受動性に基づく視覚フィードバックシステムに対する 同調制御の一考察

村尾俊幸(産業技術大学院大学)河合宏之(金沢工業大学)藤田政之(東京工業大学)

A Study on Passivity-based Synchronized Control for Visual Feedback Systems

*T. Murao (Advanced Institute of Industrial Technology), H. Kawai (Kanazawa Institute of Technology) and M. Fujita (Tokyo Institute of Technology)

Abstract– This paper investigates passivity based synchronized visual feedback control for eye-to-hand systems. Firstly the brief summary of the estimation and the control error systems with an eye-to-hand configuration is given with the basic representation of a relative rigid body motion. Secondly we construct the synchronized visual feedback system with an eye-to-hand configuration by combining a synchronization error system. Based on passivity, stability analysis are discussed. Finally the validity of the proposed control law can be confirmed by the simulation results.

Key Words: Visual feedback control, Synchronization, Passivity, Lyapunov stability

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. この視覚フィードバック制御は古くから Eye-in-Hand 構造と Eye-to-Hand (固定カメラ)構造に大別できるこ とがよく知られているが,次々とそれらを発展させた手 法も研究されている¹⁾.例えば,Occlusion 回避のため に Eye-in-Hand と固定カメラを組み合わせた複数のカ メラを用いる研究²⁾や,積極的に広い視野を手に入れ るために可動カメラを用いる研究³⁾など,複数台のマ ニピュレータから構成されるシステムが最近では提案 されている.

一方,一台では限界のある作業や広範囲に渡る作業を 行うため,複数台のマニピュレータからなる同調制御も 近年では研究されており,他のマニピュレータに同調し ながら目標軌道に追従する適応制御則⁴⁾や,角速度を 推定することで角度の測定のみで構成できる同調制御 則⁵⁾,角加速度をフィードバック項に用いない同調制御 則⁶⁾などが提案されている.これらの制御則は,マニ ピュレータに外乱が入ったときに,同調効果のために外 乱の影響を抑えることができるなどの利点が挙げられ る.複数台のマニピュレータで構成される視覚フィー ドバックシステムに対しても,目的に応じてこのような 同調制御を適用することは効果的である.

そこで、本稿では視覚フィードバックシステムに対す る同調制御として、二台のマニピュレータからなる受 動性に基づくシンクロ視覚フィードバック制御則を提 案する.提案した制御則に対して安定性解析を行い、シ ミュレーションにて制御則の検証を行う.

2 推定偏差システムと制御偏差システム

2.1 目標相対位置姿勢の生成

本稿では、Fig.1に示すような、七つの座標系によって 表される二台のマニピュレータを有する Eye-to-Hand 構造の視覚フィードバックシステムについて考える.本 稿では簡単のため、構成されるマニピュレータは二台 とし、さらにカメラは固定されているとして考えるが、



Fig. 1: Synchronized visual feedback system with eyeto-hand configuration.

より多くのマニピュレータや可動カメラを用いたシス テムに拡張することは可能である. Fig. 1 に示すよう に、基準座標系 Σ_w 、カメラ座標系 Σ_c 、観測対象座標系 Σ_o 、各マニピュレータの台座と手先にそれぞれ台座座 標系 Σ_{w_i} 、手先座標系 Σ_{h_i} を定義する. ここで、本稿で は二台のマニピュレータを考慮しているので i = 1, 2となる.

本システムの制御目的はマニピュレータの動きを同 調させつつ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_i} からみた観測対象座標系 Σ_o の相対位置姿勢 $g_{h_i o}$ を目標位置姿勢 $g_{h_i d}$ (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 $p_{ab} \in \mathcal{R}^3$ 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.

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

ただし、演算子 \land (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 \lor (vee) で定義される ⁸⁾.本稿では複数台のマニピュレー



Fig. 2: Generation of desired relative rigid body motion.

タの同調を目的としているので、それぞれの目標相対位 置姿勢 g_{hid} 間である関係を持つ.本節ではその目標相 対位置姿勢の生成について議論する.

はじめに、観測対象に追従するために基本となるマ ニピュレータとして参照マニピュレータをFig. 2のよ うに考える. これは本システムの目標相対位置姿勢を 決めるためのもので、このマニピュレータと実際の観 測対象との間に、目標相対位置姿勢 g_{hd} を設ける. さ らに、 $g_{w_io_i} = g_{wo}(g_{oo_i} = g_{ww_i})$ を満たすように座標系 Σ_{o_i} を有する参照観測対象を Fig. 2 のように定める. 一方、本システムの制御目的はすべてのマニピュレー タに対して同じ動きをさせることであり、そのときに は $g_{w_ih_i} = g_{wh}$ となることから、 $g_{hh_i} = g_{ww_i}$ が満た される. 以上の関係より、それぞれの目標相対位置姿勢 $g_{h_id_i}$ は設定する一つの目標相対位置姿勢 g_{hd} を用い ることで、つぎのように定めることができる.

$$g_{h_i d_i} = g_{ww_i}^{-1} g_{hd} g_{ww_i} \tag{2}$$

この目標相対位置姿勢 $g_{h_i d_i}$ と手先からみた参照観 測対象の相対位置姿勢 $g_{h_i o_i}$ の偏差を,制御偏差 g_{eh_i} としてつぎのように定義する.

$$g_{eh_i} := g_{h_i d_i}^{-1} g_{h_i o_i}$$
 (3)

これは言い換えると、 $g_{eh_i} = I$ のときに g_{h_io} が g_{h_id} に一致することを意味する. さらに、この制御偏差に 対する制御偏差ベクトルを $e_{h_i} := [p_{eh_i}^T e_R^T (e^{\hat{\xi}\theta_{eh_i}})]^T \in \mathcal{R}^6$ と定義する. ただし $e_R(e^{\hat{\xi}\theta}) := \operatorname{sk}(e^{\hat{\xi}\theta})^{\vee} \in \mathcal{R}^3$, $\operatorname{sk}(e^{\hat{\xi}\theta}) := \frac{1}{2}(e^{\hat{\xi}\theta} - e^{-\hat{\xi}\theta})$ である.

2.2 推定偏差システムと制御偏差システム

g

制御偏差に用いた手先からみた参照観測対象の相対 位置姿勢 ghioi は以下のようにして導出される.

$$g_{h_i o_i} = g_{ch_i}^{-1} g_{co} g_{ww_i} \tag{4}$$

(4) 式において, $g_{ch_i} \geq g_{ww_i}$ は既知情報および測定可 能な情報となるので, g_{co} の運動についてつぎに考える. g_{co} は Fig. 1 における同次表現の合成則から

$$g_{co} = g_{wc}^{-1} g_{wo} \tag{5}$$

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、

$$V_{co}^{b} = -\mathrm{Ad}_{(g_{co}^{-1})}V_{wc}^{b} + V_{wo}^{b} = V_{wo}^{b}$$
(6)

のように導かれる ⁷⁾¹. 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, $\operatorname{Ad}_{(g_{ab})} \in \mathcal{R}^{6\times 6}$ は同次表現 g_{ab} の随伴写像である ⁸⁾.

 1 本稿では固定カメラシステムを考えているため $V^b_{wc}=0$ となる.

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 $f \in \mathcal{R}^{2m}$ 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.

$$\bar{V}_{co}^{b} = -\text{Ad}_{(\bar{g}_{co}^{-1})} V_{wc}^{b} + u_{e} = u_{e}$$
(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. ここで、相対位置姿勢の真値 g_{co} と推定値 \bar{g}_{co} の偏

ここで、相対位量要勢の真値 g_{co} と推定値 g_{co} の備 差を、推定偏差 g_{ee} として

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

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 ⁷⁾.

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

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.

推定偏差 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.

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

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. (3) 式より, 制御偏差 g_{eh_i} は推定偏 差 g_{ee} を用いて以下のように表すことができる.

 $g_{eh_i} = g_{h_i d_i}^{-1} g_{ch_i}^{-1} g_{co} g_{ww_i} = g_{h_i d_i}^{-1} g_{ch_i}^{-1} \bar{g}_{co} g_{ee} g_{ww_i}(11)$

(11) 式において, 推定偏差 g_{ee} 以外は既知情報となる ため, g_{ee} が得られれば相対位置姿勢 g_{co} を直接得なく とも制御偏差 g_{eh_i} は求まる.このとき, $-\frac{\pi}{2} \le \theta_{ee} \le \frac{\pi}{2}$ の範囲内で, 以下の関係式が成り立つ³⁾.

$$\xi \theta_{ee} = \frac{\sin^{-1} \|e_R(e^{\xi \theta_{ee}})\|}{\|e_R(e^{\hat{\xi} \theta_{ee}})\|} e_R(e^{\hat{\xi} \theta_{ee}}) \tag{12}$$

したがって、推定偏差ベクトル e_e から推定偏差 g_{ee} が 求められ、制御偏差 g_{eh_i} を導出することが可能となる. (3) 式で定義した制御偏差 g_{eh_i} 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.

$$V_{eh_i}^b = -\mathrm{Ad}_{(g_{eh_i}^{-1})}\mathrm{Ad}_{(g_{h_i d_i}^{-1})}V_{wh_i}^b + V_{wo}^b$$
(13)

3 シンクロ視覚フィードバック制御

前節で構成した推定偏差システムと制御偏差システムのみでも固定カメラ構造の視覚フィードバックシステムは構成できるが、マニピュレータの同調性に対しては考慮されない.工場における製造業や宇宙での組立作業に対して、目標値への追従だけでなく各マニピュレータ間の同調制御を行うことは非常に有効となる⁴⁾. そこで本節では視覚フィードバックシステムに対する同調制御則を提案する.

3.1 シンクロ偏差システム

本節では、同調制御を保証するために必要となるシ ンクロ偏差システムを構成する.はじめに、*i* 番目のマ ニピュレータの手先から観測対象までの相対位置姿勢 $g_{h_io_i} \geq j$ 番目の相対位置姿勢 $g_{h_jo_j}$ の間の偏差とし て、 $g_{eh_{ij}} = (p_{eh_{ij}}, e^{\hat{\xi}\theta_{eh_{ij}}})$ をつぎのように定義する.

$$g_{eh_{ij}} = g_{h_i o_i}^{-1} g_{h_i o_i}, \ (i,j) = (1,2), (2,1)$$
(14)

さらに、位置と回転に対するカップリングゲイン $k_{p_{ij}}$, $k_{R_{ij}}$ と前述した偏差 (14)の要素を用いることで、シンクロ偏差として以下のものを定義する.

$$g_{es_{ij}} = \begin{bmatrix} k_{R_{ij}} e^{\hat{\theta}_{eh_{ij}}} & k_{p_{ij}} p_{eh_{ij}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(15)

他の偏差ベクトルと同様に、シンクロ偏差ベクトルを $e_{s_{ij}} := [p_{e_{s_{ij}}}^T e_R^T (e^{\hat{\xi}\theta_{e_{s_{ij}}}})]^T \in \mathcal{R}^6$ と定義する.

シンクロ偏差システムは、シンクロ制御偏差 g_{esij} を 時間微分することで以下のように導出される.

$$V_{es_{ij}}^{o} = -K_{s_{ij}} \operatorname{Ad}_{(g_{eh_{i}}^{-1})} \operatorname{Ad}_{(g_{h_{i}d_{i}}^{-1})} V_{wh_{i}}^{o} + K_{s_{ij}} \operatorname{Ad}_{(g_{h_{i}o_{i}}^{-1} \cdot g_{h_{j}d_{j}})} \operatorname{Ad}_{(g_{h_{j}d_{j}}^{-1})} V_{wh_{j}}^{b} + K_{s_{ij}} \operatorname{Ad}_{(g_{ww_{i}}^{-1})} \left(I - \operatorname{Ad}_{(g_{h_{i}o}^{-1} \cdot g_{h_{j}o})}\right) V_{wo}^{b} (16)$$

ここで, $K_{s_{ij}} := \text{diag}\{k_{p_{ij}}k_{R_{ij}}I, k_{R_{ij}}^2I\}$ である. 3.2 シンクロ視覚フィードバックシステムと受動性本節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.

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + g_i(q_i) = \tau_i + \tau_{id} \quad (17)$$

 $q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i \in \mathcal{R}^n$ はそれぞれの各関節の角度, 角速度, 角加速度を表し, $\tau_i \in \mathcal{R}^n$ は入力トルク, $\tau_{id} \in \mathcal{R}^n$ はトルク外乱, $M_i \in \mathcal{R}^{n imes n}$ は正定な慣性行列, $C_i \in \mathcal{R}^n$ は遠心力・コリオリカ項, $g_i \in \mathcal{R}^n$ 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 $J_{ib}(q_i) \in \mathcal{R}^{6 \times n}$ を用いることで $V_{w_ih_i}^b = J_{ib}(q_i)\dot{q}_i$ として表される⁸⁾. 一方、手先の 速度の目標値を u_{h_id} とし、マニピュレータの関節角 速度の目標値を \dot{q}_{id} で表すと、 $u_{h_id} = J_{ib}(q_i)\dot{q}_{id}$ と表 すことができる. ここで、関節角速度に関する偏差を $\xi_i := \dot{q}_i - \dot{q}_{id} \in \mathcal{R}^n$ と定義する. この関節角速度偏差 ξ_i 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.

$$\tau_{i} = M_{i}(q_{i})\ddot{q}_{id} + C_{i}(q_{i},\dot{q}_{i})\dot{q}_{id} + g_{i}(q_{i}) + J_{ib}^{T}(q_{i})\mathrm{Ad}_{(g_{h_{i}d_{i}}^{-1})}^{T}e_{h_{i}} + J_{ib}^{T}(q_{i})\mathrm{Ad}_{(g_{h_{j}o_{j}}^{-1})}^{T}K_{s_{ij}}e_{s_{ij}} - J_{ib}^{T}(q_{i})\mathrm{Ad}_{(g_{h_{i}o_{i}}^{-1})}^{T}K_{s_{ji}}e_{s_{ji}} + u_{\xi_{i}}$$
(18)

を考える. \ddot{q}_{id} は関節角加速度の目標値である. u_{ξ_i} 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)、(13)、(16)– (18) 式を用いることで Eye-to-Hand 構造のシンク 口視覚フィードバックシステムは (19) 式のように 表される. ただし、入力、外乱、状態をそれぞれ $u := [u_{\xi_1}^T u_{\xi_2}^T (\operatorname{Ad}_{(g_{h_1d_1}^{-1})} u_{h_1d})^T (\operatorname{Ad}_{(g_{h_2d_2}^{-1})} u_{h_2d})^T u_e^T]^T,$ $w := [\tau_{1d}^T \tau_{2d}^T (V_{wo}^b)^T]^T, x := [\xi_1^T \xi_2^T e_{h_1}^T e_{h_2}^T e_{s_{12}}^T e_{s_{21}}^T e_e^T]^T$ $\dot{e}_e^T]^T$ と定義している. Eye-to-Hand 構造のシンクロ視 覚フィードバックシステムにおいて、状態 $x \in 0$ にと どめておくことで制御目的が達成される.

このシンクロ視覚フィードバックシステム (19) に対 して、つぎのエネルギー関数を用いることで下記に示す 受動性が成立する.

$$V = \frac{1}{2}\xi_1^T M_1 \xi_1 + \frac{1}{2}\xi_2^T M_2 \xi_2 + E(g_{eh_1}) + E(g_{eh_2}) + \frac{1}{k_{R_{12}}}E(g_{es_{12}}) + \frac{1}{k_{R_{21}}}E(g_{es_{21}}) + E(g_{ee}) \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_{1} \\ \dot{\xi}_{2} \\ V_{e_{1}}^{b_{1}} \\ V_{e_{2}}^{b_{1}} \\ V_{e_{2}}^{b_{1}} \\ V_{e_{2}}^{b_{1}} \\ V_{e_{2}}^{b_{2}} \\ V_{e_{3}}^{b_{1}} \\ V_{e_{2}}^{b_{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M_{1}^{-1}C_{1}\xi_{1} + M_{1}^{-1}J_{1b}^{T} \left(\operatorname{Ad}_{(g_{h_{1}d_{1}}^{-1})}^{T}e_{h_{1}} + \operatorname{Ad}_{(g_{h_{1}d_{1}}^{-1})}^{T}K_{s_{12}}e_{s_{12}} - \operatorname{Ad}_{(g_{h_{1}d_{1}}^{-1})}^{T}K_{s_{21}}e_{s_{21}} - \operatorname{Ad}_{(g_{h_{2}d_{2}}^{-1})}^{T}K_{s_{12}}e_{s_{21}} \\ -M_{2}^{-1}C_{2}\xi_{2} + M_{2}^{-1}J_{2b}^{T} \left(\operatorname{Ad}_{(g_{h_{1}d_{2}}^{-1})}^{T}e_{h_{2}} + \operatorname{Ad}_{(g_{h_{1}d_{1}}^{-1})}^{T}K_{s_{21}}e_{s_{21}} - \operatorname{Ad}_{(g_{h_{2}d_{2}}^{-1})}^{T}K_{s_{12}}e_{s_{21}} \\ -Ad_{(g_{h_{1}d_{1}}^{-1})}J_{1b}\xi_{1} \\ -Ad_{(g_{h_{1}d_{2}}^{-1})}J_{1b}\xi_{2} \\ -Ad_{(g_{h_{1}d_{2}}^{-1})}J_{2b}\xi_{2} \\ -K_{12}\operatorname{Ad}_{(g_{h_{1}d_{2}}^{-1})}(J_{1b}\xi_{1} - J_{2b}\xi_{2}) \\ -K_{21}\operatorname{Ad}_{(g_{h_{2}d_{2}}^{-1})}(J_{2b}\xi_{2} - J_{1b}\xi_{1}) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} M_{1}^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{2}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\operatorname{Ad}_{(g_{e_{1}}^{-1})} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\operatorname{Ad}_{(g_{h_{2}d_{2}}^{-1})}(J_{2b}\xi_{2} - J_{1b}\xi_{1}) \\ 0 & 0 & M_{2}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & M_{2}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & K_{s_{12}}\operatorname{Ad}_{(g_{e_{1}}^{-1})} & K_{s_{12}}\operatorname{Ad}_{(g_{h_{2}d_{2}}^{-1})}(J_{2b}\xi_{2} - J_{1b}\xi_{1}) \\ 0 & 0 & K_{s_{12}}\operatorname{Ad}_{(g_{wu}^{-1})} \left(I - \operatorname{Ad}_{(g_{h_{1}}^{-1}, G_{h_{1}}^{-1})} \right) \\ 0 & 0 & M_{2}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & M_{2}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & M_{2}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & K_{s_{12}}\operatorname{Ad}_{(g_{wu}^{-1})} \left(I - \operatorname{Ad}_{(g_{h_{1}}^{-1}, G_{h_{2}}^{-1})} \right) \\ 0 & 0 & K_{s_{12}}\operatorname{Ad}_{(g_{wu}^{-1})} \left(I - \operatorname{Ad}_{(g_{h_{1}}^{-1}, G_{h_{1}}^{-1})} \right) \\ 0 & 0 & K_{s_{21}}\operatorname{Ad}_{(g_{wu}^{-1})} \left(I - \operatorname{Ad}_{(g_{h_{1}}^{-1}, G_{h_{2}}^{-1}) \right) \\ 0 & 0 & 0 & K_{s_{21}}\operatorname{Ad}_{(g_{wu}^{-1})} \right) \right] w (19)$$

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

補題 1 外乱がない (すなわち w = 0) とする. このとき, 出力を

 $\nu := NK_s x$ ГĪ 0 0 0 0 0 0 0 $I \quad 0 \quad 0$ 0 0 0 $N = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -I & 0 & -\mathrm{Ad}_{(g_h)}^T \end{bmatrix}$ 0 - 1 $(2^{o_1} \cdot g_{h_1 d_1})$ $-\mathrm{Ad}^{I}_{(g_{h_1o_1}^{-1}}$ $0 \ 0 \ 0 \ -I$ $\mathrm{Ad}^{T}_{(g_{eh_2}^{-1})}$ 0 $\cdot g_{h_2d_2})$ |0|0 0 $K_s = \text{diag}\{I, I, I, I, K_{s_{12}}, K_{s_{21}}, I\}$

とするとき,シンクロ視覚フィードバックシステム (19) の入出力間に ₂₇

$$\int_0^1 u^T \nu d\tau \ge -\beta_0, \ ^\forall T > 0 \tag{21}$$

が成り立つ. ただし β_0 はある非負の定数である.

3.3 シンクロ視覚フィードバック制御則と安定性

シンクロ視覚フィードバックシステム(19)に対し、補 題1の受動性に基づくことで、外乱がない場合に平衡 点 *x* = 0 を安定とする制御則として次式を提案する.

$$u = -K\nu = -KNK_s x$$
(22)
$$K := \text{diag}\{K_{\xi_1}, K_{\xi_2}, K_{h_1}, K_{h_2}, K_e\}$$

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 外乱がない (w = 0) とき, シンクロ視覚フィー ドバックシステム (19) と (22) 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.

定理1は,(20)式のエネルギー関数を Lyapunov 関 数候補とすることで証明される. 推定偏差と制御偏差 の両システムのみで構成される従来法³⁾を複数台のマ ニピュレータが扱えるように単純に発展させた制御則 に対して,本手法ではシンクロ偏差を考慮しているため に,同調性が必要なタスクにおいて性能が向上すると考 えられる. 視覚フィードバックシステムでは観測対象 の動きが未知なために,角度空間で目標軌道を与えるこ とは基本的に難しい. そのため,文献(4)-(6)では角度 空間で定義しているシンクロ偏差も,本稿では作業空間 で定義している. 紙面の都合上省略するが,外乱が存在 する場合には外乱抑制問題を考えることで L₂ ゲイン 制御性能解析を行うことが可能である⁷⁾.

4 シミュレーション

本稿で提案されているシンクロ視覚フィードバック 制御則とシンクロ要素を考慮しない制御則との性能比 較をシミュレーションにより行う.本稿では 3 次元の 視覚フィードバック制御則を提案したが、シミュレー ションでは、簡単のために水平 2 自由度マニピュレータ である SICE-DD アームを考える.両制御則を比較す るためゲイン K に対しては同じゲインを設定したが、 カップリングゲインのみシンクロ制御の場合は $k_{p_{12}} = k_{R_{12}} = k_{R_{21}} = 0.75$ 、同調を考慮しない制御の 場合には $k_{p_{12}} = k_{R_{21}} = k_{R_{21}} = 0$ とした.



Fig. 3: Hand control error e_{h_1} (Dashed) and e_{h_2} (Dotted), and the synchronization error $e_{s_{21}}$ (Solid) (Left: proposed method, Right: non-synchronized method)

Fig. 3 に二つの制御則を比較したシミュレーション 結果を示す. Fig. 3 は 3 次元空間中での x, y 軸の位置 偏差と z 軸の回転偏差を示す. 破線と点線が制御偏差 e_{h_1}, e_{h_2} を, 実線がシンクロ偏差 $e_{s_{21}}$ をそれぞれ表し ており, 左図が本稿で提案した同調制御則, 破線が同調 を考慮しない制御則の場合である.

最初の偏差の減り方からわかるように、提案した同調 制御の方は e_{h_1} , e_{h_2} よりもシンクロ偏差 $e_{s_{21}}$ の方が早 く偏差が収束していることがわかる.

一方,本シミュレーションでは2秒時に1台目のマ ニピュレータにだけ外乱トルク₇₁を加えている.2秒 以降の結果より,外乱が入った場合,偏差の大きさの最 大値は同調制御を考えている方が小さくなっているこ とがわかる.これは同調制御の利点として考えられる.

5 おわりに

本稿では視覚フィードバックシステムに対する同調 制御として、二台のマニピュレータからなる受動性に 基づくシンクロ視覚フィードバック制御則を提案した. 提案した制御則に対して安定性解析を行い、シミュレー ションにて制御則の有効性を示した.

参考文献

- F. Chaumette and S. Hutchinson: "Visual Servoing and Visual Tracking," B. Siciliano and O. Khatib (Eds.), Springer Handbook of Robotics, Springer-Verlag, 563/583 (2008)
- V. Lippiello, B. Siciliano and L. Villani: "Positionbased Visual Servoing in Industrial Multirobot Cells using a Hybrid Camera Configuration," *IEEE Trans. Robotics*, 23-1, 73/86 (2007)
- 3) T. Murao, H. Kawai and M. Fujita: "Predictive Visual Feedback Control with Eye-in/to-Hand Configuration via Stabilizing Receding Horizon Approach," *Proc. of the 17th IFAC World Congress on Automatic* Control, 5341/5346 (2008)
- 4) D. Sun and J. K. Mills: "Adaptive Synchronized Control for Coordination of Multirobot Assembly Tasks," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 18-4, 498/510 (2002)
- A. Rodriguez-Angeles and H. Nijmeijer: "Mutual Synchronization of Robots via Estimated State Feedback: A Cooperative Approach," *IEEE Trans. Con*trol Systems Technology, **12**-4, 542/554 (2004)
- 6) S.-J. Chung and J.-J. E. Slotine: "Cooperative Robot Control and Synchronization of Lagrangian Systems," *Proc. of the 46th IEEE Conference on Decision and Control*, 2504/2509 (2007)
- 7) M. Fujita, H. Kawai and M. W. Spong: "Passivitybased Dynamic Visual Feedback Control for Three Dimensional Target Tracking: Stability and L₂-gain Performance Analysis," *IEEE Trans. Control Systems Technology*, **15**-1, 40/52 (2007)
- R. Murray, Z. Li and S. S. Sastry: A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, CRC Press (1994)