視空間誤差を用いた仮想バネダンパ仮説に基づく ダイナミックビジュアルサーボによる Eye-In-Hand 型ロボットの位置姿勢制御*

松浦 精太郎*¹, 丸 典明*²

Position and Attitude Control of Eye-In-Hand Robot by Dynamic Visual Servoing Based on Virtual Spring-Dumper Hypothesis Using Binocular Visual Space Error

Shoutaro MATSUURA*¹ and Noriaki MARU

*¹ Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University
930, Sakaedani, Wakayama, Wakayama, 640-8510, Japan

We propose position and attitude control method of Eye-In-Hand Robot by Dynamic visual servoing based on Virtual Spring-Dumper Hypothesis using Binocular Visual Space Error. We obtain the 3D position and attitude error from the binocular visual space error using Jacobian between cartesian space and binocular visual space. The proposed method is robust to calibration error of camera angles, because it does not use camera angles to calculate feedback command. Simulation results are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Dynamic Visual Servoing, Binocular Visual Space Error, Eye-In-Hand Robot, Virtual Spring-Dumper Hypothesis

1. は じ め に

近年、工場の生産ラインでは、変化しない環境中では、多くの作業がロボットにより自動化されているが、変化する環境中では自動化されていない作業が多い。ロボットが時々刻々と変化する環境の中で作業を行うためには、センサを用いて周囲環境に応じた臨機応変な行動を行う必要がある。その中で視覚センサは対象物と非接触に多くの情報を得ることが可能であり、現在、視覚センサを用いたロボットの制御に関する研究が盛んに行われている。

視覚を用いた制御方法のひとつとして、視覚センサから得られる情報から直接フィードバック入力を生成するビジュアルサーボ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾が挙げられる。ビジュアルサーボは大きく分けると位置ベース法と特徴ベース法の2種類がある。位置ベース法は、カメラから得られる対象物の位置とマニピュレータの手先位置からマニピュレータへのフィードバック入力をダイレクトに生成する手法である。特徴ベース法は、対象物と手先の特徴量の誤差からマニピュレータへのフィードバック入力を生成する手法である。しかし、どちらの手法においてもデカルト座標系を中継する上で、ロボットやカメラの多くのパラメータを必要とするため、正確な関節角とカメラキャリブレーションが必要であるという問題点があった。

満田らは、以上の問題点を解決する方法として、視空間を用いた線形ビジュアルサーボ (Linear Visual Servoing: 以後 LVS) を提案した⁽⁵⁾。このビジュアルサーボは、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ることにより、カメラ姿勢と画像上の位置により定まる視空間と関節空間との間に近似的に線形性が示されることから、逆運動学が線形式で表現でき、この関係を利用してサーボを構成することができる。このとき、従来のビジュアルサーボで必要であったカメラ角と関節角の計測が不要となり、画像座標のみでフィードバック入力を生成できるという特徴をもつ。つまり、LVS ならばカメラ角のキャリブレーションを必要とせず、能動的に力

* 原稿受付 2010 年 7 月 29 日

*¹ 和歌山大学大学院システム工学研究科 (〒 640-8510 和歌山県和歌山市栄谷 930)

*² 正員, 和歌山大学システム工学部光メカトロニクス学科 (〒 640-8510 和歌山県和歌山市栄谷 930)

Email: maru@sys.wakayama-u.ac.jp

メラを動かして環境を認識するアクティブビジョンとの併用も容易であり、多自由度のロボットをビジュアルサーボにより制御する場合に適している。だが、それらの手法は速度制御型のビジュアルサーボであり、その制御式はダイナミクスを考慮していないためダイナミクスの影響がない程度の速さしか出すことができない。ダイナミクスの影響を運動方程式を用いて補償する方法もあるが、パラメータ誤差に弱く計算量が多いなどの問題がある。

以上の問題を解決するために、阪口らは Eye-And-Hand 型ロボットにおいて視空間誤差を用いた仮想バネ・ダンパー仮説に基づくダイナミックビジュアルサーボ⁽⁶⁾を提案した。仮想バネ・ダンパー仮説⁽⁷⁾は、人間のリーチング制御における仮説として提案された作業座標サーボで、軌道計画をせずにリーチングが人間と同様のプロファイルを持つ。また、従来の計算トルク法と比べてパラメータ誤差にロバストで計算量が少ない特徴を持つ。阪口らの手法は、視空間誤差を用いて 3 次元空間での手先と目標の位置誤差を求め、そのヤコビアンを目標位置で定数化することにより、カメラ角を用いずに視差情報のみを用いてダイナミックビジュアルサーボを実現している。しかし、提案された方法では、手先姿勢の制御を行うことはできない。姿勢の制御も行うことができれば、ロボットが作業を行いやすい姿勢をとることができる。

本論文では、手先にステレオカメラを設置した Eye In Hand 型ロボットにおいて、視空間誤差を用いた仮想バネダンパ仮説に基づくダイナミックビジュアルサーボによる位置・姿勢制御法を提案する。Sekimoto らが提案した仮想バネダンパ仮説に基づくリーチング制御方法においては、視覚を用いた手先位置の制御方法も、手先姿勢の制御方法も提案されていない。視覚を用いて手先姿勢の制御を実現するためには、姿勢制御のために仮想バネダンパ仮説を拡張するとともに、視空間情報から手先の位置と姿勢の誤差を推定する必要がある。本論文の新規性は、視空間座標系における手先と目標の位置姿勢誤差をカメラ座標系における位置姿勢誤差に変換する式を導出した点と、姿勢制御のために仮想バネダンパ仮説に基づく制御式を拡張した制御式を導出した点、及びそれらを用いて視空間誤差を用いた仮想バネダンパ仮説に基づくダイナミックビジュアルサーボによる位置姿勢制御式を構築している点にある。提案手法は、カメラ角を用いないため、カメラのキャリブレーションエラーにロバストで、視差情報のみを用いたビジュアルサーボが実現できる。また、従来法と比べて計算量が少ないため、トルク制御と同様に 1[ms] 程度の周期で撮像と処理が可能な高速ビジョンを用いれば、高速なダイナミックビジュアルサーボによる位置姿勢制御が可能である。2 次元平面内で運動する 3 自由度アームを用いてシミュレーションを行い、提案手法の有効性を確認した。

2. 視空間誤差を用いた仮想バネダンパ仮説に基づくダイナミックビジュアルサーボによる Eye-In-Hand 型ロボットの位置姿勢制御

2.1 Eye In Hand 型ロボットアームモデル

本論文では、手先にカメラを取り付けた Eye In Hand 型ロボットアームを制御対象として用いる。ただし、簡略化のため、水平面内のみの運動を行う 3 自由度ロボットアームを考える。そのモデルを図 1 に示す。ロボットアームの第 1 関節を原点 o とする座標系 $o-xyz$ を作業座標系とする。関節角はそれぞれ q_1, q_2, q_3 であり、ロボットアームは $x-z$ 平面内で運動を行う。また、手先には Left Camera, Right Camera の 2 台のカメラからなるステレオカメラを設置し、ロボットアームの手先を原点 o_c 、第 3 リンクの延長線を z_c 軸とする座標系 $o_c-x_c y_c z_c$ をカメラ座標系としている。

2.2 ステレオカメラモデルと視空間座標

図 2 にステレオカメラのモデルを示す。カメラは上下左右に独立に回転可能な機構を有しており、Left Camera と Right Camera が任意の点 (Vergence Point) を注視している。このとき、左右それぞれの水平方向カメラ角を α_L, α_R 、垂直方向のカメラ角を α_D としている。ただし、カメラ角を 0 とした平行ステレオカメラを用いても問題ない。また、このときに左右のカメラ画像上に映し出される目標点 (Target Point) の位置を、それぞれカメラ画像座標 $(X^L, Y^L), (X^R, Y^R)$ とする。視空間は Target Point と Left Camera, Right Camera によってできる輻輳角 γ と水平及び垂直方向の Target Point への視線方向角 θ, δ で定める座標 $V = (\gamma, \theta, \delta)^T$ である。Left Camera, Right Camera を焦点距離 f の理想的な透視投影モデルとして考えれば、視空間座標はカメラ角とカメラ画像座標 $(X^L, Y^L), (X^R, Y^R)$ を用いて (1) のように表せる。この視空間座標は、カメラ角に依存する部分と、画像座標に依存する部分の線形和になっている。ここで、右辺第二項は、 $X^L, Y^L, X^R, Y^R \ll f$ と仮定して、 $\tan^{-1}(X^L/f) \simeq X^L/f$ などの近似を行って

Fig. 1 Robot Model

Fig. 2 Stereo Camera Model

いる．

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

また，(2) により視空間座標 $V = (\gamma, \theta, \delta)^T$ からカメラ座標系 $p_c = (x_c, y_c, z_c)$ へ変換できる．

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{E \sin(2\theta)}{\sin(\gamma)} \\ y_c &= \bar{z}_c \sin(\delta) \\ z_c &= \bar{z}_c \cos(\delta) \\ \bar{z}_c &= \frac{E \{\cos(\gamma) + \cos(2\theta)\}}{\sin(\gamma)} \end{aligned} \quad (2)$$

2.3 視空間誤差を用いた 3 次元位置・姿勢誤差の推定

図 3 に示すように，手先マーカー (Hand Marker) とターゲットマーカー (Target Marker) を 3 点ずつ設置する．ただし，手先マーカーの 3 点で構成される三角形とターゲットマーカーの 3 点で構成される三角形は合同である．Hand Marker1 は z_c 軸上にあり，Hand Marker1 とロボットアームの手先との距離を D_h とする．また，Hand Marker1 から x_c 軸方向に D_t 離れた点に Hand Marker2 を， y_c 軸方向に D_t 離れた点に Hand Marker3 をそれぞれ設置している．Target Marker1 は任意の作業空間に設置されている．Target Marker2，Target Marker3 は Target Marker1 から D_t 離れた点にあり，Target Marker3 は Target Marker2 を Target Marker1 を中心に $\pi/2[\text{rad}]$ 回転させた位置にある．本論文では，この 6 点の視空間座標を用いて，ロボットアームの手先と目標との 3 次元位置・姿勢誤差の推定を行う．

Fig. 3 Marker Model

2.3.1 視空間誤差を用いた 3 次元位置誤差の推定

(2) を時間微分することで，視空間座標系での速度とカメラ座標系での速度の関係式，

$$\dot{P}_c = R_v(V)\dot{V} \quad (3)$$

が得られる．ただし，

$$R_v(V) = \begin{pmatrix} R_{v11} & R_{v12} & R_{v13} \\ R_{v21} & R_{v22} & R_{v23} \\ R_{v31} & R_{v32} & R_{v33} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} R_{v11} &= -\frac{E \sin(2\theta)}{\sin(\gamma) \tan(\gamma)} \\ R_{v12} &= \frac{2E \cos(2\theta)}{\sin(\gamma)} \\ R_{v13} &= 0 \\ R_{v21} &= -\frac{E \sin(\delta) \{\cos(\gamma) + \cos(2\theta)\}}{\sin(\gamma) \tan(\gamma)} - E \sin(\delta) \\ R_{v22} &= -\frac{2E \sin(2\theta) \sin(\delta)}{\sin(\gamma)} \\ R_{v23} &= \frac{E \cos(\delta) \{\cos(\gamma) + \cos(2\theta)\}}{\sin(\gamma)} \\ R_{v31} &= -\frac{E \cos(\delta) \{\cos(\gamma) + \cos(2\theta)\}}{\sin(\gamma) \tan(\gamma)} - E \cos(\delta) \\ R_{v32} &= -\frac{2E \sin(2\theta) \cos(\delta)}{\sin(\gamma)} \\ R_{v33} &= \frac{E \sin(\delta) \{\cos(\gamma) + \cos(2\theta)\}}{\sin(\gamma)} \end{aligned}$$

この関係式を用いて，Hand Marker1 の視空間座標 $V_{h1} = (\gamma_{h1}, \theta_{h1}, \delta_{h1})^T$ と Target Marker1 の視空間座標 $V_{t1} = (\gamma_{t1}, \theta_{t1}, \delta_{t1})^T$ との誤差より，カメラ座標系における Hand Marker1 の位置 $p_c^{h1} = (x_{h1}, y_{h1}, z_{h1})$ と Target Marker1 の位置 $p_c^{t1} = (x_c^{t1}, y_c^{t1}, z_c^{t1})$ との誤差を推定する．

$$\Delta p_c = R_v(V_h) \Delta V \quad (4)$$

$$\Delta p_c = (p_c^{h1} - p_c^{t1}), \quad \Delta V = (V_{h1} - V_{t1})$$

さらに，Hand Marker1 とロボットアームの手先との相対的位置は変わらないので，Hand Marker1 の視空間座標 V_h は定数となる．よって，変換行列 $R_v(V_h)$ は定数行列となり，カメラ座標系における Hand Marker1 と Target Marker1 の位置誤差 $\Delta p_c = (p_c^{h1} - p_c^{t1})$ は (4) のように定数行列と Hand Marker1 と Target Marker1 の視空間誤差 $\Delta V = (V_{h1} - V_{t1})$ との積で推定できる．

Fig. 4 Attitude

2.3.2 視空間誤差を用いた 3 次元姿勢誤差の推定

図 4 に示すように, Target Marker1, Target Marker2, Target Marker3 の 3 点よりなる平面が, Hand Marker1, Hand Marker2, Hand Marker3 の 3 点よりなる平面から, それぞれ x_c 軸, y_c 軸, z_c 軸周りに $\Delta\phi, \Delta\xi, \Delta\psi$ 回転した姿勢にあるとする. このときの回転角を姿勢誤差 $\Delta p_a = (\Delta\xi, \Delta\phi, \Delta\psi)^T$ として用いる. つまり, ここでいう姿勢誤差とは, Hand Marker1, Hand Marker2, Hand Marker3 よりなる平面の姿勢と, Target Marker1, Target Marker2, Target Marker3 の 3 点よりなる平面の姿勢との差である.

姿勢誤差 Δp_a を, 視空間座標を用い, 次のように推定する. まず, カメラ座標系における Target Marker1, Target Marker2 の位置をそれぞれ $p_c^{t1} = (x_c^{t1}, y_c^{t1}, z_c^{t1})^T$, $p_c^{t2} = (x_c^{t2}, y_c^{t2}, z_c^{t2})^T$ とする. このとき, ベクトル $\Delta p_c^{t21} (= p_c^{t2} - p_c^{t1})$ を $x_c - z_c$ 平面に投影すれば, 投影されたベクトル Δp_c^{t21} と x_c 軸のなす角が, Target Marker1, Target Marker2, Target Marker3 の 3 点よりなる平面の y_c 軸周りの回転角 ξ_t である.

ここで, $x_c - z_c$ 平面に投影されたベクトル Δp_c^{t21} の x_c 成分, z_c 成分を Δx_c^{t21} , Δz_c^{t21} とし, Target Marker1, Target Marker2, Target Marker3 よりなる平面の各軸周りの回転角 ξ_t , ϕ_t , ψ_t がそれぞれ十分に小さいと仮定する. このとき, $|\Delta p_c^{t21}| \simeq D_t$, $\sin(\xi_t) \simeq \xi_t$ の近似が成り立つので,

$$\xi_t \simeq \frac{\Delta z_c^{t21}}{D_t} \quad (5)$$

となる.

さらに, Δz_c^{t21} は Target Marker1 と Target Marker2 のカメラ画像座標系における z_c 軸成分の差 ($z_c^{t2} - z_c^{t1}$) であるので, Target Marker1, Target Marker2 の視空間座標をそれぞれ V_{t1} , V_{t2} とすれば,

$$\xi_t \simeq \frac{1}{D_t} (R_{v31} R_{v32} R_{v33}) (V_{t2} - V_{t1}) \quad (6)$$

となる.

同様に, カメラ座標系における Hand Marker1, Hand Marker2 の位置をそれぞれ $p_c^{h1} = (x_c^{h1}, y_c^{h1}, z_c^{h1})^T$, $p_c^{h2} = (x_c^{h2}, y_c^{h2}, z_c^{h2})^T$ とし, その差 $\Delta p_c^{h21} (= p_c^{h2} - p_c^{h1})$ の $x_c - z_c$ 平面を基準とした y_c 軸周りの回転角 ξ_h は (7) と近似できる. ただし, Hand Marker1, Hand Marker2 の視空間座標をそれぞれ V_{h1} , V_{h2} としている.

$$\xi_h \simeq \frac{1}{D_t} (R_{v31} R_{v32} R_{v33}) (V_{h2} - V_{h1}) \quad (7)$$

以上より, y_c 軸周りの姿勢誤差 $\Delta\xi$ は,

$$\Delta\xi = \xi_h - \xi_t \quad (8)$$

$$\simeq \frac{1}{D_t} (R_{v31} R_{v32} R_{v33}) (V_{h2} - V_{h1} - (V_{t2} - V_{t1})) \quad (9)$$

Fig. 5 Attitude Angle

と推定できる．

x_c 軸, z_c 軸周りの姿勢誤差 $\Delta\phi$, $\Delta\psi$ についても同様に求めれば, 姿勢誤差 Δp_a は Target Marker1, Target Marker2, Target Marker3 の視空間座標 V_{t1} , V_{t2} , V_{t3} , Hand Marker1, Hand Marker2, Hand Marker3 の視空間座標 V_{h1} , V_{h2} , V_{h3} を用い,

$$\Delta p_a = \frac{1}{D_t} R'_v(V_h) \Delta V' \quad (10)$$

$$R'_v(V_h) = \begin{pmatrix} R_{v31} & R_{v32} & R_{v33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{v31} & R_{v32} & R_{v33} \\ 0 & 0 & 0 & R_{v11} & R_{v12} & R_{v13} \end{pmatrix}$$

$$\Delta V' = \begin{pmatrix} \gamma_{h2} - \gamma_{h1} - (\gamma_{t2} - \gamma_{t1}) \\ \theta_{h2} - \theta_{h1} - (\theta_{t2} - \theta_{t1}) \\ \delta_{h2} - \delta_{h1} - (\delta_{t2} - \delta_{t1}) \\ \gamma_{h3} - \gamma_{h1} - (\gamma_{t3} - \gamma_{t1}) \\ \theta_{h3} - \theta_{h1} - (\theta_{t3} - \theta_{t1}) \\ \delta_{h3} - \delta_{h1} - (\delta_{t3} - \delta_{t1}) \end{pmatrix}$$

と推定できる．ここで, V_h を定数とするので, R'_v も R_v 同様に, 定数行列となる．ただし, $-\pi/2 < \Delta\xi < \pi/2$, $-\pi/2 < \Delta\phi < \pi/2$, $-\pi/2 < \Delta\psi < \pi/2$ である．

2.4 視空間誤差を用いた仮想バネ・ダンパー仮説に基づくダイナミックビジュアルサーボ

2.4.1 仮想バネ・ダンパー仮説による制御式

本研究では, 有本らによって提案されている, 仮想バネ・ダンパー仮説と呼ばれるトルク制御型の制御法を用いる⁽⁷⁾．仮想バネ・ダンパー仮説は, 作業空間における PD フィードバック制御を基としたシンプルな制御法であるが, ロボットアームを高速で動作させた場合でも, 遠心力やコリオリ力などの影響を受けにくく, 手先軌道の直線性が高いことが利点として挙げられる．(11) に, 仮想バネ・ダンパー仮説の制御式を示す．

$$u = -C\dot{q} - \zeta'_1 J^T(q) J(q) \dot{q} - J^T(q) k(t) \Delta p \quad (11)$$

u はロボットアームの関節トルク, q , $\dot{q}$ はそれぞれ, ロボットアームの関節角と関節角速度である．また, $J(q)$ は手先位置 p の関節角 q によるヤコビ行列, Δp は手先位置 p と目標位置 p_d との差 $(p - p_d)$ を表している．ここに, C は関節ダンピング係数行列, ζ'_1 は手先ダンピング係数行列, $k(t)$ は時変のバネ定数を示している．

Fig. 6 Simulation Model

2.4.2 位置・姿勢制御のための仮想バネ・ダンパー仮説

いま, 手先に力 F とトルク N が生じるとし, そのときに発揮されている関節トルクを τ' とすれば, 次の関係式が成立する.

$$\tau' = J'^T(q) \begin{pmatrix} F \\ N \end{pmatrix} \quad (12)$$

$J'(q)$ は手先位置 p ・手先姿勢 p_a の関節角 q によるヤコビ行列である.

N を $F = -k(t)\Delta p$ のように, 手先姿勢 p_a と目標姿勢 p_{ad} との差 $(p_a - p_{ad})$ に比例したトルクとすれば, (12) を用いることで, 仮想バネ・ダンパー仮説を, 位置・姿勢制御のための仮想バネ・ダンパー仮説 (13) のように拡張できる.

$$u = -C\dot{q} - \zeta_1' J'^T(q) J(q) \dot{q} - J'^T(q) \begin{pmatrix} k(t)\Delta p \\ N \end{pmatrix} \quad (13)$$

2.4.3 視空間誤差を用いた仮想バネダンパ仮説に基づくダイナミックビジュアルサーボによる位置姿勢制御

作業座標系における手先と目標との位置誤差 Δp_c と姿勢誤差 Δp_a を (4), (10) を用い取得することで, (13) を位置・姿勢を決めるためのビジュアルサーボの制御式 (14) とすることができる.

$$\begin{aligned} u &= -C\dot{q} - \zeta_1' J'^T(q) J(q) \dot{q} - J'^T(q) \begin{pmatrix} k(t)\Delta p \\ N \end{pmatrix} \\ &= -C\dot{q} - \zeta_1' J'^T(q) J(q) \dot{q} - J'^T(q) \begin{pmatrix} k(t)R_c(q)R_v(V_h)\Delta V \\ k'(t)\frac{1}{D_t}R_v'(V_h)\Delta V' \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

ここに, $R_c(q)$ はカメラ座標系とロボット座標系の回転行列を示している. また, $R_v(V_h), R_v'(V_h)$ は定数行列で, $\Delta V, \Delta V'$ にはカメラ角が含まれないため, 視差情報のみを用いたビジュアルサーボである. つまり, カメラ角誤差にロバストで計算量の少ないダイナミックビジュアルサーボにより, 位置姿勢制御が可能であることがわかる.

3. シミュレーション

3.1 モデル

本論文では, $x-z$ 平面上を運動する 3 リンクロボットアームで動作を検証した. よって, 手先マーカー, ターゲットマーカーの姿勢誤差は 1 自由度のみであるので, それぞれのマーカーは 2 点ずつ設置した. ダイナミクスシミュレーションのサンプリング周期は $1[ms]$, 画像のサンプリング周期は $5[ms]$ である. 図 6 にシミュレーションに用いるロボットアームのモデルを示す. シミュレーションでは, $D_h = 300[mm]$, $D_t = 50[mm]$, 左右のカメラ間距離 $2E = 60[mm]$ とした. また, ロボットアームの各パラメータを表 1 を示す.

Table 1 Parameters of the Model

Link Length[mm]	$L_1 = 450, L_2 = 450, L_3 = 100$
COG Length[mm]	$L_{g1} = 225, L_{g2} = 255, L_{g3} = 50$
Link Mass[kg]	$m_1 = 4.5, m_2 = 4.5, m_3 = 1$
Inertia Moment[kgm ²]	$I_1 = 0.85, I_2 = 0.85, I_3 = 0.0083$

Fig. 7 Trajectory of the Hand

3.2 シミュレーション結果

図7, 図8は, 手先のマーカー1の初期位置 $(X, Y) = (0.6, 0, 8)$, マーカー2の初期位置 $(X, Y) = (0.65, 0, 8)$, 目標のマーカー1の位置 $(X, Y) = (0.4, 0, 9)$, マーカー2の位置 $(X, Y) = (0.45, 0, 9)$, $k = 5000, k' = 1000$ として, 位置と姿勢の制御を行った場合の手先マーカー Hand Marker1, Hand Marker2 の軌跡と, 各関節角度を示したものである. 図よりわかるように, 推定誤差により多少軌道が湾曲するが, $0.7[sec]$ 程度で目標の位置と姿勢に制御できており, 高速な位置姿勢制御が実現できていることがわかる. また, 関節 q_3 が途中で逆方向に振られていることがわかる. これは, 姿勢の制御のゲインよりも位置の制御のゲインを大きく取っているため, 最初は位置制御のトルクにより姿勢によっては関節角が逆方向に振られていると考えられる. しかし, 目標に近づくにつれて位置制御よりも姿勢制御のトルクが相対的に大きくなるため目標に収束していると考えられる.

また, 図9, 図10は, 手先のマーカー1の初期位置 $(X, Y) = (0.6, 0, 8)$, マーカー2の初期位置 $(X, Y) = (0.65, 0, 8)$, 目標のマーカー1の位置 $(X, Y) = (0.4, 0, 9)$, マーカー2の位置 $(X, Y) = (0.44, 0, 9.25)$, $k = 5000, k' = 1000$ として, 位置と姿勢の制御を行った場合の手先マーカー Hand Marker1, Hand Marker2 の軌跡と, 各関節角度を示したものである. 図よりわかるように, 目標の姿勢が変わった場合でも $0.7[sec]$ 程度で目標の位置と姿勢に制御できており, 高速な位置姿勢制御が実現できていることがわかる.

また, 図11, 図12は, 手先のマーカー1の初期位置 $(X, Y) = (0.5, 0, 8)$, マーカー2の初期位置 $(X, Y) = (0.54, 0, 8.3)$, 目標のマーカー1の位置 $(X, Y) = (0.4, 0, 9)$, マーカー2の位置 $(X, Y) = (0.44, 0, 9.25)$, $k = 5000, k' = 1000$ として, 位置と姿勢の制御を行った場合の手先マーカー Hand Marker1, Hand Marker2 の軌跡と, 各関節角度を示したものである. 図よりわかるように, ロボットの初期姿勢が変わった場合でも $0.7[sec]$ 程度で目標の位置と姿勢に制御できており, 高速な位置姿勢制御が実現できていることがわかる.

4. お わ り に

本論文では, 視空間誤差を用いた仮想バネダンパ仮説に基づくダイナミックビジュアルサーボによる Eye-In-Hand 型ロボットの位置・姿勢制御法を提案した. まず, 視空間座標系における手先と目標の位置姿勢誤差をカメラ座

Fig. 8 Trajectories of Joint angles

Fig. 9 Trajectory of the Hand

Fig. 10 Trajectories of Joint angles

標系における誤差に変換する式を導出し，その式と姿勢制御のために拡張した仮想バネダンパ仮説に基づく制御式を用いて，視空間誤差を用いたダイナミックビジュアルサーボを構築した．また，2次元平面内で運動する3自由度アームを用いてシミュレーションを行い，提案手法の有効性を確認した．提案手法は，カメラ角を用いないため，カメラのキャリブレーションエラーにロバストで，視差情報のみを用いたビジュアルサーボが実現できる．また，従来法と比べて計算量が少ないため，トルク制御と同様に1[ms]程度の周期で撮像と処理が可能な高速ビジョンを用いれば，高速なダイナミックビジュアルサーボによる位置姿勢制御が可能である．今後は，3次元空間でのシミュレーションと共に，高速ビジョンを用いた実験により有効性を確認する予定である．

Fig. 11 Trajectory of the Hand

Fig. 12 Trajectories of Joint angles

文 献

- (1) P.K Allen, B. Yoshimi and A. Timucenko “ Real-time visual servoing ”, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation, (1991), pp.851-856.
- (2) A.J Koivo, and N. Houshangi “ Real-time vision feedback for servoing robotic manipulator with self-tuning controller ”, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 21(1) (1991), pp.134-142.
- (3) L. E. Weiss, A. C. Sanderson and C. P. Neuman “ Dynamic Sensor-Based Control of Robots with Visual Feedback ”, IEEE Trans. on Robotics And Automation, RA-3(5) (1987), pp.404-417.
- (4) W. Jang and Z. Bein “ Feature-Based Visual Servoing of an Eye-In-Hand Robots with Improved Tracking Performance ”, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation, (1991), pp.2254-2260 .
- (5) 満田隆, 丸典明, 富士川和延, 宮崎文夫, “ 逆運動学の線形近似に基づくビジュアルサーボ ”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.5 (1996), pp.743-750 .
- (6) 阪口博俊, 丸典明, “ 視空間を用いたトルク制御型ビジュアルサーボによるアームの高速リーチング制御 ”, 日本機械学会関西支部定時総会講演会講演論文集, (2009), 13-28 .
- (7) 関本昌紘, 有本卓, 衣川潤, 小澤隆太, “ 仮想バネ・ダンパー仮説に基づいた冗長多関節ロボットアームによる到達運動実験 ”, 第 6 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, (2005), pp.685-686 .