

NAIST-IS-MT1051033

修士論文

PTZカメラを用いた視覚サーボ系における  
運動パラメータ推定

川尻 圭亮

2012年2月2日

奈良先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に  
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

川尻 圭亮

審査委員：

杉本 謙二 教授 (主指導教員)

湊 小太郎 教授 (副指導教員)

平田 健太郎 准教授 (副指導教員)

# PTZカメラを用いた視覚サーボ系における 運動パラメータ推定\*

川尻 圭亮

## 内容梗概

視覚情報に基づいて追従制御をおこなうことを一般に視覚サーボとよぶ。カメラから視覚情報を取得して追従制御をおこなう場合、ビデオサンプリング周期や画像処理にかかる時間から、フィードバック制御だけでは追従偏差が残ってしまう場合がある。そこで、対象の運動を予測してフィードフォワード制御を加えることで追従特性を改善させる研究がおこなわれてきた。本研究では、PTZ（パン・チルト・ズーム）カメラを用いた視覚サーボ系を考え、得られた動画像情報から対象物の運動推定をおこなうことを考える。先行研究では、パラメトリックな運動モデルを仮定したとき、非線形オブザーバによって運動パラメータを推定する方法が提案されている。本研究では、その手法を基にズーム量の変化を考慮した推定法を提案する。そして、提案法の有効性をシミュレーションにより検証する。

## キーワード

視覚サーボ, PTZ カメラ, 運動パラメータ推定, 適応オブザーバ, ズーム

---

\*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT1051033, 2012年2月2日.

# Motion Parameter Estimation for Visual Servoing with PTZ camera\*

Keisuke Kawajiri

## Abstract

Visual servo is a kind of tracking control based on real time visual information. When tracking control is implemented, sometimes tracking error will remain because of the time delay caused by slow video sampling rate and or computations for the image processing. The tracking performance can be improved by the feed-forward control based on the estimation of the object motion. In this paper, we consider this problem with PTZ (Pan-Tilt-Zoom) camera. The motion parameter estimation by nonlinear observers in previous work is extended to the current case. The result is verified by numerical simulations

## Keywords:

Visual Servo, PTZ Camera, Motion Parameter Estimation, Adaptive Observer, Zoom

---

\*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1051033, February 2, 2012.

# 目次

1. はじめに	1
1.1 研究背景と目的	1
1.2 論文の構成	3
2. 視覚サーボ系の構成	4
2.1 カメラモデル	4
2.2 駆動系	6
2.3 物体の運動モデル	7
3. 運動パラメータの推定	9
3.1 特徴量のダイナミクス	9
3.2 適応オブザーバ	10
3.3 シミュレーション	11
4. 応用例	15
4.1 ズーム量の決定方法	15
4.2 シミュレーション	16
4.2.1 ズーム制御のみによる対象の追跡	16
4.2.2 円運動する2体の対象の追跡	25
5. 終わりに	29
5.1 まとめ	29
5.2 今後の課題	29
謝辞	30
参考文献	31
付録	33
A. ヤコビアン の導出	33

## 目 次

1	視覚サーボ系のブロック線図	4
2	ピンホールカメラモデル	5
3	カメラステージモデル	7
4	物体の運動モデル	8
5	特徴量の予測	11
6	シミュレーションの概観	12
7	焦点距離の変化	13
8	推定速度パラメータ	14
9	運動推定パラメータ	18
10	対象物の画像面上での軌跡 (ズーム量の変化なし)	19
11	対象物の画像面上での軌跡 (運動予測なし)	19
12	対象物の画像面上での軌跡 (Method(a) による運動予測)	20
13	対象物の画像面上での軌跡 (Method(b) による運動予測)	20
14	対象物の画像面上での軌跡 (Method(c) による運動予測)	21
15	運動推定パラメータ	22
16	対象物の画像面上での軌跡 (ズーム量の変化なし)	22
17	対象物の画像面上での軌跡 (運動予測なし)	23
18	対象物の画像面上での軌跡 (Method(a) による運動予測)	23
19	対象物の画像面上での軌跡 (Method(b) による運動予測)	24
20	対象物の画像面上での軌跡 (Method(c) による運動予測)	24
21	シミュレーション概観図	25
22	運動推定パラメータ	26
23	対象物の画像面上での軌跡 (運動予測なし)	27
24	対象物の画像面上での軌跡 (Method(a) による運動予測)	27
25	対象物の画像面上での軌跡 (Method(b) による運動予測)	28
26	対象物の画像面上での軌跡 (Method(c) による運動予測)	28

## 表 目 次

# 1. はじめに

## 1.1 研究背景と目的

近年、制御理論やコンピュータ技術、画像処理技術の発展により、視覚センサから得られる情報を基に運動制御するシステムの開発が盛んである。例えば、トラッキング顕微鏡 [1] がある。この顕微鏡は画像情報を基に、移動する観察対象を常に顕微鏡の視野中心でとらえられるようにステージが制御されている。また、移動体の3次元位置計測にも応用されている [2]。これは、2台のカメラのパン・チルト方向を取得画像の対象の位置と運動予測に基づいて制御することで対象に追従している。そして、現在のカメラの視線方向から、三角測量法により位置計測をおこなっている。このように、視覚センサから得られる情報を基に追従制御をおこなうシステムのことを視覚サーボ系と呼ぶ。視覚情報を用いてサーボ系を構成することで、未知の環境や周囲の環境の動的な変化に対応できるなど汎用性が高いため、幅広い分野での応用が期待されている。

一方で、カメラから得られる視覚情報を用いて制御する場合、フレームレートや画像処理時間による遅れ時間が問題となる。フレームレートとは、1秒間に何枚の画像を取得するかを表す単位で、一般的なカメラは30 [fps] である。つまり、1枚の画像を取得するまでにかかる時間は33 [ms] である。一般に機械システムのアクチュエータとして用いられるサーボモータは1 [ms] 程度のサンプリングレートで制御されているため、フィードバックループにカメラが存在する場合、過去の情報に基づいて制御していることになり追従偏差が残る要因となる。この問題の解決手段として、カメラの高サンプリングレート化と画像情報から対象の運動予測をおこなうことが挙げられている [3]。前者は、遅れ時間を小さくすることで追従特性を改善させようという考え方である。実際に、サンプリングレートが1 [ms] のカメラが開発されており、その実現方法や応用について述べられている [4]。また、前述したトラッキング顕微鏡にも応用されている。しかし、このようなカメラは高価なことが障害となり、容易に導入できないことが短所である。後者は予測した未来の情報を用いることで遅れ時間を補償しようという考え方である。対象の未来の動きが予測できれば、それを利用してフィードフォワード制御を加える

ことで追従特性を改善することが可能となる [2][5][6]. ただし, 予測の精度が悪ければ, 追従特性が悪化する可能性もある. 従って, 二つの解決手段のうちどちらを用いるかは, 適用する場面に応じて選ぶ必要がある.

また, カメラから得られた視覚情報を用いる場合, 画像処理などのために対象を確実に画像上でとらえること, 高解像度画像を得ることが重要になる. この要求を満たすひとつの手段として, カメラのズーム機能を用いることが挙げられる. ズーム機能はカメラの焦点距離を能動的に変えることができる機能であり, それを利用することで観察範囲を変化させたり, 高解像度の画像を得ることも可能となる. この利便性から, ズーム機能に着目した研究がおこなわれている. [7] では, マニピュレータ系に視覚サーボを適用する場合を考え, マニピュレータの可動範囲が物理的に限られていることによって起こる追従限界問題を取り上げている. この問題に対して, アーム機構とズーム機構の特性を活かした制御法を提案し, 追従の速応性を損なうことなく観察範囲が広げられることを示している. また, カメラの奥行き方向に移動する対象に対して, 一定の解像度で撮影するためにズーム機能を用いる方法 [8] や対象をできるだけ高解像度にかつ, 画像面上から逸脱しないように撮影するために, 観察の不確実性に応じてズーム量を制御する方法 [9] などが研究されている.

そこで, 本研究ではズーム機能を用いた視覚サーボ系を検討する. そして, 視覚センサは導入が容易な一般的なカメラを利用し, 移動体の観察にも対応させるために, カメラがパン・チルト方向に回転可能なステージに取り付けられている場合を考える. このようなカメラは, PTZ (パン・チルト・ズーム) カメラと呼ばれている. 本研究の目的は, この PTZ カメラの取得画像から観察対象の運動推定をおこなうことである.

## 1.2 論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。第2節では、視覚サーボ系の要素であるカメラモデル、制御対象、物体の運動モデルについて説明する。第3節では、提案する運動パラメータの推定法について述べ、シミュレーションにより有効性を示す。第4節では、応用例として推定した運動パラメータを用いたズーム量の制御法について述べる。最後の第5節では、本研究のまとめと今後の課題を述べる。

## 2. 視覚サーボ系の構成

本研究では図1に示す視覚サーボ系について考える。そこで、本節では図1の各要素について述べていく。はじめに、カメラでとらえた対象と画像の結像関係を表すカメラモデルについて述べる。次に制御対象についてふれ、最後に物体の運動モデルについて説明する。

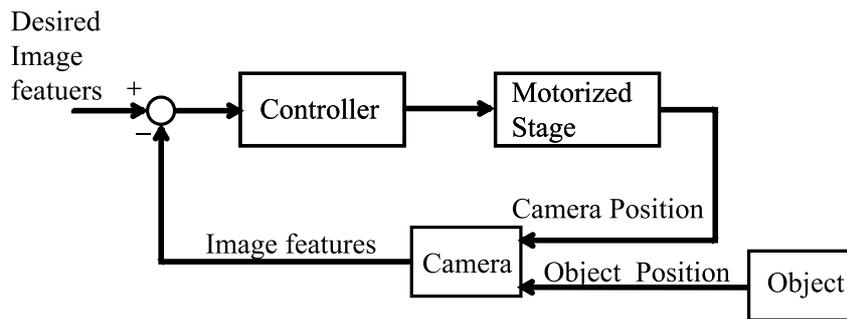


図1 視覚サーボ系のブロック線図

### 2.1 カメラモデル

カメラでとらえた対象の位置を画像平面上へ変換するカメラモデルについて述べる。ここでは、図2で示すピンホールカメラモデルを用いる。図中の $O_w$ はワールド座標系、 $O_c$ はカメラ座標系、 $f$ は焦点距離である。そして、画像面上に投影された対象物の中心点座標を特徴量 $\xi$ とする。ここで、特徴量とは画像からその物体の位置、形状などを一意に決定できる特徴のことをいう。まず、この特徴量 $\xi$ とカメラ、対象物の位置関係について述べる。対象物のワールド座標系とカメラ座標系での位置をそれぞれ、 $S_{ow}$ 、 $S_{oc}$ とする。

$$S_{ow} = [X_{ow} \quad Y_{ow} \quad Z_{ow}]^T \quad (1)$$

$$S_{oc} = [X_{oc} \quad Y_{oc} \quad Z_{oc}]^T \quad (2)$$

また、カメラ座標系の原点の位置をワールド座標上の $T$ とする。

$$T = [X_c \quad Y_c \quad Z_c]^T \quad (3)$$

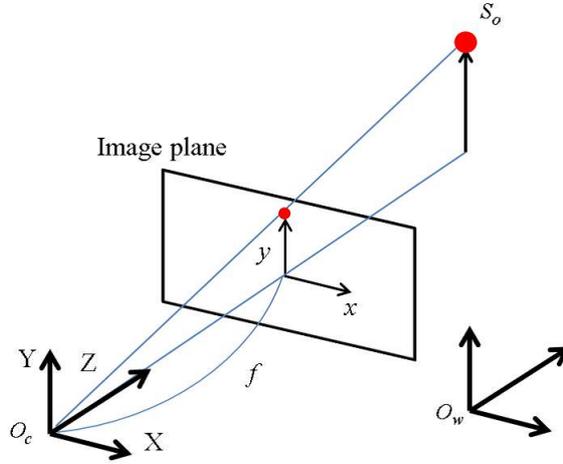


図 2 ピンホールカメラモデル

ここで、ワールド座標系からカメラ座標系への変換を考える。カメラの水平角、仰角をそれぞれ  $q_1, q_2$  とすると回転行列  $R$  は、

$$\begin{aligned}
 R &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q_2 & -\sin q_2 \\ 0 & \sin q_2 & \cos q_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_1 & 0 & \sin q_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin q_1 & 0 & \cos q_1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos q_1 & 0 & \sin q_1 \\ \sin q_1 \sin q_2 & \cos q_2 & -\cos q_1 \sin q_2 \\ -\sin q_1 \cos q_2 & \sin q_2 & \cos q_1 \cos q_2 \end{bmatrix} \quad (4)
 \end{aligned}$$

となる。カメラ座標系での対象の位置  $S_{oc}$  は  $S_{ow}, T, R$  を用いると、

$$S_{oc} = R(S_{ow} - T) \quad (5)$$

と表すことができる。さらに、(5) 式に (1), (3), (4) 式を代入すると

$$\begin{bmatrix} X_{oc} \\ Y_{oc} \\ Z_{oc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos q_1(X_{ow} - X_c) + \sin q_1(Z_{ow} - Z_c) \\ \sin q_1 \sin q_2(X_{ow} - X_c) + \cos q_2(Y_{ow} - Y_c) - \cos q_1 \sin q_2(Z_{ow} - Z_c) \\ -\sin q_1 \cos q_2(X_{ow} - X_c) + \sin q_2(Y_{ow} - Y_c) + \cos q_1 \cos q_2(Z_{ow} - Z_c) \end{bmatrix} \quad (6)$$

を得る。

ピンホールカメラモデルでは、カメラ座標系における対象物の位置が画像平面上の座標  $\xi$  に変換され、次のように算出される。

$$\begin{aligned}\xi &= \frac{f}{Z_{oc}} \begin{bmatrix} \frac{X_{oc}}{S_x} \\ \frac{Y_{oc}}{S_y} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{f(\cos q_1 (X_{ow} - X_c) + \sin q_1 (Z_{ow} - Z_c))}{S_x(-\sin q_1 \cos q_2 (X_{ow} - X_c) + \sin q_2 (Y_{ow} - Y_c) - \cos q_1 \cos q_2 (Z_{ow} - Z_c))} \\ \frac{f(\sin q_1 \sin q_2 (X_{ow} - X_c) + \cos q_2 (Y_{ow} - Y_c) - \cos q_1 \sin q_2 (Z_{ow} - Z_c))}{S_y(-\sin q_1 \cos q_2 (X_{ow} - X_c) + \sin q_2 (Y_{ow} - Y_c) - \cos q_1 \cos q_2 (Z_{ow} - Z_c))} \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (7)$$

ここで、 $S_x, S_y$  は  $x, y$  方向の画像素子上での距離と画素数の比である。

次に、このカメラモデルにおける焦点距離の影響について考える。対象の三次元空間内での動きの大きさと画像上での動きの大きさの関係は、(7) 式より、焦点距離の大きさに依存していることが分かる。つまり、対象の移動量が同じでも、焦点距離が大きくなるほど、画像変化は大きくなり、逆に、小さくなれば、画像変化も小さくなる。また、対象の奥行き方向  $Z_{oc}$  の変化に対しては、奥行き方向の距離が大きくなると、画像変化は小さくなり、奥行き方向の距離が小さくなると画像変化は大きくなる。

## 2.2 駆動系

ここで、制御対象はカメラを搭載した回転ステージとする (図 3)。カメラはレンズの焦点を原点とし、光軸を  $Z$  軸方向とする。また、ステージは 2 つのモータで  $X$  軸周り、 $Y$  軸周りに回転ができるものとする。この制御対象モデルにおいて、カメラの姿勢を決定する一般化座標は、各モータの角度  $q_1, q_2$  である。制御目的は、対象の画像平面上の座標  $\xi$  を目標値である  $\xi_r$  に一致させることであり、そのためにモータの回転角度を制御する。今回は、簡単のためにモータは速度制御されているものとし、ダイナミクスは考えない。そして、モータの回転速度は次のように調節されるものとする。

$$\dot{q} = -\lambda(\xi - \xi_r) \quad (8)$$

ただし,  $\lambda$  は 正のゲインである. これが視覚サーボ系の最もシンプルな形態である [11].

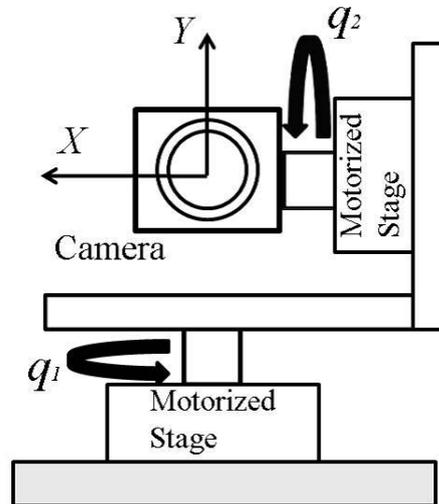


図 3 カメラステージモデル

## 2.3 物体の運動モデル

今回, 追跡する対象の運動は次の非線形自律システムで表現されると仮定する.

$$\dot{p} = W(p)\theta^* \quad (9)$$

ここで,  $p$  は物体の位置,  $W(p)$  は適当な次元の行列で  $p$  の関数であり既知とする.  $\theta^*$  は物体の運動速度を表すパラメータであり, 未知と仮定する. (9) 式を物体の運動モデルと呼ぶ. このモデルは広い範囲の運動を表すことができる [12]. 以下に式 (9) で表すことのできる運動モデルの例を示す (図 4).

物体が  $XY$  平面内で直線運動をおこなう場合,  $X$  方向の速度を  $v_x$ ,  $Y$  方向の速度を  $v_y$  とすると,  $W(p)$  と  $\theta^*$  は,

$$W(p) = I, \theta^* = [v_x \ v_y]^T \quad (10)$$

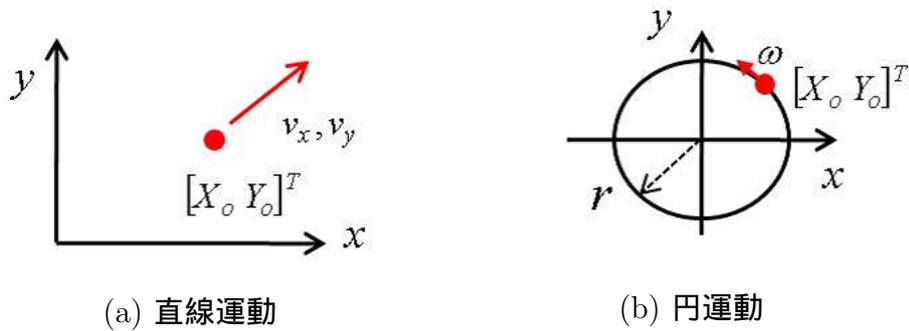


図 4 物体の運動モデル

となり、物体の運動モデルは次式のように表現される。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (11)$$

物体が  $XY$  平面内で円運動をおこなう場合、円運動の回転半径を  $r$ 、角速度を  $\omega$  とすると、物体の位置は、

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos \omega t \\ r \sin \omega t \end{bmatrix} \quad (12)$$

となるので、 $W(p)$  と  $\theta^*$  は、

$$W(p) = \begin{bmatrix} -y \\ x \end{bmatrix}, \quad \theta^* = \omega \quad (13)$$

となり、円運動をおこなう物体の運動モデルは次のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -y \\ x \end{bmatrix} \omega \quad (14)$$

### 3. 運動パラメータの推定

カメラステージの回転, 対象物の移動によって画像は変化する. さらに, 本研究ではカメラのズーム機能を用いるので焦点距離が変わることで, 画像が変化する. そこで本節では, はじめにそれらの関係を表す特徴量のダイナミクスについて述べる. そして, そのダイナミクスと運動モデルに基づいて運動推定をおこなう適応オブザーバについて説明する. 最後に, 数値シミュレーションによりズーム量の変化を考慮した運動推定とズーム量の変化を考慮していない場合の運動推定の比較をおこなう.

#### 3.1 特徴量のダイナミクス

特徴量  $\xi$  は, カメラの姿勢角, 対象物の位置, 焦点距離の関数である ((7) 式). ここで, それらの量の微小変化に対する特徴量の変化を考える. カメラの姿勢角, 対象物位置, 焦点距離の微小変化による特徴量の変化をそれぞれ  $J$ ,  $L$ ,  $R$  とすると,

$$J = \frac{\partial \xi}{\partial q} \quad (15)$$

$$L = \frac{\partial \xi}{\partial p} \quad (16)$$

$$R = \frac{\partial \xi}{\partial f} \quad (17)$$

と求められる (詳細な導出は付録に示す).  $q$  はカメラの運動パラメータ ( $q_1, q_2$ ),  $f$  は焦点距離を表している. そして,  $p$  は対象物位置 ( $p_x, p_y, p_z$ ) を表している. ここで, 今回は対象物位置の一般化座標とワールド座標は一致しているので,  $p$  と  $S_{ow}$  は等しくなる. そこで, 以下は  $p$  で表す. また,  $J$  は画像ヤコビアン,  $L$  は運動ヤコビアンと呼ばれている. この結果から, 特徴量のダイナミクスは次のように導出できる.

$$\dot{\xi} = J\dot{q} + L\dot{p} + R\dot{f} \quad (18)$$

### 3.2 適応オブザーバ

特徴量  $\xi$  と速度パラメータ  $\theta^*$  の推定値をそれぞれ  $\hat{\xi}$ ,  $\hat{\theta}$  とし, 特徴量のダイナミクス (18) と物体の運動モデル (9) 式に基づいて以下のオブザーバを構成する.

$$\dot{\hat{\xi}} = J\dot{q} + LW\hat{\theta} + Rf + H(\hat{\xi} - \xi) \quad (19)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = -W^T L^T P(\hat{\xi} - \xi) \quad (20)$$

行列  $H$  および  $P$  はオブザーバゲインに相当する. ただし,  $H$  は任意の安定行列で,  $P$  は次のリアプノフ方程式を満たす正定行列となる.

$$H^T P + PH = -Q, \quad Q > 0 \quad (21)$$

以下に適応オブザーバの安定性について示す. まず, 次の偏差系を考える.

$$\bar{\xi} = \xi - \hat{\xi}, \quad \bar{\theta} = \theta^* - \hat{\theta}, \quad e = \begin{bmatrix} \bar{\xi} \\ \bar{\theta} \end{bmatrix} \quad (22)$$

となり, (19), (20) 式を整理すると

$$\frac{d}{dt}(\xi - \hat{\xi}) = H(\xi - \hat{\xi}) + LW(\theta^* - \hat{\theta}) \quad (23)$$

$$\frac{d}{dt}(\theta^* - \hat{\theta}) = -W^T L^T P(\xi - \hat{\xi}) \quad (24)$$

となる. これより,

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} H & LW \\ -W^T L^T P & 0 \end{bmatrix} e \quad (25)$$

を得る. ここで, Lyapunov 関数候補を

$$V = e^T \tilde{P} e, \quad \tilde{P} = \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (26)$$

とおき, その微分は

$$\dot{V} = -\bar{\xi}^T Q \bar{\xi} \leq 0 \quad (27)$$

となる.  $\dot{V} = 0$  となるのは  $\bar{\xi} = 0$  のときのみである. さらにこのとき  $\bar{\theta} = 0$  となるため, 平衡点  $e = 0$  は漸近安定となる [10]. このオブザーバは, カメラの姿勢角

変化, 対象物の位置変化, 焦点距離の変化を考慮して, 特徴量の推定値を算出する. そして, 特徴量の推定誤差に基づいて運動パラメータの推定をおこなう [10]. その推定結果から, サーボ系のサンプリング周期ごとの特徴量を予測することが可能である. 図 5 のように, 現在時刻での特徴量を  $\xi(t)$  とすると,  $T_s$  秒後の特徴量  $\xi(t + T_s)$  は, 特徴量の変化量  $LW\hat{\theta}$  を用いて,

$$\xi(t + T_s) = \xi(t) + LW\hat{\theta} \cdot T_s \quad (28)$$

と求められる.

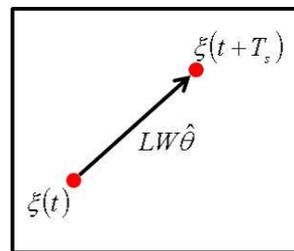


図 5 特徴量の予測

### 3.3 シミュレーション

等速直線運動する対象に対して, ズーム量を変化させながら運動パラメータを推定する場面を考える. そして, 提案した運動パラメータ推定法の有効性を検証するために, 次の 3 つの推定法でそれぞれシミュレーションをおこなう.

手法 (a) ズーム量の変化を考慮した推定法 (提案法)

手法 (b) 取得した画像における焦点距離は既知だが, オブザーバにズーム量変化を考慮した項を加えない

手法 (c) 焦点距離を初期状態のまま変化していないとして推定する方法

シミュレーション環境の概観を Fig. 6 に示す. 対象物の初期位置は  $(X_o, Y_o, Z_o) = (-100, -100, 800)$  [mm] とし, XY 平面を等速直線運動する移動体とする. その速度は X 方向, Y 方向にそれぞれ 80 [mm/s], 40 [mm/s] とする. カメラの焦点距離の初期値は 4.5 [mm] とし, 1.0 [sec] から, 3.0 [mm/s] の大きさで 20 [mm] まで変化

させる (図 7). また, 回転ステージは固定されているものとする. そして, 画像サイズは十分大きいものと仮定する. そして, ビデオサンプリング周期は 100 [ms], オブザーバゲイン  $P, H$  は以下のように設定した.

$$P = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} -8 & 0 \\ 0 & -8 \end{bmatrix} \quad (29)$$

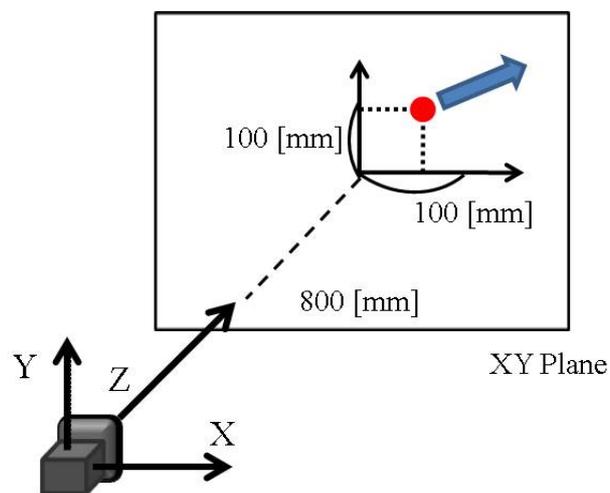


図 6 シミュレーションの概観

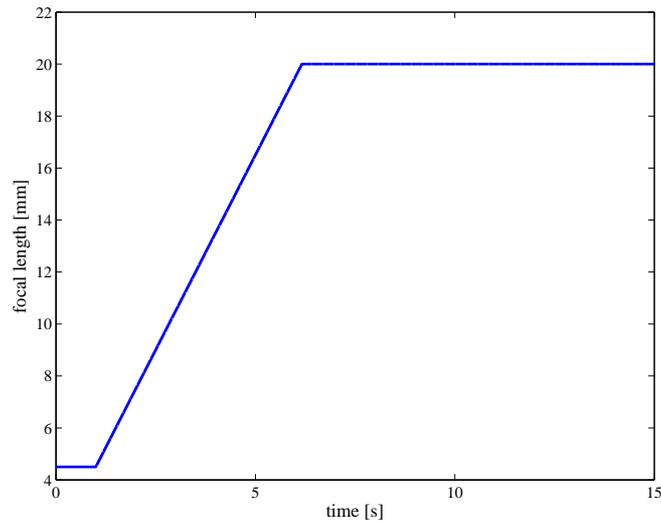
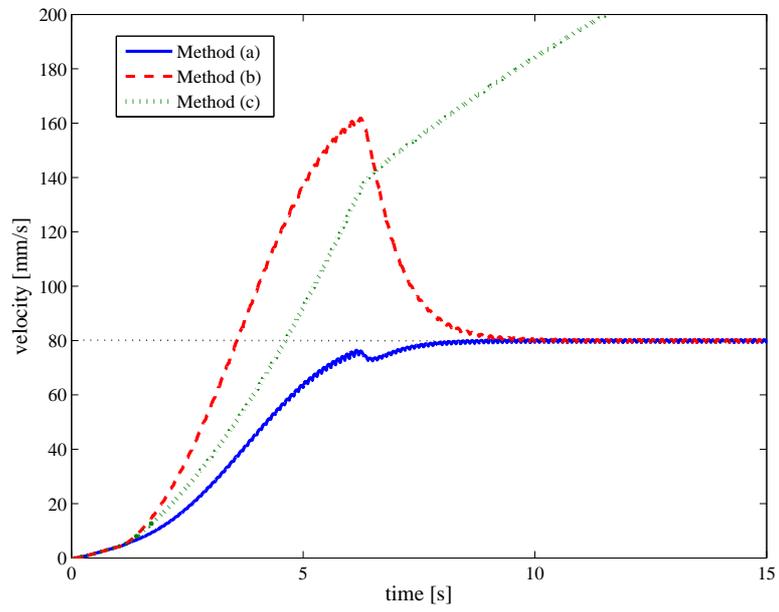
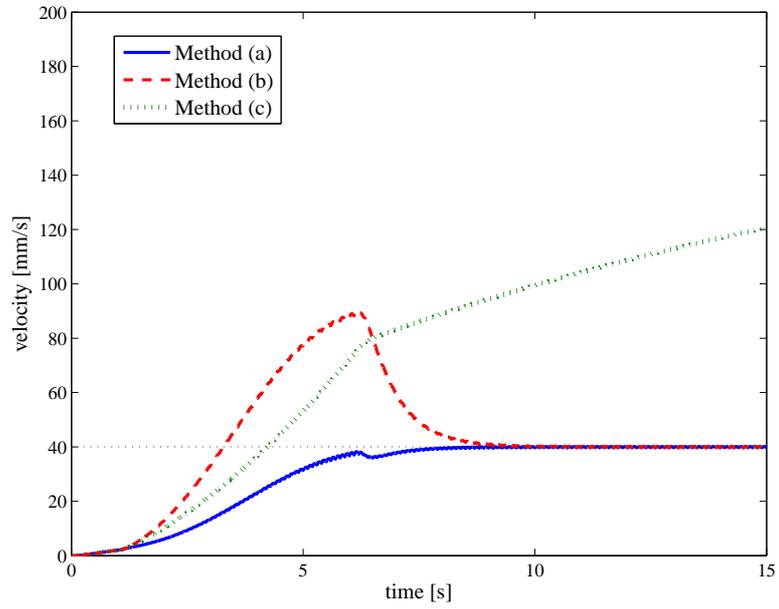


図 7 焦点距離の変化

シミュレーション結果を図 8 に示す. 図 8 は運動推定パラメータを示している. 図中の実線が手法 (a), 破線が手法 (b), 点線が手法 (c) の結果である. 結果より, 手法 (a) は大きく真値から離れることなく収束していることが分かる. しかし, 手法 (b), (c) はズーム量の変化がすると, 大きく真値から離れていくことが分かる. これは, ズーム量の変化を考慮していないので, ズームによる特徴量の変化が対象の移動によるものとして推定された結果だと考えられる. しかし, 手法 (b) は画像更新毎の焦点距離は既知なので, ズーム量の変化がなくなると推定パラメータが真値に収束していくことが分かる. この結果から, 提案法はズーム量の影響を考慮して推定ができていることが確かめられた.



(a) X 方向



(b) Y 方向

図 8 推定速度パラメータ

## 4. 応用例

本節では、運動予測をズーム量制御に用いることを検討する。そこで、ズーム量を大きくして対象の詳細観察をおこなったり、ズーム量を小さくすることで画像上から逸脱しそうな対象をとらえることを考える。

本節では、まずズーム量の決定方法について述べ、その後にシミュレーションにより有効性を検証する。

### 4.1 ズーム量の決定方法

ズーム量は次サイクル取得する画像で対象が画像から逸脱しない範囲で、可能な限り大きく撮影できるように調節する。そこで、まず対象物の次サイクルの位置を予測するためにカメラの回転量を算出する。カメラの回転速度は、式 (8), (28) より、

$$\dot{q} = -\lambda(\xi(t) + LW\hat{\theta} \cdot T_s - \xi_r) \quad (30)$$

と求めることができる。従って、カメラの回転量を考慮したときの次サイクルの対象位置は

$$\xi(t + T_s) = \xi(t) + J\dot{q} \cdot T_s + LW\hat{\theta} \cdot T_s \quad (31)$$

と導出できる。

ここで、画像サイズを  $(x_{\text{size}} \times y_{\text{size}})$ 、ビデオサンプリング周期を  $T_s$ 、また、対象の  $x$  方向の特徴量を  $\xi_x$  とする。さらに、対象の領域で  $x$  方向の最大値、最小値をそれぞれ、 $\xi_{\text{max}}$ 、 $\xi_{\text{min}}$  とする。そして、次サイクルの焦点距離を  $f_{\text{next}} = \alpha f$  と表すとき、 $\alpha$  をつぎのように場合わけして求める。

$$\xi_x(t + T_s) \geq 0$$

$$\alpha = \frac{x_{\text{size}} / 2}{(\xi_{\text{max}} + J\dot{q} \cdot T_s + LW\hat{\theta} \cdot T_s)} \quad (32)$$

$$\xi_x(t + T_s) < 0$$

$$\alpha = -\frac{x_{\text{size}} / 2}{(\xi_{\text{min}} + J\dot{q} \cdot T_s + LW\hat{\theta} \cdot T_s)} \quad (33)$$

y 方向についても同様に  $\alpha$  を求めて、それぞれ算出した  $\alpha$  を比較して小さいほうを用いて次の焦点距離  $f_{next}$  を決定する。

## 4.2 シミュレーション

本項では、次の 2 通りの場面を想定したシミュレーションをおこなう。

- 1 パン・チルトの可動範囲外を対象が移動している場合
- 2 2 体の対象の追跡を行う場合

シミュレーション 1 は、パン・チルト方向への動きがない場面を想定しているため、ズーム量制御だけで対象を追跡しなくてはならない。また、シミュレーション 2 は、パン・チルト・ズームの制御を組み合わせる必要がある。

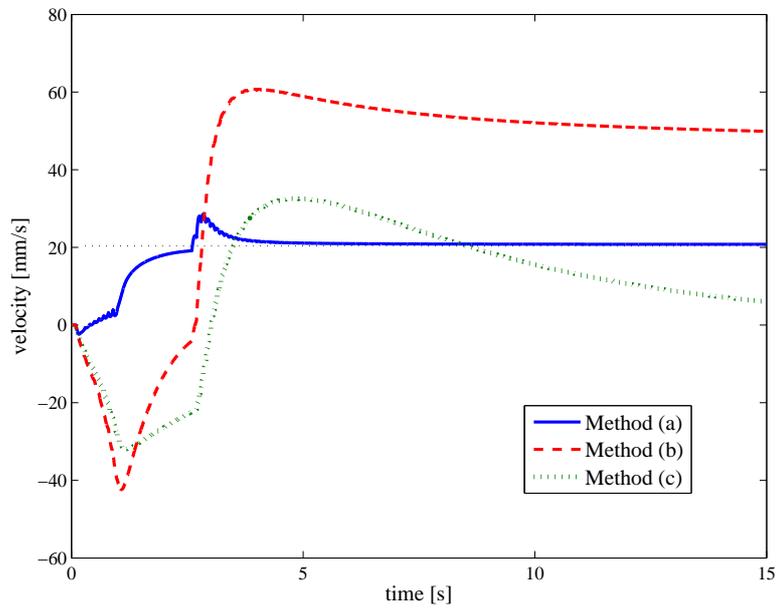
両方のシミュレーションとも、ズーム量算出に用いる運動推定パラメータは、比較のため 3.3 項のシミュレーションで述べた手法 (a), (b), (c) で求める。さらに、運動予測を用いることの有効性を示すために、運動予測なしでズーム量を求めた場合のシミュレーションもおこなう。このズーム量は、現在の対象の位置で対象の大きさが最大となるように求めた。

### 4.2.1 ズーム制御のみによる対象の追跡

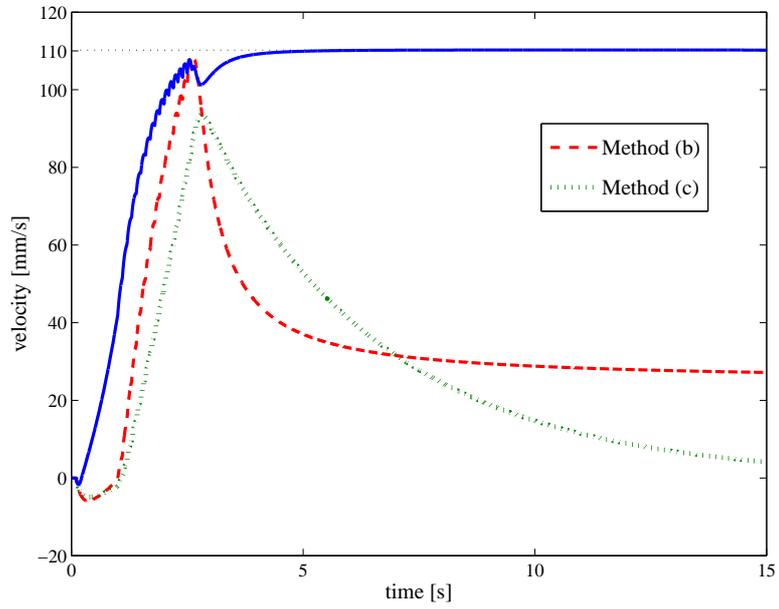
このシミュレーションでは、対象が XY 平面を直線運動する場合と円運動する場合の 2 通りのシミュレーションをおこなう。まず、対象が直線運動する場合について示す。対象物の大きさは半径 3 [mm] で、初期位置は  $(X_o, Y_o, Z_o) = (-160, -200, 800)$  [mm] とする。そして、X 方向、Y 方向にそれぞれ 20 [mm/s], 110 [mm/s] の速度で等速直線運動をしている。また、カメラの画像サイズは QVGA(320 × 240)、ビデオサンプリング周期は 100 [ms] と設定した。

直線運動のシミュレーション結果を図 9 から図 14 に示す。図 9 は運動推定パラメータを示している。(a), (b) はそれぞれ X 方向、Y 方向の推定結果である。図より、ズーム量の変化を考慮している手法 (a) だけが真値に収束していることが分

かる。そして、図 10 から図 14 は対象物の画像面上での軌跡を表している。図 10 は、ズーム量を初期値から変化させなかった場合の結果を示している。この図より、対象物が直線運動をおこなっていることが確認できる。そして、図 11 から図 14 は対象の移動とズーム量の変化により、図中の矢印で示したように画像上を移動していく。ズーム量制御に運動予測を用いない場合、対象が 2.7 [s] で画像面上から逸脱する (図 11)。また、ズーム量制御に運動予測を用いた場合も手法 (b),(c) に関しては、推定が正確におこなわれていないため、それぞれ 3.8 [s], 2.7 [s] で画像上から対象が逸脱する (図 13, 14)。手法 (a) については、推定が過渡状態のときに対象が画像上からはみだすことはあったが、定常状態では画像面上に全体をとらえられていることが確認できる。



(a) X 方向



(b) Y 方向

図 9 運動推定パラメータ

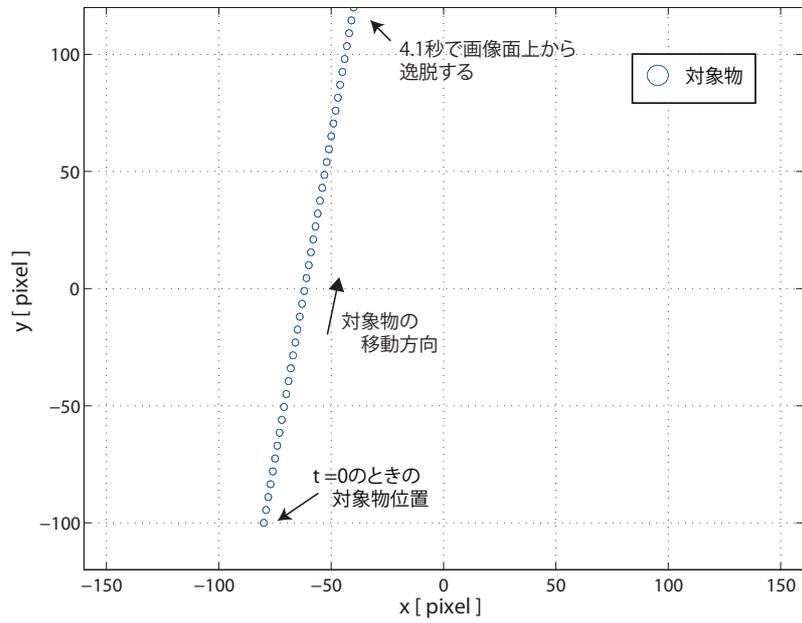


図 10 対象物の画像面上での軌跡 (ズーム量の変化なし)

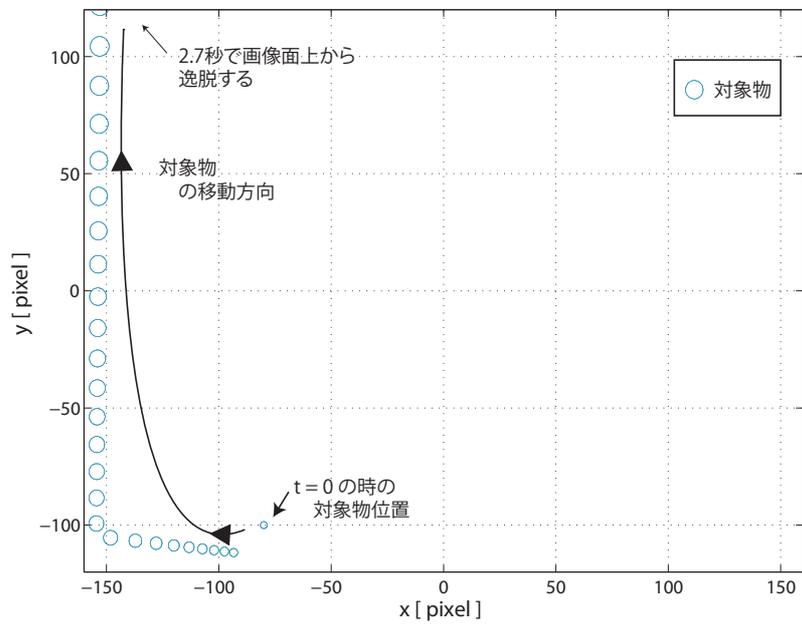


図 11 対象物の画像面上での軌跡 (運動予測なし)

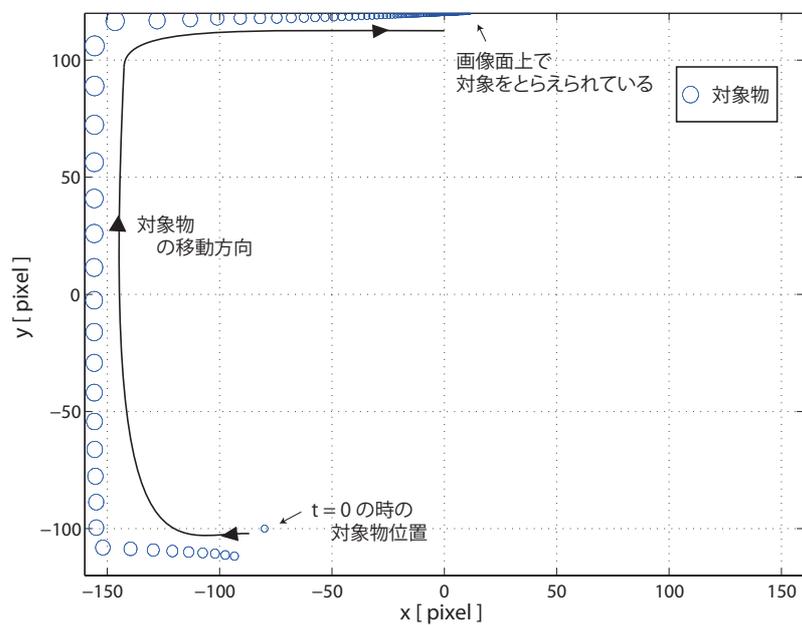


図 12 対象物の画像面上での軌跡 (Method(a) による運動予測)

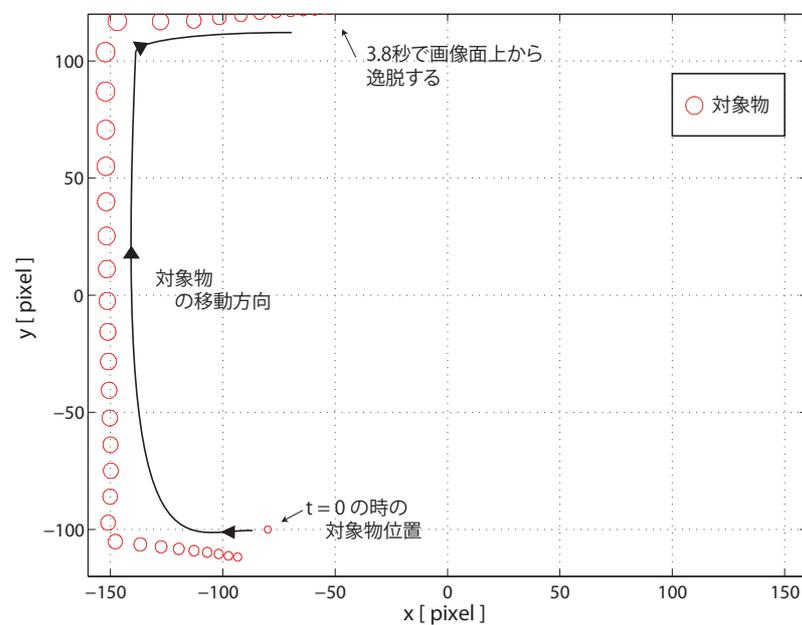


図 13 対象物の画像面上での軌跡 (Method(b) による運動予測)

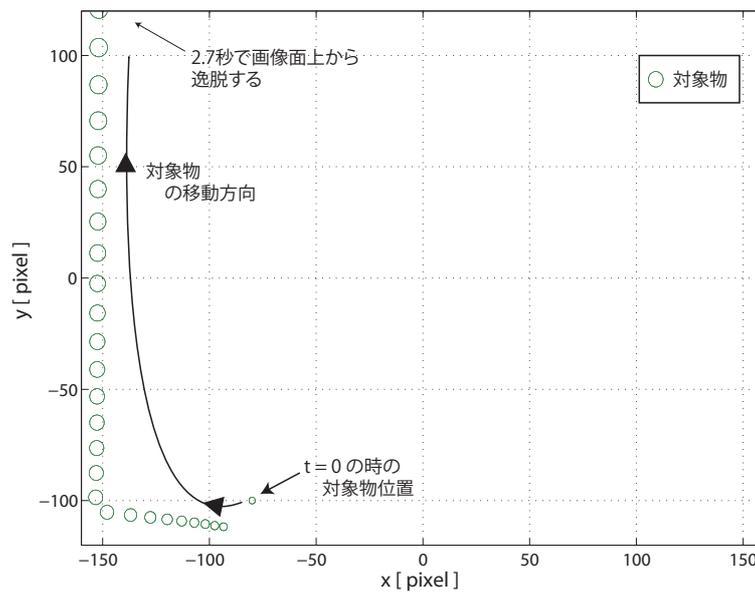


図 14 対象物の画像面上での軌跡 (Method(c) による運動予測)

次に, 対象が円運動する場合について示す. 対象物の大きさは半径 3 [mm] で, 初期位置は  $(X_o, Y_o, Z_o) = (100, 0, 800)$  [mm] とする. そして, 対象は半径 100 [mm], 角速度 2[rad/s] で円運動をしている. また, カメラは Y 軸周りに 10 [deg] 回転した状態とする. カメラの画像サイズ, ビデオサンプリング周期は直線運動する場合と同じ値とする. そして, ズーム量の制御は 3[s] からおこなった.

円運動のシミュレーション結果を図 15 から図 20 に示す. 図 15 は, 運動パラメータの推定結果を表している. 図より, 手法 (a) は手法 (b), (c) に比べて, ズーム量変化による推定値の変動を小さくできていることがわかる. そして, 図 16 から図 20 は対象物の画像面上での軌跡を表している. 図中の実線で囲んだ枠はカメラで撮影できる範囲を示している. ただし, 今回はシミュレーションなので, 範囲を広げて画像から逸脱した対象も描いている. また, ズーム量を 3 [s] から変化させたので, 対象の軌跡も 3 [s] から表示させた. 図 16 は, ズーム量を変化させなかった場合の対象軌跡を表している. この図と他の結果 (図 17 から図 20) を比較することで, ズーム量変化によって対象が大きく撮影できていることがわかる. また, 図 17 から図 20 より手法 (a) だけが対象をすべての時間で画像面上にとらえられていることが確認できる.

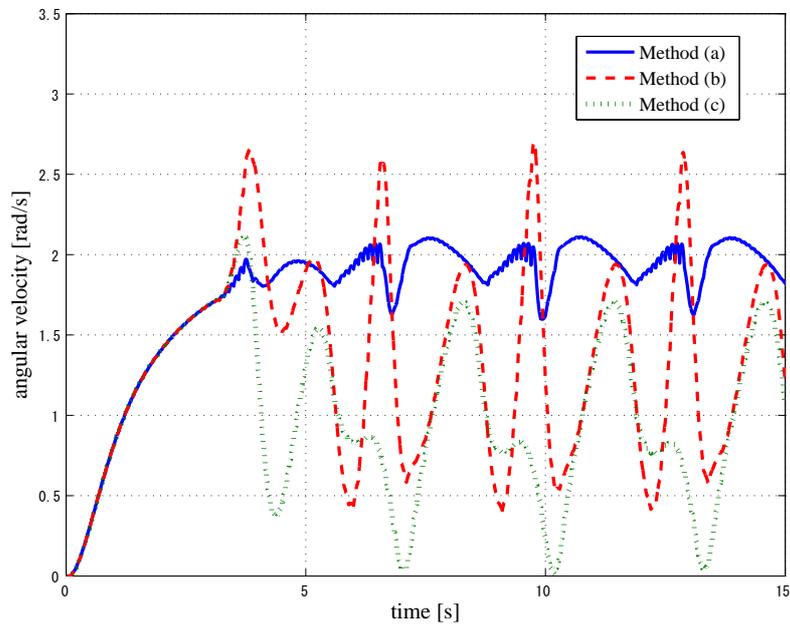


図 15 運動推定パラメータ

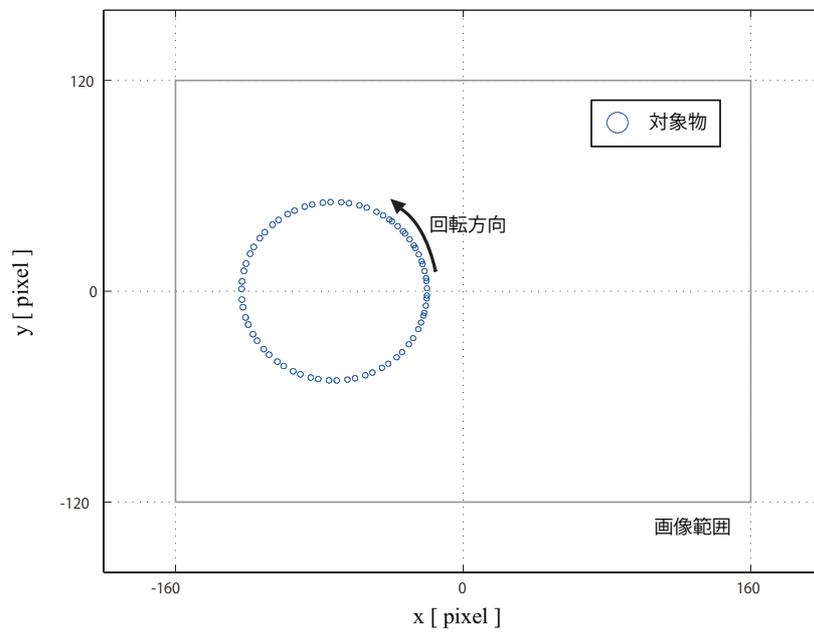


図 16 対象物の画像面上での軌跡 (ズーム量の変化なし)

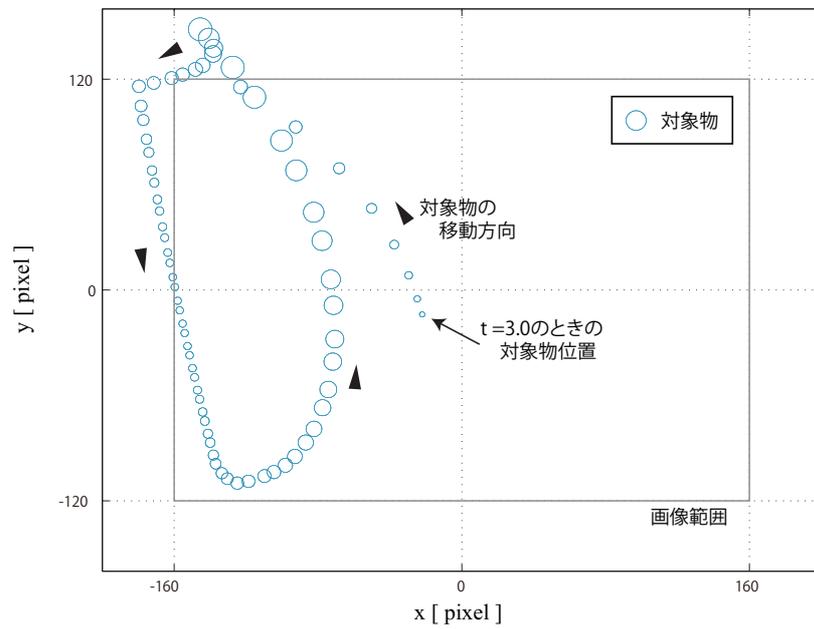


図 17 対象物の画像面上での軌跡 (運動予測なし)

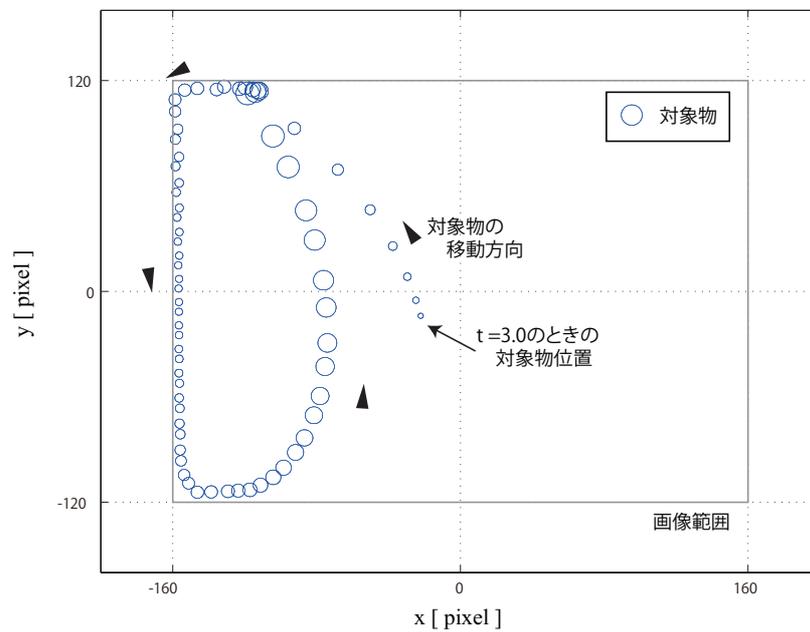


図 18 対象物の画像面上での軌跡 (Method(a) による運動予測)

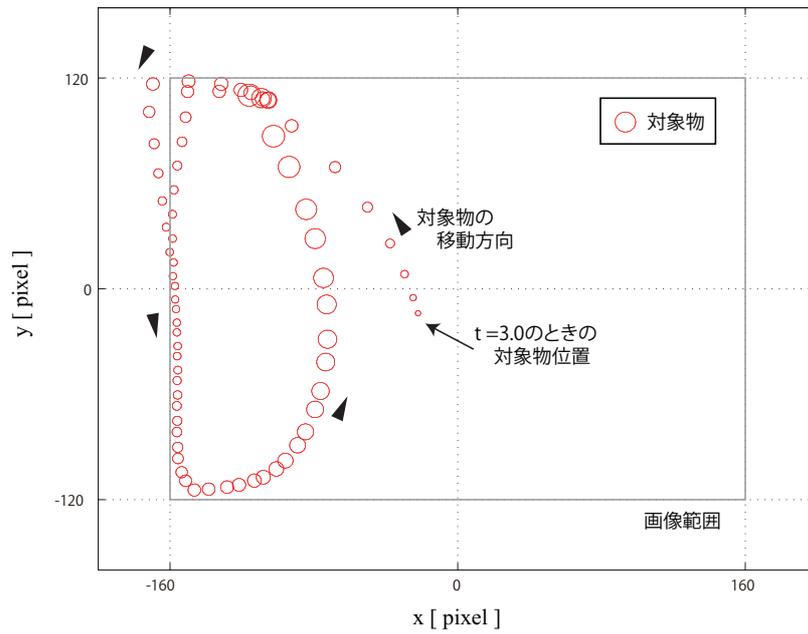


図 19 対象物の画像面上での軌跡 (Method(b) による運動予測)

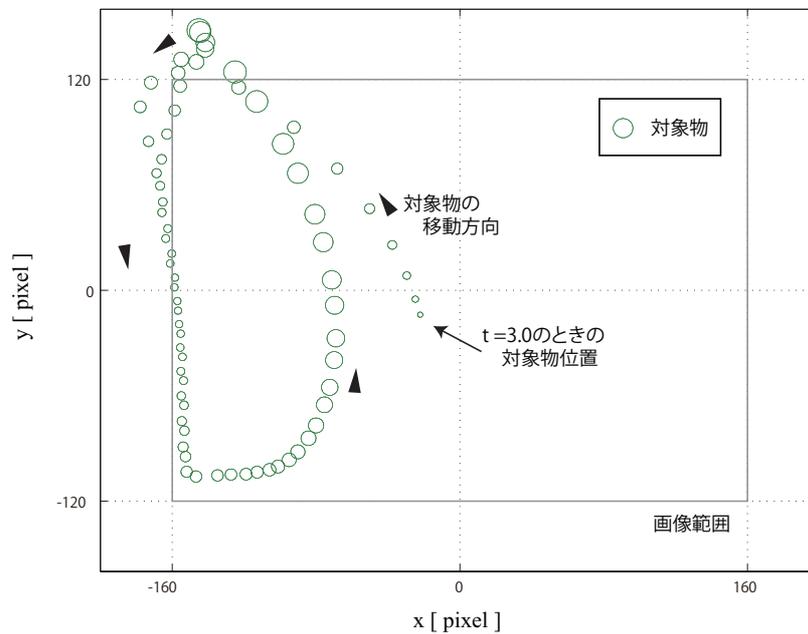


図 20 対象物の画像面上での軌跡 (Method(c) による運動予測)

#### 4.2.2 円運動する2体の対象の追跡

ここでは、2体の対象を追跡する場面を考える。シミュレーションの概観を図21に示す。図21において、内側を円運動する対象を対象物1、外側を円運動する方を対象物2と呼ぶことにする。対象物の大きさは2つとも半径2.5 [mm]と設定している。そして、対象物1は初期位置  $(X_o, Y_o, Z_o) = (100, 0, 800)$  [mm]で、半径100 [mm]、角速度2[rad/s]で円運動をしている。また、対象物2は初期位置  $(X_o, Y_o, Z_o) = (-110, 0, 800)$  [mm]で、半径110 [mm]、角速度0.3[rad/s]で円運動をおこなっている。カメラの回転量は、運動予測を用いて2体の対象物間の中心が画像中心と一致するように算出した。そして、焦点距離の範囲は4.5から100 [mm]と設定している。また、カメラの画像サイズ、ビデオサンプリング周期はシミュレーション1と同じ値とする。

シミュレーション結果を図21から図26に示す。図21は、対象物の運動パラメータの推定結果である。図21(a)は対象物1、(b)は対象物2の推定結果を示している。この図より、提案法の推定結果が真値に一番近づいていることが確認できる。そして、図23から図26は対象物のある区間での軌跡を示した結果である。運動予測を用いないズーム量制御の結果(図23)では、対象物が大きく画像から逸脱していることが確認できる。また、手法(b)、(c)による結果(図25、図26)は、推定値と真値との偏差が大きいため、予測が正確におこなえず、対象が画像から逸脱してしまっていると考えられる。

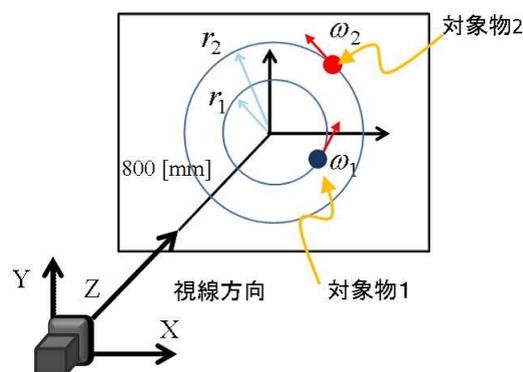
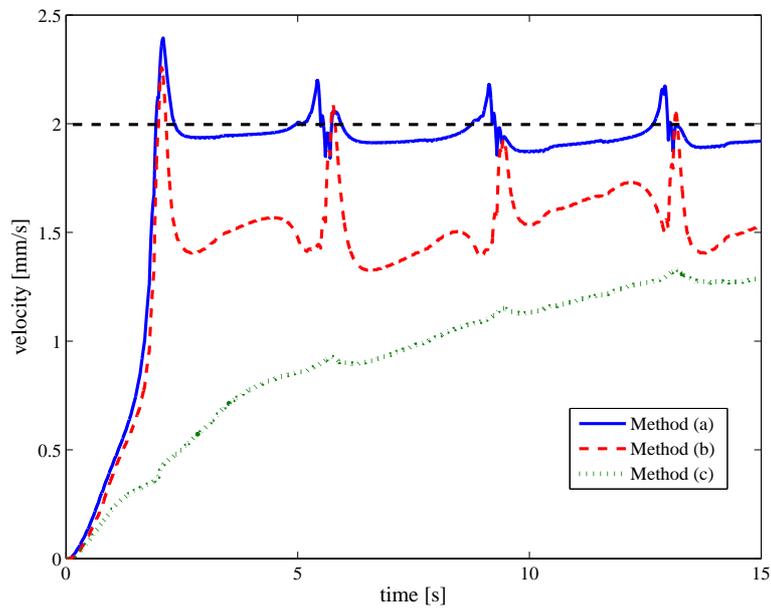
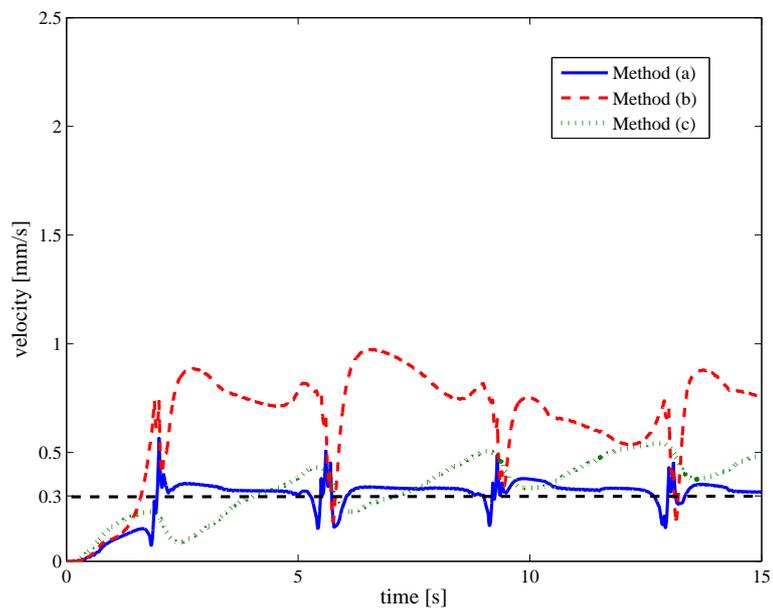


図 21 シミュレーション概観図



(a) 対象物 1 の推定結果



(b) 対象物 2 の推定結果

図 22 運動推定パラメータ

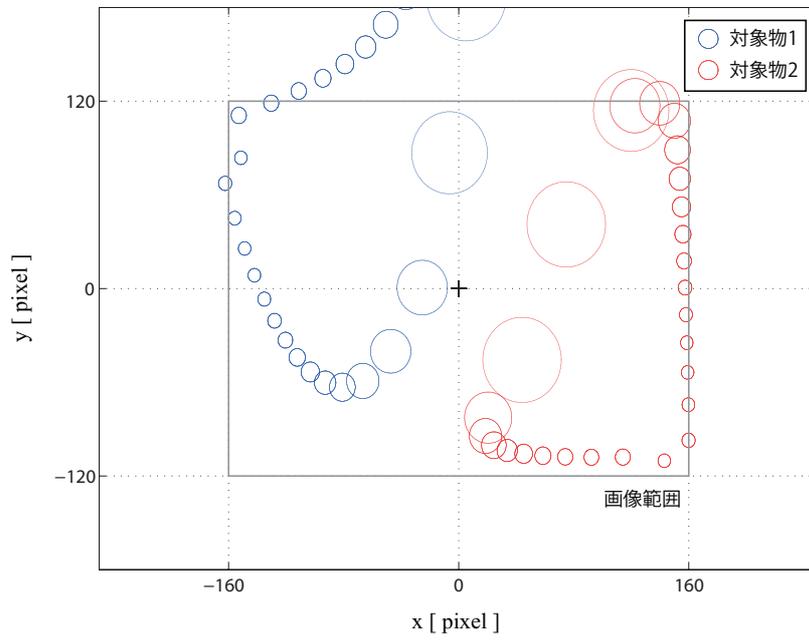


図 23 対象物の画像面上での軌跡 (運動予測なし)

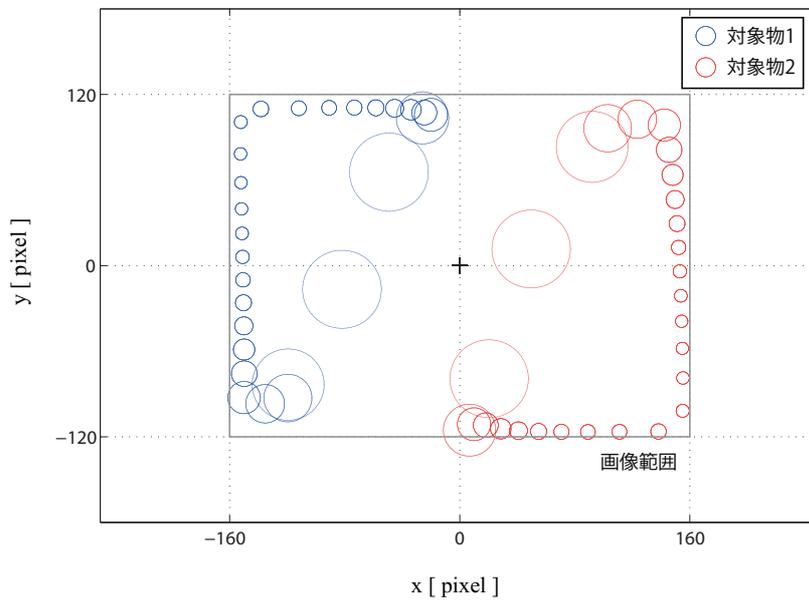


図 24 対象物の画像面上での軌跡 (Method(a) による運動予測)

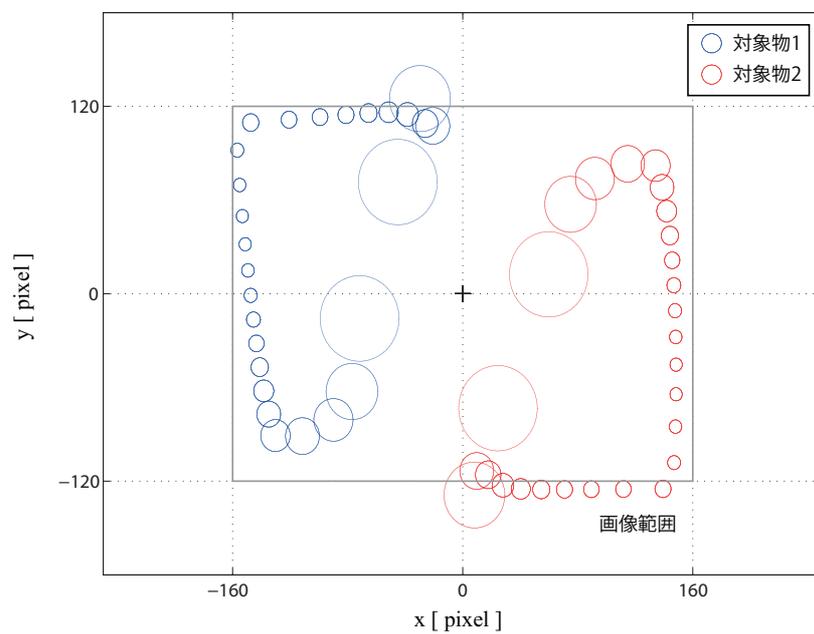


図 25 対象物の画像面上での軌跡 (Method(b) による運動予測)

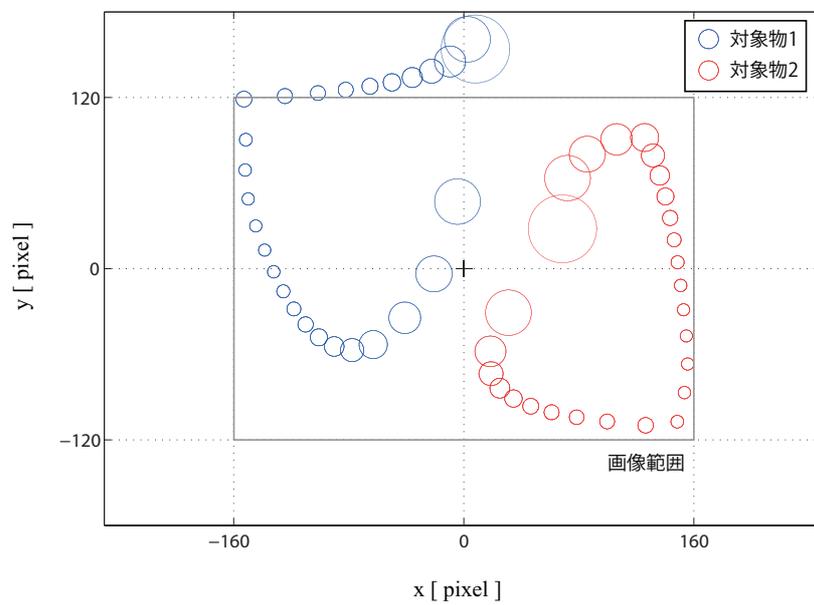


図 26 対象物の画像面上での軌跡 (Method(c) による運動予測)

## 5. 終わりに

### 5.1 まとめ

本研究では、PTZカメラから得られる画像を基に運動推定をおこなう方法を検討した。具体的には、観察対象の運動モデルを考慮した場合の非線形オブザーバによる運動パラメータ推定法を用いて、焦点距離の変化にも対応できるように拡張した。そして、その有効性を数値シミュレーションにより検討した。数値シミュレーションでは、焦点距離の変化を考慮した推定法と焦点距離は既知であるが、その変化を考慮しない方法、焦点距離が初期値から変化しないとして推定する方法の比較をおこなった。その結果、焦点距離の変化を考慮しない方法は焦点距離が変化しだすと大きく真値から離れていくことを確認した。また、焦点距離の変化を考慮した方法は、他の手法に比べて真値への収束がはやいことを確認できた。さらに、応用例として運動推定を用いたズーム量の決定方法を示した。

### 5.2 今後の課題

まず、実機による検証が挙げられる。また、ズーム機能の利点を活かした応用方法の検討も挙げることができる。その例として、位置計測精度の向上が考えられる。ズーム量を大きくしていくことで、1 [pixel] あたりの距離 [m] が短くなるので、計測精度を向上させることができると考えられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なるご指導およびご助言を頂き奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科知能システム制御研究室の杉本謙二教授に深く感謝を致します。

お忙しい中、副指導教員になっていただき、適切なご助言を頂きました生命機能計測学研究室の湊小太郎教授に厚くお礼申し上げます。

本研究の全過程を通して、懇切丁寧なご指導、的確なご助言を頂きました平田健太郎准教授に心より感謝致します。

定例研究会での質疑などを通して研究のアドバイスを頂きました野田賢准教授に深く感謝致します。

定例研究会等において、大変貴重となるご助言を頂きました小木曾公尚助教、松原崇充助教に深く感謝致します。

研究に関するご指摘のみならず、貴重な経験や物事の考え方の話をして頂きました、前応用システム科学講座助教、現福井大学工学研究科の橘拓至准教授に深く御礼申し上げます。

研究や学内生活のサポートをして頂いた林英子秘書に感謝致します。

研究に大変参考となるご助言をくださった、博士後期課程の畑田和良さん、齋藤紀彦に御礼申し上げます。

共に研究生生活を送ってきた同期生の皆様、博士前期課程一年の皆様に感謝します。

最後に、大学院生活を支援してくれた家族と友人に心から感謝致します。

## 参考文献

- [1] 小原, 五十嵐, 橋本, 細胞の個体差に適応する高速オートフォーカス顕微鏡, 計測自動制御学会論文集, Vol. 47, No. 1, pp. 31-39 (2011)
- [2] 木田, 平田, 中澤, Active Vision による位置計測のための予測追従制御, 第 54 回 システム制御情報学会研究発表講演会, pp. 717-718 (2010)
- [3] 石川, ビジュアルサーボイングの現状と将来, 計測と制御, Vol. 40, No. 9, pp. 615-617 (2001)
- [4] 中坊, 石川, 1 ms 高速ビジョンを用いたビジュアルサーボイング, 計測と制御, Vol. 40, No. 9, pp. 636-640 (2001)
- [5] 高橋, 渡部, 村松, 有我, 遠藤, 運動モデルを用いた視覚サーボ系の設計, 計測自動制御学会東北支部第 231 回研究集会, 231-10 (2006)
- [6] 猿田, 藤本, 堀, 運動推定オブザーバによる特徴量予測を用いたビジュアルサーボ, 電気学会論文誌 D, Vol. 122, No. 5, pp. 516-521 (2002)
- [7] 細田, 森山, 浅田, ズーム機構を利用した視覚サーボ系の構成, 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 6, pp. 845-850 (1998)
- [8] 大池, 呉, 華, 和田, 高速追従型 2 眼能動カメラシステム, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J91-D, No. 5, pp. 1393-1405 (2008)
- [9] 松山, 和田, 物部, 視点固定型パン・チルト・ズームカメラを用いた実時間対象検出・追跡情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 8, 3169-3178 (1999)
- [10] 橋本, 木村, ビジュアルサーボイング-非線形オブザーバアプローチ-, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 7, pp. 986-993 (1995)
- [11] 橋本, ビジュアルサーボ-I-ビジュアルサーボとは, システム/制御/情報, Vol. 53, No. 9, pp. 411-416 (2009)

- [12] 橋本, 視覚と制御, 計測自動制御学会制御部門大会前日のワークショップテキスト, pp. 37-68 (2001)

## 付録

### A. ヤコビアン の 導出

(7) 式の特徴量  $\xi$  を  $\xi = [\xi_1 \ \xi_2]^T$  とする. 画像ヤコビアン  $J$ , 運動ヤコビアン  $L$ , 焦点距離の変化に対する画像変化を表す量  $R$  は以下のように計算できる.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi_1}{\partial q_1} & \frac{\partial \xi_1}{\partial q_2} \\ \frac{\partial \xi_2}{\partial q_1} & \frac{\partial \xi_2}{\partial q_2} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$L = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi_1}{\partial p_x} & \frac{\partial \xi_1}{\partial p_y} & \frac{\partial \xi_1}{\partial p_z} \\ \frac{\partial \xi_2}{\partial p_x} & \frac{\partial \xi_2}{\partial p_y} & \frac{\partial \xi_2}{\partial p_z} \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$R = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi_1}{\partial f} \\ \frac{\partial \xi_2}{\partial f} \end{bmatrix} \quad (36)$$

ここで, ワールド座標上のカメラ座標系の原点の位置  $T = [0 \ 0 \ 0]^T$  とする. さらに,  $S_x = S_y$  として,  $S$  と表記する. この条件に基づいて各要素を計算していく. ここで,

$$Z_{oc} = -p_x \sin q_1 \cos q_2 + p_y \sin q_2 + p_z \cos q_1 \cos q_2 \quad (37)$$

と定義しておく.

$$\frac{\partial \xi_1}{\partial q_1} = \frac{f}{SZ_{oc}^2} \left[ (-p_x \sin q_1 + p_z \cos q_1) Z_{oc} - (p_x \cos q_1 + p_z \sin q_1) (-p_x \cos q_1 \cos q_2 - p_z \sin q_1 \cos q_2) \right]$$

$$\frac{\partial \xi_1}{\partial q_2} = \frac{-f}{SZ_{oc}^2} \left[ (p_x \cos q_1 + p_z \sin q_1) (p_x \sin q_1 \sin q_2 + p_y \cos q_2 - p_z \cos q_1 \sin q_2) \right]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \xi_2}{\partial q_1} = \frac{f}{SZ_{oc}^2} & \left[ (p_x \cos q_1 \sin q_2 + p_z \sin q_1 \sin q_2) Z_{oc} \right. \\ & \left. - (p_x \sin q_1 \sin q_2 + p_y \cos q_2 - p_z \cos q_1 \sin q_2) (-p_x \cos q_1 \cos q_2 - p_z \sin q_1 \cos q_2) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \xi_2}{\partial q_2} = \frac{f}{SZ_{oc}^2} & \left[ (p_x \sin q_1 \cos q_2 - p_y \sin q_2 - p_z \cos q_1 \cos q_2) Z_{oc} \right. \\ & \left. - (p_x \sin q_1 \sin q_2 + p_y \cos q_2 - p_z \cos q_1 \sin q_2) (p_x \sin q_1 \sin q_2 + p_y \cos q_2 - p_z \cos q_1 \sin q_2) \right] \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \xi_1}{\partial p_x} = \frac{f}{SZ_{oc}^2} \left[ Z_{oc} \cos q_1 + (p_x \cos q_1 + p_z \sin q_1) \sin q_1 \cos q_2 \right]$$

$$\frac{\partial \xi_1}{\partial p_y} = \frac{f}{SZ_{oc}^2} \left[ \sin q_2 (p_x \cos q_1 + p_z \sin q_1) \right]$$

$$\frac{\partial \xi_1}{\partial p_z} = \frac{f}{SZ_{oc}^2} \left[ Z_{oc} \sin q_1 - (p_x \cos q_1 + p_z \sin q_1) \cos q_1 \cos q_2 \right]$$

$$\frac{\partial \xi_2}{\partial p_x} = \frac{f}{SZ_{oc}^2} \left[ Z_{oc} \sin q_1 \sin q_2 + (p_x \sin q_1 \sin q_2 + p_y \cos q_2 - p_z \cos q_1 \sin q_2) \sin q_1 \cos q_2 \right]$$

$$\frac{\partial \xi_2}{\partial p_y} = \frac{f}{SZ_{oc}^2} \left[ Z_{oc} \cos q_2 - (p_x \sin q_1 \sin q_2 + p_y \cos q_2 - p_z \cos q_1 \sin q_2) \sin q_2 \right]$$

$$\frac{\partial \xi_2}{\partial p_z} = \frac{f}{SZ_{oc}^2} \left[ -Z_{oc} \cos q_1 \sin q_2 - (p_x \sin q_1 \sin q_2 + p_y \cos q_2 - p_z \cos q_1 \sin q_2) \cos q_1 \cos q_2 \right]$$

$$\frac{\partial \xi_1}{\partial f} = \frac{p_x \cos q_1 + p_z \sin q_1}{SZ_{oc}}$$

$$\frac{\partial \xi_2}{\partial f} = \frac{p_x \sin q_1 \sin q_2 + p_y \cos q_2 - p_z \cos q_1 \sin q_2}{SZ_{oc}}$$

上で求めたヤコビアンにはワールド座標上の対象位置  $[p_x \ p_y \ p_z]^T$  が含まれている。これは未知であるので、次に特徴量からこれらを求める。しかし、特徴量からは2つの方程式しか作れないので、 $p$  のうち少なくとも1つの値が既知でないと求められない。そのため、 $p_z$  方向に対象が移動せず、その値が既知という仮定を置く。

$$p_x = \frac{p_z \left[ (f/S \cos q_1 \sin q_2 + \xi_2 \cos q_1 \cos q_2) \xi_1 \sin q_2 + (\xi_2 \sin q_2 - f/S \cos q_2) (-\xi_1 \cos q_1 \cos q_2 + f/S \sin q_1) \right]}{-(\xi_2 \sin q_2 - f/S \cos q_2) (f/S \cos q_1 + \xi_1 \sin q_1 \cos q_2) + (\xi_2 \sin q_1 \cos q_2 + f/S \sin q_1 \sin q_2) \xi_1 \sin q_2}$$

$$p_y = \frac{p_x (\xi_2 \sin q_1 \cos q_2 + f/S \sin q_1 \sin q_2) - p_z (f/S \cos q_1 \sin q_2 + \xi_2 \cos q_1 \cos q_2)}{\xi_2 \sin q_2 - f/S \cos q_2}$$