逆運動学の線形近似に基づくビジュアルサーボ

満田 隆^{*1} 丸 典明^{*2} 富士川 和延^{*3} 宮崎 文夫^{*3}

Visual Servoing based on Linear Approximation of the Inverser Kinematics

Takashi Mitsuda^{*1}, Noriaki Maru^{*2}, Kazunobu Fujikawa^{*3} and Fumio Miyazaki^{*3}

We propose a simple visual servoing based on linear approximation of the inverse kinematics. When we use a hand-eye system which has a similar structure as a human being, we can approximate the transformation from a binocular visual space to a joint space of the manipulator as a linear function. This relationship makes it possible to produce the desired joint angles from the image data using a constant linear function instead of the variable nonlinear image jacobian and robot jacobian. This method is robust to the calibration error, because it uses neither camera angles nor joint angles. We show some experimental results which demonstrates the effectiveness of this method.

Key Words: Visual Servoing, Active Stereo Vision, Hand-Eye System, Binocular Visual Space, Joint Space

1. はじめに

未知あるいは動的な環境中で、ロボットマニピュレータにより作業を行うためには、外界の情報を非接触に計測できるカメラを用いた視覚が必要不可欠である。一般に、カメラを用いたマニピュレータの制御方法としては、ルックアンドムーブと呼ばれる方法がある。これは、カメラにより目標物体の三次元位置や姿勢をカメラ座標系で計測し、それを座標変換によりロボット座標系における目標位置に変換して、あとはロボットのコントローラにより手先の位置を目標位置に制御する方法である。この方法は、カメラ系や座標変換、ロボット座標系のキャリブレーションエラーに対して非常に弱い。

このような問題を解決する方法として、画像中の目標位置と手先位置の誤差から直接マニピュレータのフィードバック入力を生成する制御（ビジュアルサーボ）が現在注目を浴びている。ビジュアルサーボは、カメラで定まる座標系に基づく制御であるため、キャリブレーションエラーに対してロバストである。これまでに提案されたビジュアルサーボとしては、位置ベース [12]~[14] と特徴ベース [9][15][16] のものがある [11]。Fig. 1 (a), (b) にそれぞれの制御式を示す。図中、 u は関節への指令値、 I, I_d はそれぞれ画像座標における位置と目標位置、 P, P_d はそれぞれデカルト座標における位置と目標位置、 θ は

カメラ角度とマニピュレータ角度、 J_R はデカルト座標の位置と関節角度を関係づけるヤコビアン、 J_I は画像座標における位置と関節角度を関係づけるヤコビアン、 λ はゲインである。

前者は、カメラ画像に基づいて推定した三次元位置（デカルト座標系）を状態量としてフィードバック（Fig.1 (a) 式）を行うもので、単純なアルゴリズムであり軌道の推定も容易である。しかし、位置推定における計算量が多く、また位置推定時のノイズに弱い欠点があった。

一方、後者は、画像上の特徴量を状態量としてフィードバック（Fig.1 (b) 式）を行うもので、位置推定を行わないため、前者と比べて計算量が少なく、カメラのキャリブレーションエラーに対してもロバストである。しかし、本手法は、画像中の特徴量の変化と、デカルト空間における特徴点の運動を関係づけるヤコビ行列（いわゆるイメージヤコビアン）に基づく複雑な非

Conventional Visual Servoing

(a) Position Based

$$u = -\lambda J_R^{-1}(\theta)(P - P_d)$$

(b) Feature Based

$$u = -\lambda J_I^{-1}(\theta)(I - I_d)$$

Linear Visual Servoing

(c) Linear Visual Servoing

$$u = -\lambda RT(I - I_d)$$

$$(V = TI)$$

Fig. 1 Manipulator control using visual servoing

原稿受付 1995年8月17日

^{*1}富士通株式会社

^{*2}和歌山大学システム工学部

^{*3}大阪大学基礎工学部

^{*1}Fujitsu Co.

^{*2}Faculty of System Engineering, Wakayama University

^{*3}Faculty of Engineering Science, Osaka University

線形制御であるため、軌道の解析が難しい。また、その構成式には三次元座標が含まれないため、マニピュレータの非可動範囲、特異点を回避させることが困難である。これらの問題は画像座標上の位置と三次元位置（デカルト座標系）、そしてマニピュレータの関節角度の間の変換が非線形なものであることに起因していた。

また、前者、後者いずれにおいても、デカルト空間におけるカメラ座標系からマニピュレータの座標系への変換が必要であるため、カメラの位置姿勢の計測が必要であった。さらに、マニピュレータ座標系における手先速度と関節角速度を関係づけるヤコビ行列（いわゆるロボットヤコビアン）を用いるため、ヤコビ行列の生成に必要なマニピュレータの関節角度の計測も必要であった。

本論文では、カメラとマニピュレータを人間の眼と腕に似せた構造と配置にすれば、視空間座標系におけるマニピュレータの手先位置と関節角度が、線形変換により近似結合できる性質[2]に着目し、視空間座標系がカメラ画像上の位置と直結した座標系であることを利用すれば、定数行列による線形変換という極めて単純なビジュアルサーボが構成可能であることを提案する。Fig. 1(c) 式に提案する線形ビジュアルサーボの構成式を示す。ただし、図中 R, T は定数行列、 V は視空間座標における位置を示している。

線形ビジュアルサーボと名付けたこの制御方法は、線形式に基づくためアルゴリズムも非常に単純であり計算量も非常に少ない。また、従来のビジュアルサーボでは関節角度をリアルタイムに検出する必要があったが、本サーボの構成式には関節角度は含まれず、完全なカメラ情報のみに基づく制御が可能である。このため、マニピュレータのキャリブレーションエラーに対してもロバストである。さらに、従来のカメラを用いた制御ではカメラの姿勢が必要であったが、本サーボの構成式にはカメラ姿勢も含まれないため、マニピュレータに対するカメラの位置が一定であれば、動作中にカメラ姿勢が変化しても、サーボ動作にまったく影響はない。このため、人間の眼のように回転するカメラを用いたヘッドアイシステムを用いた場合でも、カメラの運動に関係なくサーボが実現でき、カメラのキャリブレーションエラーに対してもロバストである。キャリブレーションにおいても、従来はカメラとマニピュレータの各パラメータを一つずつ修正する必要があり、手間がかかる上に、破損等によるモデルの変化にはまったく対応することができなかった。これに対し、本方法では、カメラ座標系からマニピュレータ座標系への変換を用いず、カメラ画像上の位置とマニピュレータの関節角度を直接関係づける近似線形式に基づいているため、カメラとマニピュレータを一まとめにしたグローバルなキャリブレーションが可能である。さらに本方法は、画像座標と直結した三次元座標（視空間座標系）と関節座標系との線形結合にも基づいているため、画像特徴を状態量とする特徴ベースのビジュアルサーボでありながらも、軌道の予測は容易であり、位置ベースの利点も併せ持つものである。

本論文では、まず回転型ステレオカメラのモデルを示し、線形ビジュアルサーボの構成を示す。また、静止ターゲットへの位置決め動作に関する種々の実験により、線形ビジュアルサー

ボの持つロバスト性と様々な利点を確認する。

2. モデル

2.1 カメラとマニピュレータのモデル

本研究では、Fig. 2 に示すように、人間と類似した構造と配置のカメラとマニピュレータのモデルを用いる。

カメラは、水平、垂直方向の2自由度の回転が可能なステレオカメラで、フレームに固定されている。フレームは、首関節により水平方向に回転可能で、カメラ全体を水平方向に回転させることができる。ここでは、人間の目と同様に回転が可能なステレオカメラを考えたが、標準配置の平行ステレオカメラでも何ら問題はない。マニピュレータは肩関節に2自由度を持つ2リンク3自由度の回転関節型で、一般に用いられる産業用マニピュレータと同様の機構である。図中、マニピュレータの関節角度 j_0, j_1, j_2 はマニピュレータを含む平面 ($X-Z_M$ 平面) 上で定まる角度であり、視空間座標 γ, θ, δ (3.1 節参照) は視線を含む平面 ($X-Z_V$ 平面) 上で定まる角度である。また、マニピュレータのリンク長さやカメラに対する配置は、成人男子の眼と腕の関係を参考に Table 1 のように定めた。(これらのパラメータは、ある評価関数に対して最も良い線形近似を与えることが示せる[1].)

2.2 ステレオカメラのモデル

Fig. 3 に回転型ステレオカメラのモデルを示す。カメラは Fig. 2 で示したのと同じく、水平、垂直方向の2自由度の回転が可能な注視機構を持つステレオカメラを用いる。また、本節でも首関節は正面 ($\zeta = 0$) に固定して用いる。カメラは焦点距離 f の理想的なピンホールカメラを想定し、カメラの回転中心は光学的焦点にあるものとする。左右のカメラの水平方向の回転角度をそれぞれ α_L, α_R 、垂直方向の回転角度を α_D としたとき、画像座標上の点 $(X^L, Y^L), (X^R, Y^R)$ は次式で視空間座標 $V = (\gamma, \theta, \delta)^T$ に変換される。

$$V = \begin{bmatrix} \alpha_L - \alpha_R \\ (\alpha_L + \alpha_R)/2 \\ \alpha_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (X^L - X^R)/f \\ (X^L + X^R)/2f \\ (Y^L + Y^R)/2f \end{bmatrix} \quad (1)$$

Fig. 2 Model of the hand-eye system

Table 1 Parameters of the model

Link length	$L_1 = 250, L_2 = 380$
Camera position	$W = 200, K = 200, G = 0$
Baseline length / 2	$E = 35$
Focal length	$f = 3$ (unit:mm)

Fig. 3 Model of the active stereo cameras

ここに, $X^L, X^R, Y^L \ll f$ と仮定して, $\tan^{-1}(X^L/f) \simeq X^L/f$ などの近似を行っていることに注意されたい。

3. 線形ビジュアルサーボ

3.1 視空間

視空間は両眼により注視を行っている際の輻輳角 γ と視線方向角 θ, δ で定める座標系であり, 人間の空間知覚に関係の深い座標系として, 生理学の分野でよく用いられている (Fig. 4)。

Fig. 2 において首関節 ζ を正面向き ($\zeta = 0[\text{deg}]$) に固定した場合, 次式により視空間座標系 (γ, θ, δ) からデカルト座標系 (x, y, z) へ変換できる。

$$\begin{aligned} x &= E \sin(2\theta) / \sin(\gamma) \\ y &= \bar{z} \sin(\delta), \quad z = \bar{z} \cos(\delta) \\ \text{ただし } \bar{z} &= E \{ \cos(\gamma) + \cos(2\theta) \} / \sin(\gamma) \end{aligned} \quad (2)$$

この視空間におけるマニピュレータの逆運動学は次式で近似できることが分かっている [2]。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{j}} &= \mathbf{R}(\zeta) \mathbf{V} + \mathbf{C}(\zeta) \\ \mathbf{V} &= (\gamma, \theta, \delta)^T, \quad \mathbf{j} = (j_0, j_1, j_2) \\ \mathbf{R}(\zeta), \mathbf{C}(\zeta) &\text{ は, } \zeta \text{ の線形式} \end{aligned} \quad (3)$$

さて, 本式に基づき位置決めサーボを構成すると次式のようなになる。

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= -\lambda \mathbf{R}(\zeta) (\mathbf{V} - \mathbf{V}_d) \\ \mathbf{u} &: \text{関節への速度指令値} \\ \mathbf{V}_d &: \text{目標視空間座標} \\ \lambda &: \text{ゲイン} \end{aligned} \quad (4)$$

さらに式 (4) に式 (1) を代入すると, 次式のようなビジュアルサーボが構成できる。

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= -\lambda \mathbf{R}(\zeta) \begin{bmatrix} \{(X^L - X^R) - (X_d^L - X_d^R)\} / f \\ \{(X^L + X^R) - (X_d^L + X_d^R)\} / 2f \\ \{(Y^L + Y^R) - (Y_d^L + Y_d^R)\} / 2f \end{bmatrix} \\ &= -\lambda \mathbf{R}(\zeta) \mathbf{T} (\mathbf{I} - \mathbf{I}_d) \\ \mathbf{T} &= \begin{pmatrix} 1/f & -1/f & 0 & 0 \\ 1/2f & 1/2f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2f & 1/2f \end{pmatrix} \\ \mathbf{I} &= (X^L, X^R, Y^L, Y^R)^T \end{aligned} \quad (5)$$

Fig. 4 Definition of the binocular visual space

本式は, カメラ角度の項が消去されており, 視差情報のみに基づくサーボとなっている。すなわち, カメラが回転する場合でも, カメラ角度を検出すること無しに, サーボ系を構成することができる。

本ビジュアルサーボの利点として, 以下の事が挙げられる。

- 計算量が極めて少ない。
- イメージャコピアン, ロボットヤコビアンが不要である。(カメラ角度, マニピュレータの姿勢が不要である。)
- ノイズに対して非常にロバストである。
- キャリブレーションが容易である。カメラ, マニピュレータの各パラメータを一まとめにしたグローバルなキャリブレーションができる。

4. 実 験

本章では, 実機によって線形ビジュアルサーボの有効性を検証する。また比較対象として, 加瀬らにより提案されている疑似逆行列を用いたステレオビジュアルサーボ [9][10] を用いた実験も同時に行った。以下, これを従来のビジュアルサーボと呼ぶ。

4.1 実験システム

前章 (Fig. 2) のモデルに基づいて Fig. 6 に示す実験システムを作成した。実験システムの概略を Fig. 5 に, 使用するマニピュレータ (三菱電機 ムーブマスター RV-M2) を Fig. 8 に, また, 試作した回転型ステレオカメラ (CCD カメラ: エルモ社 UN-411, 焦点距離: 3[mm], $\times 2$) の概観を Fig. 7 に示す。さらに, システムの各パラメータを Table 2 に示す。

本節における実験およびシミュレーションは, 肩関節を水平に固定し ($j_0 = 0[\text{deg}]$) 二次元平面内で動作を行わせた。使用したマニピュレータは関節速度制御を行えない仕様であるので, パルス信号により, 直接マニピュレータの関節を駆動できるようにコントローラを改造したもので, ソフト的に関節速度サーボを実現している。

ステレオカメラは基線長 80[mm] に配置し, それぞれ水平, 垂直方向に回転することができるようにした。焦点距離は 3[mm] のレンズを用いた。また, 首関節は正面向き ($\zeta = 0[\text{deg}]$) に固定した。

手先には豆電球を点灯させ, ターゲットには白色の特徴点をとつけた。CCD カメラで得た画像データを 3 値化することにより, 手先とターゲットを分離し, 画像上に投影されたそれぞれの像の重心位置を座標位置として用いた。

Fig. 5 Schematic representation of the experimental setup

Fig. 6 Experimental system

Fig. 7 An overview of the active stereo cameras

また、制御モジュールとしてトランスペュータを用いることで、マニピュレータの制御と左右カメラの画像処理をすべて並列に行い、高速化を計った。なお、カメラとマニピュレータは大雑把に設置しており、 W, K, G のみならずカメラの取り付け角度も含めたすべてのパラメータは不正確である。

4.2 実験結果

まず、カメラを平行、 $15[\text{deg}]$ 下向き ($\alpha_D = -15[\text{deg}]$) に固定して実験を行った ($\alpha_L = \alpha_R = 0, \alpha_D = -15[\text{deg}]$)。また、実験と同じパラメータでシミュレーションも行った。以下、L-VS は、線形ビジュアルサーボ、C-VS は、従来のビジュアルサーボを示す。

4.2.1 軌道の比較

L-VS と C-VS の軌道の違いをみるため、Table 3 の条件で実験、およびシミュレーションを行った。得られたデカルト空間における手先軌道を Fig. 9 に示す。また、初期位置が $(-100, 400)$

Fig. 8 Manipulator

Table 2 Parameters of the experimental system

Link length [mm]	$L_1 = 220, L_2 = 360$
Camera position [mm]	$W = 180, K = 180, G = 0$
Baseline length / 2 [mm]	$E = 40$
Focal length [mm]	$f = 3$

Table 3 Experimental conditions

Initial position	Target position	Gain
$(-100, 400)$	$(300, 500)$	100
$(300, 500)$	$(-100, 400)$	100

Fig. 9 Trajectories of the hand

のときに得られた関節軌道を Fig. 10 に示す。図中、実線は実験結果、一点鎖線はシミュレーション結果を示している。デカルト空間上での手先軌道 (Fig. 9) をみると、L-VS ではシミュレーション結果と実験結果がほぼ一致し、安定な手先軌道が得られたのに対して、C-VS ではシミュレーション結果と実験結果は大きく異なった。本実験では、カメラのキャリブレーションを行っていないため、誤差の影響が大きく現れたと考えられる。

また、関節軌道 (Fig. 10) をみると、L-VS がほぼ直線的に収束しているのに対し、C-VS は遠回りの軌道を描いている。L-VS は視空間における直線軌道を描くため、視空間と線形的関係にある関節軌道も直線軌道を描くのに対し、C-VS はデカルト空間に対して直線軌道を描こうとするため、関節軌道はこのような無駄な軌道を描く。関節軌道が直線を描くということは、途中の軌道がマニピュレータの可動範囲外を通る心配が

Fig. 10 Trajectories of the joint angles

Table 4 Experimental conditions

	Initial position	Target position	Gain
L-VS	(300, 500)	(-100, 400)	100
	(300, 500)	(-100, 400)	200
	(300, 500)	(-100, 400)	400
C-VS	(300, 500)	(-100, 400)	100
	(300, 500)	(-100, 400)	150
	(300, 500)	(-100, 400)	200
	(300, 500)	(-100, 400)	400

無く、ダイナミクスやエネルギーを考慮しても、非常に都合が良い。実際に C-VS の実験においては、手先の初期位置とターゲットの位置によって、途中、可動範囲外を通るために実行不可能となる場合が度々生じた。本性質は、線形ビジュアルサーボの持つ利点の一つである。

4.2.2 ゲインによる比較

同じ初期位置、ターゲット位置に対して、ゲインを変えて実験とシミュレーションを行った。実験条件を Table 4 に、得られたデカルト空間における手先軌道を Fig. 11 に示す。シミュレーションにおいては、ゲインを変えても手先軌道はほとんど変化しない。しかし、実験においては様々なパラメータ誤差が影響するため、ゲインにより手先軌道が異なる可能性がある。本実験においては、L-VS では、ゲインを変えても平面上の軌道は変化しなかったのに対して、C-VS では、ゲインに対して大きく変化した。図には示していないがゲイン 400 においては、スタート直後に可動範囲を出てしまい、動作不可能となった。本実験は、実験システムとモデルとの誤差がはっきりしない。そのため、この結果より L-VS のモデル誤差に対するロバスト性を示すことはできない。しかし、様々な軌道について、ゲインを変えて実験して得られた実感としては、L-VS は C-VS に比べ、かなり安定した動作を示した。モデル誤差に対するロバスト性については、5 節においてシミュレーションを用いた検証を行う。

4.2.3 カメラにターゲットを注視させた場合

線形ビジュアルサーボはカメラ姿勢に依らないサーボである。前節までは、平行ステレオカメラによる実験であったが、ここ

Fig. 11 Trajectories of the hand

Table 5 Experimental conditions

Initial position	Target position	Gain
(300, 500)	(-100, 400)	100

Fig. 12 Trajectories of the hand

Table 6 Experimental conditions

Initial position	Target position	Gain
(100, 500)	(-100, 400)	100

ではカメラを、ターゲットを注視させた状態（画像中心にターゲットが映る状態）に固定して Table 5 の条件で実験を行い、平行ステレオカメラの場合と比較した。得られたデカルト空間における手先軌道を Fig. 12 に示す。図中、実線はカメラが注視している場合の軌道で、点線は平行ステレオカメラを用いた場合の軌道である。シミュレーションにおいては、平行ステレオカメラの場合も、注視した場合も、手先軌道は一致する。実験結果をみても、手先軌道はほぼ一致していることが分かる。これにより、L-VS はカメラ姿勢に依らないことが実証された。

4.2.4 カメラを回転させながら動作させた場合

先の実験ではカメラは固定されていたが、L-VS はカメラ姿勢にまったく依らないサーボであるため、例えば動作中にカメラが回転しても構わない。そこで、カメラをそれぞれ水平方向に左右に振らせながら Table 6 の条件で実験を行った。カメラは人間が手で直接、約 1 秒の周期で回転させた。

得られたデカルト空間における手先軌道を Fig. 13 に示す。比較のため、ターゲットを注視した状態に固定したカメラにおける実験（前節）の結果を点線として表示している。カメラを回転させた場合も、得られた手先軌道、関節軌道はカメラ固定の場合とほぼ一致しており、安定した動作を示した。画像上の特徴点の X 座標の変化を、Fig. 14, 15 に示す。また、その差を Fig. 16 に示す。カメラの回転により座標値が大きく変化し

Fig. 13 Trajectories of the hand

Fig. 14 X coordinates of the feature points in left image

Fig. 15 X coordinates of the feature points in right image

ているにもかかわらず、手先がターゲットに収束している様子が分かる。

以上より、カメラが回転した状態においても線形ビジュアルサーボでは安定した動作が行えることが実証された。ここで、従来のビジュアルサーボでは、必要不可欠であったカメラ姿勢の計測はまったく行っていないことを確認しておく。

Fig. 16 The difference of X coordinates of the feature points

5. モデル誤差に対するロバスト性

本章では、線形ビジュアルサーボのモデル誤差に対するロバスト性を検証する。従来のビジュアルサーボ [9] [12]~[16] では、カメラ姿勢とマニピュレータの関節角度は、正確に計測されているという前提に基づいていた。そのため、これらの計測誤差はサーボ動作に悪影響を及ぼすと考えられる。これに対し、線形ビジュアルサーボでは、構成式にこれらのパラメータが含まれないため、計測自体が必要ない。

また、従来のビジュアルサーボは、カメラは固定されたものと仮定しており、このことがカメラのキャリブレーションエラーに対するロバスト性を保証していた。これに対し、線形ビジュアルサーボはカメラ姿勢に依らないシステムであるため、カメラが回転する場合でも、同等のロバスト性が保証される。現在、研究されている次世代ビジョンシステムの多くが、回転可能なカメラシステムを用いており、実環境におけるカメラの回転を利用した画像処理の有効性が報告されていることを考えると、カメラの回転角を用いないビジュアルサーボの意義は非常に大きい。また、カメラ姿勢に依らないシステムであることは、固定カメラを用いる場合においても、カメラの設置姿勢の誤差に対するロバスト性を保証する。

マニピュレータの関節角度の計測が不要な点についても、計測誤差の影響を受けないだけでなく、マニピュレータのモデル誤差を一部吸収することができるという利点がある（このことについては、次節で詳しく説明する）。

以上のようなモデル誤差に対する線形ビジュアルサーボのロバスト性について、シミュレーションにより検証を行った。比較対象としては、前章までと同様、『疑似逆行列を用いたステレオビジュアルサーボ』を用いた。以下、これを従来のビジュアルサーボと呼ぶこととする。また、システムは前節と同じモデル (Table 2) を用いた。

5.1 カメラの姿勢誤差による影響

線形ビジュアルサーボでは、カメラ姿勢が変化しても、サーボ動作には影響がない。これに対し、平行ステレオカメラの

Fig. 17 Trajectories of the hand

Fig. 18 Trajectories of the hand

モデルに基づく従来のビジュアルサーボでは、カメラの姿勢誤差がある場合、サーボ動作にどのような影響があるかをシミュレーションにより実験した。ステレオカメラのうち左側のカメラ角度に対して、反時計まわりに 2, 5, 8, 10 [deg] の誤差を与えた場合の軌道を Fig. 17 に示す。線形ビジュアルサーボでは、軌道がほとんど変化していないのに対して、従来のビジュアルサーボでは大きく変化している。線形ビジュアルサーボにおける軌道の変化は式 (1) の第二項の近似誤差によるものであるが、本結果よりほとんど影響がないことが分かる。一方、従来のビジュアルサーボではカメラ誤差に対して大きく軌道が変化し不安定なことが分かる。

5.2 マニピュレータの関節角度誤差による影響

線形ビジュアルサーボの構成式にはマニピュレータの関節角度が含まれないため、関節角度の計測誤差による影響は受けない。従来型ビジュアルサーボにおいて、関節 j_1 の計測値が、実際より 5, 10, 20 [deg] の誤差があった場合の軌道を Fig. 18 に示す。線形ビジュアルサーボではまったく軌道の変化がないのに対し、従来のビジュアルサーボでは、誤差とともに軌道も変化する。

5.3 マニピュレータのモデル誤差による影響

システムに関節角度のパラメータとして含まれないことは、マニピュレータのモデル誤差も一部吸収することができることも意味している。例えば、Fig. 19 に示すようなモデル誤差（本例では、第 2 リンクのモデル誤差）が存在する場合、同図右に示すように関節角度とリンク長さの誤差に分解することができる。関節角度誤差に関しては、線形ビジュアルサーボは影響

Fig. 19 The effect of the link model error

を受けないため、リンクモデルの誤差による影響は、従来のビジュアルサーボに比べて少ないといえる。

6. おわりに

本論文では、人間の眼と手の配置関係や寸法が、視空間座標と関節座標の間の近似的線形関係を成立させる要因であることに着目し、人間と似た構造のステレオ視覚付きマニピュレータに対して、視空間座標でサーボ誤差を定量化するステレオビジュアルサーボ方式を提案した。また、人間の両眼と手の配置を模擬した実験システムを用いて本制御方式と従来のステレオビジュアルサーボを比較し、様々な利点を確認した。特に、カメラやマニピュレータのキャリブレーション誤差に対する優れたロバスト性は、未知あるいは動的な環境中の作業において効果を発揮するものと思われる。

なお、本論文で提案したサーボ方式は様々な誤差要因に対して常に安定した挙動を示したが、安定性に関する厳密な保証は得られていない。首関節の制御を積極的に利用する方策と併せ、今後の課題としたい。

参考文献

- [1] 満田：“人間型ハンドアイシステムにおける線形ビジュアルサーボ”，大阪大学大学院基礎工学研究科修士論文，1995。
- [2] 満田，丸，宮崎：“視空間と関節空間の線形近似に基づくビジュアルサーボ”，第 12 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，no.1，pp.331-332，1994。
- [3] 神谷，久保，青柳，岡部：“繰返し順変換によるロボットの運動制御”，日本機械学会論文集（C 編），vol.59，no.564，pp.2389-2394，1993。
- [4] 大石，藤田，宮崎：“位置情報だけを用いたマニピュレータのモーションコントロール”，日本ロボット学会誌，vol.10，no.6，pp.796-802，1992。
- [5] 前田，館：“視覚性到達運動における両眼視と上肢位置感覚の統合”，計測自動制御学会論文集，vol.29，no.2，pp.201-210，1993。
- [6] 磯部，川人，鈴木：“両眼網膜座標における手の繰返し学習制御”，電子通信学会技術研究報告，MBE86-80，pp.17-24。
- [7] 笠井：“眼と手の協調動作と空間知覚”，電子情報通信学会誌，vol.76，no.22，pp.1156-1163，1993。
- [8] 宇野，川人，鈴木：“上肢運動における最適軌道の生成とその制御トルク変化最小モデル”，電子通信学会技術研究報告，MBE86-79，1987。
- [9] 加瀬，丸，西川，宮崎：“ステレオ視によるマニピュレータのビジュアルサーボ”，システム制御情報学会誌，vol.6，no.8，pp.360-367，1993。
- [10] N. Maru and H. Kase et al: “Manipulator control by visual servoing with the stereo vision,” Proceedings of the 1993

IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1865-1870, 1993.

- [11] 橋本, 海老根, 木村: “ビジュアルサーボイングー最適制御によるアプローチ”, 日本ロボット学会誌, vol.12, no.5, pp.773-778, 1994.
- [12] P.K. Allen, B. Yoshimi and A. Timucenko: “Real-time visual servoing,” Proceedings of the 1991 IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation, pp.851-856, 1991.
- [13] A.J. Koivo and N. Houshang: “Real-time vision feedback for servoing robotic manipulator with self-tuning controller,” IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, 21 (1), pp.134-142, 1991.

- [14] D.B. Westmore and W.J. Wilson: “Direct dynamic control of robot using an end-point mounted camera and Kalman filter position estimation,” Proceedings of the 1991 IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation, pp.2376-2384, 1991.
- [15] L.E. Weiss, A.C. Sanderson and C.P. Newman: “Dynamic sensor-based control of robotics with visual feedback,” IEEE J. Robotics and Automation, RA-3 (5), pp.404-417, 1991.
- [16] K. Hashimoto et al: “Manipulator control with image-based visual servo,” Proceedings of the 1991 IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation, pp.2267-2272, 1991.

満田 隆 (Takashi Mitsuda)

1971年1月23日生。1993年大阪大学基礎工学部機械工学科卒業。1995年大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程修了。同年富士通株式会社入社。現在に至る。現在はATM(自動預金支払機)の設計開発に従事。修士(工学)。(日本ロボット学会正会員)

富士川和延 (Kazunobu Fujikawa)

1973年2月19日生。1995年大阪大学基礎工学部機械工学科卒業。現在大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程在学中。ロボティクスに関する研究に従事。

丸 典明 (Noriaki Maru)

1962年12月10日生。1990年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程単位取得退学。同年財団法人京都高度技術研究所入所。1991年大阪大学基礎工学部助手。1995年和歌山大学システム工学部講師となり現在に至る。アクティブビジョンとビジュアルサーボに関する研究に従事。博士(工学)。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)

宮崎文夫 (Fumio Miyazaki)

1952年8月28日生。1979年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程中途退学。同年大阪大学基礎工学部助手。1986年同助教授。1991年同教授となり現在に至る。この間1987年~1988年米国カリフォルニア大学客員準教授。ロボットの知能化に関する研究に従事。工学博士。システム制御情報学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)