# 学術・技術論文

# フィードフォワード遺伝的認識法を用いた 3-Dビジュアルサーボ

宋 薇\*1 見 浪 護\*2

## 3-D Visual Servoing Using Feedforward Evolutionary Recognition

Wei Song<sup>\*1</sup> and Mamoru Minami<sup>\*2</sup>

This paper deals with position-based 6-DoF visual servoing. With a common sense of feedback control, we stress that improvement of the dynamics of the sensing unit is important for a stable visual servoing. We had proposed a method to improve dynamics in visual recognition, with compensating the fictional motion of the target in the camera images based on kinematics of the manipulator, by extracting the real motion of the target. We named it as hand-eye motion feedforword (MFF) method. In this paper, we present new visual servo system including MFF method; and confirm that the enhanced dynamics of recognition gave further stability and precision to the total visual servoing system, evaluated by full 6-DoF servoing experiment using 7-link manipulator. The convergence time of step response was about 10 [s] and precise visual servoing to a moving target object has been achieved.

Key Words: Pose Measurement, Unit Quaternion, GA, Motion-feedforward 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、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ビジュアル サーボと呼ばれる運動制御が注目されて久しい[1][2]. Fig.1 に簡単な線形フィードバック系を示す. 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、 dY/Y = (1/(1+CSH))(dS/S)であり、通常  $CSH \gg 1$  であるので、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  $CSH \gg 1$  を用いると、dY/Y = -dH/Hと近似される. このことから, コントローラのゲイン Cを上げ ても H の変化は直接出力に影響を及ぼすことが分かる. すなわ ち. S の変化は制御ゲイン C により抑えることができるが. H の変化は抑えることができないことを示している. 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.以上の議論 は認識系の応答特性や精度を向上させることがビジュアルサー ボの制御性能を考える上で重要であることを示唆している.

一方, Fig.1をハンドアイカメラを持つロボットのビジュア ルサーボ系として見るとき,認識系はハンドアイの位置/姿勢

<sup>\*1</sup>University Shanghai



Fig. 1 Feedback system

運動より直接影響を受ける.ハンドアイの運動が認識系の性能 を下げることが原因で,出力 Y の変化が発生し,これにより dH が増大し,増大した dH が dY をさらに増加させる.こ のような悪い連鎖の循環が起こるため,ロボットは不安定な運 動を起こす可能性がある.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,認識系の特性がハンドアイの位置/姿勢 の運動に影響されないという特徴を持つ Motion-FeedForward (MFF)と呼ぶ補償方法を用いる[3].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.

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の 入力方法の違いにより位置ベース法(position-based method) とイメージベース法(image-based method)の二つに大別され る.多くの論文,解説では位置ベース法とイメージベース法のそ れぞれのメリットやデメリットについて議論されている[4][5]. 位置ベース法は認識と制御とを明確に区別しているため、ビジュ アルサーボ時の相互に依存する計測と運動とを区別して考える

原稿受付 2009年3月18日

<sup>\*1</sup>上海大学

<sup>\*2</sup>岡山大学

<sup>&</sup>lt;sup>\*2</sup>Okayama University

<sup>■</sup>本論文は有用性で評価されました.

C

ことができる利点を持つ.本報ではその利点に着目し,MFF法 を含んだ位置ベース法のサーボ手法を用いる.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うため,作業空間に固定されたカ メラによる認識と同程度の認識ダイナミクスを得ることができ る.これにより,Fig.1に示すような悪い連鎖の循環を立ち切 ることができ,より安定したビジュアルサーボできる可能性が あると考えられる.

位置ベース法を用いるビジュアルサーボとしては、Extended kalman filters を用い、作業座標内対象物の位置/姿勢を計測 し、サーボを行った研究がある[6][7]. これらの研究では、制 御系に含まれる Extended kalman filters はハンドアイカメラ の位置/姿勢を含んでおり、対象物の運動を推定するが、マニ ピュレータのハンドアイの運動に起因する対象物の見かけ上の 速度の関係は含まれていない. それに対して、筆者らの研究で は、カメラから見た対象物の速度とマニピュレータの関節速度 の関係、と対象物の実際の速度の関係それぞれ完全に分離して 明確に表現している[3]. 本報では、カメラから見た対象物の速 度とマニピュレータの関節速度の関係を利用して、MFF 認識 法を組み込んだ 3-D ビジュアルサーボ系を議論する.

本報では、MFF 認識法を組み込んだ 3-D ビジュアルサーボ 系を提案するとともに、その性能を実機を用いて検証する.こ こでは、ビジュアルサーボをその制御目標の与え方によって以 下の2種類に分類する. (1) Static Visual Servoing: 制御目標 対象物とハンドとの相対的関係は時間的に変化しない、と(2) Dynamic Visual Servoing:上記の関係が時変である場合,の 二つに分けて考える. Static Visual Servoing はビジュアルサー ボの分野でよく議論されている [6]~[13]. この場合,時間とと もに対象物とハンドとの関係は一定値に収束し、カメラ画像内 の対象物も一定値に収束し動かなくなるため, MFF 認識法の 効果は、Dynamic Visual Servoing に比べて少ないと考えられ る. Dynamic Visual Servoing の場合,カメラ画像内で対象物 は停止することなく動きつづけることから、カメラ自身の運動 を補償して固定カメラを用いた認識精度と同等な性能を出すこ とができる MFF 法の効果は大きくなる、本報では、以上の効 果を実験的に確認する.

Dynamic Visual Servoing の研究を最初に進めた研究者は William J. Wilson [6] らであり,彼らは Relative path control と名付けて,Dynamic Visual Servoing を行った.しかし, ビジュアルサーボ系はカメラ自身の運動が認識へ与える影響を 補償していなかった.また、5自由度のロボットを使っているた め、完全な6自由度のDynamic Visual Servoing ではなかった. それ以後,Dynamic Visual Servoing についてあまり議論され ていない.他の研究では位置の制御結果しか載せていない [7] [9] 場合もあるが、本研究では位置/姿勢6変数の完全な 3-D ビ ジュアルサーボを試みる.

## 2. フィードフォワード遺伝的認識法

筆者らの従来の研究 [3] は、"1-Step GA" による実時間認識 法とロボットハンドの運動をフィードフォワードで補償する新



Fig. 2 Coordinate system

しい動画像認識法「フィードフォワード遺伝的認識法」を提案 し、シミュレーションにより提案した認識法の有効性を確認し た.本報は文献[3]の続報として、フィードフォワード遺伝的認 識法を組み込んだ 3-D ビジュアルサーボ系を構造し、その性能 を実機を用いて検証することを目的とする.3章以後のサーボ 系の記述の準備のため、ここにフィードフォワード遺伝的認識 法の概要だけを紹介する.詳細は論文[3]に示す.

**Fig.2**に示すように,カメラ座標系  $\Sigma_C$  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ができる.

$$\begin{split} \dot{\boldsymbol{\psi}}_{M} &= \begin{bmatrix} {}^{C} \dot{\boldsymbol{r}}_{M} \\ {}^{C} \dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{M} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} {}^{-C} \boldsymbol{R}_{W}(\boldsymbol{q}) \boldsymbol{J}_{P}(\boldsymbol{q}) + {}^{C} \boldsymbol{R}_{W}(\boldsymbol{q}) \\ \boldsymbol{S}({}^{W} \boldsymbol{R}_{C}(\boldsymbol{q}){}^{C} \boldsymbol{r}_{M}) \boldsymbol{J}_{O}(\boldsymbol{q}) \\ {}^{-\frac{1}{2}} [{}^{C} \eta_{M} \boldsymbol{I} - \boldsymbol{S}({}^{C} \boldsymbol{\epsilon}_{M})]{}^{C} \boldsymbol{R}_{W}(\boldsymbol{q}) \boldsymbol{J}_{O}(\boldsymbol{q}) \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} {}^{C} \boldsymbol{R}_{W}(\boldsymbol{q}) & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \frac{1}{2} [{}^{C} \eta_{M} \boldsymbol{I} - \boldsymbol{S}({}^{C} \boldsymbol{\epsilon}_{M})]{}^{C} \boldsymbol{R}_{W}(\boldsymbol{q}) \end{bmatrix} \\ &\times \begin{bmatrix} {}^{W} \dot{\boldsymbol{r}}_{M} \\ {}^{W} \boldsymbol{\omega}_{M} \end{bmatrix} \\ &= \boldsymbol{J}_{M}(\boldsymbol{q}, {}^{C} \boldsymbol{\psi}_{M}) \dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{J}_{N}(\boldsymbol{q})^{W} \dot{\boldsymbol{\phi}}_{M} \end{split}$$
(1)

で表される.ここで、S(a)は $3 \times 3$ 行列であり、S(a)bは $a \times b$ (× は外積)を意味する.

ここで、 ${}^{W}\dot{\boldsymbol{\phi}}_{M}$ を推定することは対象物の運動の推定であり、 カルマンフィルタを用いて推定されている研究がある [7]. 文 献 [7] では、対象物の運動は等速運動と仮定している. この対象 物の運動に対する仮定はあまり現実的ではなく、この仮定を満 たさない運動のほうが一般的に多い. これに対し、 $\dot{\boldsymbol{q}}$  は容易に 観測可能であり、 $J_{M}(\boldsymbol{q}, {}^{C}\psi_{M})\dot{\boldsymbol{q}}$ 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(1)の右辺第二項を無視した次式について考える

$${}^{C}\dot{\boldsymbol{\psi}}_{M} = \boldsymbol{J}_{M}(\boldsymbol{q}, {}^{C}\boldsymbol{\psi}_{M})\dot{\boldsymbol{q}}.$$
(2)

式(2)より *q*を用いて画像中の対象物の動きを予測すること ができるが、以下に問題点について考察する.式(2)より *J*<sub>M</sub> は  $q, {}^{C}\psi_{M}$  の関数であることが分かる. q の観測は容易であ り, 誤差を含まないと考えることができるが,  ${}^{C}\psi_{M}(t)$  は  $\Sigma_{C}$ で表された対象物の時刻 t における位置/姿勢であり, "1-Step GA" によりモデルベーストマッチングを行うことで得られた三 次元計測 [3] [11] の結果, 推定できる量である. このため誤差を 含む観測結果であることを表現するため  ${}^{C}\hat{\psi}_{M}$  と表し,  $J_{M}$  は  $\hat{J}_{M}(q, {}^{C}\hat{\psi}_{M})$  と表す.

以上より、 時刻  $(t + \Delta t)$  の対象物の位置/姿勢を

$${}^{C}\hat{\boldsymbol{\psi}}_{M}(t+\Delta t) = {}^{C}\hat{\boldsymbol{\psi}}_{M}(t) + \hat{\boldsymbol{J}}_{M}\left(\boldsymbol{q}(t), {}^{C}\hat{\boldsymbol{\psi}}_{M}(t)\right) \dot{\boldsymbol{q}}(t)\Delta t.$$
(3)

と予測することができる、右辺第一項の基準点という意味でも、 第二項の増分という意味でも、観測結果 <sup>C</sup> ŷ<sub>M</sub> が予測位置/姿 勢に影響を与えることが分かる.この結果は、 ${}^{C}\hat{oldsymbol{\psi}}_{M}(t)$ の推定 誤差が  $\Delta t$  秒後の時刻  $t + \Delta t$  の位置/姿勢計測の誤差生成要 因となり, 計測誤差が指数関数的に増大する可能性を示してい る.式(2)は解析的に得られた運動学関係式であるため、上記 の好ましくない結果は三次元位置/姿勢計測の中に含まれる難 しさと考えることができる.この問題点に関して、本報の推定 値  ${}^{C}\hat{\psi}_{M}(t)$  に基づいた観測は, "1-Step GA" 実時間遺伝的認 識法を用いているため、ヒューリステックな探索も含まれてい る。これにより、上記の誤差の連鎖の悪循環を立ち切ることが でき、推定を正確に保つことができる可能性がある.式(3)を 用いて予測したカメラ座標内の対象物の位置/姿勢で GA の個 体郡全体をカメラ運動を補償する方向に動かすことで、カメラ の動きによる認識への影響を補償することができる。前報[3]で は、1-Step GA の実時間認識能力を議論し、計測誤差の増大を 抑圧する効果があることを実験により示した.

#### 3. ビジュアルサーボシステム

#### 3.1 手先の運動軌道の生成

**Fig.3**に示すように作業座標  $\Sigma_W$ ,対象物の座標  $\Sigma_M$  と定義 し,ハンドの手先の座標とカメラの座標  $\Sigma_C$  は一致している.目 標の位置/姿勢は  $\Sigma_{Cd}$ ,実際は  $\Sigma_C$  と定義する.対象物の運動 ( $\Sigma_W$  と  $\Sigma_M$  の関係)を同次変換行列を用いて  ${}^W T_M(t)$  と表 し,ビジュアルサーボの目標 ( $\Sigma_M$  と  $\Sigma_C$  の関係)が  ${}^{Cd} T_M(t)$ 



Fig. 3 End-effector's motion trajectory

と表す.ハンドの手先の目標運動軌道 ( $\Sigma_W$  と  $\Sigma_{Cd}$  の関係) <sup>W</sup> $T_{Cd}(t)$  は次式で表される.

$$\mathbf{T}_{Cd}(t) = {}^{W} \mathbf{T}_{M}(t) {}^{Cd} \mathbf{T}_{M}^{-1}(t).$$

$$\tag{4}$$

対象物  $\Sigma_M$  と実際の手先  $\Sigma_C$  の関係を  ${}^C \boldsymbol{T}_M(t)$  と表すと, 実際のハンドの手先の運動軌道  ${}^W \boldsymbol{T}_C(t)$  は

$${}^{W}\boldsymbol{T}_{C}(t) = {}^{W}\boldsymbol{T}_{M}(t){}^{C}\boldsymbol{T}_{M}^{-1}(t).$$

$$(5)$$

になる.

 $\Sigma_{Cd}$  と  $\Sigma_C$  の差を  ${}^{C}\boldsymbol{T}_{C,Cd}$  と定義し、式(4)(5)を用いて  ${}^{C}\boldsymbol{T}_{Cd}$  は

$${}^{C}\boldsymbol{T}_{C,Cd}(t) = {}^{W}\boldsymbol{T}_{C}^{-1}(t)^{W}\boldsymbol{T}_{Cd}(t)$$
$$= {}^{C}\boldsymbol{T}_{M}(t) {}^{Cd}\boldsymbol{T}_{M}^{-1}(t), \qquad (6)$$

と得られる.式(6)で表した実際のハンドと目標ハンドの差は 一般的な導出であり、任意の対象物の運動 $^{W}T_{M}(t)$ および任 意のビジュアルサーボの目標(一定あるいは時変) $^{M}T_{Cd}(t)$ に 対応する.

式(6)を時間で微分すると

$${}^{C}\dot{\boldsymbol{T}}_{C,Cd}(t) = {}^{C}\dot{\boldsymbol{T}}_{M}(t){}^{Cd}\boldsymbol{T}_{M}^{-1}(t) + {}^{C}\boldsymbol{T}_{M}(t){}^{Cd}\dot{\boldsymbol{T}}_{M}^{-1}(t).$$
(7)

になる.ここでは、 ${}^{Cd}\boldsymbol{T}_{M}(t) \geq {}^{Cd}\dot{\boldsymbol{T}}_{M}(t)$ はビジュアルサー ボの目標として与えられる. ${}^{C}\boldsymbol{T}_{M}(t) \geq {}^{C}\dot{\boldsymbol{T}}_{M}(t)$ は提案され た認識法 [3] を用いてカメラで測定できる.ここで ${}^{C}\dot{\boldsymbol{T}}_{M}(t)$ は  ${}^{C}\dot{\boldsymbol{T}}_{M}(t) = ({}^{C}\boldsymbol{T}_{M}(t) - {}^{C}\boldsymbol{T}_{M}(t - \Delta t))/\Delta t$  で近似して算出す る.式(6) は位置/姿勢誤差を,式(7) は位置/姿勢の速度誤 差を表す.角速度誤差  ${}^{C}\boldsymbol{\omega}_{C,Cd}$ は  ${}^{C}\boldsymbol{T}_{C,Cd}(t)$ ,  ${}^{C}\dot{\boldsymbol{T}}_{C,Cd}(t)$ の 中の回転行列  ${}^{C}\boldsymbol{R}_{C,Cd}(t)$ ,  ${}^{C}\dot{\boldsymbol{R}}_{C,Cd}(t)$ から以下のように求め られる.

$$\dot{\boldsymbol{R}}_{C,Cd} = \boldsymbol{S}(^{C}\boldsymbol{\omega}_{C,Cd})^{C}\boldsymbol{R}_{C,Cd}, \qquad (8)$$

$$\mathbf{S}(^{C}\boldsymbol{\omega}_{C,Cd}) = {}^{C}\dot{\mathbf{R}}_{C,Cd} \, {}^{C}\mathbf{R}_{C,Cd}^{-1}. \tag{9}$$

#### 3.2 サーボコントロール

C

提案したビジュアルサーボシステムのブロック線図を Fig. 4 に示す.前節で議論したロボット手先の運動軌道を用いて,手 先の目標速度は



Fig. 4 Block diagram of the visual servoing system

Table 1 Gain parameters

Link Number	[L1 L2 L3 L4 L5 L6 L7]
$K_{SP}$	$[3,200 \ 3,200 \ 1,400 \ 1,400 \ 1,000 \ 1,000 \ 1,000]$
$K_{SI}$	$[1362 \ 1362 \ 596 \ 596 \ 596 \ 426 \ 426]$

$${}^{W}\dot{\boldsymbol{r}}_{d} = \boldsymbol{K}_{P_{n}}{}^{W}\boldsymbol{r}_{C,Cd} + \boldsymbol{K}_{V_{n}}{}^{W}\dot{\boldsymbol{r}}_{C,Cd}$$
(10)

と PD 制御を行う. ここでは、 ${}^{W} \mathbf{r}_{C,Cd}, {}^{W} \dot{\mathbf{r}}_{C,Cd}$  は  $\Sigma_{C}$  から  $\Sigma_{W}$  への座標変換を使って  ${}^{C} \mathbf{T}_{Cd}$  と  ${}^{C} \dot{\mathbf{T}}_{Cd}$  から求められる.  $\mathbf{K}_{P_{p}}$  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 $^{W}oldsymbol{\omega}_{d}$ は

$${}^{W}\boldsymbol{\omega}_{d} = \boldsymbol{K}_{P_{o}}{}^{W}\boldsymbol{R}_{C}{}^{C}\Delta\boldsymbol{\epsilon} + \boldsymbol{K}_{V_{o}}{}^{W}\boldsymbol{\omega}_{C,Cd}, \quad (11)$$

と与えられる.ここで、 $^{C}\Delta\epsilon$ はクォータニオンエラーであり、  $\Sigma_{C}$ で表されたカメラ座標系で表した対象物の姿勢誤差であり、 "1-Step GA"による認識結果から直接に得られる [3].  $^{W}\omega_{C,Cd}$ は  $\Sigma_{C}$  から  $\Sigma_{W}$  への座標変換を使って  $^{C}\omega_{C,Cd}$  から求められ る.  $K_{P_{o}}$  と  $K_{V_{o}}$ 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

$$\dot{\boldsymbol{q}}_{d} = \boldsymbol{J}^{+}(\boldsymbol{q}) \begin{bmatrix} W \dot{\boldsymbol{r}}_{d} \\ W \boldsymbol{\omega}_{d} \end{bmatrix}.$$
(12)

と求められる. ここの  $J^+(q)$  は J(q) の擬似逆行列であり,  $J^+(q) = J^T (J J^T)^{-1}$ 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.

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{K}_{SP}(\dot{\boldsymbol{q}}_d - \dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{K}_{SI} \int_0^t (\dot{\boldsymbol{q}}_d - \dot{\boldsymbol{q}}) dt \quad (13)$$

上式は、コントローラが $\dot{q}_d$ をサーボアンプに出力したあとに ハードウェアフィードバックループが行う制御則であり、正定対 角行列であるフィードバックゲイン  $K_{SP}$ ,  $K_{SI}$  の値を Table 1 に示す.

#### 4. ビジュアルサーボ実験

本稿では、フィードフォワード認識法 MFF を用いたビジュ アルサーボシステムの有効性を実機によって確認する.

### 4.1 実験機の構成

実験機の概要を **Fig.5** (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 2 台取り付け,複眼で対象物を観測する.対象物は赤,緑, 青ボールを組み合わせた 3D マーカ [16] であり,ボールの直 径は 50 [mm],ボールの中心とマーカの連接中心点の距離は 150 [mm] である.本研究は、SONY 製のカメラ CCD-TRV86 (撮影素子:1/6 インチ CCD,焦点距離:f = 3.6 [mm],視野 角: $\alpha = 38$  [deg])を使用する.入力されたカラー画像(生画像) に対して認識対象物モデルを直接マッチングし,GA でモデルの 位置/姿勢を表す遺伝子を進化させる.生画像を直接用いるこ とで、画像処理時間が必要なく、それ以外も二値化処理で発生す るノイズ増幅の問題を避けることができる.物体認識は従来の研 究で提案されたフィードフォワード遺伝的認識法 [3] で行う.一 枚の画像を入力してから計測した物体の位置/姿勢を出力する



Fig. 5 (a) Initial pose of PA10, (b) Desired pose of PA10

までの時間は約 0.03 [s] かかっている. GA で物体のマッチング を行い, GA の一世代の進化に要する時間は約 0.022 [s] である. 画像認識およびアームロボットの制御を行う PC には, DELL Optiplex (OS: windows2000, CPU: Pentium4, 2 GHz) 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.

#### 4.2 誤差の評価

GA の適合度 F の i 世代の最大値を  $F_M^i$  とし、 $F_M^i$  を与え る時刻  $t_i$  の遺伝子を  ${}^C \hat{\psi}_M^i(t_i)$  と定める. このとき

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} F_M^i({}^C \hat{\psi}_M^i(t_i))$$
(14)

を適合度の時間平均値と定義する.

また、ハンドの手先の初期位置の座標系  $\Sigma_{E_0}$  は  $\Sigma_W$  に固定 されている (初期状態の  $\Sigma_C$  と一致する). ここで  $\Sigma_{E_0}$  から  $\Sigma_W$  への同次変換行列  $^W T_{E_0}$  は

$${}^{W}\boldsymbol{T}_{E_{0}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 918 \,[\text{mm}] \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 455 \,[\text{mm}] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$
 (15)

と設定する.  $\Sigma_{E_0}$  で表したハンドの実際の位置/姿勢  $E_0 \psi_E$ と,真の位置/姿勢  $E_0 \psi_{E_d}$  との差をハンドの位置/姿勢誤差  $E_0 \Delta \psi$  と定義する.

$${}^{E_0} \Delta \psi = [{}^{E_0} \psi_{E_d}^T - {}^{E_0} \psi_{E}^T]^T = [{}^{E_0} \Delta x, {}^{E_0} \Delta y, {}^{E_0} \Delta z, {}^{E_0} \Delta \epsilon_1, {}^{E_0} \Delta \epsilon_2, {}^{E_0} \Delta \epsilon_3]^T$$
(16)

ハンドの位置/姿勢の誤差の rms 値(root-mean-square value) $^{E_0}\Delta \tilde{\psi}$ は,

$${}^{E_0}\Delta\tilde{\psi} = [{}^{E_0}\Delta\tilde{x}, {}^{E_0}\Delta\tilde{y}, {}^{E_0}\Delta\tilde{z}, {}^{E_0}\Delta\tilde{\epsilon_1}, {}^{E_0}\Delta\tilde{\epsilon_2}, {}^{E_0}\Delta\tilde{\epsilon_3}, ]^T,$$

$$(17)$$

$${}^{E_0}\Delta\tilde{p} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \left({}^{E_0}\Delta p(t_i)\right)^2}, (p = x, y, z, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3).$$

$$(18)$$

と定義する.

本実験では各世代の最大適合度の時間平均値  $\bar{F}$  と位置/姿勢 の誤差の rms 値  $E_0 \Delta \tilde{\psi}$  を用いて認識性能を評価する. クォー タニオンで姿勢を表すとき,変数  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_3$  は比を表してい



Fig. 6 Hand pose error of step response without using MFF



Fig. 7 Hand orientation error of step response by using MFF

るため、単位は無次元である. さらに  $\|\epsilon\|$  は  $\eta$  に依存してい るため他の表現に比べて姿勢の定量的評価が難しい. そこで参 考のために変換の一例をあげておく. 対象物が x 軸回りに角度 1 [deg] で回転した姿勢はクォータニオンで表すと  $\epsilon_1 = 0.008$ ,  $\epsilon_2 = 0$ ,  $\epsilon_3 = 0$  になる.

#### 4.3 実験結果

4.3.1 静止対象物への Static Visual Servoing 実験 (ステップ応答)

ここでは、ビジュアルサーボの目標は  $C^{d}\psi_{M} = [0 \text{ [mm]}, 10 \text{ [mm]}, 900 \text{ [mm]}, 0, 0, 0]^{T} とする. 対象物は初期位置/姿$  $勢は <math>C\psi_{M}(0) = [-70 \text{ [mm]}, 70 \text{ [mm]}, 1,000 \text{ [mm]}, 0.1, -0.2, 0.12]^{T}$ と設定した. ハンドの初期状態は Fig. 5 (a) に、目標状 態は Fig. 5 (b) に示している.

ハンドの動きによる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行い比較した.**Fig.6**にMFFを用 いない場合の $\Sigma_{E_0}$ 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.7**にMFFを用いる場合のハンド誤差を 示している.本研究は、クォータニオンで姿勢を表し、クォー タニオンの単位は無次元なので、Fig.6, Fig.7の右図の縦軸の 単位の部分を[]と表記した.Fig.6 では  $6[s] \sim 28[s]$ 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 影響を与え、認識の精度が下がり、これがさらにハンドの誤差 を増やしていると考えられる.対象物は静止しているので、振 動したあと、30[s]頃に収束している.これに対して、MFFを 用いた場合のハンドの収束の様子をFig.7に示している.不安 定な振動が少なく、ハンドの位置は約 20[s]、姿勢は約 10[s] 程 度で収束している.

**Table 2**にはすでに提案された各種の制御方法のステップ応 答という基本的な制御性能を調べた結果を示している. Table 2 に載せた他の研究は本研究と問題設定が異なる実験を含んでお り,視覚認識の方法も異なるものであるが,整定時間は数十秒か ら数百秒にも及び,いまだ工学的に実現されたビジュアルサー ボは,甚だ不十分な性能であることが分かる.また,Table 2の

Table 2 Review of literature

Reference	Settling time of step response
[9]	about $9.9[s]$ when the desired
	position is parallel to the image plane,
	else, about $49.5$ [s].
[10]	in x, y, roll, pitch, yaw 30 [s],
	in z position about $70 [s]$
[4]	about 60 [s].
[12]	about 150 [s].
[13]	is about 200 [s].



Fig. 8 (a) A photograph of dynamic visual servoing system. (b) Coordinate system of (a)

整定時間と Fig. 6, Fig. 7 の応答を比較することで、本手法の 整定時間は同程度であることが分かる。

4.3.2 静止対象物への Dynamic Visual Servoing 実験 ここでは、ビジュアルサーボの目標は一定値ではなく、以下 の  $\Sigma_C$  の x 軸より *sin* 関数で時変の目標軌道を与えた.

$$\begin{cases}
C^{d}x_{M}(t) = 100 \sin((2\pi/T)t) \text{ [mm]} \\
C^{d}y_{M}(t) = 70 \text{ [mm]} \\
C^{d}z_{M}(t) = 1,300 \text{ [mm]} \\
C^{d}\epsilon_{1M}(t) = 0 \\
C^{d}\epsilon_{2M}(t) = 0 \\
C^{d}\epsilon_{3M}(t) = 0
\end{cases}$$
(19)

対象物は静止状態と設定して、初期位置/姿勢は  ${}^{C}\psi_{M}(0) = [0 \text{ [mm]}, 70 \text{ [mm]}, 1,300 \text{ [mm]}, 0, 0, 0]^{T}$ である. ハンドの手先の目標運動の様子を **Fig. 8** に示す.

まず、マニピュレータの運動周期 *T* を 60[s] と設定する. **Fig.**9は MFF を用いない場合の  $\Sigma_{E_0}$  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.**10は MFF を用いる 場合のハンド誤差を示している.実験では、マニピュレータのダ イナミクスによってカメラに振動が発生する.そのため、対象 物が静止していてもカメラの振動による影響があるので、認識 が難しくなる.Fig.1に示すように、認識性能はハンドアイの位 置/姿勢運動に直接影響されているので、システムの不安定性 が Fig.9に示すように増大していく.Fig.9と比較して、MFF を用いている Fig.10 のほうがハンドの運動誤差がより小さく なり、システムがより安定になることが分かる.MFF 法を用 いて、このようなカメラの動的な運動の認識への影響を抑える ことができ、ビジュアルサーボシステムの安定性を改善できる ことが分かる.

上述の目標軌道は同じままでマニピュレータの運動周期 T =

Table 3 Results of time-varying visual servoing

Condition	$\overline{F}$	$E_0 \Delta \tilde{x} [\mathrm{mm}]$	$E_0 \Delta \tilde{y} [\mathrm{mm}]$	$E_0 \Delta \tilde{z} [\mathrm{mm}]$	$E_0 \Delta \tilde{\epsilon_1}$	$E_0 \Delta \tilde{\epsilon_2}$	$E_0 \Delta \tilde{\epsilon_3}$
T = 60 [s], without MFF.	0.8416	73.92	92.06	37.25	0.035	0.029	0.025
T = 60 [s], with MFF.	0.9032	51.00	52.85	21.46	0.020	0.020	0.014
T = 40 [s], without MFF.	0.7822	80.39	82.94	37.92	0.032	0.041	0.034
T = 40 [s], with MFF.	0.9052	43.78	51.48	18.16	0.019	0.018	0.014
T = 20 [s], without MFF.	0.7241	96.39	76.48	31.63	0.022	0.045	0.043
T = 20 [s], with MFF.	0.9068	51.04	56.46	21.43	0.022	0.019	0.015



Fig. 9 Hand pose error of dynamic visual servoing without MFF methodf when time period is  $T = 60 \, [s]$ 



Fig. 10 Hand pose error of dynamic visual servoing with MFF methodf when time period is T = 60 [s]

40 [s], 20 [s] を与えて、それぞれ MFF を用いない場合と用い る場合の二つの条件でビジュアルサーボを行った. ここでは 4.2 節で定義した各世代の最大適合度の時間平均値 F とハンドの位 置/姿勢の誤差の rms 値  ${}^{E_0}\Delta ilde{m{\psi}}$  を用いてシステム性能を評価す る. Table 3 は異なるハンド周期運動での  $\overline{F}$  と  $E_0 \Delta \tilde{\psi}$  を計算 してまとめた結果である. MFF を用いない場合はマニピュレー タの運動周期は 60 [s]~20 [s] まで減少するとともに、各世代の



Fig. 11 A photograph of visual servo system



Fig. 12 Coordinate system of visual servoing

最大適合度の平均値 F は小さくなって、位置/姿勢の誤差の rms 値  ${}^{E_0}\Delta ilde{m \psi}$  は大きくなる. $ar{F}$  はモデルベーストマッチングに よる認識のマッチングの程度を表しているため、 F の減少は認 識精度の劣化を意味する.最大位置誤差のrms 値は約 96 [mm], 最大姿勢誤差の rms 値は 0.045,約7 [deg] になってしまう.つ まり, 認識の性能はだんだん悪くなる. MFF を用いる場合, マ ニピュレータの運動速度が速くなっても、 $\bar{F}$ と $^{E_0}\Delta\tilde{\psi}$ はあまり 変化せず、より高い  $\overline{F}$  と低い  $E_0 \Delta \tilde{\psi}$  を維持することができる.

また、別の実験でハンドが動かない状態では、静止対象物の 認識は  $\overline{F}$  が 0.9126 になった. Table 3 のデータにより, MFF を用いる場合は、カメラが動いても固定されたカメラによる認 識と同程度の認識精度を得ることができることを示した。これ により提案した MFF 認識方法の有効性を確認した.

4.3.3 動的対象物への Static Visual Servoing 実験

Fig. 11 は動的対象物の追従実験の写真である。それに対応 するシステムの各座標系の設定を Fig. 12 に示す.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.移動ロボットに固定された座標系を $\Sigma_R$ と定義 する.対象物と移動ロボットの一定な関係を

$${}^{R}\boldsymbol{T}_{M} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 300 \,[\text{mm}] \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 455 \,[\text{mm}] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(20)

とする.

本実験では、以下の式で移動ロボットに  $\Sigma_R$  の z 軸回りの回 転運動を与える. 回転角度を

$$\theta_d[\text{deg}] = asin\left(\frac{2\pi}{T}\right)t,$$
(21)

a = 8 [deg], T = 40 [s] と設定した. 左右車輪の速度は

$$V_R = kp(\theta_d - \theta) + kv(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}), \qquad (22)$$

$$V_L = -V_R, (23)$$

となる.  $\theta_d$  は目標の回転角度であり、 $\theta$  は実際の回転角度である.  $kp \ge kv$  は PD 制御のゲインである.

 $\Sigma_R$ から  $\Sigma_W$ への同次変換行列は

$${}^{W}\boldsymbol{T}_{R} = \begin{bmatrix} & & -1,938 \, [\text{mm}] \\ & \boldsymbol{W}\boldsymbol{R}_{R}(\eta = \cos\frac{\theta}{2}, & 0 \\ & \boldsymbol{\epsilon} = \sin\frac{\theta}{2}[0, 0, 1]^{T}) & 0 \\ \hline & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{1} \end{bmatrix},$$
(24)

となる.式 (20) と式 (24) を用いて  $\Sigma_W$  内の対象物の運動を

$${}^{W}\boldsymbol{T}_{M}(t) = {}^{W}\boldsymbol{T}_{R}(t){}^{R}\boldsymbol{T}_{M}.$$
 (25)

と表せる.ここでは、ビジュアルサーボの目標を  $^{Cd}\psi_M = [0 \text{ [mm]}, 10 \text{ [mm]}, 900 \text{ [mm]}, 0, 0, 0]^T$ と設定した.

**Fig. 13** は MFF を用いない場合の  $\Sigma_{E_0}$  内のハンドの目標位 置/姿勢  $^{E0}\psi_E$  と実際の位置/姿勢  $^{E0}\psi_{Ed}$  を示し,**Fig. 14** 



Fig. 13 Hand pose error of visual servoing without MFF. method



Fig. 14 Hand pose error of visual servoing with MFF. method

に MFF を用いる場合の  $^{E0}\psi_{Ed}$ ,  $^{E0}\psi_{E}$  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. 13 と Fig. 14 の (a). (e) の目標線が sin/cos 関数の曲 線になる瞬間に移動ロボットが動き始めている. Fig. 13 (a), (e) と Fig. 14 (a), (e) を比較すると、ハンドが回転する対象物に対 するハンドの追従時間の遅れは MFF 法のほうが小さいことが 分かった. 他の軸の実際値と目標値とのずれについては Fig. 14 のほうが Fig. 13 より小さく、ハンドがより正しく安定に運動 していることが分かる. 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ことを確認した.

## 5. 結 論

本研究では、マニピュレータのダイナミクスが対象物認識に 与える影響を抑える MFF 認識方法を組み込んだ 3-D ビジュア ルサーボ系を提案して、その性能を実機を用いて検証する、静止 対象物への Static Visual Servoing、静止対象物への Dynamic Visual Servoing および動的対象物への Static Visual Servoing の三つの実験により提案したビジュアルサーボシステムの有効 性を確認し、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。

# 参考文献

- [1] S. Hutchinson, G. Hager and P. Corke: "A Tutorial on Visual Servo Control," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.12, no.5, pp.651–670, 1996.
- [2] P.Y. Oh and P.K. Allen: "Visual Servoing by Partitioning Degrees of Freedom," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.17, no.1, pp.1–17, 2001.
- [3] 朱薇, 見浪護, 青柳誠司: "クォータニオンを用いたフィードフォワード オンラインポーズ遺伝的認識法", 日本ロボット学会誌, vol.28, no.1, pp.55-64, 2010.
- [4] E. Malis, F. Chaumentte and S. Boudet: "2-1/2-D Visual Ser-



# 宋 薇 (Wei Song)

2003年北京信息科技大学電子信息工程学科卒業, 2006年福井大学大学院知能システム工学専攻修士 課程修了.2009年福井大学大学院システム設計工 学博士課程修了.博士(工学).2010年3月より 上海大学機電工程与自動化学院講師.画像認識,ビ ジュアルサーボイング等の研究に従事.IEEEなど (日本ロボット学会正会員)

の会員.

voing," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.15, no.2, pp.238–250, 1999.

- [5] 橋本浩一:"視覚フィードバック制御―静から動へ",システム/ 制御/情報,vol.38, no.12, pp.695-665, 1994.
- [6] W.J. Wilson, C.C.W. Hulls and G.S. Bell: "Relative Endeffector Control Using CartesianPosition Based Visual Servoing," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.12, no.5, 1996, pp.684–696.
- [7] V. Lippiello, B. Siciliano and L. Villani: "Position-Based Visual Servoing in Industrial Multirobot Cells Using a Hybrid Camera Configuration," IEEE Trans on Robotics vol.23, issue 1, pp.73–86, 2007.
- [8] W. Sepp, S. Fuchs and G. Hirzinger: "Hierarchical Featureless Tracking for Position-Based 6-DoF Visual Servoing," IROS2006, 2006.
- [9] O. Tahri and F. Chaumette: "Point-Based and Region-Based Image Moments for Visual Servoing of Planar Objects," IEEE Tran. on Robotics, vol.21, no.6, 2005.
- [10] T. Hamel and R. 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, 2002.
- [11] W. Song, Y. Mae and M. Minami: "Evolutionary Pose Measurement by Stereo Model Matching," Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, vol.9, no.2, pp.150–157, 2005.
- [12] P.I. Corke and S.A. Hutchinson: "A New Partitioned Approach to Image-Based Visual Servo Control," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.17, no.4, 2001.
- [13] N.R. Gans and S.A. Hutchinson: "Stable Visual Servoing Through Hybrid Switched-System Control," IEEE Tran. on Robotics, vol.23, no.3, 2007.
- [14] G. Hu, W.E. Dixon, S. Gupta and N. Fitz-Coy: "A Quaternion Formulation for Homography-based Visual Servo Control," ICRA 2006, pp.2391–2396, 2006.
- [15] J.T.-Y. Wen and K. Kreutz-Delgado: "The attitude control problem", IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.39, pp.1148-1163, 1991.
- [16] 尾里淳,丸典明:"視空間座標系を用いたビジュアルサーボによるカメラ角を必要としない3次元位置・姿勢決め制御",第8回システムインテグレーション部門講演会(SI2007),2007.



## 見浪 護 (Mamoru Minami)

1979年大阪府立大学航空工学科卒業,1981年大阪 府立大学航空工学専攻修士課程修了、1993年金沢大 学大学院自然科学研究科博士課程修了、博士(工学)、 1994年福井大学工学部機械工学科助教授,2002年 同大学同学部知能システム工学科教授、2010年4 月より岡山大学大学院自然科学研究科教授、ロボッ

トの力学,拘束運動,力制御,移動マニピュレータの制御,画像認識, ビジュアルサーボイング等の研究に従事.日本機械学会,計測自動制 御学会,IEEEなどの会員. (日本ロボット学会正会員)