

ズーム機構を利用した視覚サーボ系の構成

細田 耕^{*1} 森山 齊^{*2} 浅田 稔^{*1}

Visual Servoing Utilizing Zoom Mechanism

Koh Hosoda^{*1}, Hitoshi Moriyama^{*2} and Minoru Asada^{*1}

This paper proposes a complementary visual servoing controller of both zoom and arm mechanisms. A camera, which is used as an artificial vision, often has a zoom mechanism. A zoom mechanism cannot realize fast motion while an arm mechanism can do, and it has only one degree of freedom. On the other hand the arm mechanism cannot cover wide range of change in the image while the zoom mechanism can do. First we discuss on a condition that camera position and zoom setting are regarded as redundant. Then a visual servoing controller is proposed making use of complementary characteristics of the both mechanisms. Experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key Words: Visual Servoing, Visual Tracking, Zoom, Redundancy

1. はじめに

視覚センサは、ロボットを取り巻く環境が未知であったり、環境が動的に変化する場合に、環境やロボットの状態を観測するために重要な役割を果たす。従来、視覚センサをロボット制御に利用する場合には、センサより得られる情報から三次元の情報再構成し、それを基にロボットを制御する方法を取ることが多かった。このような場合、一般的な三次元情報を得るための再構成に時間がかかる。さらに再構成のためのモデル化誤差を含んでしまうなど、実世界で動作するロボットの実時間制御に向いていない。これに対し、視覚により得られた情報を直接ロボットにフィードバックするビジュアルサーボに関する研究が近年盛んになってきている [1] ~ [4]。ビジュアルサーボを用いれば、視覚情報を直接フィードバックするため、ロボットの速い応答を実現でき、また、モデル化誤差に対し頑健な制御系を実現することができる。

一方、利用可能な視覚センサの中には、焦点距離を能動的に変えることのできるズーム機構を持つセンサが少なくない。Nelson and Khosla は、視覚センサの焦点距離を変化させることにより、対象に対する解像度 (resolvability) を変えることができることを指摘し、これを利用してカメラの配置問題を考察している [5]。また、ズーム機構を持つカメラを装備したカメ

ラヘッドの開発に関する報告もなされている [6] [7]。これらの研究では、ズーム機構によるオンラインの焦点距離の制御は想定されていないが、オンラインでズーム機構を利用すれば、視覚を持ったロボットの作業実行能力は拡大すると考えられる。

カメラ・マニピュレータ系にビジュアルサーボを適用する場合、その追従限界の一つとして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があげられる。本論文では、オンラインで焦点距離を制御できるズーム機構を用い、それにより生じるアーム機構とズーム機構の冗長性を利用することによって、追従の速応性を損なうことなく実効的な可動範囲を広げられることを示す。以下ではまず、マニピュレータ機構による動作とズーム機構による動作の相補性を示すために、カメラの移動によって実現される見え方の変化と、ズーム機構による見え方の変化の等価性について論ずる。そして、その等価性によって生じる冗長性を利用し、ズーム機構とマニピュレータ機構の特性を生かしたビジュアルサーボ系を提案、実験によりその有効性を検証する。

2. カメラ移動とズームによる見え方変化の等価性

ここでは、マニピュレータに搭載されたカメラで対象を観測し、画像平面内で得られる画像特徴量を、所期の目標値に収束させる作業を考える (Fig. 1 参照)。カメラにズーム機構が備わっていない場合、対象物が望みの見え方になるまでマニピュレータによってカメラを移動させることになる。一方、カメラにズーム機構が備わっている場合、カメラを対象物の方向に移動させる代わりに、ズームによっても望みの見え方に行うことができると考えられ、マニピュレータが作業が遂行できるため

原稿受付 1997年10月16日

^{*1}大阪大学工学部

^{*2}大阪大学工学部、現在 NTT に勤務

^{*1}Osaka University

^{*2}Osaka University, currently with NTT Co., Ltd.

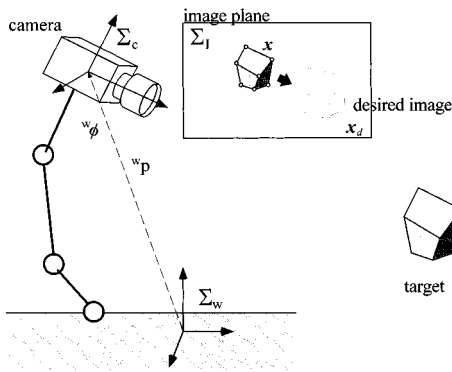


Fig. 1 Coordinate frames of the camera-manipulator system

に十分な自由度を持つときには、全体として冗長なシステムとみなすことができる。この冗長性を利用して、カメラ・マンピュレータ系の性能を向上させることができる。

マンピュレータによってカメラを対象物方向に移動する場合と、ズーム機構を用いる場合には、対象物の見え方の変化は等価ではない（ピンホールカメラモデルの場合について、付録 A. に例題を示す）。前述したように、ズーム機構とマンピュレータ機構の冗長性を利用するために、本章ではカメラ移動による見え方の変化と、ズーム機構による見え方の変化が等価とみなせる条件を導く。なお、以下ではマンピュレータ部がカメラを n 自由度で動かすのに必要十分な自由度を持っていると仮定し、ロボットの関節の自由度に関する考察をする代わりに、カメラの空間自由度を用いて議論しているが、この議論を関節自由度に関する議論に書き換えるのは容易である。

2.1 ズーム機構を持つカメラ・マンピュレータ系

ズーム機構を持つカメラ・マンピュレータ系を Fig. 1 に示す。 $\Sigma_w, \Sigma_c, \Sigma_I$ をそれぞれ地面に固定された基本座標系、カメラに固定されたカメラ座標系、画像平面に固定された画像座標系とし、基本座標系 Σ_w から見たカメラ座標系 Σ_c の位置、姿勢ベクトルを ${}^w p, {}^w \phi$ とする。カメラ・マンピュレータ系に与えられる作業は、画像座標系 Σ_I から見た対象物上の画像特徴量ベクトル ${}^I x \in \mathbb{R}^m$ を望みの目標特徴量ベクトル ${}^I x_d \in \mathbb{R}^m$ に収束させることである。対象物の動きがカメラの動きに対して十分に遅いとすると、カメラのズーム機構を利用しない場合には、画像特徴量ベクトル ${}^I x$ は ${}^w p$ と ${}^w \phi$ の関数となる。

$${}^I x = {}^I x({}^w p, {}^w \phi) \quad (1)$$

式(1)の両辺を時間微分すると、画像上の特徴量速度とカメラの速度の関係

$${}^I \dot{x} = J {}^w v \quad (2)$$

が得られる。ここで ${}^w v \in \mathbb{R}^n$ は、基本座標系 Σ_w から見たカメラ座標系 Σ_c の速度である。また、 $J \in \mathbb{R}^{m \times n}$ は特徴量速度とカメラ速度を関係付ける画像ヤコビ行列である。

カメラがズーム機構を持っている場合、画像特徴量ベクトル ${}^I x$ はカメラの位置、姿勢ベクトル ${}^w p, {}^w \phi$ と焦点距離ベクトル $f \in \mathbb{R}^l$ との関数となり

$${}^I x = {}^I x({}^w p, {}^w \phi, f) \quad (3)$$

と表せる。式(3)の両辺を時間微分することにより画像特徴量速度とカメラ速度との関係式

$${}^I \dot{x} = \tilde{J} {}^w \tilde{v} \quad (4)$$

を得る。ここで ${}^w \tilde{v} = [{}^w v^T f^T]^T \in \mathbb{R}^{(n+l)}$ は拡張速度ベクトル、 $\tilde{J} \in \mathbb{R}^{m \times (n+l)}$ は、拡張画像ヤコビ行列である。

2.2 カメラ移動とズームによる見え方変化の等価性

カメラ・マンピュレータ系が冗長となるためには、マンピュレータによるカメラ移動に伴う見え方の変化と、ズーム機構を用いた場合の見え方の変化が等価である必要があるが、付録 A. に示すように、実際にはこれらは完全には等価ではない。付録では特にピンホールカメラモデルを例題にとって説明したが、本節では一般的な場合について、これらの見え方の変化が等価とみなせるための条件を導く。

カメラのズーム機構を利用しない場合、ある時刻 t において、画像特徴量ベクトル ${}^I x$ が目標ベクトル ${}^I x_d$ に一致しているとき、与えられる特徴量速度ベクトルの目標値 ${}^I \dot{x}_d$ が実現されるためには、式(2)の解が存在する条件

$$\text{rank} J(t) = \text{rank}[J(t) {}^I \dot{x}_d(t)] \quad (5)$$

であることが必要条件となる[8]。

カメラのズーム機構を利用する場合には、拡大ヤコビ行列 \tilde{J} は、 J にズーム機構分の列を足したものであるため、式(5)により式(4)の解も存在することがいえる。ここでシステムの方程式にズーム機構を加えたことによって実現できる目標画像のクラスが広がらなければ、ズーム機構を用いた場合の見え方の変化とカメラ移動に伴う見え方の変化が等価であるといえるので、その条件は、

$$\text{rank}[J] {}^I \dot{x}_d = \text{rank}[\tilde{J}] {}^I \dot{x}_d \quad (6)$$

で与えられる。実際にはカメラ移動による見え方変化と、ズーム機構によるそれとは等価ではないので、式(6)は、必ずしも成立しない。

式(6)は等号で表現されているため条件としては厳しく、ほとんど成立しない。実際の問題に適用するために、行列 $[\tilde{J}] {}^I \dot{x}_d$ の特異値 $\sigma_1, \dots, \sigma_k, \sigma_{k+1}, \dots$ ($\sigma_1 > \dots > \sigma_k > \sigma_{k+1} > \dots$) を使った表現

$$\sigma_{k+1} \ll \sigma_1, \dots, \sigma_k \quad (7)$$

に修正する。ここで、 k は行列 J のランクである。

以上より、式(5)(7)が成立するとき、その目標値は実現可能で、かつズーム機構とマンピュレータ機構が等価であるとみなすことができる。

2.3 ズーム機構とマンピュレータ機構の冗長性

前節での考察が成立するとき、ズーム機構を持つカメラ・マンピュレータ系は与えられた作業に対して冗長であるとみなすことができるので、この冗長性を利用してシステムの作業遂行能力を向上させることができる。

マンピュレータ機構は手先の可動範囲が物理的に制限されている。したがって追跡対象物の動く範囲が大きくなった場合、これに追従することができない。一方ズームによる画像の変

化は、緩やかでカメラの光軸方向の変化のみではあるが、マニピュレータの動作範囲に置き換えると、広範囲を動くことができる。したがってこれらの性質を相補的に利用することにより、ズーム機構を利用した視覚サーボ系を提案する。

3. ズーム機構を利用した視覚サーボ系

ズーム機構とマニピュレータ機構の冗長性と特性を考慮して、画像特徴量と焦点距離速度が以下のような挙動を示す制御系を考える。

$${}^I \dot{x} + K_x ({}^I x - {}^I x_d) = 0 \quad (8)$$

$$\dot{f} + K_f (f - f_d) = 0 \quad (9)$$

ここで、 f_d は焦点距離ベクトルの目標値である。目標焦点距離ベクトルは、マニピュレータが望ましい姿勢のときに、対象が目標の見え方になるよう計算される。また、 K_x, K_f は正定のフィードバックゲイン行列で、この値を適当に調節することによって、ズーム機構とマニピュレータ機構の相補性を利用することができる。

式(4)は

$${}^I \dot{x} = \begin{bmatrix} J_v & J_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^w v \\ f \end{bmatrix} \quad (10)$$

と書き直せる。式(9)より、ズーム機構に対する入力 u_f は、

$$u_f = -K_f (f - f_d) \quad (11)$$

と計算される。

また、式(8)(10)(11)よりマニピュレータ機構に対する入力 u_v は、

$$\begin{aligned} u_v &= -J_v^+ (K_x ({}^I x - {}^I x_d) + J_f \dot{f}) \\ &= -J_v^+ \{ K_x ({}^I x - {}^I x_d) \\ &\quad - J_f K_f (f - f_d) \}, \end{aligned} \quad (12)$$

と計算される。ここで J_v^+ は J_v の疑似逆行列を表している。Fig. 2 に提案する視覚サーボ系の構成を示す。

4. 実 験

本章では、提案した手法の有効性を検証するための実験結果を示す。

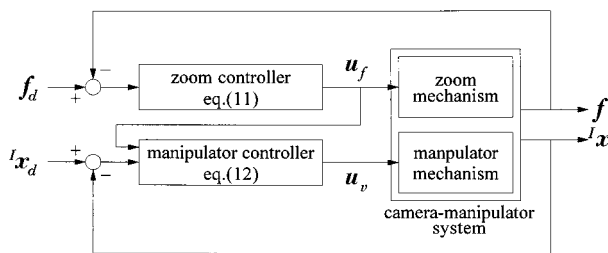


Fig. 2 Visual servoing controller utilizing zoom mechanism

4.1 実験システムの構成

Fig. 3 に実験に用いたカメラ・マニピュレータシステムを、Fig. 4 に実験装置の構成を示す。マニピュレータとして、川崎重工製 6 自由度 PUMA 型マニピュレータ Js-5 を用い、手先の姿勢を固定して、3 自由度マニピュレータとして制御した。マニピュレータの手先には、ズーム機構が RS-232C を介して制



Fig. 3 Robot arm with camera, used for experiment

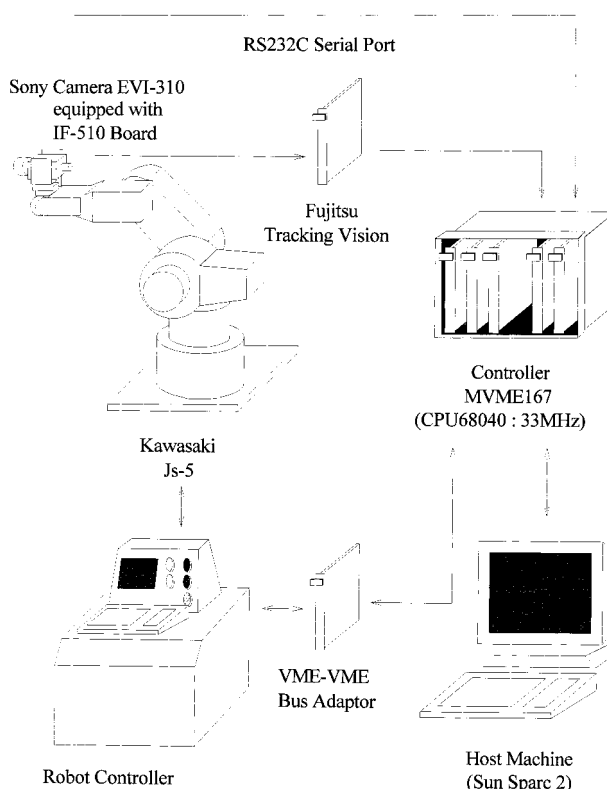


Fig. 4 Experimental system

御できるソニー製カメラモジュール EVI-310 が取り付けられている。

カメラモジュールによって得られた画像は、富士通製の動き追跡処理システムボード（トラッキングビジョン）に送られる。このボードはあらかじめ与えられた画像テンプレートと、現在の画像との相関演算を実行することにより、このテンプレートが画像上のどの座標にあるかを算出する。ここでは、 512×480 [pixel] の画像平面内において、あらかじめ与えられた 8×8 のテンプレートとの相関の最も高い画像の座標を、ホストコントローラ MVME167 (CPU: 68040, 33 [MHz], モトローラ製) に送る。コントローラは提案された手法に基づいて制御入力を計算し、VME-VME バスアダプタを介して、ロボットの専用コントローラに制御コマンドを送る。C 言語を用いてプログラムを記述したところ、サンプリング時間は 49.4 [ms] となった。

4.2 実験結果

本実験では、二つの画像テンプレートを用意し、その座標を画像特徴点として制御に用いている。画像特徴量ベクトルの初期値は、

$${}^I \mathbf{x}_0 = [x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2]^T = [120 \ 204 \ 348 \ 256]^T$$

また、基本座標系から見たカメラの初期位置は、 $[{}^w p_x, {}^w p_y, {}^w p_z] = [9.04 \times 10^{-3}, 1.92 \times 10^{-1}, 7.01 \times 10^{-1}]$ [m], 焦点距離の初期値は 1.375×10^{-2} [m] とした。

時刻 $t = 0$ において実現可能な目標画像ベクトル

$${}^I \mathbf{x}_d = [56 \ 140 \ 304 \ 196]^T$$

を与えた。これは、カメラの光軸方向に約 0.1 [m] 対象物を移動した場合の見え方に相当する。また、マニピュレータの望みの姿勢を初期姿勢とし、焦点距離の目標値として、この見え方になるような $f_d = 1.65 \times 10^{-2}$ [m] を与える。

目標姿勢における拡大画像ヤコビ行列 \tilde{J} を計算すると、

$$\tilde{J} = \begin{bmatrix} 2.43 \times 10^3 & 0.00 & 6.93 \times 10^1 & 3.45 \times 10^3 \\ 0.00 & 2.43 \times 10^3 & 1.73 \times 10^2 & 8.61 \times 10^3 \\ 2.40 \times 10^3 & 0.00 & 3.72 \times 10^2 & 1.87 \times 10^4 \\ 0.00 & 2.40 \times 10^3 & 2.40 \times 10^2 & 1.21 \times 10^4 \end{bmatrix}$$

となった。ズーム機構とマニピュレータ機構の等価性を確保するために、式(5)(7)の条件を確認する。ここで調べているのはステップ応答なので、行列 $[J]^I \dot{\mathbf{x}}_d$, $[\tilde{J}]^I \dot{\mathbf{x}}_d$ の代わりに、 $[J]^I \mathbf{x}_0 - {}^I \mathbf{x}_d$ と $[\tilde{J}]^I \mathbf{x}_0 - {}^I \mathbf{x}_d$ の特異値を調べる。行列 $[J]^I \mathbf{x}_0 - {}^I \mathbf{x}_d$ の特異値は、 3.44×10^3 , 3.42×10^3 , 2.21×10^2 と 1.30, 行列 $[\tilde{J}]^I \mathbf{x}_0 - {}^I \mathbf{x}_d$ の特異値は 2.43×10^4 , 3.41×10^3 , 1.57×10^3 と 2.00 となり、第 4 番目の特異値が、3 番目の特異値に比べて十分に小さいので、式(5)(7)の条件は満たされており、したがってズーム機構による見え方の変化とマニピュレータ機構によるそれとは等価であるとみなすことができる。

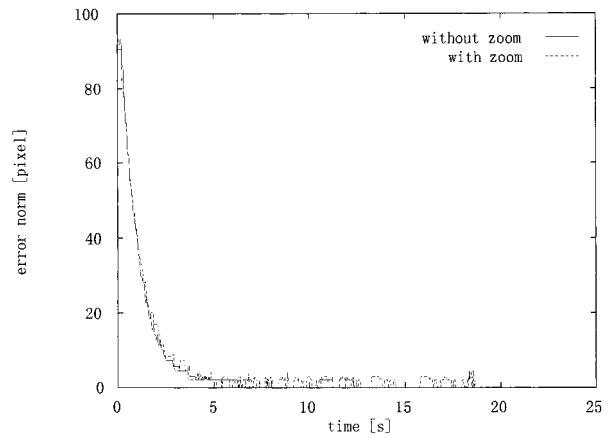


Fig. 5 Result 1 (step response, error norm in the image plane)

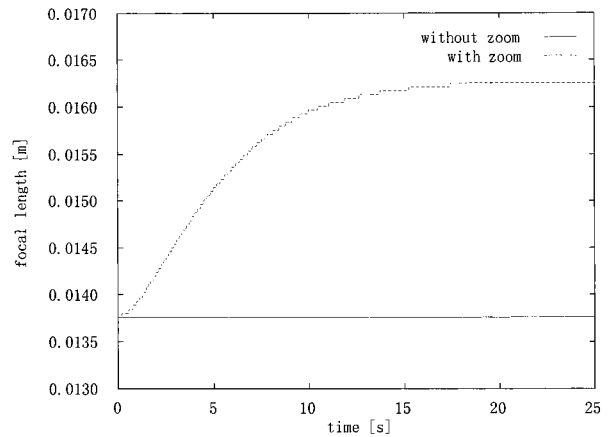


Fig. 6 Result 2 (step response, focal length)

ゲイン行列 K_x は試行錯誤的に

$$K_x = \text{diag}[4.0 \times 10^{-2} \ 4.0 \times 10^{-2} \ 4.0 \times 10^{-2} \ 4.0 \times 10^{-2}].$$

と決めた。

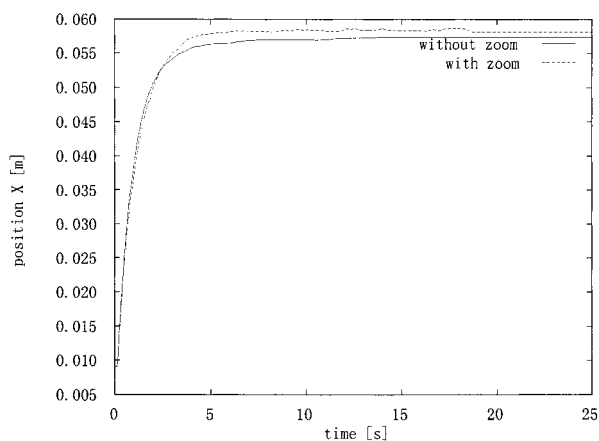
ここでは、以下のような二つのケースについて対照実験を行った。

case 1 ズーム機構に関するゲイン $K_f = 0$ の場合、すなわちズーム機構を利用しない場合。

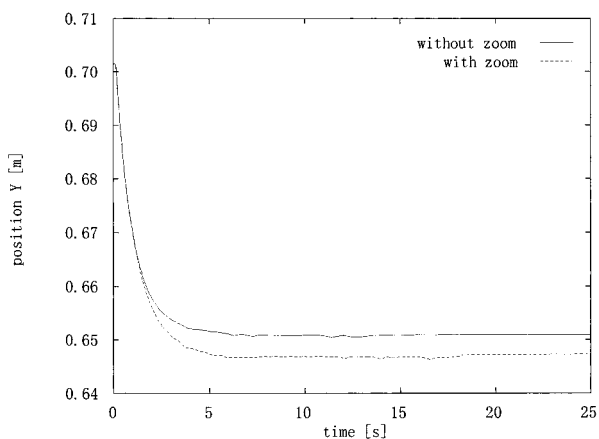
case 2 ズーム機構に関するゲイン $K_f = 1.0 \times 10^{-2}$ とした場合。

Fig. 5 に画像平面内での画像特徴量とその目標値の間の誤差ノルム $\| [x_1 \ y_1]^T - [x_{1d} \ y_{1d}]^T \|$ を示す。また、Fig. 6 にそのときの焦点距離 f の変化を示す。Fig. 7 に基本座標系に対するカメラの位置 ${}^w p$ を示す。

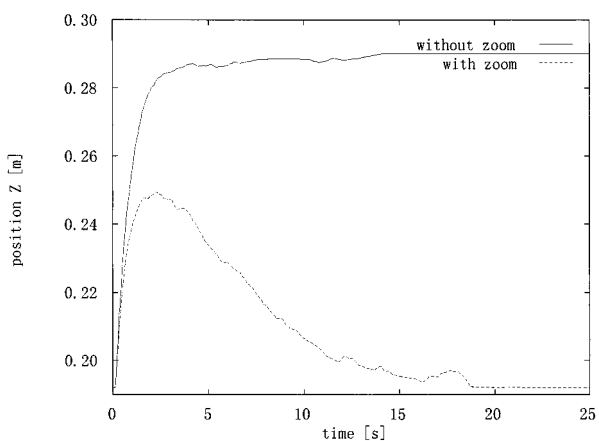
Fig. 5 より、ズーム機構を用いた場合にも、用いない場合と同等の制御性能が得られることが分かる。Fig. 6, Fig. 7 より、提案する手法を適用すると、目標値がステップ状に変わると、速い応答はマニピュレータ機構によって実現され、15 [s] ほどたつとズーム機構が動くことにより、マニピュレータがほとんど元の姿勢に戻っているのが分かる。これは、マニピュレータ



(a) position $w p_x$



(b) position $w p_y$



(c) position $w p_z$

Fig. 7 Result 3 (step response, position of tip of robot arm)

の望みの姿勢を初期姿勢とし、そのときのズーム機構の変位をズーム機構の目標値としたためである。

次に、よりマニピュレータの可動範囲のふちに近いところで、ロボットを動作させた場合、画像特徴点とその目標値の誤差ノルムを Fig. 8 に示す。ズーム機構を用いない場合には、マニ

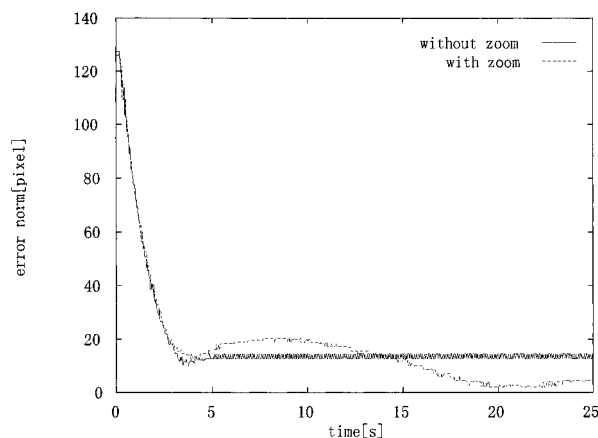


Fig. 8 Result 4 (step response, error norm in the image plane)

ピュレータは画像特徴量を追跡しているうちに可動範囲外に出てしまうため、およそ 4[s] 後からは、誤差ノルムを 0 にすることができない。ズーム機構を用いると、それを利用してマニピュレータはできるだけ初期姿勢にとどまろうとし、その結果可動範囲から出ることが避けられ、マニピュレータは誤差ノルムを小さくすることができる。

5. 考察と今後の課題

本報告では、カメラの持つズーム機構を利用し、カメラ・マニピュレータ系を作業に対して冗長とみなせる条件を導き、これによって生じる冗長性を利用して、カメラ・マニピュレータ系の性能を上げられることを示した。また、実験により、本手法の有効性を検証した。

本論文で示した実験においては、マニピュレータの望みの姿勢として、マニピュレータの初期姿勢を与えたが、例えば、マニピュレータの可操作性 [9] や、対象に対する解像度 (resolvability) [5] を指標として、望みの姿勢を与えることも容易である。

より複雑なロボットシステムを構築していくと、本論文におけるズーム機構とマニピュレータ機構のように、機構的には異なるが、遂行できる作業のクラスは等価なものが存在する。このような等価性を利用することにより、システムを作業に対して冗長とみなし、これを利用することができると思われる。

参考文献

- [1] L.E. Weiss, A.C. Sanderson and C.P. Neuman: "Dynamic sensor-based control of robots with visual feedback," IEEE J. of Robotics and Automation, vol.RA-3, no.5, pp.404-417, 1987.
- [2] P.I. Corke: "Visual control of robot manipulators - a review," In Visual Servoing, pp.1-31. World Scientific, 1993.
- [3] 橋本: "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.659-665, 1994.
- [4] 細田, 浅田: "構造やパラメータに関する先験的な知識を必要としないフィードフォワード補償器を持つ適応型ビジュアルサーボ系の構成", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.2, pp.313-319, 1996.
- [5] B. Nelson and P.K. Khosla: "Integrating sensor placement and visual tracking strategies," In Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1351-1356, 1994.

- [6] E. Krotkov, F. Fuma and J. Summers: "An agile stereo camera system for flexible image acquisition," Int. J. of Robotics and Automation, vol.4, no.1, pp.108-113, 1998.
- [7] K. Pahlavan and J.O. Eklundh: "A head-eye system - analysis and design," Computer Vision, Graphics, Image Process.: Image Understanding, vol.7, no.1, pp.41-56, 1992.
- [8] 児玉, 須田: システム制御のためのマトリクス理論. 第3章(社)計測自動制御学会, 1978.
- [9] 吉川: ロボット制御基礎論. コロナ社, 1988.

付録 A. ズーム機構とカメラの動きの等価性についての例題

焦点距離の変化(ズーム機構)による対象物の見え方の変化と, カメラの動きによるそれとは, 完全に等価ではない. カメラモデルとして, ピンホールカメラモデルを用いた場合について, 以下で考察する (Fig. 9 参照).

カメラで, 3点 $A(-a, 0)$, $O(0, 0)$, $B(a, c)$ を観測している場合を考える. ここからズーム機構を用いて焦点距離を $2f$ に変えた場合, A, O, B の像はそれぞれ, $-2af/z_0, 0, 2af/(z_0+c)$ となる. 一方カメラを移動させて, A, O の像を $-2af/z_0, 0$ にするには, カメラを $z_0/2$ の位置まで移動させればよいが, このとき C の像は $2af/(z_0+2c)$ となり, ズーム機構を用いた場合と見え方の変化は異なることが分かる. カメラと対象までの距離が十分に遠い場合, つまり $c \ll z_0$ の場合には両者が等価になることに注意されたい.

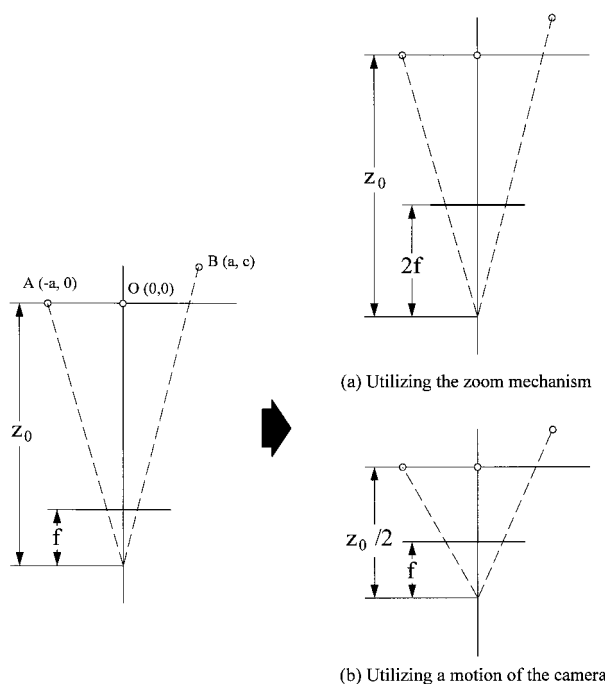


Fig. 9 View changes caused by (a) the zoom mechanism and by (b) the motion of the camera



細田 耕 (Koh Hosoda)

1965年11月9日生. 1988年京都大学工学部精密工学科卒業. 1993年同大学工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了. 同年大阪大学工学部助手, 1997年同助教授となり, 現在に至る. ロボット工学の研究に従事. 博士(工学). IEEE, 計測自動制御学会の会員. (日本ロボット学会正会員)



森山 育 (Hitoshi Moriyama)

1971年10月16日生. 1995年大阪大学工学部電子制御機械工学科卒業. 1997年同大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻博士前期課程修了, 同年よりNTTに勤務, 現在に至る. 在学中ビジュアルサーボの研究に従事. (日本ロボット学会正会員)



浅田 稔 (Minoru Asada)

1953年10月1日生. 1982年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了. 同年同大学基礎工学部助手. 1989年同大学工学部助教授, 1995年同教授となり現在に至る. この間, 1986年から1年間米国メリーランド大学客員研究員. 知能ロボットの研究に従事. 工学博士. 電子情報通信学会, 情報処理学会, 人工知能学会, 日本機械学会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, IEEEなどの会員. (日本ロボット学会正会員)