論　文

固定カメラ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

正　員　村尾　俊幸*　　非会員　河合　宏之**
非会員　藤田　政之***

Stabilizing Predictive Visual Feedback Control for Fixed Camera Systems

Toshiyuki Murao*, Member, Hiroyuki Kawai**, Non-member, Masayuki Fujita***, Non-member

This paper investigates a vision based robot control via a receding horizon control strategy for fixed camera systems, as a stabilizing predictive visual feedback control. Firstly, a 3D dynamic visual feedback system with a fixed camera configuration is reconstructed in order to improve performance of estimation. Next, a stabilizing receding horizon control for the 3D dynamic 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 the energy function of the dynamic visual feedback system. Furthermore, simulation and actual nonlinear experimental results are assessed with respect to the stability and the performance.

キーワード：視覚フィードバック制御，Receding Horizon 制御，受動性，安定性，Control Lyapunov 関数
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)]。中でも少子高齢化社会を迎える日本において必要不可欠とされる医療分野では，視覚フィードバック制御による腹腔鏡の制御[(3)]や超音波探触子の制御[(4)]などが，また生命科学の分野では，細胞注入[(5)]などの応用研究が行われている。

著者らは従来研究[(6)]において，細胞注入システムに代表される固定カメラ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，位置ベース法の 3 次元動的視覚フィードバック制御則を提案している。しかし一般的な位置ベース法で扱う，目標値に一致させる制御問題と位置姿勢を推定する推定問題において，従来研究で提案した制御則[(6)]では制御タスクが推定タスクに悪影響を与えることがあった。

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，Jadbabaie らは評価関数の終端コストに Control Lyapunov 関数を用いることで安定化モデル予測制御則を提案し[(8)]，Milam らはその制御則を Caltech Ducted Fan に適用することでよりアグレッシブな動きを実現させている[(9)]。また河合ら[(10)]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[(11)]。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，フィルタリングによる雑音除去[(12)]やマニピュレータの白線トラッキング[(13)]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おらず，著者らは文献 (14) 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

* 産業技術大学院大学 産業技術研究科
〒 140–0011　東京都品川区東大井 1–10–40
School of Industrial Technology, Advanced Institute of Industrial Technology
1–10–40 Higashi-Ohi Shinagawa-ku, Tokyo 140–0011
** 金沢工業大学 工学部
〒 921–8501　石川県石川郡野々市町扇が丘 7–1
College of Engineering, Kanazawa Institute of Technology
7–1 Ohgigaoka Nonoichi, Ishikawa 921–8501
*** 東京工業大学 大学院理工学研究科
〒 152–8550　東京都目黒区大岡山 2–12–1
Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology
2–12–1 Ookayama Meguro-ku, Tokyo 152–8550

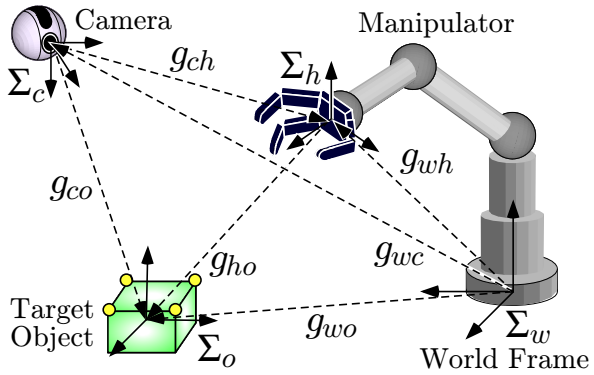


Fig. 1. Visual feedback system with a fixed camera configuration

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固定カメラ構造の 3 次元動的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。本論文では，従来研究のシステム [6] を再構成し，オブザーバが制御タスクに影響されないシステムを構成する。また，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，安定性を満たしたモデル予測制御則を提案する。本論文は，文献 (10) 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 (14) 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，四つの座標系を有する固定カメラ構造の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，我々が従来研究で提案している固定カメラ構造の 3 次元動的視覚フィードバックシステムを再構成し，受動性に基づく安定化制御則について述べる。3 節では，Control Lyapunov 関数を用いることで 3 次元動的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する。4 節でシミュレーション結果と実験結果を示し，最後に 5 節でまとめを行う。

2. 固定カメラ構造の 3 次元動的視覚フィードバックシステムと安定化制御則

〈2･1〉 剛体運動の表現と推定偏差システム 本論文では，Fig. 1 に示すような，四つの座標系によって表される固定カメラ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，手先に手先座標系 Σ_h，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マニピュレータの手先を追従させることである。言い換えると，手先座標系 Σ_h からみた観測対象座標系 Σ_o の相対位置姿勢 g_{ho} を目標位置姿勢 g_d (本論文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 $p_{ab} \in \mathcal{R}^3$ と姿勢を表す回転行列 $e^{\hat{\xi}\theta_{ab}} \in SO(3)$ から構成され，4×4 行列として以下のように定義される。

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

ただし，演算子 $\wedge$(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 $\vee$(vee) で定義される [15]。

この相対位置姿勢 g_{ho} 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。

$$g_{ec} := g_d^{-1} g_{ho} \cdots\cdots (2)$$

さらに，この制御偏差に対する制御偏差ベクトルを $e_c := [p_{ec}^T \; e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}})]^T \in \mathcal{R}^6$ と定義する。ただし $e_R(e^{\hat{\xi}\theta}) := \mathrm{sk}(e^{\hat{\xi}\theta})^\vee \in \mathcal{R}^3$，$\mathrm{sk}(e^{\hat{\xi}\theta}) := \frac{1}{2}(e^{\hat{\xi}\theta} - e^{-\hat{\xi}\theta})$ である。

制御目的を達成するためには g_{ho} が必要になるが，g_{ho} は同次表現の合成則から以下のように導かれる。

$$g_{ho} = g_{ch}^{-1} g_{co} \cdots\cdots (3)$$

(3) 式において g_{ch} は既知情報であるために†，g_{co} の運動についてまずは考える。g_{co} は同次表現の合成則から同様に

$$g_{co} = g_{wc}^{-1} g_{wo} \cdots\cdots (4)$$

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，

$$V_{co}^b = -\mathrm{Ad}_{(g_{co}^{-1})} V_{wc}^b + V_{wo}^b \cdots\cdots (5)$$

のように導かれる [16]。ここで，$V_{ab}^b = (g_{ab}^{-1}\dot{g}_{ab})^\vee \in \mathcal{R}^6$ は剛体運動のボディ速度を表しており，$\mathrm{Ad}_{(g_{ab})} \in \mathcal{R}^{6\times6}$ は同次表現 g_{ab} の随伴写像である [15]。

本論文では固定カメラ構造の視覚フィードバックシステム (カメラのボディ速度が 0，すなわち $V_{wc}^b = 0$) を考えるため，(5) 式で表された相対速度は以下のようになる。

$$V_{co}^b = V_{wo}^b \cdots\cdots (6)$$

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 $f \in \mathcal{R}^{2m}$ 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。(6) 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。

$$\bar{V}_{co}^b = u_e \cdots\cdots (7)$$

$u_e \in \mathcal{R}^6$ 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。

† 本論文ではカメラキャリブレーションが正確に行われていると仮定し，$g_{ch} = g_{wc}^{-1} g_{wh}$ が正確に計算できるとする。

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

$$g_{ee} := \bar{g}_{co}^{-1} g_{co} \cdots\cdots (8)$$

と定義する。さらに，推定偏差ベクトルを $e_e := [p_{ee}^T \ e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}})]^T \in \mathcal{R}^6$ 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の擬似逆行列 $J^{\dagger}(\bar{g}_{co}) \in \mathcal{R}^{6\times 2m}$ を用いることでつぎのように導かれる [16]。

$$e_e = J^{\dagger}(\bar{g}_{co})(f - \bar{f}) \cdots\cdots (9)$$

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，(6)，(7) 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。

$$V_{ee}^b = -\mathrm{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} u_e + V_{wo}^b \cdots\cdots (10)$$

〈2･2〉 制御偏差システム つぎ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。従来研究 [6] では，g_{ho} の推定値を

$$\bar{g}_{ho} = g_{ch}^{-1} \bar{g}_{co} \cdots\cdots (11)$$

とし，既知情報であるこの $\bar{g}_{ho}$ を用いた $g_{ec} := g_d^{-1}\bar{g}_{ho}$ を制御偏差として定義し，この偏差に対して制御偏差システムを構成していた。それは，(2) 式で定義した制御偏差 g_{ec} は，未知情報 g_{co} が含まれている g_{ho} を用いて定義しており，直接得ることができないためであった。しかし，従来法の偏差 g_{ec} の定義では推定値 $\bar{g}_{ho}$ との偏差をとっているために，制御偏差システムを構成したときに推定入力が制御偏差システムに直接影響していた。それに対して本論文ではその影響を取り除くために，(2) 式で定義した g_{ec} による制御偏差システムを用いて，視覚フィードバックシステムを再構成することを試みる。その際に必要となる g_{ec} は，未知情報 g_{ho} を直接用いずに，推定偏差ベクトル e_e と推定値 $\bar{g}_{ho}$ を用いて導出する手法を提案する。

はじめに制御偏差 g_{ec} の導出過程から述べる。(2) 式を再考すると，推定偏差 g_{ee} を用いることで g_{ec} は以下のように表すことができる。

$$g_{ec} = g_d^{-1} g_{ho} = g_d^{-1}\bar{g}_{ho}\bar{g}_{ho}^{-1} g_{ho} = g_d^{-1}\bar{g}_{ho} g_{ee} \cdots (12)$$

(12) 式において，目標値 g_d と推定値 $\bar{g}_{ho}$ は既知情報であるため，推定偏差 g_{ee} が得られれば制御偏差 g_{ec} は求まることがわかる。但し，g_{ee} も未知情報 g_{co} を用いて定義されているため直接求めることは不可能であるが，推定偏差ベクトル e_e は (9) 式から生成可能な情報となる。したがって，つぎに e_e から g_{ee} を導出することを考える。

推定偏差 g_{ee} において，位置偏差 p_{ee} は推定偏差ベクトル e_e よりそのまま得られる。一方，姿勢偏差 $e^{\hat{\xi}\theta_{ee}}$ に関しては $e_R(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}})$ しか得られないが，$-\frac{\pi}{2} \le \theta_{ee} \le \frac{\pi}{2}$ の範囲内では，以下の関係式から $\xi\theta_{ee}$ を求めることができる。

$$\xi\theta_{ee} = \frac{\sin^{-1}\|e_R(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}})\|}{\|e_R(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}})\|} e_R(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}}) \cdots\cdots (13)$$

したがって，推定偏差ベクトル e_e から $\xi\theta_{ee}$ を介して，推定偏差 g_{ee} を求めることができる。ここで，仮定 $-\frac{\pi}{2} \le \theta_{ee} \le \frac{\pi}{2}$ は，$\|\xi\theta_{ee}\| = \sin^{-1}\|e_R(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}})\|$ を一意に決めるための仮定であるが，既に〈2･1〉節で姿勢推定偏差 θ_{ee} を十分に小さいとしているため新たな条件とはならない。

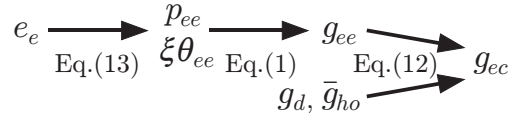


Fig. 2. Relation between e_e and g_{ec}

このように推定偏差 g_{ee} が求まるので，さらに g_d と $\bar{g}_{ho}$ を用いて，(12) 式より制御偏差 g_{ec} を導出することが可能となる。Fig. 2 に e_e と g_{ec} の関係を示す。

(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。

$$V_{ec}^b = -\mathrm{Ad}_{(g_{ec}^{-1})}\left(\mathrm{Ad}_{(g_d^{-1})} V_{wh}^b\right) + V_{wo}^b \cdots\cdots (14)$$

〈2･3〉 3 次元動的視覚フィードバックシステムと受動性 本節では，前節で構成したシステムに対して，つぎのマニピュレータダイナミクスを考慮する [17]。

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau + \tau_d \cdots\cdots (15)$$

$q, \dot{q}, \ddot{q} \in \mathcal{R}^n$ はそれぞれの各関節の角度，角速度，角加速度を表し，$\tau \in \mathcal{R}^n$ は入力トルク，$\tau_d \in \mathcal{R}^n$ はトルク外乱，$M(q) \in \mathcal{R}^{n\times n}$ 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。

また，マニピュレータの手先の速度はボディマニピュレータヤコビアン $J_b(q) \in \mathcal{R}^{6\times n}$ を用いることで $V_{wh}^b = J_b(q)\dot{q}$ として表される [15]。一方，手先の速度の目標値を 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 $\xi := \dot{q} - \dot{q}_d \in \mathcal{R}^n$ と定義する。この関節角速度偏差 ξ が 0 になると手先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

$$\tau = M(q)\ddot{q}_d + C(q,\dot{q})\dot{q}_d + g(q) + J_b^T(q)\mathrm{Ad}_{(g_d^{-1})}^T e_c + u_\xi \cdots (16)$$

を考える。$\dot{q}_d$，$\ddot{q}_d$ はそれぞれ関節角速度と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，(10)，(14)〜(16) 式を用いることで固定カメラ構造の 3 次元動的視覚フィードバックシステムは

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi} \\ V_{ec}^b \\ V_{ee}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M^{-1}C\xi + M^{-1}J_b^T \mathrm{Ad}_{(g_d^{-1})}^T e_c \\ -\mathrm{Ad}_{(g_{ho}^{-1})} J_b \xi \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & -\mathrm{Ad}_{(g_{ec}^{-1})} & 0 \\ 0 & 0 & -\mathrm{Ad}_{(g_{ee}^{-1})} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} M^{-1} & 0 \\ 0 & I \\ 0 & I \end{bmatrix} w \quad (17)$$

で表される。ただし，入力，外乱，状態をそれぞれ $u := [u_\xi^T \ (\mathrm{Ad}_{(g_d^{-1})} u_d)^T \ u_e^T]^T$，$w := [\tau_d^T \ (V_{wo}^b)^T]^T$，$x := [\xi^T \ e_c^T \ e_e^T]^T$ と定義している。固定カメラ構造の動的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。

この動的視覚フィードバックシステム (17) に対して，下記に示す受動性が成立する。

〔補題 1〕 外乱がない (すなわち $w = 0$) とする。このとき，出力を $\nu := Nx$，$N := \mathrm{diag}\{I, -I, -I\}$ とするとき，動的視覚フィードバックシステム (17) の入出力間に

$$\int_0^T u^T \nu d\tau \geq -\beta_0, \ {}^\forall T > 0 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (18)$$

が成り立つ。ただし β_0 はある非負の定数である。

この補題 1 はつぎのエネルギー関数を用いることで証明される。

$$V = \frac{1}{2}\xi^T M \xi + E(g_{ec}) + E(g_{ee}) \cdots\cdots\cdots\cdots (19)$$

ここで $E(g_{ab}) := \frac{1}{2}\|p_{ab}\|^2 + \phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ab}})$ であり，関数 $\phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ab}})$ は回転行列に対する誤差関数を表す正定関数である [18]。

〈2•4〉 動的視覚フィードバック制御則と安定性 動的視覚フィードバックシステム (17) に対し，補題 1 の受動性に基づくことで次式の制御則を提案する。

$$u = -K\nu = -KNx := u_k, \ \cdots\cdots\cdots\cdots (20)$$
$$K := \mathrm{diag}\{K_\xi, K_c, K_e\}$$

ただし，ゲインにおける各要素はすべて正とする。このとき安定性に関してつぎの定理が導かれる。

〔定理 1〕 $w = 0$ のとき，動的視覚フィードバックシステム (17) と (20) 式の入力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：(19) 式のエネルギー関数を Lyapunov 関数候補とし，解軌道に沿って時間微分を行うと，提案した (20) 式の制御則 u_k を用いることで，

$$\dot{V} = u^T \nu = -x^T N^T K N x \cdots\cdots\cdots\cdots (21)$$

が導かれる。行列 K が正定であり，N が正則であるため，システムの平衡点 $x = 0$ は漸近安定となる。 □

ここで従来研究の制御則 [6] との比較を行う。Fig. 3 の左図に本論文で提案した制御則，右図に従来研究で提案した制御則のブロック図を示す。文献 (6) の推定偏差に対する制御則 $u_e = K_e(e_e - \mathrm{Ad}_{(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}})}^T e_c)$ は，e_c で定義された制御偏差が推定入力に干渉してしまうために，制御偏差 e_c が存在する場合，それが推定入力 u_e に影響を与えていた。それに対して本論文で提案した制御則 (20) $u_\xi = -K_\xi \xi$，$u_d = \mathrm{Ad}_{(g_d)} K_c e_c$，$u_e = K_e e_e$ は，それぞれの偏差がそれぞれの入力に対してのみフィードバックされている。したがって，本論文の受動性に基づく動的視覚フィードバック制御則は制御偏差が推定入力に干渉するという影響を回避することができるため，制御偏差がある場合，従来研究 [6] の制御則に比べて性能が向上する。このことは動的視覚フィードバックシステムと制御則で構成される閉ループ系のブロック図からも読み取れる。Fig. 4 の左図に本論文の閉ループ系，右図に従来研究 [6] の閉ループ系のブロック図を示す。従来研究のオブザーバと異なり，本論文のオブザーバには目標相対位置姿勢 g_d が影響せず，推定部分に制御部分が直接影響していないことがわかる。

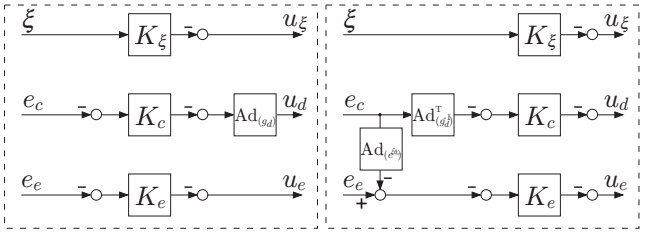


Fig. 3. Block diagram of the control law (Left: proposed method, Right: previous one [6])

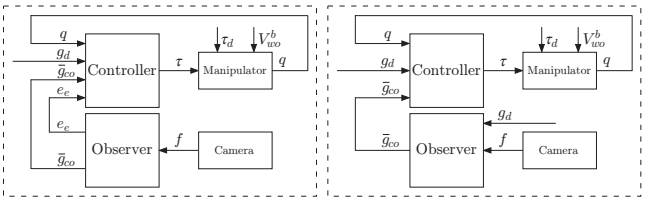


Fig. 4. Block diagram of the dynamic visual feedback control (Left: proposed method, Right: previous one [6])

このように制御則を提案できるのは，動的視覚フィードバックシステム (17) の入力に対する行列が対角行列になっているためであり，構成した動的視覚フィードバックシステムの偏差系において，推定と制御の構造を分離しているためと解釈できる。そのために，制御偏差システムや推定偏差システムで制御則を個別に設計したとしても，全体のシステムを安定化させる制御則となる。したがって，動的視覚フィードバックシステムを再構築していることも本研究の貢献の一つである。

次節では本節で構成した動的視覚フィードバックシステムに対して，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. 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となると考えられる。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〉 Control Lyapunov 関数　本節では，はじめに視覚フィードバックシステム (17) 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 (17) 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。

$$J(x_0,u,T)=\int_t^{t+T} l(x(\tau),u(\tau))d\tau+F(x(t+T)) \quad (22)$$

$$l(x(t),u(t))=q_\xi(t)\|\xi(t)\|^2+E_{qc}(g_{ec}(t))+E_{qe}(g_{ee}(t)) +u^T(t)R(t)u(t) \quad (23)$$

$$F(x)=\rho V(x) \quad (24)$$

$$q_\xi(t)\geq 0,\ q_{pi}(t)\geq 0,\ q_{Ri}(t)\geq 0,\ R(t)>0,\ \rho>0$$

ただし，$R(t)$ は対角行列とし，$E_{qi}(g_{ei}(t)):=q_{pi}(t)\|p_{ei}(t)\|^2+q_{Ri}(t)\phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ei}(t)})$，$i=c,e$ 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

$$u_{RH}:=u^*(\delta,x_0) \quad (25)$$

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 [8]。

本論文では，視覚フィードバックシステム (17) 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 Control Lyapunov 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 Control Lyapunov 関数である [8]。

$$\inf_u[\dot{S}(x)+l(x,u)]\leq 0 \quad (26)$$

Control Lyapunov 関数について，係数 $q_\xi,q_{pc},q_{Rc},q_{pe},q_{Re}\in\mathcal{R}$ と重み行列 $Q:=\mathrm{diag}\{q_\xi I_n,q_{pc}I_3,q_{Rc}I_3,q_{pe}I_3,q_{Re}I_3\}$ を用いることで，つぎの補題が示される。

〔補題 2〕 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たすように設計する。

$$\rho^2 I\geq 4QR \quad (27)$$

このとき，3 次元動的視覚フィードバックシステム (17) のエネルギー関数 $\rho V(x)$ は Control Lyapunov 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 (21) 式と，(23) 式の正定な関数 $l(x(t),u(t))$，さらに $K=\frac{\rho}{2}R^{-1}$ とした (20) 式の安定化制御則 u_k を用いることにより，(26) 式の左辺はつぎのように変形される。

$$\begin{aligned}
&\inf_u[\dot{S}(x)+l(x,u)]\\
&=\inf_u\left[\rho\dot{V}+q_\xi\|\xi\|^2+E_{qc}(g_{ec})+E_{qe}(g_{ee})+u^TRu\right]\\
&=\inf_u\left[\rho x^TN^Tu+q_\xi\|\xi\|^2+E_{qc}(g_{ec})+E_{qe}(g_{ee})+u^TRu\right]\\
&=\inf_u\left[\left(u+\frac{\rho}{2}R^{-1}Nx\right)^TR\left(u+\frac{\rho}{2}R^{-1}Nx\right)\right.\\
&\quad\left.-\frac{\rho^2}{4}x^TN^TR^{-1}Nx+q_\xi\|\xi\|^2+E_{qc}(g_{ec})+E_{qe}(g_{ee})\right]\\
&=-\frac{\rho^2}{4}x^TR^{-1}x+q_\xi\|\xi\|^2+q_{pc}\|p_{ec}\|^2\\
&\quad+q_{Rc}\phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}})+q_{pe}\|p_{ee}\|^2+q_{Re}\phi(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}})\\
&\leq-\frac{\rho^2}{4}x^TR^{-1}x+q_\xi\|\xi\|^2+q_{pc}\|p_{ec}\|^2\\
&\quad+q_{Rc}\|e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{ec}})\|+q_{pe}\|p_{ee}\|^2+q_{Re}\|e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{ee}})\|\\
&=-x^T\left(\frac{\rho^2}{4}R^{-1}-Q\right)x \quad (28)
\end{aligned}$$

この計算過程において，$\|\theta\|\leq\frac{\pi}{2}$ のとき $\phi(e^{\hat{\xi}\theta})\leq\|e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta})\|$ となる関係を用いている。$\rho^2I\geq 4QR$ 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，(26) 式の Control Lyapunov 関数の定義式より，エネルギー関数 $\rho V(x)$ は Control Lyapunov 関数とみなすことができる。□

この補題 2 は，補題 1 の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 (17) のエネルギー関数 $\rho V(x)$ を Control Lyapunov 関数とみなせることが示された。

〈3・2〉 3 次元動的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　評価関数の終端コスト $\rho V(x)$ が Control Lyapunov 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 2〕 固定カメラ構造の 3 次元動的視覚フィードバックシステム (17) に対して (22)〜(24) 式の評価関数を考える。外乱がなく ($w=0$)，$\|\theta_{ec}\|\leq\frac{\pi}{2}$，$\|\theta_{ee}\|\leq\frac{\pi}{2}$，$\rho^2I\geq 4QR$ であるならば，視覚フィードバックシステム (17) と，評価関数 (22)〜(24) に対して解かれるモデル予測制御則 (25) 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。

$$\tilde{u}=\begin{cases} u^*(\tau) & \tau\in[t+\delta,t+T]\\ u_k(\tau)=-\frac{\rho}{2}R^{-1}Nx & \tau\in[t+T,t+T+\delta]\end{cases} \quad (29)$$

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 (20) である。この入力 $\tilde{u}$ に対する評価関数は

$$
\begin{aligned}
&J(x^*(t+\delta),\tilde{u},T)\\
&=J(x(t),u^*,T)+\rho[V(x(t+T+\delta))-V(x^*(t+T))]\\
&\quad-\int_t^{t+\delta} l(x^*(\tau),u^*)d\tau+\int_{t+T}^{t+T+\delta} l(x^*(\tau+T),u_k)d\tau
\end{aligned}
\quad\cdots\cdots (30)
$$

となる。ここで x^* は最適な状態を表している。さらに $J(x^*(t+\delta),u^*,T)\le J(x^*(t+\delta),\tilde{u},T)$ より，

$$
\begin{aligned}
&J(x^*(t+\delta),u^*,T)-J(x^*(t),u^*,T)\\
&\le\rho[V(x(t+T+\delta))-V(x^*(t+T))]\\
&\quad-\int_t^{t+\delta} l(x^*(\tau),u^*)d\tau+\int_{t+T}^{t+T+\delta} l(x^*(\tau+T),u_k)d\tau
\end{aligned}
\quad\cdots\cdots (31)
$$

と計算できる。(23) 式のステージコスト $l(x(t),u(t))$ と (29) 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，$\delta\to 0$ の極限をとることで，(31) 式はつぎのように変形される。

$$
\begin{aligned}
&\lim_{\delta\to 0}\frac{J(x^*(t+\delta),u^*,T)-J(x^*(t),u^*,T)}{\delta}\\
&\le-\frac{\rho^2}{4}x^{*T}(t+T)N^TR^{-1}Nx^*(t+T)-x^{*T}(t)Qx^*(t)\\
&\quad-u^{*T}Ru^*+q_\xi\|\xi^*(t+T)\|^2+E_{qc}(g^*_{ec}(t+T))\\
&\quad+E_{qe}(g^*_{ee}(t+T))\\
&\le-x^{*T}(t+T)\left(\frac{\rho^2}{4}R^{-1}-Q\right)x^*(t+T)\\
&\quad-x^{*T}(t)Qx^*(t)-u^{*T}Ru^*
\end{aligned}
\quad\cdots\cdots (32)
$$

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

定理 2 により，終端コストに Control Lyapunov 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 3 次元動的視覚フィードバックシステム (17) 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なものに選ぶことで，望まれる制御性能を陽に得られると考えられる。本論文では，2 章において視覚フィードバックシステムを再構成したことにより，それぞれの重みのチューニングがより容易になっている。また，回転行列の誤差関数 $\phi(e^{\hat{\xi\theta}})$ をステージコスト (23) に直接用いたことも特徴となっている。

さらに文献 (14) 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，四つの座標系を有する固定カメラ構造の視覚フィードバックシステムに対す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 (10) や文献 (14) 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。さらに，推定偏差を予測しているので，カメラから観測対象の相対位置姿勢の推定値を間接的に予測していることになり，本システムはオブザーバにもモデル予測制御を適用していると捉えることができる。

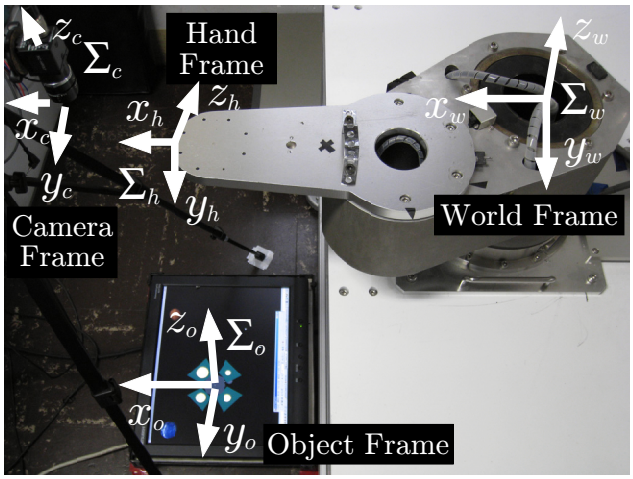


Fig. 5. Coordinated frames for 3D dynamic visual feedback systems with 2DOF manipulator

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. 検証実験

本論文では 3 次元の動的視覚フィードバック制御則を提案したが，簡単のために Fig. 5 で示す水平 2 自由度マニピュレータを用いて位置姿勢に対する制御則の検証を行った。はじめにシミュレーションにて，観測対象が静止している状況で，閉ループ系の安定性の検証と，受動性に基づく制御則 u_k との性能比較，また予測ホライズン T と終端コスト重み ρ を変化させた場合のコストの比較を行う。さらに SICE-DD アーム [17] を用いた実システムによる検証実験で，観測対象が運動している場合の実験結果を示す。

〈4・1〉 シミュレーション設定 本論文では，観測対象が静止している状況で安定性解析に対するシミュレーション検証を行う。それぞれの初期設定は $q_1(0)=\pi/4$ [rad]，$q_2(0)=\pi/12$ [rad]，$p_{wc}=[0.4732\ 0.1\ 0.1]^T$ [m]，$\xi\theta_{wc}=[0\ 0\ 0]^T$ [rad]，$p_{wo}=[0.3986\ 0\ -0.9]^T$ [m]，$\xi\theta_{wo}=[0\ 0\ -0.5087]^T$ [rad] とする。また目標位置姿勢は時不変とし $p_d=[0\ 0\ -0.9]^T$ [m]，$\xi\theta_d=[0\ 0\ 0]^T$ [rad] とした。初期状態 $x(0)$ は $\xi(0)=[0\ 0]^T$ [rad/s]，$p_{ec}(0)=[-0.294\ -0.293\ 0]^T$ [m]，$\xi\theta_{ec}(0)=[0\ 0\ -1.556]^T$ [rad]，$p_{ee}(0)=[0\ -0.004\ 0]^T$ [m]，$\xi\theta_{ee}(0)=[0\ 0\ -0.015]^T$ [rad] となっている。

さらに，本シミュレーションにおける評価関数の重みは以下のように設定した。$q_\xi=0.001$，$q_{pc}=0.1$，$q_{Rc}=0.05$，$q_{pe}=0.3$，$q_{Re}=0.1$，$R=\mathrm{diag}\{0.1,3.2,0.7,2,2,1,1,2,0.3,0.3,0.3,0.3,0.3,0.3\}$。また，$\rho^2I\ge 4QR$ という条件式

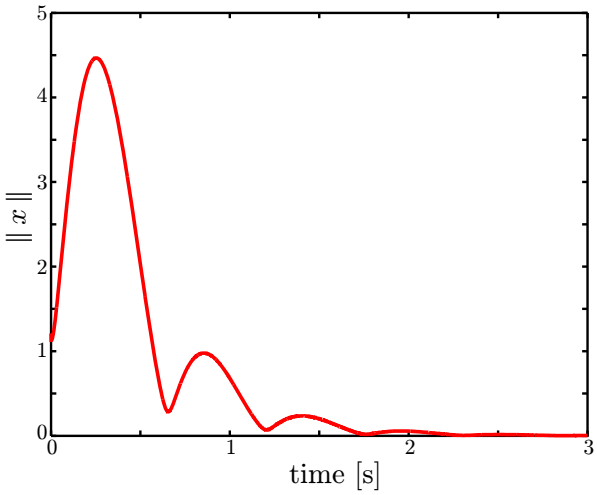


Fig. 6. Norm of the state

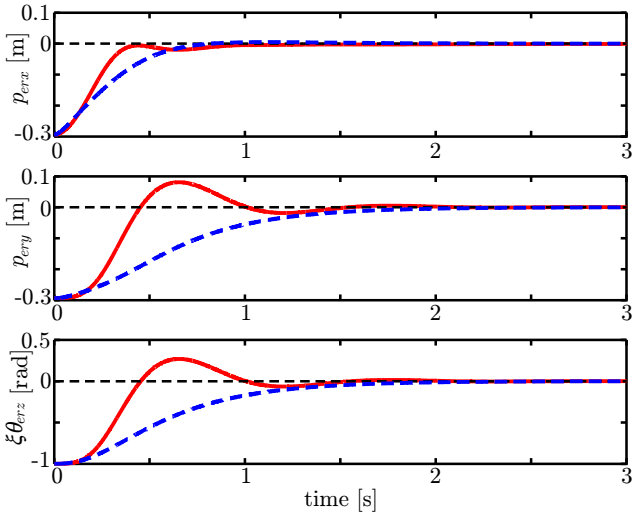


Fig. 7. Actual control error (Solid: stabilizing receding control law, Dashed: passivity based control law)

Table 1. Values of the integral cost with the simulation results

Control Scheme	cost
Passivity based Control	3502
Receding Horizon Control ($T = 0.02$ [s], $\rho = 1$)	320
Receding Horizon Control ($T = 0.02$ [s], $\rho = 2$)	732
Receding Horizon Control ($T = 0.02$ [s], $\rho = 5$)	3152
Receding Horizon Control ($T = 0.2$ [s], $\rho = 1$)	301
Receding Horizon Control ($T = 0.5$ [s], $\rho = 1$)	256

を満たすように $\rho = 1$ とし，u_{RH} をリアルタイムで求めるための最適化ソフトウェアは C/GMRES [19] を用いた。制御入力は 1 [ms] 毎に更新され，その間に u_{RH} は計算されなければならない。予測ホライズンの長さは $T = 0.02$ [s] と設定した。

〈4・2〉 シミュレーション結果 Fig. 6 に予測ビジュアルフィードバック制御則 u_{RH} を視覚フィードバックシステムに適用した場合の，状態 x のユークリッドノルム $\|x\|$ を示す。Fig. 6 より，定常状態において平衡点 $x = 0$ に収束していることが確認される。したがって，予測ビジュアルフィードバック制御則 u_{RH} の漸近安定性が示された。

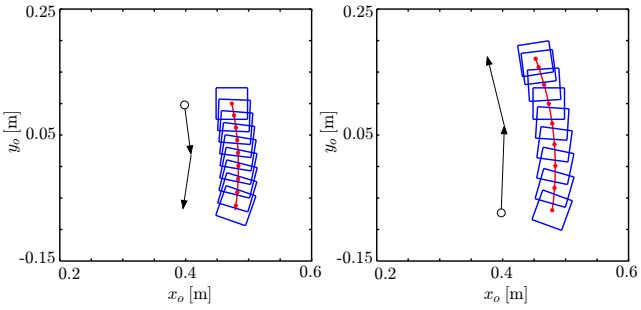
つぎに，受動性に基づく制御則 u_k との性能比較を行った。ただし，両入力ともモータへの入力電圧が ± 3 [V] を超えないように設計した。受動性に基づく制御則のゲインは経験的に $K = \mathrm{diag}\{10, 3, 2, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1\}$ とした。Fig. 7 に二つの制御手法を比較したシミュレーション結果を示す。Fig. 7 で示している偏差は，g_{ho} と g_d の間の実際の偏差ベクトルである $e_r := [p_{er}^T \ e_R^T(e^{\hat{\xi}\theta_{er}})]^T$ を図示したシミュレーション結果である。上から 3 次元空間での x，y 軸の位置偏差と z 軸周りの回転偏差を示す。図中の実線が予測ビジュアルフィードバック制御則 u_{RH}，破線が受動性に基づく制御則 u_k を表している。Fig. 7 において，両方の制御手法の定常状態における偏差が，ともに 0 になっているのがわかる。また，過渡応答に注目すると，予測ビジュアルフィードバック制御則 u_{RH} のほうが受動性に基づく制御則 u_k に比べて立上り時間が短いことがわかる。これは視覚情報によってカメラと観測対象の相対位置姿勢を予測し，結果として偏差がより早く収束するようにマニピュレータを制御した結果であると捉えられる。これが視覚フィードバックシステムにモデル予測制御を適用する上で，期待される利点の一つである。

最後に，予測ホライズン T と終端コスト重み ρ を変化させた場合のコストの違いに対して，以下の式で計算し，その結果を Table 1 に示す。

$$Cost = \int_0^I l(x(\tau), u(\tau))d\tau \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (33)$$

積分区間は $I = 3$ とした。評価関数のパラメータを適切なものに選んだモデル予測制御を用いたときのコストが受動性に基づく制御則を適用させたときのコストに比べて小さいことから，コストの面において制御性能が向上していることが確認できる。また，終端コストの重み ρ の値を 1 から 5 に増加させると，コストもそれに伴い大きくなった。これは終端コストを大きくすると，より大きな入力を用いてより厳しく状態を収束させるためである。一方，ホライズン T の長さを 0.2 [s] から 0.5 [s] にすると，コストは減少する。これはより未来の状態を考慮し，コストが最小になるように，入力が計算されているためである。但し，コストの面ではホライズン T を長くする方が良かったが，状態と入力にはトレードオフが発生するので，入力ができるだけ大きくなるようにホライズン T を短くする方が僅かだが応答は良かった。また，$T = 1$ [s] 以上にホライズンの長さを設定するとサンプリング時間内に制御入力を計算することができなくなった。

〈4・3〉 実験設定 本論文では，観測対象が運動した場合の実験結果を示す。実験環境の詳細については文献(20)の検証実験とほぼ同じであるので詳細は省略するが，Fig. 5 のようにマニピュレータは一台だけ用いて，カメラは固定



($0 \leq t \leq 0.85$ [s]) ($2.15 \leq t \leq 3.4$ [s])

Fig. 8. Trajectory of the target object

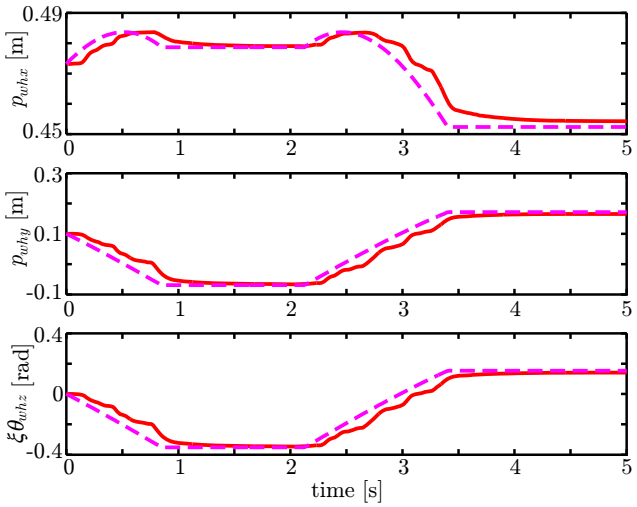


Fig. 9. Rigid body motion g_{wh} (Solid: actual value, Dashed: target object's value)

されているものとする。また，マニピュレータに対するサンプリング周期は 5.6 [ms] である。観測対象のトラジェクトリーを Fig. 8 に示す。観測対象は一定時間動いた後，0.85 [s] から 2.15 [s] まで一度静止し，その後逆方向に再び動き出すものとした。マニピュレータの角度の初期設定は $q_1(0) = \pi/6$ [rad]，$q_2(0) = -\pi/6$ [rad] とする。またカメラ位置と目標位置姿勢はシミュレーションと同じとし，初期状態では偏差は 0 とする。

さらに，本実験における評価関数の重み，各パラメータは以下のように設定した。$q_\xi = 0.1$，$q_{pc} = 3$，$q_{Rc} = 1$，$q_{pe} = 30$，$q_{Re} = 10$，$R = \mathrm{diag}\{0.1, 0.5, 0.05, 0.05, 0.05, 0.05, 0.05, 0.05, 0.008, 0.008, 0.008, 0.01, 0.01, 0.01\}$，$\rho = 1$，$T = 11.2$ [ms]。制御入力のサンプリング時間は 5.6 [ms] とした。

〈4・4〉 実験結果 Fig. 9 に実験結果を示す。Fig. 9 で示しているグラフは，基準座標系からみた手先の位置姿勢 g_{wh} を表しており，上から 3 次元空間での x，y 軸の位置と z 軸周りの姿勢を示す。図中の実線が予測ビジュアルフィードバック制御則 u_{RH}，破線が観測対象の位置姿勢を表している。また，Fig. 10 に手先の位置姿勢 g_{wh} の y 軸方向の一部分のグラフを示す。図中の実線が実際の状態，破線が予測トラジェクトリーである。

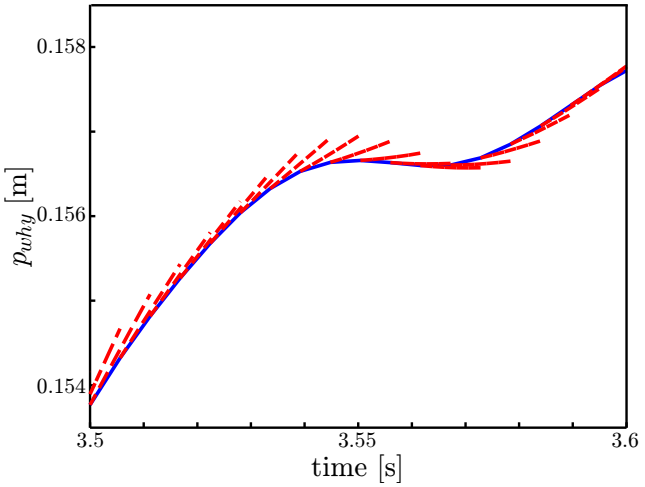


Fig. 10. Horizontal rigid body motion p_{why} (Solid: actual value, Dashed: receding horizon reference trajectory)

Table 2. Values of the integral cost with the experimental results

Control Scheme	cost
Passivity based Control	128.9
Receding Horizon Control ($T = 0.0056$ [s], $\rho = 1$)	88.8
Receding Horizon Control ($T = 0.0112$ [s], $\rho = 1$)	80.4
Receding Horizon Control ($T = 0.028$ [s], $\rho = 1$)	65.8
Receding Horizon Control ($T = 0.056$ [s], $\rho = 1$)	64.7

Fig. 9 より，マニピュレータの手先が観測対象に追従していることがわかる。Fig. 9 において，観測対象が静止したときに，シミュレーションと異なり定常偏差が少し残ってしまっているが，それは摩擦の影響によるものだと考えられる。ただし，微小ではあるがこの定常偏差はホライズンが長い方がより小さくなった。また，Fig. 10 より実際の g_{wh} の値と予測したトラジェクトリーが異なっていることがわかる。ここに示されているグラフは，特に観測対象が静止した直後のグラフの拡大図であり，観測対象がそれまでの挙動と異なる動きをしたとしても，予測し直すことで追従できていることが表れている。

最後に，予測ホライズン T を変化させた場合のコストを Table 2 に示す。コストは (33) 式で計算し，積分区間は $I = 5$ とした。シミュレーションのときと同様に，ホライズン T の長さを 0.0056 [s] から 0.056 [s] にすると，コストは減少する。しかし，$T = 0.056$ [s] 以上にホライズンの長さを設定すると実時間で制御入力を計算することができなくなり，制御則を適用できなかった。

本節では，シミュレーションと実験結果から予測ビジュアルフィードバック制御則 u_{RH} の有効性が検証できた。今後，計算機の計算能力が向上することにより，さらなる性能の向上が期待される。

5. 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固定カメラ構造の 3 次元動的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，オブザーバが制御タスクに影響されないように動的視覚フィードバックシステムを再構成した。そして，システムのエネルギー関数を Control Lyapunov 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。最後にシミュレーションと検証実験により，提案した制御則の安定性を検証し，制御則の有効性を示した。本論文の安定化予測ビジュアルフィードバック制御は文献(20) で示した， 可動カメラ構造の動的視覚フィードバックシステムへも拡張可能である。

（平成 7 年 7 月 20 日受付，平成 15 年 1 月 14 日再受付）

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)

（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） 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） 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)

（5） S. Yu and B. J. Nelson: “Autonomous injection of biological cells using visual servoing”, In:D. Rus and S. Singh (Eds.), *Experimental Robotics VII*, Springer-Verlag, pp. 169–178 (2001)

（6） H. Kawai, T. Azuma and M. Fujita: “Passivity-based 3D Dynamic Visual Feedback Control with a Fixed Camera”, *Trans. the Institute of Systems, Control and Information Engineers*, Vol. 18, No. 4, pp. 127–135 (2005) (in Japanese)
河合宏之, 村尾俊幸, 東 剛人, 藤田政之: “受動性に基づく 3 次元動的視覚フィードバック制御の固定カメラ構造への展開”, システム制御情報学会論文誌, Vol. 18, No. 4, pp. 127–135 (2005)

（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)

（8） A. Jadbabaie, J. Yu and J. Hauser: “Unconstrained Receding-Horizon Control of Nonlinear Systems”, *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 46, No. 5, pp. 776–783 (2001)

（9） M. B. Milam, R. Franz, J. E. Hauser and R.M. Murray: “Receding Horizon Control of Vectored Thrust Flight Experiment”, *IEE Proc. Control Theory & Applications*, Vol. 152, No. 3, pp. 340–348 (2005)

（10） Y. Kawai, Y. Nakaso, S. Mimoto and M. Fujita: “Experiments on Stabilizing Receding Horizon Control of a Direct Drive Manipulator”, *IEEJ Trans. Electronics, Information and Systems*, Vol. 127-C, No. 5, pp. 748–754 (2007) (in Japanese)
河合康典, 中曽裕次郎, 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)

（11） A. E. Hunt and A. C. Sanderson: “Vision-based Predictive Robotic Tracking of a Moving Target”, *Technical Report*, Carnegie Mellon University (1982)

（12） R. Ginhoux, J. Gangloff, M. de Mathelin, L. Soler, M. M. A. Sanchez and J. Marescaux: “Active Filtering of Physiological Motion in Robotized Surgery using Predictive Control”, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No. 1, pp. 67–79 (2005)

（13） F. Lange and G. Hirzinger: “Predictive Visual Tracking of Lines by Industrial Robots”, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 22, No. 10–11, pp. 889–903 (2003)

（14） 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)

（15） R. Murray, Z. Li and S. S. Sastry: A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, CRC Press (1994)

（16） 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)

（17） H. Kobayashi *et al.*: Practical Control of Robot Manipulators, Corona Publishing Co., Ltd. (1997) (in Japanese)
小林尚登 ほか：ロボット制御の実際, コロナ社 (1997)

（18） F. Bullo and A. D. Lewis: Geometric Control of Mechanical Systems, Springer-Verlag (2004)

（19） T. Ohtsuka: “A Continuation/GMRES Method for Fast Computation of Nonlinear Receding Horizon Control”, *Automatica*, Vol. 40, No. 4, pp. 563–574 (2004)

（20） T. Murao, H. Kawai and M. Fujita: “Passivity-based Control of Dynamic Visual Feedback Systems with Movable Camera Configuration”, *IEEJ Trans. Electronics, Information and Systems*, Vol. 128, No. 2, pp. 286–294 (2008) (in Japanese)
村尾俊幸, 河合宏之, 藤田政之: “受動性に基づく可動カメラ構造の 3 次元動的視覚フィードバック制御”, 電気学会論文誌 C, Vol. 128, No. 2, pp. 286–294 (2008) (in Japanese)

村 尾 俊 幸（正員） 2003 年金沢大学工学部電気・情報工学科卒業。2005 年金沢大学大学院博士前期課程修了，同年金沢大学大学院博士後期課程入学，同年東京工業大学大学院博士後期課程転入学。2006 年産業技術大学院大学研究員，2007 年同助教。視覚フィードバック制御に関する研究に従事。計測自動制御学会，システム制御情報学会，IEEE などの会員。

河 合 宏 之（非会員） 1999 年金沢大学工学部電気・情報工学科卒業。2001 年金沢大学大学院博士前期課程修了，2004 年金沢大学大学院博士後期課程修了，同年法政大学情報技術 (IT) 研究センターポストドクター，2005 年金沢工業大学講師。視覚フィードバック制御に関する研究に従事。博士（工学）。計測自動制御学会，システム制御情報学会，IEEE の会員。

藤 田 政 之（非会員） 1984 年早稲田大学大学院理工学研究科博士前期課程修了（電気工学専攻），1985 年同博士後期課程中退。同年金沢大学工学部助手。同講師，助教授を経て，1992 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授。1999 年金沢大学工学部教授。2005 年東京工業大学大学院理工学研究科教授。ロバスト制御とその応用に関する研究に従事。工学博士。計測自動制御学会，システム制御情報学会，IEEE などの会員。