ステレオ視によるマニピュレータのビジュアルサーボ*

加瀬 裕**・丸 典明**・西川 敦**・宮崎 文夫**

Manipulator Control by Visual Servoing with Stereo Vision*

Hiroshi KASE**, Noriaki MARU**, Atsushi NISHIKAWA**
and Fumio MIYAZAKI**

This paper presents a new method of visual servoing with stereo vision to control the position of a manipulator with respect to an object. Conventional control methods by visual servoing use a monocular camera and have several problems. For example, either shape information or desired distance of the target object from the camera must be given. Furthermore, it is not stable if the initial positional error of features in the image is very large. These problems are caused by image the Jacobian matrix, that is, the approximate value at desired position is used instead of correct one. By using stereo vision, the image Jacobian matrix can be calculated correctly at any position. So neither shape information nor desired distance of the target object is required. It is also stable even if the initial error is very large. Both simulation and experimental results are presented to demonstrate the effectiveness of this method.

1. はじめに

マニピュレータで、物体を把握したり適当な場所に置いたりするためには、手先を目標位置まで移動させなければならない。このとき、内界センサだけでは外部環境の変化に対応することは困難であり、外界センサにより誤差を検出することが必要である。人間の場合は、主に視覚を用いて誤差を検出するとにより、手先の位置を制御していると考えられる。このような視覚を用いたマニピュレータの制御方法は、ビジュアル・フィードバックと呼ばれている。

ビジュアル・フィードバックを実現する制御法には、大きく分けて“ルック・アンド・ムーブ”と呼ばれる方法と“ビジュアル・サーボ”¹⁾と呼ばれる方法の二つがある。ルック・アンド・ムーブは、カメラにより得られる対象物体の位置・姿勢を、環境に固定されたワールド座標系における3次元表現に変換し、ワールド座標系における目標位置へマニピュレータの手先を制御する手法

である。この方法では、ワールド座標系で手先の運動を計画し、逆運動学を介して各アクチュエータへの運動指令を与えることになるため、マニピュレータやカメラ系など、システムのキャリブレーションを正確に行う必要がある。

これに対して、ビジュアル・サーボは、画像中の特徴量の変化とカメラの運動の変化を関係づけるヤコビ行列（イメージヤコビアンと呼ばれる）を用いることにより、画像特徴を直接用いて状態量とするクローズドな制御を行う手法である。すなわち、ワールド座標系での位置計算を行う必要が無いために、画像のみに基づくサーボ系を構成でき、ルック・アンド・ムーブに比べ、キャリブレーションエラーや環境の変化に対してロバストな制御が可能となる。

ビジュアル・フィードバックでは、ハンドアイシステムと呼ばれるシステムがよく用いられるが、ハンドアイシステムは、カメラとマニピュレータを別々に配置した方法とマニピュレータの手先にカメラを取り付けた方法の二つに分けられる。前者は、カメラ位置とマニピュレータの手先位置がどちらも移動するので、手先がカメラの死角に入らないようにするなどのマニピュレータの移動戦略が複雑になるが、後者は、カメラがマニピュレータの手先に固定されているので、死角などを考慮する必要

* 原稿受付 1992. 11. 26.

** 大阪大学 基礎工学部 Faculty of Engineering Science, Osaka University; 1-1, Machikaneyama-cho, Toyonaka-city, Osaka 560, JAPAN

Key Words : visual servoing, stereo vision, manipulator control, hand-eye system, image jacobian.

が無く、画像により得られた情報から直接マニピュレータを制御できる。本論文では、後者 (Fig. 1 参照) を対象とする。

Fig. 1 Hand-eye system

従来の研究には、ビジュアル・サーボの応用として、ハンドアイシステムを用いた位置決めや特徴追跡などを行った報告がいくつかある^{2)~5)}。これらは、対象物体に付けられた特徴点をカメラでとらえることにより、カメラと対象物体との目標とする相対関係を維持または達成しようとするものである。

しかしながら、これらの研究は、いずれも単眼カメラによるハンドアイシステムであり、3次元情報が2次元情報へと落とされるため、必然的に人間の手により情報を付け足す必要がある。たとえば、特徴点とカメラとの3次元的な距離情報 (目標相対距離) をあらかじめ与えておかなければならなかったり³⁾、対象物体の形をモデルとしてあらかじめ記憶しておかなければならない²⁾。また、初期誤差が大きい場合や特徴点の取り方によっては、目標位置へ収束しないという問題点もある。これは、単眼視におけるイメージャコピアンには、その要素中に画像情報だけでは記述できない項があり、その値として近似値を代入しているため、目標位置でのみ正しい値をとり、それ以外の位置では近似値に過ぎないことに起因するものである。

本論文では、両眼カメラを用いたステレオ視により、これらの問題を解決する方法を提案する。ステレオ視に

より、目標点近傍以外でも正しいイメージャコピアンを計算することが可能となり、目標相対距離や対象物体のモデルをあらかじめ与えなくても、また、初期誤差が大きい場合にも目標位置へ制御することが可能となる。

以下では、ステレオ視のモデルとフィードバック入力の生成方法について説明し、シミュレーションと実験によりその有効性を示す。

2. ステレオ視によるビジュアルサーボ

2.1 ステレオ視のモデル

まず、ステレオ視における各座標系を定義し、ステレオ視のモデルについて説明する。また、各座標系における値は、Table 1 の添字により表現することにする。

ここで用いたステレオ視のモデルは、一般に標準配置のステレオ視モデルと呼ばれるもので、以下のような座標系を定義する。

Fig. 2 に示すように、2台のカメラ中心を基線長 b だけ離し、それらの光軸の方向が基線に対して直角になるように配置し、2台のカメラ間の中心にカメラ座標系 Σ_c の原点をとる。このとき、カメラ中心から光軸方向に焦点距離 f だけ離れた位置で光軸と直角に交わる平面が画像平面であり、光軸と画像平面の交点を左右それぞれ左画像座標系 Σ_l 、右画像座標系 Σ_r の原点とする。また、ワールド座標系 Σ_w は、適当な位置に原点がとられているものとする。各座標系の x, y, z 軸のとり方は、Fig. 2 に示すとおりとする。

Fig. 2 Model of the stereo vision

このとき、カメラ座標系で ${}^c p = ({}^c x, {}^c y, {}^c z)^T$ (T は転置を示す) と表わされる環境中の点 p の左右の画像中に写る像を、それぞれ ${}^l p = ({}^l x, {}^l y)$ 、 ${}^r p = ({}^r x, {}^r y)$ とすると、次式が成立する。

$${}^l x = f \frac{{}^c x + \frac{b}{2}}{{}^c z} \quad (1)$$

Table 1 Definition of suffixes

Frame		Suffix
World Frame	Σ_w	w (World)
Camera Frame	Σ_c	c (Camera)
Left Image Frame	Σ_l	l (Left)
Right Image Frame	Σ_r	r (Right)
Virtual Image Frame	Σ_I	I (Image)
Monocular Image Frame	Σ_m	m (Monocular)

$${}^r x = f \frac{{}^c x - \frac{b}{2}}{{}^c z} \quad (2)$$

$${}^l y = f \frac{{}^c y}{{}^c z} \quad (3)$$

$${}^r y = f \frac{{}^c y}{{}^c z} \quad (4)$$

以下では、画像中の左右の特徴点のステレオ対応はとれているものとする。

2.2 イメージャコピアン

ビジュアル・サーボでは、画像中の特徴点の変化を利用して手先の速度入力を生成するので、画像中の特徴点速度とカメラの移動速度の関係を詳しく知る必要がある。これらに関係づける行列はイメージャコピアンと呼ばれ、以下のようにして求めることができる。

いま、対象物体上の n 個の特徴点 $p_k (k=1, \dots, n)$ を考え、その画像中の座標を ${}^l p_k ({}^l x_k, {}^l y_k)$, ${}^r p_k ({}^r x_k, {}^r y_k)$ とする。これら左右の画像座標をまとめて仮想的な画像座標系 I を定義し、画像中の特徴点の現在位置を次式のように記述する。

$${}^I p = ({}^l x_1 {}^r x_1 {}^l y_1 {}^r y_1 \dots {}^l x_n {}^r x_n {}^l y_n {}^r y_n)^T \quad (5)$$

まず、簡単のために特徴点が1点の場合を考えると、画像中の特徴点速度 ${}^I \dot{p}$ とカメラ座標系から見た特徴点速度 ${}^c \dot{p}$ の間には、その相互関係を表わすヤコビ行列 ${}^I J_c$ を用いて、次式の関係が成立する。

$${}^I \dot{p} = {}^I J_c {}^c \dot{p} \quad (6)$$

ただし、

$${}^I J_c = \begin{pmatrix} \frac{\partial {}^l x}{\partial {}^c x} & \frac{\partial {}^l x}{\partial {}^c y} & \frac{\partial {}^l x}{\partial {}^c z} \\ \frac{\partial {}^r x}{\partial {}^c x} & \frac{\partial {}^r x}{\partial {}^c y} & \frac{\partial {}^r x}{\partial {}^c z} \\ \frac{\partial {}^l y}{\partial {}^c x} & \frac{\partial {}^l y}{\partial {}^c y} & \frac{\partial {}^l y}{\partial {}^c z} \\ \frac{\partial {}^r y}{\partial {}^c x} & \frac{\partial {}^r y}{\partial {}^c y} & \frac{\partial {}^r y}{\partial {}^c z} \end{pmatrix} \quad (7)$$

である。これにステレオ視のモデル (1)~(4) 式を代入すると以下ようになる。

$${}^I J_c = f \begin{pmatrix} \frac{1}{{}^c z} & 0 & -\frac{{}^c x + \frac{b}{2}}{{}^c z^2} \\ \frac{1}{{}^c z} & 0 & -\frac{{}^c x - \frac{b}{2}}{{}^c z^2} \\ 0 & \frac{1}{{}^c z} & -\frac{{}^c y}{{}^c z^2} \\ 0 & \frac{1}{{}^c z} & -\frac{{}^c y}{{}^c z^2} \end{pmatrix} \quad (8)$$

また、カメラの各軸ごとの並進移動速度を ν_x, ν_y, ν_z 、回転角速度を $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ とし、カメラの移動速度 u を

$$u = \begin{pmatrix} \nu_x \\ \nu_y \\ \nu_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^c \nu_c \\ {}^c \omega_c \end{pmatrix} \quad (9)$$

と表わせば、カメラ座標系から見た特徴点速度 ${}^c \dot{p}$ は、

$$\begin{aligned} {}^c \dot{p} &= \frac{d {}^c p}{dt} \\ &= \frac{d}{dt} {}^c R_w ({}^w p - {}^w p_c) \\ &= {}^c R_w \{-{}^w \omega_c \times ({}^w p - {}^w p_c)\} + {}^c R_w ({}^w \dot{p} - {}^w \dot{p}_c) \end{aligned} \quad (10)$$

と表わされる²⁾。ただし、 ${}^c R_w$ はカメラ座標系からワールド座標系への回転行列であり、 ${}^w p_c$ などは、左肩添字の座標系から見た右下座標系の位置を表わしている。対象物体は、ワールド座標系に固定されているので、 ${}^w \dot{p} = 0$ とすれば、 ${}^c \dot{p}$ と u は以下のような関係式で表わすことができる。

$$\begin{aligned} {}^c \dot{p} &= {}^c R_w \{-{}^w \omega_c \times ({}^w p - {}^w p_c)\} - {}^c R_w {}^w \dot{p}_c \\ &= -{}^c \omega_c \times {}^c p - {}^c \dot{p}_c \end{aligned}$$

${}^c \dot{p}_c$ はカメラの移動速度を表わすので ${}^c \nu_c$ と等価である。よって以下を得る。

$$\begin{aligned} {}^c \dot{p} &= - \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} {}^c x \\ {}^c y \\ {}^c z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \nu_x \\ \nu_y \\ \nu_z \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -\omega_y {}^c z + \omega_z {}^c y - \nu_x \\ -\omega_z {}^c x + \omega_x {}^c z - \nu_y \\ -\omega_x {}^c y + \omega_y {}^c x - \nu_z \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & -{}^c z & {}^c y \\ 0 & -1 & 0 & {}^c z & 0 & -{}^c x \\ 0 & 0 & -1 & -{}^c y & {}^c x & 0 \end{pmatrix} u \end{aligned} \quad (11)$$

したがって、(6)、(11) 式より次式が得られる。

$$\begin{aligned} {}^I \dot{p} &= {}^I J_c {}^c \dot{p} \\ &= {}^I J_c \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & -{}^c z & {}^c y \\ 0 & -1 & 0 & {}^c z & 0 & -{}^c x \\ 0 & 0 & -1 & -{}^c y & {}^c x & 0 \end{pmatrix} u \\ &= J u \end{aligned} \quad (12)$$

ここに、

$$J = f \begin{pmatrix} -\frac{1}{c_z} & 0 & \frac{c_x + \frac{b}{2}}{c_z^2} & c_y \frac{c_x + \frac{b}{2}}{c_z^2} \\ -\frac{1}{c_z} & 0 & \frac{c_x - \frac{b}{2}}{c_z^2} & c_y \frac{c_x - \frac{b}{2}}{c_z^2} \\ 0 & -\frac{1}{c_z} & \frac{c_y}{c_z^2} & 1 + \frac{c_y^2}{c_z^2} \\ 0 & -\frac{1}{c_z} & \frac{c_y}{c_z^2} & 1 + \frac{c_y^2}{c_z^2} \\ -\left(1 + c_x \frac{c_x + \frac{b}{2}}{c_z^2}\right) & \frac{c_y}{c_z} \\ -\left(1 + c_x \frac{c_x - \frac{b}{2}}{c_z^2}\right) & \frac{c_y}{c_z} \\ -\frac{c_x c_y}{c_z^2} & -\frac{c_x}{c_z} \\ -\frac{c_x c_y}{c_z^2} & -\frac{c_x}{c_z} \end{pmatrix} \quad (13)$$

である。画像中の特徴点速度 ${}^l\dot{p}$ とカメラの移動速度 u を関係づける行列 J は、イメージャコピアンと呼ばれる。

ここで、ステレオ視のモデル (1)~(4) 式より次式が得られる。

$$c_x = \frac{b}{2} \frac{{}^l x + {}^r x}{{}^l x - {}^r x} \quad (14)$$

$$c_y = {}^l y \frac{b}{{}^l x - {}^r x} = {}^r y \frac{b}{{}^l x - {}^r x} \quad (15)$$

$$c_z = f \frac{b}{{}^l x - {}^r x} \quad (16)$$

したがって、(14)~(16) 式を (13) 式に代入すれば、ステレオ視におけるイメージャコピアンは次式のようになる。

$$J = \begin{pmatrix} -\frac{s}{b} & 0 & {}^l x \frac{s}{bf} & \frac{{}^l x {}^l y}{f} \\ -\frac{s}{b} & 0 & {}^r x \frac{s}{bf} & \frac{{}^r x {}^l y}{f} \\ 0 & -\frac{s}{b} & {}^l y \frac{s}{bf} & \frac{{}^l y^2}{f} + f \\ 0 & -\frac{s}{b} & {}^l y \frac{s}{bf} & \frac{{}^l y^2}{f} + f \\ -\frac{{}^l x ({}^l x + {}^r x)}{2f} - f & {}^l y \\ -\frac{{}^r x ({}^r x + {}^l x)}{2f} - f & {}^l y \\ -{}^l y \frac{{}^l x + {}^r x}{2f} & -\frac{{}^l x + {}^r x}{2} \\ -{}^l y \frac{{}^l x + {}^r x}{2f} & -\frac{{}^l x + {}^r x}{2} \end{pmatrix} \quad (17)$$

ここに、 $s = {}^l x - {}^r x$ で特徴点の視差を表わしている。

以上は、特徴点が 1 点の場合での議論であるが、実際の制御を行う際は、以下のように複数の特徴点を用いて制御を実現する。

画像中に n 個の特徴点が見られる時、各特徴点の画像中の座標より (17) 式のイメージャコピアン $J_1, \dots, J_n$ が得られるので、これらをまとめて、

$$J_{\text{image}} = \begin{pmatrix} J_1 \\ \vdots \\ J_n \end{pmatrix} \quad (18)$$

と記述する。これにより、複数の特徴点の場合でも特徴点速度とカメラの移動速度は次式の関係で表わすことができる。

$${}^l\dot{p} = J_{\text{image}} u \quad (19)$$

ただし、特徴点のステレオ対応および時間的な対応はとれているものとする。また、 J_{image} はフルランクと仮定する（実際には、この仮定が満たされるように、特徴点の選択、その個数の決定を行うものとする）。

2.3 フィードバック入力の生成

ビジュアル・サーボでは、画像中の特徴点の現在位置が目標位置に達するようにマニピュレータを制御する。このときのフィードバック入力は次のようにして生成する³⁾。

${}^l p$ と画像中の特徴点の目標位置 ${}^l p_d$ との誤差関数を次式のように定義する。

$$e = C({}^l p - {}^l p_d) \quad (20)$$

ここに、 C は系を安定化する適当な行列である。このとき、フィードバック入力を、 λ をゲインとして次のように与える。

$$u = -\lambda e \quad (21)$$

ビジュアル・サーボを実現するためには、誤差システム

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \frac{\partial e}{\partial t} \\ &= C \frac{\partial {}^l p}{\partial t} \\ &= C {}^l \dot{p} \\ &= C J_{\text{image}} u \\ &= -\lambda C J_{\text{image}} e \end{aligned} \quad (22)$$

が収束するような C を選べば良い。ここではローカルな収束性を保証するための C の値として、 $C J_{\text{image}} > 0$ であり、かつ入力が過大にならないようなイメージャコピアン J_{image} の疑似逆行列

$$J_{\text{image}}^+ = (J_{\text{image}}^T J_{\text{image}})^{-1} J_{\text{image}}^T \quad (23)$$

を用いた。すなわち、フィードバック入力は、

$$u = -\lambda J_{\text{image}}^+ ({}^l p - {}^l p_d) \quad (24)$$

となる。疑似逆行列 J_{image}^+ は、その各要素がパラメータ誤差を含んでいても $CJ_{\text{image}} > 0$ を満たすことから、ロバスト安定なシステムを実現することができる。

この入力により、Fig. 3 に示すような閉ループシステムが構築される。なお、ロボットシステムは、カメラ速度 u の入力より関節目標速度 $\dot{q}_d$ を生成し、コントローラ内で理想的な速度サーボ系が構成されているとする。また、 J_{image} は $4n \times 6$ 行列になるので、その疑似逆行列 J_{image}^+ は $6 \times 4n$ 行列となり、6 自由度に対応するフィードバック入力 (24) 式が得られる。

Fig. 3 Block diagram of feedback system

3. 単眼視との比較

単眼視における J は次のようになる²⁾。

$$J = f \begin{pmatrix} -\frac{1}{c_z} & 0 & \frac{c_x}{c_z^2} & \frac{c_x c_y}{c_z} \\ 0 & -\frac{1}{c_z} & \frac{c_y}{c_z^2} & 1 + \frac{c_y^2}{c_z^2} \\ -\left(1 + \frac{c_x^2}{c_z^2}\right) & \frac{c_y}{c_z} \\ -\frac{c_x c_y}{c_z^2} & -\frac{c_x}{c_z} \end{pmatrix} \quad (25)$$

いま、単眼視での画像座標系を m と定義する。このとき、カメラ座標系で ${}^c p = ({}^c x \ {}^c y \ {}^c z)^T$ と表わされる環境中の点 p の単眼画像中に写る像を ${}^m p = ({}^m x, {}^m y)$ とすると次式が成立する。

$${}^m x = f \frac{c_x}{c_z} \quad (26)$$

$${}^m y = f \frac{c_y}{c_z} \quad (27)$$

(26), (27) 式を (25) 式に代入すると、

$$J = \begin{pmatrix} -\frac{f}{c_z} & 0 & \frac{m_x}{c_z} & \frac{m_x m_y}{f} \\ 0 & -\frac{f}{c_z} & \frac{m_y}{c_z} & \frac{m_y^2 + f^2}{f^2} \\ -\frac{m_x^2 + f^2}{f^2} & m_y \\ -\frac{m_x m_y}{f} & -m_x \end{pmatrix} \quad (28)$$

となる。

(17) 式と (28) 式を比較すると、ステレオ視では J に特徴点の奥行きに対応した視差 s が入っているのに対して、単眼視の場合にはこれが c_z というカメラ座標系で表わされた項となっている。

したがって、焦点距離 f 基線長 b を与えれば、ステレオ視では J のすべての項を画像上の座標で記述できるので、全く画像情報のみでフィードバック入力を生成することができる。一方、単眼視の場合は、画像中の座標とカメラ座標における奥行き c_z の両方が入り混じっているため、画像中の情報のみを用いてビジュアル・フィードバックを行うことはできず、対象物体のモデルをあらかじめ持っておくとか、カメラ座標系から見た奥行き方向の目標位置 c_z が与えられていなければならない。このため、単眼視ではイメージャコピアン疑似逆行列 J_{image}^+ を求める際に、目標点で近似した値しか取れないが、ステレオ視の場合は安定領域が広く、フィードバック入力生成時に毎回計算することが可能なので、安定領域を考慮する必要もなくなる。

また、相対位置と相対姿勢を一意に定めるには、単眼視では特徴点が最低4点必要なのに対して、ステレオ視では3点で十分である。

さらに、位置決めをより正確に行うためや、画像に含まれるノイズの影響を減じるために、多くの特徴点を用いる場合、単眼視では現在の画像上の特徴点と目標状態での特徴点との位置誤差がばらつくため、上述の制御はますます厳しいものになることが予想される。

4. シミュレーションおよび実験

4.1 シミュレーション

シミュレーションにより単眼視の場合とステレオ視の場合との比較検討を行った。シミュレーションでは、対象物体の特徴点は一辺 200 (mm) の正方形の頂点を構成する4点とした。同条件での比較のため、ステレオ視の場合にも特徴点を4点用いた。各パラメータは、焦点距離 $f = 8$ (mm)、基線長 $b = 120$ (mm)、サンプリングタイム 80 (msec)、ゲイン $\lambda = 1$ である。目標位置 ${}^c p_d$ を $(100 \ 500 \ 600)^T$ (mm)、目標姿勢を $z-y-z$ オ

イラー角で $(\phi, \theta, \psi) = (0, 0, 0)$ (degree) とした。初期誤差は並進誤差を $(-100 \ -100 \ -100)^T$ (mm), 回転誤差を $(\phi, \theta, \psi) = (10, 10, 10)$ (degree) とした。画像上の特徴点の現在位置と目標位置との間の誤差変化を, 単眼視の場合とステレオ視の場合それぞれについて Fig. 4 に示す。さらに, 画像上での特徴点の軌跡を, 単眼視とステレオ視のそれぞれの場合について Fig. 5, Fig. 6 に示す。これらより, 単眼視の場合は収束が遅く, オーバーシュートも大きいが, ステレオ視の場合は収束が速く, オーバーシュートも小さいことがわかる。

つぎに, 特徴点の取り方を変えて初期誤差を大きくした場合の結果を示す。150 × 200 (mm) の長方形の頂点を構成するような四つの特徴点に対して, 並進誤差を

Fig. 4 Positional error in x and y axes (Simulation)

Fig. 5 Trajectories of feature points on the image (Simulation, Monocular)

Fig. 6 Trajectories of feature points on the image (Simulation, Stereo)

Fig. 7 Positional error in x and y axes (Simulation)

$(-200 \ -200 \ -200)^T$ (mm) とし, その他の条件は同一のままにした時の結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 より, 単眼視では発散してしまうが, このような場合にもステレオ視を用いれば, 収束することがわかる。これは, 単眼視ではイメージャコピアンを目標位置での値に固定しているため, 初期誤差が大きいと正しいフィードバック入力を生成できなくなるが, ステレオ視の場合では, イメージャコピアンをマニピュレータの手先が移動するごとに更新できるため, 安定性を保証するフィードバック入力を生成することが可能なのである。

4.2 実験

実験は, 6 自由度ロボット (川崎重工 PH260) の手先にステレオカメラ (カメラ本体: 竹中システム機器 TM-745H, レンズ: 同 CLS813 各 2 台) を取り付け装置を用い (Fig. 8 参照), 一辺 87 (mm) の正三角形を構成する頂点上に, 半径 20 (mm) の円板 3 枚を対象物体に配置することにより特徴点とした。なお, 手先に取り付けられたステレオカメラは, 厳密なキャリブレーションを行っていないが, その影響は出ていない。ステレオ画像は 2 枚の画像入力装置 (コンカレント TRP-IMG) によりリアルタイムに二値化されパラレルに取り込まれ, 2 台のトランスピュータ (コンカレント TRPM-402) で各特徴点の重心座標がパラレルに計算される。このとき, 特徴点のステレオ対応および時間的な対応は, 初回のサンプリング時には与えているが, 2 回目のサンプリング以降は, 左右の画像でそれぞれ独立に, 前回のサンプリング時に特徴点があった場所の近傍で探索を行うことにより, 特徴点の時間的な対応とステレオ対応を取っている。特徴点の座標値は制御用のトランスピュータに送られ, 手先速度が計算される。その結果は RS-232C を通じてロボットのコントローラに送られ, コントローラ内の速度サーボ系によりロボットが制御される (Fig. 8 参照)。制御ループは 1 ループ約 80 (msec) であり, 内訳は, 画像の取り込みに約 33 (msec), 画像中の特徴点座標の計算に約 2 (msec),

Fig. 8 Experimental system

制御入力の計算に約 5 (ms), ロボットのコントローラとの通信に約 40 (ms) である。RS-232C を使用せずに直接コントローラに速度信号を入力できれば、さらに高速なサーボが実現できる。

また、目標位置を ${}^c p_d = (0 \ 0 \ 600)^T$ (mm), 目標姿勢は $z-y-z$ オイラー角で $(\phi, \theta, \psi) = (0, 0, 0)$ (degree) とし、初期誤差を並進誤差 $(50 \ 50 \ 50)^T$ (mm) とした。焦点距離 f と基線長 b はあらかじめ与えておき、その他のパラメータはシミュレーションの場合と同じとした。画像上の特徴点の目標位置と現在位置との誤差変化の様子を Fig. 9 に、画像上の特徴点の移動軌跡を Fig. 10 に示す。

これらの図より、厳密なキャリブレーションを行っていなくても目標位置へ収束することがわかる。なお、グラフが振動しているのは、ロボットのコントローラのハード上の理由のためである。

Fig. 9 Positional error in x and y axes (Experiment, Stereo)

Fig. 10 Trajectories of feature points on the images (Experiment, Stereo)

5. おわりに

本論文では、マニピュレータの手先にカメラを取り付けたハンドアイシステムにおけるビジュアルフィードバック制御に関して、従来用いられていた単眼視における問題点を指摘し、その原因がイメージャコビアンに起因することを述べた。それらの問題点の解決方法としてステレオ視を用いることを提案し、ステレオ視におけるイメージャコビアンを検討した。それにより、イメージャコビアンをカメラ位置ごとに正しく計算できることを見出し、対象物体のモデルや目標相対距離を与える必要がないこと、初期誤差によらず収束するという利点を述べた。また、シミュレーションおよび実験により本手法の有効性を確かめた。

ビジュアル・サーボでは、画像でのノイズや量子化誤差、特徴点の選び方などの問題が多々存在する。今後は、これらの問題についてもステレオ視を利用することにより、解決をはかりたい。

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 Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 5, pp. 404~417 (1987)
- 2) K. Hashimoto, T. Kimoto, T. Ebine and H. Kimura : Manipulator Control with Image-Based Visual Servo ; Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2267~2272 (1991)
- 3) F. Chaumette, P. Rives and B. Espiau : Positioning of a Robot with Respect to an Object, Tracking It and Estimating Its Velocity by Visual Servoing ; Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2248~2253 (1991)
- 4) K. Hashimoto, T. Ebine and H. Kimura : Dynamic Visual Feedback Control for a Hand-Eye Manipulator ; Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1863~1868 (1992)
- 5) B. Espiau, F. Chaumette and P. Rives : A New Approach to Visual Servoing in Robotics ; IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 8, No. 3, pp. 313~326 (1992)