

SICE 標準ロボットアームによる視覚フィードバック制御

河合 宏之* · 村尾 俊幸* · 藤田 政之*
* 金沢大学

Visual Feedback Control on SICE Direct Drive Arm

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

In this paper, we consider the vision-based robot control for the three dimensional target tracking. The construction and the implementation of the visual feedback system are shown by combining SICE-DD arm and a vision system with software for control design. Experimental results are reported to confirm the effectiveness of the proposed visual feedback control law.

1 はじめに

視覚フィードバック制御とは、ロボットマニピュレータをはじめとするダイナミカルシステムに対して、視覚情報をフィードバックループに組み込んだ制御のことである¹⁾。視覚システムは豊富で多様な情報を有し、かつ手軽であるため、センサとしてその重要性が増してきており、近年では DNA を細胞へ注入するロボットの自動化のために、視覚フィードバック制御をシステムに組み込んだ研究も進められている²⁾。しかしながら、ロボットの視覚フィードバック制御における多くの従来研究では、ロボットはゆっくりと動作すると仮定されておりマニピュレータダイナミクスは考慮されていない³⁾。

本稿では、マニピュレータダイナミクスを考慮した Eye-in-hand 構造の 3 次元視覚フィードバック制御⁴⁾を考え、SICE-DD アーム⁵⁾での視覚フィードバックシステムの構成と実装について述べる。そして、実験により提案する制御則の有効性を検証する。

2 視覚フィードバックシステム

マニピュレータダイナミクスは次式で表される⁵⁾。

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

q は関節角度、 τ は入力トルク、 $M(q)$ 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。ここで、角速度の目標値を \dot{q}_d として、その偏差ベクトルを $\xi := \dot{q} - \dot{q}_d$ と定義する。

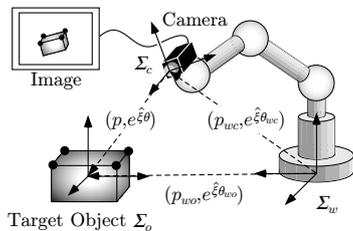


Fig. 1: 視覚フィードバックシステム

Eye-in-hand 構造の視覚フィードバックシステムを Fig. 1 に示す。基準座標系を Σ_w 、カメラ座標系を Σ_c 、観測対象座標系を Σ_o とする。また Σ_c から見た Σ_o の位置と姿勢をそれぞ

れ $g = (p, e^{\xi\theta})$ とする。視覚フィードバックシステムの制御目的は、マニピュレータの手先を運動する観測対象に追従させることである。したがって、相対位置姿勢 $g = (p, e^{\xi\theta})$ を目標値 $g_d = (p_d, e^{\xi\theta_d})$ と一致させられれば、制御目的は達成される。しかしながら、真値 g はカメラから直接得られないため、オブザーバを構成する。そして、推定値 $\bar{g} = (\bar{p}, e^{\bar{\xi}\theta})$ と目標値 $g_d = (p_d, e^{\xi\theta_d})$ との偏差 e_c と真値 g と推定値 \bar{g} の偏差 e_e を 0 にすることで制御目的を達成させる。ただし、マニピュレータダイナミクスを考慮しているため、 e_c と e_e を 0 にするためには、 ξ も 0 にする必要がある。

ここで新たな制御入力を u_ξ として、次の入力トルクを考える。

$$\tau = M(q)\ddot{q}_d + C(q, \dot{q})\dot{q}_d + g(q) + J_b^T(q)\text{Ad}_{(g_d^{-1})}^T W_c e_c + u_\xi \quad (2)$$

$J_b(q)$ はマニピュレータヤコビアン、 Ad は随伴写像と呼ばれる演算子である⁶⁾。 W_c は制御偏差 e_c と推定偏差 e_e のバランスをとるための重み行列のひとつである。

(1)(2) 式を含む視覚フィードバックシステムに対して、つぎの視覚フィードバック制御則を考える⁴⁾。

$$u = - \begin{bmatrix} K_\xi & 0 & 0 \\ 0 & K_c & 0 \\ 0 & 0 & K_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & -\text{Ad}_{(g_d^{-1})}^T W_c & 0 \\ 0 & \text{Ad}_{(e^{-\xi\theta_{ec}})} W_c & -W_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi \\ e_c \\ e_e \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで K_ξ, K_c, K_e はゲインである。 W_e は W_c と同様に重み行列のひとつである。この制御則の安定性と L_2 ゲイン制御性能解析については文献⁴⁾で議論している。

3 SICE-DD アームによる実験

3.1 実験環境

提案する制御則を SICE-DD アームに実装し検証実験をおこなう。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] であり、動作範囲は、 $q_1 = \pm 90^\circ$ 、 $q_2 = \pm 120^\circ$ である。カメラは PULNiX 社 TM-7EX の CCD カメラ (30 [fps]) 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 を利用して観測対象物上にある 4 点の中心点をそれぞれ算出する。画像処理とデータ解析をおこなう Host PC の CPU は Pentium 4, 2.53GHz である。

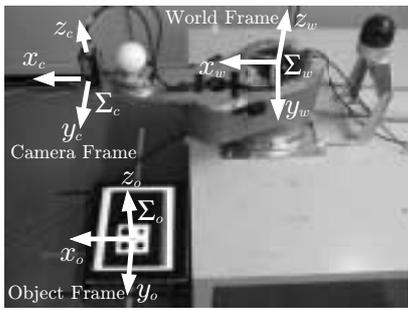


Fig. 2: SICE-DD アームの座標系

メモリは 512MB である。制御則を実装するデジタル制御装置は dSPACE 社の DS1005 (PowerPC 750 processor, 480MHz) を用いており、サンプリング周期は 1 [ms] である。また、制御則は Matlab と Simulink により設計し、dSPACE のソフトウェアである ControlDesk により DSP に実装する。観測対象は、位置と姿勢を決定可能にするために Matlab と VRML を用いて構成する。Fig. 2 に SICE-DD アームにおける視覚フィードバックシステムの座標系を示す。

3.2 実験結果

本実験において、目標位置姿勢は $p_d = [0 \ 0 \ -0.9]^T$, $e^{\xi \theta_d} = I$ とし、マニピュレータの初期角度は $q_1 = 30^\circ$, $q_2 = -30^\circ$ とした。観測対象は Fig. 3, 4 に示すように、 $0 \leq t \leq 4$ の間は直線運動させ、 $4 \leq t \leq 9.6$ の間は 8 の字運動をさせる。

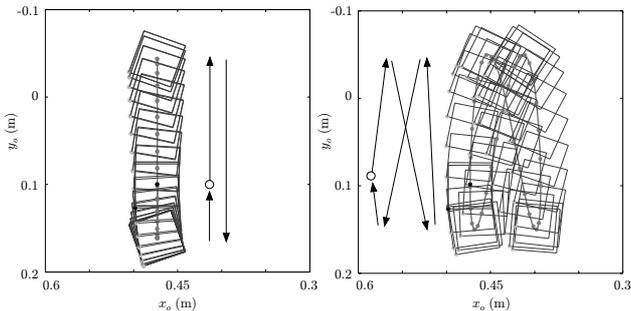


Fig. 3: 直線運動

Fig. 4: 8 の字運動

また重み行列を $W_c = 0.1I$, $W_e = I$ とした。ゲインは $K_\xi = \text{diag}\{10, 10\}$ とし、 K_c , K_e は以下の 2 種類を用いる。

Gain A : $K_c = \text{diag}\{60, 60, 30, 30, 30, 60\}$, $K_e = 20I_6$

Gain B : $K_c = \text{diag}\{120, 120, 60, 60, 60, 120\}$, $K_e = 30I_6$

まず、重み行列 W_c と W_e の有効性を示すために、重み行列なし ($W_c = W_e = I$) とした場合と重み行列を考えた場合について、観測対象の特徴点のうちの 2 点の x, y 座標のカメラからの測定値 (破線) と推定値 (実線) をそれぞれ Fig. 5, 6 に示す。重み行列を含む場合のほうが、同じゲインを用いても推定偏差が少ないことから、重み行列 W_c と W_e が推定のための設計パラメータである考えられる。

Fig. 7 に状態 ξ , e_c , e_e を含む被制御出力のユークリッドノルムを示す。ゲイン A のグラフは上部に、ゲイン B のグラフを下部に示す。Fig. 7 の実験結果において、観測対象が静止した後、偏差が 0 付近に収束している。この結果によりシステムが漸近

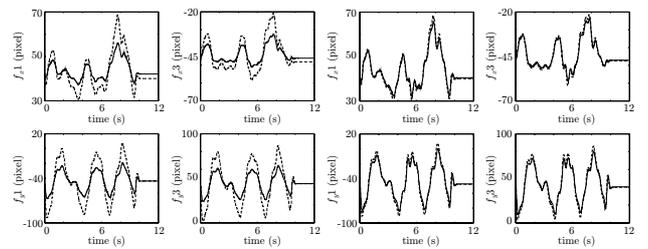


Fig. 5: 特徴量の推定値 (重み行列なし)

Fig. 6: 特徴量の推定値 (重み行列あり)

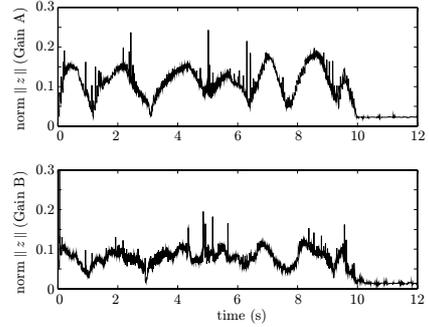


Fig. 7: 被制御出力のユークリッドノルム

安定であることが確認できる。また、Gain A は $\gamma = 0.62$, Gain B は $\gamma = 0.23$ であり、Fig. 7 の実験結果より γ が外乱抑制レベルを表す指標となっていることが確認できる。ただし、観測対象が静止した後に定常偏差が残ってしまっており、これについては今後の課題である。

4 おわりに

本稿では、マニピュレータダイナミクスを考慮した Eye-in-hand 構造の 3 次元視覚フィードバック制御を考え、SICE-DD アームでの視覚フィードバックシステムの構成と実装について述べた。また、実験により提案する制御則の安定性と制御性能解析および重み行列の有効性を検証した。

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.
- 2) 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.
- 3) R. Kelly, R. Carelli, O. Nasisi, B. Kuchen and F. Reyes, "Stable Visual Servoing of Camera-in-Hand Robotic Systems," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 5, no. 1, pp. 39–48, 2000.
- 4) 河合, 村尾, 藤田, "受動性に基づく動的視覚フィードバック制御の安定性と L_2 ゲイン制御性能解析," 第 32 回制御理論シンポジウム資料 (掲載予定), 2003.
- 5) 小林ら, *ロボット制御の実際*, コロナ社, 1997.
- 6) R. Murray, Z. Li and S. S. Sastry, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press, 1994.