

## 運動モデルを用いた視覚サーボ系の設計

### Design of visual servoing with dynamics model

○高橋正志, 渡部慶二, 村松鋭一, 有我祐一, 遠藤茂  
○ M.Takahashi, K. Watanabe, E. Muramatsu, Y. Ariga, S. Endo

山形大学大学院理工学研究科

Yamagata University

キーワード: 視覚サーボ(visual servoing), 適応オブザーバ(ovserber)

連絡先: 〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16 山形大学 工学部 応用生命システム工学科 渡部研究室  
高橋正志, Tel & Fax: (090)5220-8572, E-mail: edc67547@yz.yamagata-u.ac.jp

## 1 はじめに

視覚サーボ(visual servoing)とは, カメラを搭載したロボットである制御対象を視覚情報を基に運動制御させる制御システムである. Fig.1 に視覚サーボ系のブロック線図を示す. 視覚サーボ系では, 運動する対象物をカメラで捕え, 目標画像と現在のカメラ画像を比較することでカメラ運動を決定する. そして, カメラの位置を制御させることで運動する対象物の追従を実現する. また, 視覚サーボ系では, カメラのビデオサンプリング周期や, 画像処理に時間が掛かる等の理由により画像更新のサンプリング周期  $T_i$  はサーボ系のサンプリング周期  $T_s$  に比べ遅くなる.

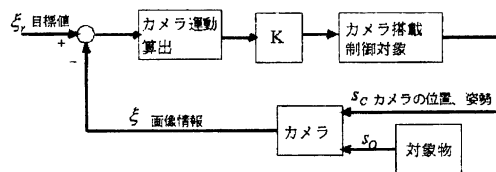


Fig. 1: 視覚サーボ系のブロック線図

## 2 研究目的

人間が運動する物体を目で追うという行動を考える. この時, 人間は物体の運動の変化より運動する物体の運動をある程度把握することができる. 例えば, テニスを行う場合, 選手は相手が打ってきたボールを目で追うことによりボールの運動の軌道を予測し, 自分がボールを打ち返すことが可能な位置まで移動するという行動を無意識に行うことが出来る. 人間はこのような視覚による情報処理能力を持っている.

本研究ではこのような視覚情報処理能力を視覚サー

ボ系で実現することを考える. これを, 視覚サーボ系に運動モデルを考慮させ, 対象物の運動を予測させることによって実現を目指す. これにより, 視覚サーボ系は, 対象物の運動モデルを基に画像変化から対象物の運動を推定し, 未来の運動の変化を考慮した制御が可能になると考えられる.

## 3 運動モデルを用いた視覚サーボ系の設計

視覚サーボ系においてカメラの画像情報を決定するのは, カメラの位置, 姿勢と対象物の位置, そして, カメラの結像系のモデルである. この3つの関係を考慮し, 対象物の運動モデルを用いた視覚サーボ系を設計する.

### 3.1 視覚サーボ系の設定

本研究では, Fig.2 で与える視覚サーボ系について考える. Fig.2 において  $O_w$  はワールド座標系,  $O_c$  はカメラ座標系を表す.

3次元空間

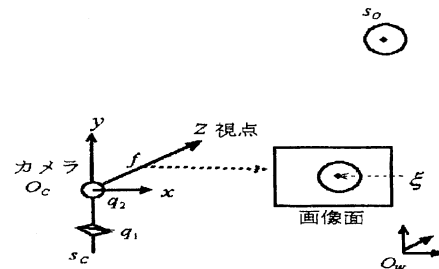


Fig. 2 視覚サーボ系のブロック線図

### 3.2 特徴量

特徴量とは、画像からその物体の位置、形状等を一意に決定できる特徴である。Fig.2 から分かるように本研究で考える対象物の形状は球である。この対象物の特徴量は、球の中心座標とする。

この場合、画像面上に投影された対象物の中心点を特徴量  $\xi_p$  [pixel] と表す。また、特徴量の目標値は  $\xi_r = (0,0)^T$  [pixel] とする。これは、画像の中心座標である。視覚サーボ系において制御目的は、特徴量  $\xi_p$  を特徴量  $\xi_r$  に一致させることであるので、この場合、制御目的は対象物を画像中心に捕えるということである。

### 3.3 物体の運動モデル

物体の運動モデルは、非線形自律システム

$$\dot{p} = W(p)\theta^* \quad (1)$$

により生成されるとする。ここで、 $W(p)$  は対象物位置  $p$  の関数であり既知とする。この  $W(p)$  によって対象物がどのような運動を行うのか設定することが出来る。 $\theta^*$  は、運動の速度を表すパラメータであり、その値は未知であると仮定する。

この対象物の運動モデルを視覚サーボ系に考慮させた制御系を設計する。この場合、視覚サーボ系は、対象物の運動の非線形自律部分は、既知であり、どのパラメータが運動を決定するかも既知であるが、そのパラメータの値はわからないということになる。

#### 3.3.1 直線運動モデル

対象物が XY 平面の直線運動を行う場合の運動モデルは、x 方向の速度を  $v_x$ 、y 方向の速度を  $v_y$  とすることで次の式で表される。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$W(p) = I, \theta^* = (v_x \quad v_y)^T \quad (3)$$

#### 3.3.2 円運動モデル

対象物が XY 平面の円運動を行う場合、回転半径を  $r$ 、角速度を  $\omega$  とすることで対象物の位置は、

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \cos \omega t \\ r \sin \omega t \end{pmatrix} \quad (4)$$

となる。この時、運動モデルは次の式で表される。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -Y \\ X \end{pmatrix} \omega \quad (5)$$

$$W(p) = \begin{pmatrix} -Y \\ X \end{pmatrix}, \theta^* = \omega \quad (6)$$

### 3.4 制御対象モデル

Fig.2 で与えられるカメラのモデルは、z 軸を視点として、2つのモータにより X 軸回転と Y 軸回転が可能である。縦と横方向の首振り運動を行う 2 自由度運動モデルとする。この視点の首振り運動により対象物を画像中心に捕えることで対象物の運動を追従する。また、このカメラを搭載した制御対象モデルにおいて、カメラの位置姿勢  $s_c$  を決定する一般化座標は、各モータの角度である  $q_1, q_2$  である。

### 3.5 カメラのモデルの設定

カメラのモデルによって、カメラと対象物の位置関係によってどのような画像が生成されるかが決定する。実際のカメラの場合、画像の中心座標はカメラの光軸を通るとは限らない等、結像系にそのカメラ特有の性質を持っている。この性質をカメラの内部パラメータという。本研究では、簡単化のためカメラの内部パラメータは透視変換モデルとする。また、Fig.2 において  $f$  は焦点距離を表しカメラ座標系において画像が投影される画像面の位置を表す。

このときの画像面上の特徴量  $\xi$  をカメラと対象物の位置関係を基に求める。

まず、対象物のワールド座標上での位置を  $s_{ow}$ 、カメラ座標上での位置を  $s_{oc}$  とする。

$$s_{ow} = (X_{ow} \quad Y_{ow} \quad Z_{ow})^T \quad (7)$$

$$s_{oc} = (X_{oc} \quad Y_{oc} \quad Z_{oc})^T \quad (8)$$

また、カメラ座標のワールド座標上での位置を  $T$  とする。そして、 $R$  をワールド座標からカメラ座標系への回転行列とする。

$$T = (X_c \quad Y_c \quad Z_c)^T \quad (9)$$

式(7),(8),(9)を基に座標変換により、ワールド座標上での対象物の位置をカメラ座標系に変換するとカメラ座標での対象物位置は式(10)で表される。

$$\begin{pmatrix} X_{oc} \\ Y_{oc} \\ Z_{oc} \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} X_{ow} \\ Y_{ow} \\ Z_{ow} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} \quad (10)$$

カメラ座標系における対象物位置を式(11)のように透視変換することにより焦点距離  $f$  の位置に出来る

画像面座標に変換することで画像面座標  $\xi$  が算出される。

$$\xi = \frac{f}{Z_{oc}} \begin{pmatrix} X_{oc} \\ Y_{oc} \end{pmatrix} \quad (11)$$

この時の  $\xi$  の単位は m である。実際にカメラから得られる  $\xi_p$  の単位は pixel 値であるが、これは、変換係数を掛けることによる単位変換で変換できる。

### 3.6 画像ヤコビアンの設定

3.5 により算出した特徴量  $\xi$  は、カメラと対象物の位置関係を含んだものとなっている。カメラの運動による画像の変化を表す画像ヤコビアン  $J$  は、次の式のように式(11)で表される特徴量をカメラの運動パラメータ ( $q_1, q_2$ ) で偏微分した形となる。

$$J = \frac{\partial \xi}{\partial q} \quad (12)$$

そして、カメラの運動による画像の変化を表す画像ヤコビアン  $L$  は、次の式のように、式 (11) で表される特徴量を、対象物の位置 ( $p_x, p_y, p_z$ ) で偏微分したものとなる。

$$L = \frac{\partial \xi}{\partial p} \quad (13)$$

### 3.7 適応オブザーバ

速度パラメータ  $\theta^*$  と、特徴量  $\xi$  の推定値をそれぞれ  $\hat{\theta}, \hat{\xi}$  とし以下の式で表されるオブザーバを考える。

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\xi}} &= J\dot{q} + LW\hat{\theta} + H(\hat{\xi} - \xi) \\ \dot{\hat{\theta}} &= -W^T L^T P(\hat{\xi} - \xi) \end{aligned} \quad (14)$$

このオブザーバにおいて、 $P, H$  はオブザーバゲインを表す。ただし、 $H$  は任意の安定行列、 $Q$  は任意の正定行列であり、 $P$  は式(15)で与えられる Lyapunov 方程式を満たす正定行列である。

$$H^T P + PH = -Q, Q > 0 \quad (15)$$

このオブザーバは、カメラの運動量、対象物の運動量を考慮して、特徴量の推定値を算出する。そして、特徴量の推定誤差を基に、未知である速度パラメータを調整する機能を持つ。このオブザーバでは、対象物の運動を推定しているため、サーボ系のサンプリング周期  $T_s$  ごとの特徴量を推定することが可能である。

### 3.8 対象物運動モデルを考慮した視覚サーボ系

対象物の運動を考慮しない場合の視覚サーボ系は、Fig.1 で表される。この場合、特徴量は、画像更新のサ

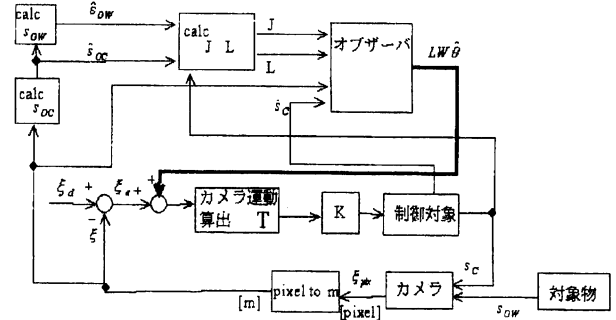


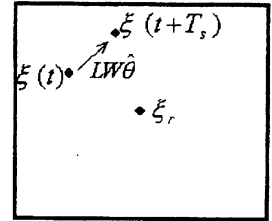
Fig. 3 運動モデルを考慮した視覚サーボ系

ンプリング周期  $T_i$  ごとに更新される。よって、 $T_i$  間は、特徴量は更新されず、過去の特徴量で制御を行っていることになる。

次に適応オブザーバを視覚サーボ系に加え、対象物の運動モデルを考慮した視覚サーボ系を

Fig.3 示す。この視覚サーボ系は、画像が更新されるまでの間も適応オブザーバにより、対象物の運動の推定が行われるため、サーボ系のサンプリング周期  $T_s$  ごとの特徴量の変化を予測することが可能である。

特徴量の予測は、Fig.4 表しているように、現在時刻での特徴量を  $\xi(t)$  とするとその未来の値  $\xi(t+T_s)$  を、時刻  $t+T_s$  時の物体の運動における特徴量変化量  $LW\hat{\theta}$  だけ変化させることで予測させている。なお、運動の推定が完全に行えた場合は、特徴量の未来値が完全に予測できることになるので画像を取得しなくても予測値だけの制御が可能となる。



画像

Fig. 4 特徴量の予測

## 4 シミュレーション

設計した視覚サーボ系の有効性を検証するためにシミュレーションを行う。本研究では、視覚サーボ系のシミュレーションを、C 言語と、OpenGL を用いて作成した 3 次元アニメーションによるビジュアルサーボリングシミュレーション環境を用いて行う。

### 4.1 ビジュアルサーボシミュレーション環境

シミュレーション環境の概観を Fig.5 示す。この図において、ウィンドウ 1 は、ワールド座標を表示するものであり、時間によって変化するカメラと対象物の運動や、位置関係を視覚的に表現する。ウィンドウ 2 は、ワールド座標上のカメラ位置における画像を表示する。このウィンドウを画像処理することにより、対象物の特徴量を抽出することが可能である。このシミュレーション環境は、カメラのモデル、制御対象のモデル、対象物の運動のモデルを設定することで

そのモデル通りのシミュレーションが可能なものとなっている。

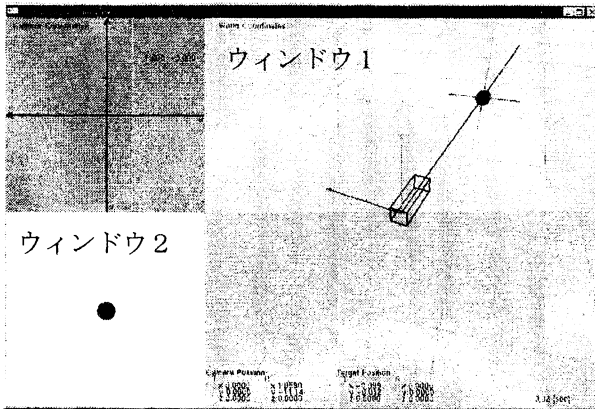


Fig. 5 シミュレーション環境概観

#### 4.2 シミュレーションパラメータ

対象物の運動は、XY 平面上の円運動でそのパラメータは回転半径  $r=0.1$ [m]、角速度  $\omega=3.5$ [rad/sec]とする。また、シミュレーションにおける画像更新のサンプリング周期  $T_i$  は  $0.1$ [sec]、サーボ系のサンプリング周期  $T_s$  は  $0.01$ [sec]とする。また、オブザーバゲインは、以下の様に設定した。

$$P = \begin{pmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{pmatrix}, H = \begin{pmatrix} -10 & 0 \\ 0 & -10 \end{pmatrix} \quad (16)$$

#### 4.3 対象物運動の推定

Fig.6 未知である速度パラメータの推定値を示す。そして、Fig.7 特徴量の推定値と特徴量を示す。実線が特徴量、鎖線が特徴量推定値である。

Fig.6 へ、未知パラメータは、およそ5秒後に一定値に収束していることが分かる。また、Fig.7 へ特徴量推定値は、初めは特徴量に対して誤差があるが、未知パラメータが一定値に収束した5秒付近では推定誤差がほぼ0となっており良好に特徴量を推定出来ている。

#### 4.4 追従応答

Fig.8、対象物運動を予測した場合の追従応答と、予測しない場合の追従応答を示す。実線が予測した場合の追従応答、点線が予測しない場合の追従応答となる。予測した場合は、特徴量目標値である  $0$ [pixel]に対する偏差が減少していることが分かる。

### 5 おわりに

本研究では、構築したビジュアルサーボシミュレーション環境に、適応オブザーバの理論を実装し、設計した視覚サーボ系のシミュレーションを行った。そして、シミュレーションにより視覚サーボ系において対象物の運動モデルを推定し特徴量の変化を予測可能で

あることを確認した。

今後の課題は、対象物のカメラ視点に対する奥行き方向の運動による画像の大きさの変化を対象物の3次元運動に結びつけて、3次元運動の推定法を考える。また、実機への適応も考えて行きたい。

#### 参考文献

- 1) 橋本浩一, 視覚と制御, SICE (2001)
- 2) 橋本浩一, 木村秀紀, ビジュアルサーボ非線形オブザーバアプローチ, 日本ロボット学会誌 (1995)

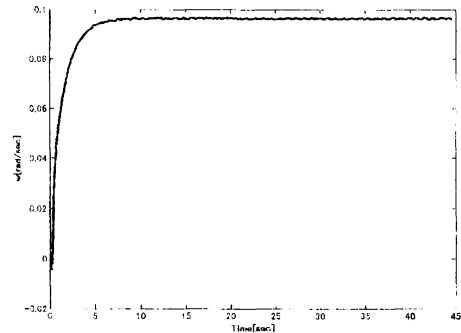


Fig. 6 速度パラメータ推定値

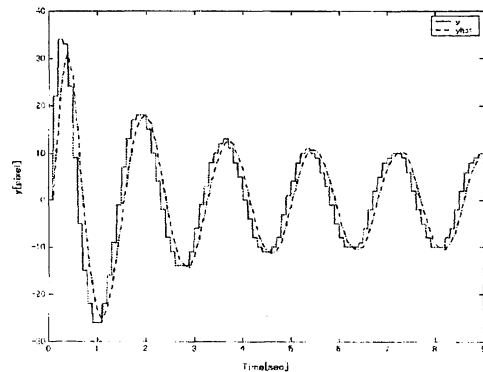


Fig. 7 特徴量と特徴量推定値 (y 軸)

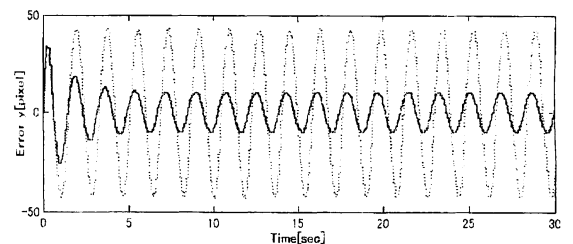
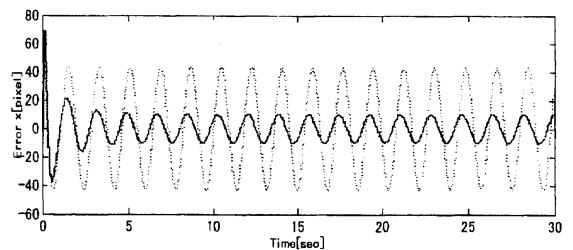


Fig. 8 予測ありと予測なしの場合の追従応答の比較