

ハンドアイ 3-D ビジュアルサーボの動的安定性の改善と検証

宋 薇 (福井大学) 見浪 譲 (福井大学)

Improvement and Verification of Hand-eye 3-D Visual Servoing Stability

*Wei Song (University of Fukui), Mamoru Minami (University of Fukui)

Abstract— This paper deals with visual servoing to a 3-D target object (6 degree of freedom). We propose a motion-feedforward (MFF) method to improve visual recognition dynamics, by compensating the negative effects on recognition from the disturbed hand-eye motion during visual servoing of the robot manipulator. Step response experiment of visual servoing to a static object will be performed to show a good ability of our visual servoing system, comparing with the other researches. Moreover, we will conduct an experiment of visual servoing to a moving object that is fixed on a rotating mobile robot. It can be verified that the stability of visual servoing system could be improved by these experiments.

Key Words: visual servoing(6 DoF), hand-eye motion compensation

1. 緒言

物体認識を応用するロボットビジョンの分野では、ビジュアルサーボと呼ばれる画像処理結果をロボットのフィードバック情報として用いる運動制御が最近注目されている [1]。Fig.1 に簡単なフィードバック回路を示す。よく知られたことではあるが、フィードバック情報の重要性について以下に示す。出力 Y の変化を dY とすると、

$$\frac{dY}{Y} = \frac{1}{1 + CSH} \frac{dS}{S} \quad (1)$$

により、もし $CSH \gg 1$ ならば、 S の変化はあまり出力に影響しないことになる。次に、 H が dH だけ変化したときの出力 Y の変化は式

$$\frac{dY}{Y} = -\frac{CSH}{1 + CSH} \frac{dH}{H} \quad (2)$$

になる。 $CSH \gg 1$ ならば、つぎのように近似してもよい。

$$\frac{dY}{Y} \approx -\frac{dH}{H} \quad (3)$$

このことから、コントローラのゲインを上げても H の変化は直接出力に影響を及すことがわかる。 H はビジュアルサーボシステムでは認識系であり、 dY を減少させるには dH を小さくする以外に方法がないことが分かる。式 (3) から認識系の応答特性や精度を向上させることができがビジュアルサーボの制御性能を考える上で重要なことが分かる。一方、Fig.1 に示すように、認識系はハンドアイの位置 / 姿勢運動に直接影響を受けるつまり、ハンドアイの運動は認識系の性能を下げるこれが原因で、 dY が増大し、増大した dY が dH をさらに増加させる不安定な運動が起こる可能性がある。この問題点に関して、本報では、ビジュアルサーボ時のロボットの動きを認識部にフィードフォワードすることによって、認識系の特性はハンドアイの位置/姿勢の運動に影響されないという特徴を持つ Motion-FeedForward (MFF) と呼ぶ補償方法を提案する。この結果、 dH が減少し、サーボ系全体の安定性、サーボ追従特性の向上が期待される。

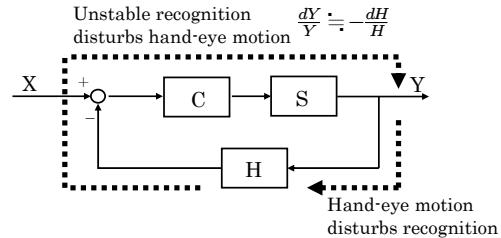


Fig.1 Feedback system

ハンド・アイシステムを用いるビジュアルサーボは目標値入力の違いにより位置ベース法 (position based method) と特徴ベース法 (image based method) の二つに大別される [1]。位置ベース法は、カメラにより目標物体の三次元位置 / 姿勢をカメラ座標系で計測し、それを座標変換により作業座標系における目標位置 / 姿勢に変換して、ロボットのコントロールにより手先の位置 / 姿勢を目標位置 / 姿勢に制御する方法である。特徴ベース法は画像の特徴量を直接フィードバックする制御法である。これは、画像ヤコビアンと呼ばれる、関節の変分から特徴量の変分への関係を用いて関節速度指令を生成する。位置ベース法と特徴ベース法のそれぞれのメリットやデミリットについては Table 1 にまとめている。位置ベース法と比べると、運動学を使わず、画像ヤコビアンを用いた特徴ベース法のほうが運動学の計算時間が不用であり、カメラやロボットの特性の干渉を受けないという利点がある。これに対して、位置ベース法のほうが運動学を使って前述の MFF 法を利用できるという利点がある。MFF 法はハンドアイの運動に影響されたカメラ座標内の対象物の見かけ上の運動を予測できる。対象物の見かけ上の運動を補償して対象物の真の運動に対して認識を行いうため、認識が簡単になり、認識系を性能を上げることができる。これにより、Fig.1 に示すような不安定の連鎖の悪い循環を立ち切ることができ、より安定的にビジュアルサーボできる可能性があると考えられる。前述の運動学を使う利点と使わない利点を比較して考える上で、著者

Table 1 Position-based and Image-based Visual Servoing

	kinematics	Merit	Demerit
Position-based visual servoing	using	Can compensate the fictional motion of the target in camera frame generated by the hand-eye motion (MFF)	More calculations. Influenced by camera and robot calibration errors
Image-based visual servoing	not using	robust to both camera and robot calibration error	difficult to distinguish the fictional and real motion of the target in camera frame, posing large recognition error

らは運動学を使った位置ベース法を用いてビジュアルサーボを行うことを決めた。

本報での対象物の3次元計測手法は従来の研究[2]で提案したモデルベースマッチング及びGAを用いた遺伝的認識法である。対象物の3次元ポーズの候補は、GAの遺伝子として表現される。遺伝子は対象物の形をしたモデルと入力画像の相関関数を適合度として最適化することで進化し、入力画像中の対象物とモデルのポーズが一致していく。GAのリアルタイム性の問題に対し、「1-Step GA」を適用する。著者らは泳ぐ魚をロボットにより捕獲する研究事例より「1-Step GA」を用いた実時間認識が可能であることを示した[3]。

2. Motion-Feedforward (MFF) 法 [2]

ハンド・アイ・カメラから見た対象物の動きは二つの要素、物体の実際の運動とカメラを装着したマニピュレータの運動に影響される。Fig.2に示すように、基準座標系を Σ_W 、モデル座標系を Σ_M 、カメラ座標系を Σ_{CR} 、 Σ_{CL} と表した。ここでは、カメラ座標系で表された対象物の位置と姿勢の時間微分が、関節角速度ベクトルと対象物の運動に分けて表現されることを示す。

$${}^{CR}\dot{\psi}_M = \begin{bmatrix} {}^{CR}\dot{r}_M \\ {}^{CR}\dot{\epsilon}_M \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -{}^{CR}\mathbf{R}_W(q)\mathbf{J}_P(q) + {}^{CR}\mathbf{R}_W(q) \\ \mathbf{S}({}^W\mathbf{R}_{CR}(q){}^{CR}\mathbf{r}_M)\mathbf{J}_O(q) \\ -\frac{1}{2}[{}^{CR}\eta_M\mathbf{I} - \mathbf{S}({}^{CR}\boldsymbol{\epsilon}_M)]{}^{CR}\mathbf{R}_W(q)\mathbf{J}_O(q) \end{bmatrix} \dot{q} +$$

$$\begin{bmatrix} {}^{CR}\mathbf{R}_W(q) & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}[{}^{CR}\eta_M\mathbf{I} - \mathbf{S}({}^{CR}\boldsymbol{\epsilon}_M)]{}^{CR}\mathbf{R}_W(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^W\dot{r}_M \\ {}^W\omega_M \end{bmatrix} \\ = \mathbf{J}_M(q, {}^{CR}\psi_M)\dot{q} + \mathbf{J}_N(q)^W\dot{\phi}_M \quad (4)$$

で表される。ここでは、クオータニオン($\boldsymbol{\epsilon}, \boldsymbol{\eta}$)を用いた姿勢を表現する[4]。式(4)を用いれば、 Σ_{CR} から見た対象物の速度/姿勢速度 $[{}^{CR}\dot{r}_M^T, {}^{CR}\dot{\epsilon}_M^T]^T$ とマニピュレータの関節速度 \dot{q} の関係が $\mathbf{J}_M(q, {}^{CR}\psi_M)$ で、対象物の実際の速度/角速度 $[{}^W\dot{r}_M^T, {}^W\omega_M^T]^T$ との関係が $\mathbf{J}_N(q)$ でそれぞれを区別して表現できる。

ここで、 ${}^W\dot{\phi}_M$ を推定することは対象物の運動の推定であり重要であるが、対象物の運動を支配する方程式の推定と本質的に等価であり、ここでは議論しない。これ

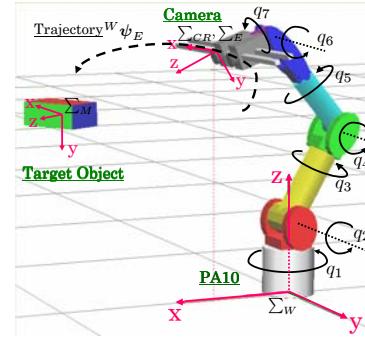


Fig.2 Visual servo system of PA-10

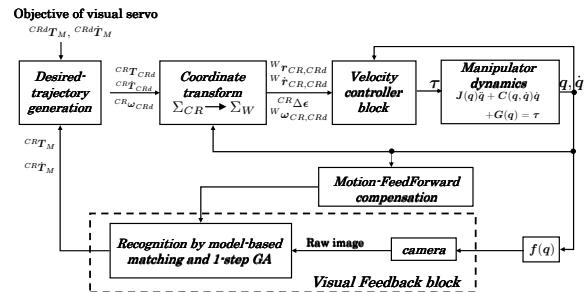


Fig.3 block diagram of the visual servoing system

に対し、 \dot{q} は容易に観測可能であり、 $\mathbf{J}_M(q, {}^{CR}\psi_M)\dot{q}$ によって生じる影響を補償して認識特性を改善することは、現実的であり有効である。以下では式(4)の右辺第二項を無視した次式について考える

$${}^{CR}\dot{\psi}_M = \mathbf{J}_M(q, {}^{CR}\psi_M)\dot{q}. \quad (5)$$

式(5)より \dot{q} を用いて画像中の対象物の動きを予測することができる。

以上より、時刻 $(t + \Delta t)$ の対象物の位置/姿勢を

$${}^{CR}\dot{\psi}_M(t + \Delta t) = {}^{CR}\dot{\psi}_M(t) + \hat{\mathbf{J}}_M(q(t), {}^{CR}\dot{\psi}_M(t))\dot{q}(t)\Delta t. \quad (6)$$

と予測することができる。式(6)を用いて予測したカメラ座標内の対象物の運動速度でGAの個体全体をカメラ速度を補償する方向に動かすことによって、カメラの動きによる認識への影響を抑える。



Fig.4 (a)Initial pose of PA10, (b)Desired pose of PA10

3. サーボコントロール

提案したビジュアルサーボシステムのブロック線図はFig.3に示している。手先の目標速度は

$${}^W\dot{r}_d = \mathbf{K}_{P_p} {}^W r_{CR, CRd} + \mathbf{K}_{V_p} {}^W \dot{r}_{CR, CRd} \quad (7)$$

と与えられる。 \mathbf{K}_{P_p} と \mathbf{K}_{V_p} はPDゲインとして与えられる行列である。

ハンドの手先の目標角速度ベクトル ${}^W\omega_d$ は

$${}^W\omega_d = \mathbf{K}_{P_o} {}^W R_{CR} {}^{CR} \Delta \epsilon + \mathbf{K}_{V_o} {}^W \omega_{CR, CRd}, \quad (8)$$

と与えられる。ここで、 ${}^{CR}\Delta\epsilon$ はクオータニオンエラーであり、認識結果から直接に得られる。同様に、 \mathbf{K}_{P_o} と \mathbf{K}_{V_o} はPDゲインとして与えられる行列である。

ロボットの目標関節速度 \dot{q}_d は

$$\dot{q}_d = \mathbf{J}^+(\mathbf{q}) \begin{bmatrix} {}^W\dot{P}_d \\ {}^W\omega_d \end{bmatrix}. \quad (9)$$

と求められる。ここでの $\mathbf{J}^+(\mathbf{q})$ は $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ の擬似逆行列であり、 $\mathbf{J}^+(\mathbf{q}) = \mathbf{J}^T(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1}$ によって得られる。ロボットへの入力トルクはPI制御により次式によって与えられる。

$$\tau = \mathbf{K}_{SP}(\dot{q}_d - \dot{q}) + \mathbf{K}_{SI} \int_0^t (\dot{q}_d - \dot{q}) dt \quad (10)$$

ここでの $\dot{q}_d - \dot{q}$ はロボットの関節速度のエラーを表す。 \mathbf{K}_{SP} と \mathbf{K}_{SI} はフィードバックゲインである。

4. ビジュアルサーボ実験

本稿では、実機によって提案したフィードフォード認識法(MFF)を用いてビジュアルサーボの動的安定性の改善に関する有効性を確認する。

4.1 実験機の構成

実験機の概要をFig.4(a)に示す。アームロボットPA-10(三菱重工製)の手先にはステレオカメラ(ビデオレート30[fps])を取り付け、対象物を観測する。対象物は赤、緑、青ボールを組み合わせる3Dマーカーであり、ボールの直径は50mm、ボールの中心とマーカーの連接中心点の距離は150mmである。画像認識及びアームロボットの制御を行う計算機には、DELL Optiplex(CPU: Pentium4 2GHz)を使用しており、画像入力ボードはサイバーテック製CT3001Rev2を用いている。

Table 2 Review of Literature

Reference	Convergence time of step response
[5]	about 9.9[s] when the desired position is parallel to the image plane, else, about 49.5[s].
[6]	in x,y, roll,pitch, yaw 30s, in z position about 70s
[7]	about 60s.
[8]	about 150s.
[9]	is about 200s.

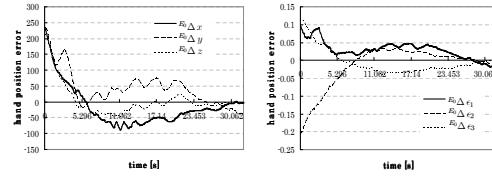


Fig.5 Hand pose error of step response without MFF

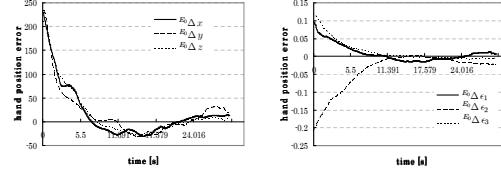


Fig.6 Hand pose error of step response by using MFF

4.2 実験結果

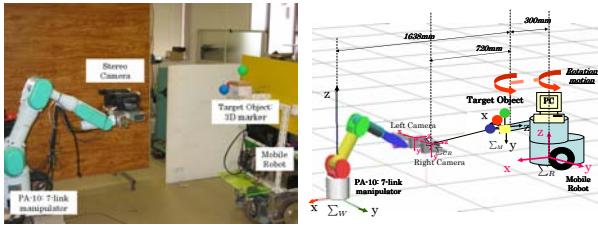
4.2.1 ビジュアルサーボのステップ応答実験

ここでは、ビジュアルサーボの目標は ${}^{CR}\psi_{Md} = [0[mm], 10[mm], 900[mm], 0, 0, 0]^T$ とする。静止する対象物はハンドの手先の初期位置/姿勢での Σ_{E_0} 内に ${}^{CR}\psi_M(0) = [-70[mm], 70[mm], 1000[mm], 0.1, -0.2, 0.12]^T$ と設定した。ハンドの初期状態はFig.4(a)に示し、目標状態はFig.4(b)に示している。

ハンドの動きから認識への影響を抑える効果を確認するため、MFFを用いない場合と用いる場合二つについてのビジュアルサーボステップ応答実験を比較した。Fig.5にMFFを用いない場合の Σ_{E_0} 内のハンドの目標位置/姿勢と実際の位置/姿勢の差を示し、Fig.6にMFFを用いる場合のハンド誤差を示している。Fig.5では6sから28sまでの間にハンドが振動している。これは、ハンドの振動が認識に悪い影響を与えて、認識の正確率が下がるとともに、ハンドの誤差がさらに増えると考える。ここでは対象物は静止しているので、長い時間の振動をしてから、30s頃に収束できた。これに対して、MFFを用いる場合のハンドの収束の様子をFig.6に示している。不安定的な振動が少なく、10sぐらいでハンドが収束している。Table 2に載せた他研究のビジュアルサーボのステップ応答の時間と比較すると、本研究の10sぐらいまでに収束できるという性能がよいことが分かった。

4.2.2 動的対象物の追従実験

Fig.7(a)は運動する対象物に対するサーボ実験の写真である。それに対応するシステムの各座標系の設定



(a)A photograph

(b)Coordinate system

Fig.7 Visual servoing to a moving object

は Fig. 7(b) に示している。対象物(3D マーカ)は移動ロボットの上に固定されて、移動ロボットと一緒に運動する。移動ロボットの座標系は Σ_R と定義する。

本実験では、移動ロボットの Σ_R の z 軸回りの回転運動を与える。回転角度を

$$\theta_d[\text{deg}] = a \sin\left(\frac{2\pi}{T}\right)t, \quad (11)$$

$a = 8[\text{deg}], T = 40[\text{s}]$ と設定した。左右車輪の速度は

$$V_R = k_p(\theta_d - \theta) + k_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}), \quad (12)$$

$$V_L = -V_R, \quad (13)$$

と制御する。 θ_d は目標の回転角度であり、 θ は実際の回転角度である。 k_p と k_v は PD 制御のゲインである。

ここでは、ビジュアルサーボの目標は ${}^{CR}\psi_{Ma} = [0[\text{mm}], 10[\text{mm}], 900[\text{mm}], 0, 0, 0]^T$ と設定した。

Fig.8 は MFF を用いない場合の Σ_{E_0} 内のハンドの目標位置 / 姿勢 ${}^0\psi_E$ と実際の位置 / 姿勢 ${}^0\psi_{Ed}$ を示し、Fig.9 に MFF を用いる場合の ${}^0\psi_{Ed}$, ${}^0\psi_E$ を示している。目標の位置 / 姿勢が直線である間は移動ロボットが動かない状態で、マニピュレータの手先は目標の位置 / 姿勢のところに収束していく。Fig.8 と Fig.9 の (a),(e) の赤線で示した目標線は sin/cos 関数の曲線になる瞬間に移動ロボットが動き始めた。Fig.8(a),(e) と Fig.9(a),(e) を比較すると、ハンドが回転する対象物の追従時間の遅れは MFF 法のほうが小さいと分かった。他の軸の実際値は目標値とのずれについては Fig.9 のほうが Fig.8 より小さく、ハンドがより正しく安定的に運動できると分かった。つまり、MFF 認識法はハンドの運動ダイナミクスから認識への影響を補償して、3-D ビジュアルサーボの動的安定性を改善できるると確認した。

5. 結論

本研究では、マニピュレータの手先に CCD カメラが装着されるハンド・アイシステムで、マニピュレータのダイナミクスが対象物認識に与える影響を解析し、これを抑えるために MFF 認識方法を提案した。実際にロボットマニピュレータのビジュアルサーボシステムに組み込んで実験を行い、移動する対象物の 6 自由度のビジュアルサーボイングの安定性を改善できることを示した。

[1] S.Hutchinson, G.Hager, and P.Corke, "A Tutorial on Visual Servo Control", IEEE Trans. on

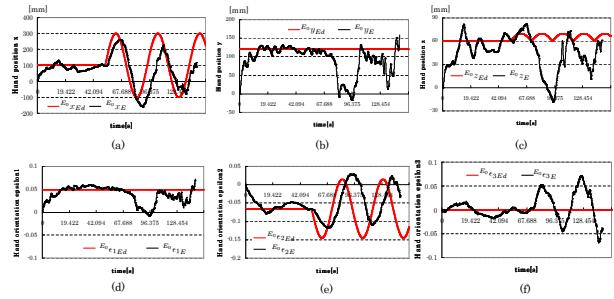


Fig.8 Hand pose error of visual servoing (2) without MFF. methodf

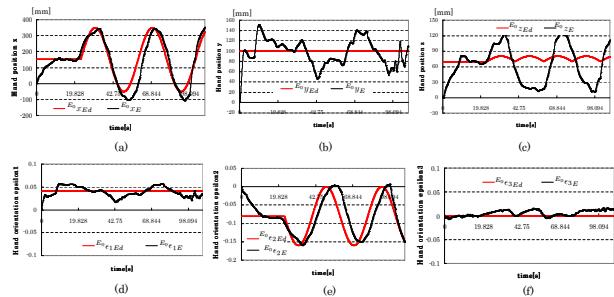


Fig.9 Hand pose error of visual servoing (2) with MFF. methodf

Robotics and Automation, vol. 12, no. 5, pp. 651-670, 1996.

- [2] W. Song, M. Minami, Y. Mae and S. Aoyagi, "On-line Evolutionary Head Pose Measurement by Feedforward Stereo Model Matching", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp.4394-4400, 2007.
- [3] H. Suzuki, M. Minami, "Visual Servoing to catch fish Using Global/local GA Search", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.10, Issue 3, 352-357 (2005.6).
- [4] B.Siciliano and L.Villani: *Robot Force Control*, ISBN 0-7923-7733-8.
- [5] Omar Tahri and Francois Chaumette, "Point-Based and Region-Based Image Moments for Visual Servoing of Planar Objects", IEEE Tran. on Robotics, vol. 21, no. 6, Dec 2005.
- [6] Tarek Hamel and Robert Mahony, "Visual Servoing of an Under-Actuated Dynamic Rigid-Body System: An Image-Based Approach", IEEE Trans. on Robotics and Automation, VOL. 18, NO. 2, APRIL 2002.
- [7] E.Malis, F.Chaumentte and S.Boudet, "2-1/2-D Visual Servoing", IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 15, no. 2, pp. 238-250, 1999.
- [8] Peter I. Corke and Seth A. Hutchinson, "A New Partitioned Approach to Image-Based Visual Servo Control", IEEE Trans. on Robotics and Automation, VOL. 17, NO. 4, August 2001.
- [9] Nicholas R. Gans, and Seth A. Hutchinson, "Stable Visual Servoing Through Hybrid Switched-System Control", IEEE Tran. on Robotics, vol. 23, no. 3, JUNE 2007.