

受動性に基づく可動カメラ構造の視覚フィードバック制御

村 尾 俊 幸*・河 合 宏 之**・藤 田 政 之***

Passivity-based Control of Visual Feedback Systems with Movable Camera Configuration

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

Abstract

This paper deals with control of visual feedback systems with a movable camera configuration. This configuration consists of a robot manipulator and a camera that is attached to the end-effector of another robot manipulator. This system which can be interpreted the visual feedback system with an eye-in-hand configuration and a fixed camera one as a special case, can enlarge the field of view. Firstly the visual feedback system with an eye-to-hand configuration is given with the fundamental representation of a relative rigid body motion. Next, we construct the visual feedback system with a movable camera configuration by combining the camera control error system. Finally, we derive the passivity of the visual feedback system. Based on the passivity, stability and L_2 gain performance analysis are discussed.

Keywords: Visual feedback control, Robot control, Passivity, Lyapunov stability, L_2 gain performance

1. はじめに

近年、視覚フィードバック制御は、工場だけでなく医療分野などへも応用され始めており、より複雑なシステムや幅広い分野へ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、よく知られているように二つの制御方法と二つのカメラ構造に大別できる。すなわち、制御方法は位置ベース法と画像ベース法、カメラ構造はカメラがハンドの手先に取り付けられた Eye-in-Hand 構造と、カメラとハンドが別々に配置された固定カメラ構造である[1][2]。

さらに、Eye-in-Hand 構造では作業スペースを全て観察するにはカメラ視野が限定され、固定カメラ構造では作業スペースを探索するには不十分であるという理由から、二つのカメラ構造を発展させたシステムが研究され始めている。その中の一つに、固定カメラ構造のようにカメラとハンドが別々に配置されているが、カメラが固定されているとは限らない Eye-to-Hand 構造が挙げられる（固定カメラ構造はこの特殊ケースとなる）。実際、工場では溶接作業や車の塗装のような散乱した場所における繰り返しの多い作業が頻繁に行われており、可動カ

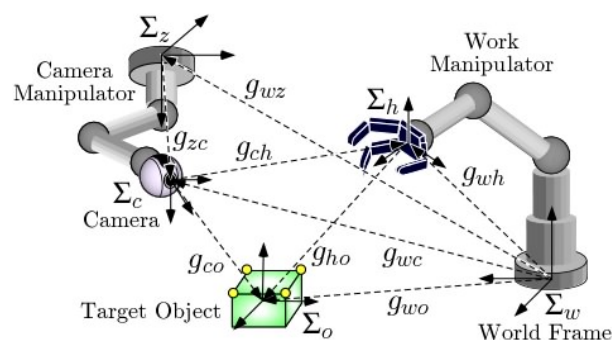


図1 可動カメラ構造の視覚フィードバックシステム

メラを用いた Eye-to-Hand 構造により積極的に視野を得る手法が効果的となる[3]。また、医療分野では穿刺手術マニピュレータなどのメディカルロボットの開発が近年特に望まれており、作業するマニピュレータの位置制御を行いながら、視野を確保するために腹腔鏡などを用いて広範囲をモニタリングする必要が出てくる[4]。このような可動カメラを用いた研究としては、可視度を用いた可動カメラの位置決め[3]、カメラ視野などの指標を用いた制御[5]、リアルタイム性を強く意識した手法[6]などが挙げられる。しかし、これらの論文は安定性や観測対

Received on May 10, 2007

*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

象が運動する場合における議論も十分になされていない。

そこで本研究では, 図 1 に示すような可動カメラ構造の視覚フィードバックシステムに対して, 手先にカメラを取り付けたマニピュレータ (カメラマニピュレータ) と, 作業を行うマニピュレータ (作業マニピュレータ) を一つのシステムとして捉え, 我々が提案している Eye-in-Hand 構造[7]と固定カメラ構造[8]の視覚フィードバックシステム同様, 受動性に基づくことで安定性や制御性能解析について議論する。

本論文の構成は以下のとおりである。2 節では固定カメラ構造も含まれる Eye-to-Hand 構造の視覚フィードバックシステムについて述べる。3 節では, カメラ制御偏差システムを組み合わせることにより可動カメラ構造の視覚フィードバックシステムを構成した後に, 制御則を提案し安定性と L_2 ゲイン制御性能解析を行う。最後に 4 節でまとめを行う。

2. Eye-to-Hand 構造の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, カメラマニピュレータと作業マニピュレータの二台のマニピュレータを有し, 五つの座標系によって表される視覚フィードバックシステムについて考える。図中の五つの座標系をそれぞれ作業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 , カメラマニピュレータの台座に台座座標系 Σ_z , 手先にカメラ座標系 Σ_c また観測対象に観測対象座標系 Σ_o を定義する。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 $e^{\hat{S}\theta_{ab}}$ から構成され, 4×4 行列として以下のように定義される。

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

例えば, 基準座標系 Σ_w からみた手先座標系 Σ_h の位置姿勢は g_{wh} となる。

本システムにおいて, g_{wh} , g_{zc} は各マニピュレータの関節角度などから得られるとする。また各マニピュレータの台座は動かないことから g_{wz} が同定可能である。さらに, 同次表現の合成則から g_{wc} , g_{ch} を求めることが可能であり, 以上の五つの位置姿勢が既知情報となる。逆

に, 観測対象が未知な運動をするために, g_{wo} , g_{ho} , g_{co} は未知情報となる。

本節では準備として Eye-to-Hand 構造の視覚フィードバックシステムについて議論する。Eye-to-Hand 構造の制御目的は手先座標系からみた観測対象の相対位置姿勢 g_{ho} をその目標位置姿勢 g_{hd} に常に一致させておくことである。しかし前述したように, 手先座標系からみた観測対象の相対位置姿勢 g_{ho} を直接観測することはできない。そこでまずはカメラからみた観測対象 g_{co} の運動について考える。

カメラ座標系からみた観測対象の相対位置姿勢 g_{co} は

$$g_{co} = g_{wc}^{-1} g_{wo} \quad (2)$$

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(2)式を時間微分することで, g_{co} の基本式として

$$\dot{V}_{co}^b = -Ad_{(g_{co}^{-1})} V_{wc}^b + V_{wo}^b \quad (3)$$

のように導かれる。ここで, V_{ab}^b 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[9]。この(3)式は厳密ではないが, カメラ座標系からみた観測対象の相対速度 V_{co}^b がカメラの速度 V_{wc}^b と観測対象の速度 V_{wo}^b の差で表されることを意味している。(3)式において, $V_{wc}^b = 0$ と考えると固定カメラ構造となる。導出の詳細は文献[8]を参照。

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。本システムでは一台のピンホールカメラから画像特徴量を得ることを考えている。しかし, カメラから得られる視覚情報 f は相対位置姿勢 g_{co} を含んではいるが, 二次元情報であるため直接 g_{co} を得ることはできない。そこで, 相対位置姿勢の推定値 $\bar{g}_{co}$ を得るために, 非線形オブザーバを構成する。(3)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。

$$\dot{\bar{V}}_{co}^b = -Ad_{(\bar{g}_{co}^{-1})} V_{wc}^b + u_e \quad (4)$$

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と推定値の偏差 g_{ee} を

$$g_{ee} := \bar{g}_{co}^{-1} g_{co} \quad (5)$$

と定義する。さらに, この推定偏差に対する推定偏差ベ

クトルを $e_e := [p_{ee}^T \ e_R^T(e^{\hat{\theta}_{ee}})]^T$ と定義する. ただし $e_R(e^{\hat{\theta}_{ee}}) := sk(e^{\hat{\theta}_{ee}})^\vee$, $sk(e^{\hat{\theta}_{ee}}) := \frac{1}{2}(e^{\hat{\theta}_{ee}} - e^{-\hat{\theta}_{ee}})$ である. 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 $\bar{f}$, さらに画像ヤコビアン¹の擬似逆行列 $J^+(\bar{g}_{co})$ を用いることで

$$e_e = J^+(\bar{g}_{co})(f - \bar{f}) \quad (6)$$

として導かれる[8]. 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.

剛体運動の基本式(3)と相対位置姿勢の推定モデル(4)を用いて, 推定偏差システムを構成する. (5)式を時間微分し (3), (4)式を用いることで, 推定偏差システムとして

$$\dot{V}_{ee}^b = -Ad_{(g_{ee}^{-1})} u_e + V_{wo}^b \quad (7)$$

が導出される.

2.3 手先制御偏差システム

つぎに実際に制御目的を達成するための手先制御偏差について述べる. 手先座標系からみた観測対象の相対位置姿勢 g_{ho} も, g_{co} が直接求められないために得ることができない. したがって, その推定値 $\bar{g}_{ho}$ を求めることを考え, $\bar{g}_{co}$ を用いてつぎのように表す.

$$\bar{g}_{ho} := g_{ch}^{-1} \bar{g}_{co} \quad (8)$$

相対位置姿勢 $\bar{g}_{ho}$ の基本式は, 手先の速度を V_{wh}^b とすると, (8)式より以下の式のように導かれる.

$$\dot{\bar{V}}_{ho}^b = -Ad_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} V_{wh}^b + u_e \quad (9)$$

ここで, 相対位置姿勢の推定値 $\bar{g}_{ho}$ と手先座標系からみた観測対象の相対位置姿勢の目標値 g_{hd} との偏差を手先制御偏差 g_{eh} として

$$g_{eh} := g_{hd}^{-1} \bar{g}_{ho} \quad (10)$$

で定義する. また, 推定偏差ベクトルと同様に, 手先制御偏差ベクトルを $e_h := [p_{eh}^T \ e_R^T(e^{\hat{\theta}_{eh}})]^T$ と定義する.

導出した相対位置姿勢 $\bar{g}_{ho}$ の運動モデルおよび相対位置姿勢の目標値を用いて, 手先制御偏差システムを構成する. (7)式の推定偏差システムの導出と同様に, (10)式を時間微分することで, 手先制御偏差システムは

$$\dot{V}_{eh}^b = -Ad_{(\bar{g}_{ho}^{-1})} V_{wh}^b + u_e - Ad_{(g_{eh}^{-1})} V_{hd}^b \quad (11)$$

と導出される. ここで V_{hd}^b は手先座標系からみた観測対

象の相対位置姿勢 g_{ho} の目標速度である.

2.4 Eye-to-Hand 構造の視覚フィードバックシステム

(7)式の推定偏差システムと(11)式の手先制御偏差システムを組み合わせることで, Eye-to-Hand 構造の視覚フィードバックシステムは次のように表すことができる.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{eh}^b \\ \dot{V}_{ee}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Ad_{(g_{eh}^{-1})} & I \\ 0 & -Ad_{(g_{ee}^{-1})} \end{bmatrix} u_{he} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} V_{wo}^b \quad (12)$$

で表される. ただし,

$$u_{he} := \begin{bmatrix} Ad_{(g_{hd}^{-1})} V_{wh}^b + V_{hd}^b \\ u_e \end{bmatrix} \quad (13)$$

で定義される. Eye-to-Hand 構造の動的視覚フィードバックシステムにおける制御目的は, 運動する観測対象に作業マニピュレータの手先を追従させることであり, 状態 e_h および e_e を 0 にとどめておくことで制御目的が達成される.

(注意) 本節ではカメラの動きについては議論していない. カメラの動きを考えない場合, Eye-to-Hand 構造の視覚フィードバックシステム(12)は, 文献[8]の固定カメラ構造の視覚フィードバックシステムと一致する.

3. 可動カメラ構造の視覚フィードバック制御

前節では Eye-to-Hand 構造の視覚フィードバック制御について述べてきた. しかし前節のシステムでは, カメラ速度 V_{wc}^b を入力として考慮していなかったため, 観測対象が視野から外れてしまう可能性がある. 例えば文献[8]では $V_{wc}^b = 0$ とした Eye-to-Hand 構造の特殊ケースである固定カメラ構造に対して議論した. 一般的に固定カメラ構造は Eye-in-Hand 構造に比べて大域的な視野を得ることができるとされているものの, 観測対象が大きく動くようなシステムにおいてはより広いカメラ視野が必要となる.

本節では可動カメラの利点を活かし, カメラ速度 V_{wc}^b を決め, システムの入力とすることでカメラが観測対象を視野から外さないようにする. そこで図 1 に示すように, カメラをマニピュレータの手先に取り付け制御することを考える.

3.1 カメラ制御偏差システム

本論文の制御目的は前述の g_{ho} を g_{hd} に常に一致させ

この補題は、(16)式の視覚フィードバックシステムが受動性を有していることを示唆している。この可動カメラ構造の視覚フィードバックシステム(16)は、作業マニピュレータを考慮しないとき、Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバックシステムとみなすことができる。具体的には、手先速度 $V_{wh}^b = 0$ 、基準座標系からみた台座の相対位置姿勢 $g_{wz} = I$ 、さらに手先制御偏差 e_h と作業マニピュレータを考慮しない特別な場合が、文献[7]で示した Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバックシステムとなる。また 2 節より固定カメラ構造の視覚フィードバックシステム[8]が含まれていることは明らかである。したがって可動カメラ構造の視覚フィードバックシステム(16)は Eye-in-Hand 構造と固定カメラ構造という一般的によく知られている二つのカメラ構造の視覚フィードバックシステムを特殊な場合として含んだ形となる。

3.4 視覚フィードバック制御則と安定性

視覚フィードバックシステム(16)に対し、観測対象が静止している(すなわち $V_{wo}^b = 0$)場合に平衡点 $e = 0$ を安定とする制御則として次式を提案する。

$$u_{hce} = -K_{hce} v_{hce}, \quad K_{hce} := \text{diag}\{K_h, K_c, K_e\} \quad (24)$$

$K_h := \text{diag}\{k_{h1}, \dots, k_{h6}\}$ 、 $K_c := \text{diag}\{k_{c1}, \dots, k_{c6}\}$ と $K_e := \text{diag}\{k_{e1}, \dots, k_{e6}\}$ は x 軸、 y 軸、 z 軸の並進と回転における手先制御偏差とカメラ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。

このとき、補題 1 で示した視覚フィードバックシステムの受動性に基づくことで、安定性に関してつぎの定理が導かれる。

定理 1 観測対象が静止している (すなわち $V_{wo}^b = 0$) とし視覚フィードバックシステム(16)と(24)式の入力で構成される閉ループ系の平衡点 $e = 0$ は漸近安定である。(証明) (21)式のエネルギー関数を Lyapunov 関数候補とすると、(16)、(24)式の解軌道に沿った時間微分は(22)式より

$$\dot{V}_{hce} = u_{hce}^T v_{hce} = -e^T N_{hce}^T K_{hce} N_{hce} e \quad (25)$$

と導かれる。ゲイン K_h, K_c, K_e の正定性より行列 K_{hce} が正定であり、 N_{hce} が正則であるため、システムの平衡点 $e = 0$ は漸近安定となる。□

定理 1 では、カメラマニピュレータと作業マニピュレ

ータを一つのシステムとして含めた可動カメラ構造の視覚フィードバックシステムに対し、Lyapunov の安定定理によりその安定性を示した。この安定性解析は補題 1 で示した受動性に基づいて行われている。

3.5 L_2 ゲイン制御性能解析

本節では観測対象が運動している場合に、観測対象の動きを外乱とみなし、外乱抑制問題を考えることで L_2 ゲイン制御性能解析を行う。

ここで、正のスカラーの定数 k_c と k_e を用いることによって、 $K_c = k_c I$ 、 $K_e = k_e I$ とゲインを定義しなおす。また、ある正の数 γ を用いてつぎの条件を与える。

$$K_h - \frac{1}{2}I - \frac{(2k_c - 1)l}{2k_c - 1 - 2l}I > 0 \quad (26)$$

$$k_c - \frac{1}{2} - l > 0 \quad (27)$$

$$k_e - \frac{1}{2\gamma^2} - \frac{1}{2} > 0 \quad (28)$$

ただし

$$l = \frac{k_e(\gamma^2 + 1)}{\gamma^2(2k_e - 1) - 1} \quad (29)$$

とする。このとき、制御性能解析に関するつぎの定理が示される。

定理 2 与えられた γ に対して、(26)～(28)式を満たすようにゲイン K_h, k_c, k_e を選ぶとき、(16)、(24)式で構成される視覚フィードバックシステムは γ 以下の L_2 ゲインを有する。

紙面の都合上証明は省略するが、(21)式のエネルギー関数を蓄積関数としてみなすことで、定理 2 は証明される。

この制御性能解析では観測対象の運動を外乱としてとらえているために、 γ が小さいコントローラであれば観測対象の運動が状態に与える影響がより少ないことを示している。本論文では、 H_∞ 制御における最も基本となる外乱抑制問題を考えたが、適切な一般化プラントを構成することで、外乱抑制問題以外にも拡張可能である。

4. おわりに

本論文では、二台のマニピュレータを用いた可動カメラ構造の 3 次元視覚フィードバックシステムを構成し

た. ロボットの作業スペースをより広げるために, カメラを固定させずに可動カメラを用いた本システムは, Eye-in-Hand 構造と固定カメラ構造の両構造を特殊な場合として含んでいる. 視覚フィードバックシステムが有する受動性に基づいて制御則を提案し, Lyapunov の安定定理により安定性解析を行った. また, 観測対象が運動する場合に外乱抑制問題を考えることで, L_2 ゲイン制御性能解析を行った.

参考文献

- [1] S. Hutchinson, G. D. Hager and P. I. Corke, "A Tutorial on Visual Servo Control," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 5, pp. 651-670, 1996 (10).
- [2] 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).
- [3] R. Sharma and S. Hutchinson, "Motion Perceptibility and its Application to Active Vision-based Servo Control," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 5, pp. 651-670, 1996 (10).
- [4] 下山 勲ら, "ロボットフロンティア," 岩波書店, 2005.
- [5] B. J. Nelson and P. K. Khosla, "Visually Guided Manipulation using Active Camera-Lens Systems," *Proc. of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 437-442, 1997 (4).
- [6] A. Muis and K. Ohnishi, "Eye-to-Hand Approach on Eye-in-Hand Configuration within Real-Time Visual Servoing," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol. 10, No. 4, pp. 404-410, 2005 (12).
- [7] 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).
- [8] 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 (4).
- [9] R. Murray, Z. Li and S. S. Sastry, "A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation," CRC Press, 1994.