. M. Murray, “Receding Horizon Control of Vectored Thrust Flight Experiment”, *IEEE Proc. Control Theory & Applications*, Vol. 152, No. 3, pp. 340-348, 2005 (5).
 [9] 河合康典, 中曾裕次郎, 見本真一郎, 藤田政之, 安定化モデル予測制御を用いたロボットマニピュレータの制御に関する実験的考察, 電気学会論文誌 C, Vol. 127, No. 5, pp. 748-754, 2007 (5).
 [10] A. E. Hunt and A. C. Sanderson, “Vision-based Predictive Robotic Tracking of a Moving Target”, *Technical Report*, Carnegie Mellon University, 1982 (1).
 [11] M. Sauvée, P. Poignet, E. Dombre and E. Courtial, “Image based Visual Servoing through Nonlinear Model Predictive Control”, *Proc. 45th IEEE Conference on Decision and Control*, pp.

- 1776-1781, 2006 (12).
- [12] G. Allibert, E. Courtial and Y. Touré, “Visual Predictive Control for Manipulators with Catadioptric Camera” , *Proc. 7th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems*, pp. 1115-1120, 2007 (8).
 - [13] M. Fujita, T. Murao, Y. Kawai and Y. Nakaso, “An Experimental Study of Stabilizing Receding Horizon Control of Visual Feedback System with Planar Manipulators”, In : R. Findeisen, F. Allgöwer and L. Biegler (Eds.), *Assessment and Future Directions of Nonlinear Model Predictive Control*, Springer-Verlag, pp. 573-580, 2007 (8).
 - [14] R. Murray, Z. Li and S. S. Sastry, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press, 1994 (3).
 - [15] F. Bullo and A. D. Lewis, *Geometric Control of Mechanical Systems*, Springer-Verlag, 2004 (11).
 - [16] A. Jadbabaie, J. Yu and J. Hauser, “Unconstrained Receding-Horizon Control of Nonlinear Systems”, Vol. 46, No. 5, pp. 776-783, 2001 (5).