Eye-Vergence に基づくビジュアルサーボシステム

○田 宏志 侯 森 見浪 護 于 福佳 前田 耕市 矢納 陽 (岡山大学)

Visual Servoing System based on Eye-Vergence

*Tian Hongzhi, Hou Sen, Minami Mamoru, Yu Fujia, Maeda, Koichi and Yanou Akira (Okayama University)

Abstract– Towards moving target visual servoing with hand-eye cameras fixed at the hand is inevitably affected by hand dynamical oscillations, therefore it's difficult to make target's position always at the center of camera's view, because nonlinear dynamical effects of whole manipulator stand against tracking ability. One proposal to solve the problem is that the visual servoing controllers of the hand and eye-vergence are separated independently by decoupling each other, so that the camera can rotate to observe the target object better. The track ability of the eye-vergence motion is superior to the one of hand since the eyes' motion can be quicker than the hand's motion because of the eyes' light mass. In this report the merit of eye-vergence visual servoing for tracking have been confirmed on condition of full six degree-of-freedom(DOF) pose being estimated in real time.

Key Words: Visual Servoing, Eye-vergence, 1-step genetic algorithm(GA), Object tracking

1 緒言

ロボットビジョンの分野では、最近ビジュアルサー ボと呼ばれる制御方法が注目されている^{1,2,3,4)}.ビ ジュアルサーボとは、視覚センサから得られる視覚情 報をフィードバックループに組み込むことでロボットの 動作を制御する方法であり、常に変化する環境や未知 の環境で働くロボットへの適応が期待されている.具 体的な手法は:位置ベース制御 5), イメージベース制御 ^{6,7)}とハイブリッド視覚サーボイング^{8,9)}の3つに大 別される.本報告では位置ベース制御をビジュアルサー ボの手法として利用する. ビジュアルサーボの認識能 力を向上させるために, ステレオカメラを使用する方 法¹³⁾と複数のカメラを使用する方法¹⁴⁾,または二台 のカメラのうち,一台のカメラを手先に固定し,もう 一台を動かす方法¹⁵⁾が提案されている.しかし,これ らの方法はカメラの数を増やすことで視角も増加する が、変化する環境に適応することが難しい. Fig.1 に示 すように,人が動く目標を追従し続ける場合,対象物 の移動速度が遅い時は、目標を追従できるが、移動速 度が速くて人の顔を目標に向けることができない場合 は、目だけで目標を注視することができる.これは目 の質量と慣性モーメントが小さいからである. そこで この特徴で利用した, Eve-Vergence システムを提案し た¹⁶⁾.

Eye-Vergence システムは運動学と動力学についての 利点がある.まず,運動学についての利点を説明する. カメラがハンドに固定されている固定ハンドアイシス テムは、いくつかの欠点を持つ.例えば、対象物がカ メラに近いとき対象物を認識できないこと (Fig.2 (a))、



Fig. 1: People watching a moving object



Fig. 2: Disadvantage of Fixed Camera System



Fig. 3: Advantage of Eye-vergence System また二つのカメラの可視領域が狭いこと (Fig.2 (b)), さらに可視領域内の対象物であっても Fig.2(c) に示す ようにカメラ画像視野の中心に写像されることはない. このことは、レンズ周辺部で大きくなるレンズのひず みの影響を受けやすいという問題を生む.以上より固 定ハンドアイシステムは位置/姿勢計測が不正確にな る場合や、不可能になる場合があるという本質的な問 題を持っていることがわかる. ここで上述の問題を解 決するため、本論文では画像の中心で対象物を捉える ためにカメラ自身の姿勢を変化させる自由度を与える. カメラの姿勢を変えることが可能になるので、Fig.3の (a)-(c) に示すように、対象物をよりよく観測すること ができる. Fig.3 の (a)-(c) は Fig.2 の問題点 (a)-(c) に 対応した Eve-Vergence システムの利点を示している. (a), (b) は両眼可視領域が拡大すること, (c) はレンズ の中心で対象物を観測することによってレンズ収差に より発生する入力画像のひずみを避けられることを示 している.最近の研究では、対象物を認識して一定の 距離で追従する研究が多い^{17,18)}.しかし、ビジュア ルサーボの目的は手先を対象物に近づけて掴むなどの 動作をすることである.この時、手先と対象物の間の 関係は時変である. Fig. 3 に示すような Eye-Vergence



Fig. 4: Dynamical Advantage of Eye-Vergence System システムでは、カメラがいつでも最適な角度で対象物 を注視し続けることができる.

Eve-Vergence システムの動力学的な利点はカメラが 移動する対象物を注視できることである。ビジュアル サーボの応用では, 安定な閉ループシステムで安定な サーボ動作を保つ必要がある. Fig.4(a) は、カメラが 対象物を捉え続けることができる状態を示す.(b)に示 すロボットのカメラはハンドに固定されており,対象 物が速く動くと、追いつかれることができないとき対 象物はカメラの視界から消失し、制御系は暴走すると いう危険な状態に陥る.よって、ビジュアルサーボシ ステムにおいては、カメラが動く対象物をカメラ視野 内にとらえつづける能力である可追跡性を高めること が非常に重要である.また、カメラの質量と慣性モー メントがマニピュレータ全体より小さいので、固定ハ ンドアイシステムより Eye-Vergence システムの方が対 象物を追従しやすい. Fig. 4(c) に示すように, 動物が 対象物を追従するのと同じ原理で,カメラ視線制御を ハンド制御に追加することで、対象物を追跡する能力 を高める.

従来の研究¹⁶⁾では、対象物の位置/姿勢が既知の場 合、位置/姿勢を時変にして、ハンドと対象物の関係か ら Eye-Vergence システムの効果を確認した.しかし、 上に説明した運動学と動力学の利点を実験で確認して いない.本論文では、提案した Eye-Vergence システム の利点を確認するために、対象物の追従実験を行った. また、実験の結果から Eye-vergence システムにおける 運動学と動力学の利点を確認した.さらに周波数の変 化を分析して、提案した Eye-Vergence システムが高い 安定性と可追従性を持つことを示す.

2 ハンドアイビジュアルサーボ

2.1 目標軌道生成

Fig.5 にハンドと対象物の関係を示す.世界座標系を Σ_W ,対象物の座標系を Σ_M と記述する.さらに,実際のハンドの座標系とその目標座標系をそれぞれ Σ_E , Σ_{Ed} で表すこととする.ハンドの目標状態と対象物との相対的な位置/姿勢関係は $^{Ed}T_M$ によって表し,実際のハンドと対象物との関係は $^{E}T_M$ によって表す.この とき, Σ_E と Σ_{Ed} との差は $^{E}T_{Ed}$ として表され, $^{E}T_{Ed}$ は以下のように記述できる.

$${}^{E}\boldsymbol{T}_{Ed}(t) = {}^{E}\boldsymbol{T}_{M}(t){}^{Ed}\boldsymbol{T}_{M}^{-1}(t)$$
(1)



Fig. 5: Motion of the end-effector and object 式 (1) は任意の対象物の運動 ${}^{W}T_{M}(t) =$ ${}^{(W}T_{E}(t)^{E}T_{M}(t))$ と任意の時変ビジュアルサー ボの目標運動 ${}^{Ed}T_{M}(t)$ を含む. ${}^{E}T_{M}(t)$ は 1-step GA^{13, 19)} とオンラインモデルベースド認識法を使って 観測される. 推定された対象物を $\Sigma_{\hat{M}}$ で表すと,実際 の物体 Σ_{M} と検出された物体 $\Sigma_{\hat{M}}$ の間には,誤差が 存在することが一般的である. ここでは,式(1) で表 されるハンドの位置/姿勢誤差 ${}^{E}T_{Ed}(t)$ を次のように 推定した物体 $\Sigma_{\hat{M}}$ に基づいて再構成する.

$${}^{E}\boldsymbol{T}_{Ed}(t) = {}^{E}\boldsymbol{T}_{\hat{M}}(t)^{\hat{M}}\boldsymbol{T}_{Ed}(t)$$
(2)

式(2)を時間に関して微分すると以下の式を得る.

$${}^{E}\dot{T}_{Ed}(t) = {}^{E}\dot{T}_{\hat{M}}(t)^{\hat{M}}T_{Ed}(t) + {}^{E}T_{\hat{M}}(t)^{\hat{M}}\dot{T}_{Ed}(t).$$
(3)

時間に関してもう一回微分すると以下の式を得る.

$${}^{E}\ddot{\boldsymbol{T}}_{Ed}(t) = {}^{E}\ddot{\boldsymbol{T}}_{\hat{M}}(t)^{\hat{M}}\boldsymbol{T}_{Ed}(t) + 2{}^{E}\dot{\boldsymbol{T}}_{\hat{M}}(t)^{\hat{M}}\dot{\boldsymbol{T}}_{Ed}(t) + {}^{E}\boldsymbol{T}_{\hat{M}}(t)^{\hat{M}}\ddot{\boldsymbol{T}}_{Ed}(t), \quad (4)$$

ここで^{\hat{M}}**T**_{Ed}, ${}^{\hat{M}}$ **T**_{Ed} はビジュアルサーボの目 標軌道としてあらかじめ与えられ, E **T**_{\hat{M}}, E **T**_{\hat{M}}, E **T**_{\hat{M}}, E **T**_{\hat{M}}, E **T**_{\hat{M}} はカメラによって観測される. Fig.5 に示すように, ビ ジュアルサーボ過程において0 にすべき二つの誤差が 存在する. 一つは実際の物体と検出された物体 M **T**_{\hat{M}} の誤差である.

もう一つはハンドの目標状態と実際のハンド ${}^{E}T_{Ed}$ の誤差である.著者らの研究では、ある仮定のもとで ${}^{M}T_{\hat{M}}$ の誤差は 1-step GA オンライン認識法 19,20 , MFF 補償法 13 と Eye-Vergence システムによって 0 に収束することをリアプノフ法により確認し実験でも 確認している 21). ${}^{E}T_{Ed}$ の誤差はハンドビジュアルサー ボコントロールによって減少することも実験により確認している.

2.2 1-step GA オンライン認識法

対象物の位置/姿勢をリアルタイムで認識するために, 本研究では遺伝的アルゴリズム (GA) の一つの方法と して 1-step GA 法¹⁹⁾を利用する.この方法は GA の 進化を操作する時,毎回カメラから新しい画像を入力 する.モデルと新しい入力画像の相関関数を適合度と し,最適解を GA で探索し,それをリアルタイムの認 識結果として利用する.

しかし、モデルの探索範囲は3次元空間内で、位置 と姿勢を合わせて6個のパラメータがあるため、探索



Fig. 6: Hand & Eye-vergence Visual Servoing System 時間が増し,認識結果が悪くなる.提案した MFF 認 識法¹³⁾はマニピュレータの手先の移動から対象物の移 動を予測できる.本論文ではこの方法を利用して,カ メラが高速で移動する対象物を追従できるようにして いる.

2.3 ビジュアルサーボコントローラ

2.3.1 ハンドビジュアルサーボコントローラ

提案したハンドアイビジュアルサーボのコントロー ラはハンドとアイ二つのコントローラを組み合わせて、 ブロック線図を Fig.6 に示す. ハンドビジュアルサーボ は外側のループであり、ブロック線図を Fig.7 に示す. 前節で議論したロボット手先の運動軌道を用いて、手 先の目標速度 $^{W}\dot{r}_{d}$ は、

$${}^{W}\dot{\boldsymbol{r}}_{d} = \boldsymbol{K}_{P_{p}}{}^{W}\boldsymbol{r}_{E,Ed} + \boldsymbol{K}_{V_{p}}{}^{W}\dot{\boldsymbol{r}}_{E,Ed}, \qquad (5)$$

のように PD 制御を行う. ここでは、 ${}^{W} \boldsymbol{r}_{E,Ed}, {}^{W} \dot{\boldsymbol{r}}_{E,Ed}$ は Σ_{E} から Σ_{W} への座標変換を使って ${}^{E}\boldsymbol{T}_{Ed}$ と ${}^{E}\boldsymbol{T}_{Ed}$ から求められる. $\boldsymbol{K}_{P_{p}}$ はバネ定数, $\boldsymbol{K}_{V_{p}}$ は粘性抵抗 を表す行のである. ハンドの目標位置/姿勢は ${}^{W}\boldsymbol{\psi}_{d}^{T} =$ $[{}^{W}\boldsymbol{r}_{d}^{T}, {}^{W}\boldsymbol{\epsilon}_{d}^{T}]^{T}$ とする. ハンドの手先の目標角速度ベク トル ${}^{W}\boldsymbol{\omega}_{d}$ は

$${}^{W}\boldsymbol{\omega}_{d} = \boldsymbol{K}_{P_{o}}{}^{W}\boldsymbol{r}_{E}{}^{E}\Delta\boldsymbol{\epsilon} + \boldsymbol{K}_{V_{o}}{}^{W}\boldsymbol{\omega}_{E,Ed}, \qquad (6)$$

と与えられる.ここで、 ${}^{E}\Delta\epsilon$ はクォータニオンの偏差 ¹⁹⁾であり、 Σ_{E} で表された対象物の姿勢誤差であり、 1-step GA による認識結果から直接得られる. ${}^{W}\omega_{E,Ed}$ は Σ_{E} から Σ_{W} への座標変換を使って ${}^{E}T_{Ed}$ から求めら れる. $K_{P_{o}}$ はバネ定数、 $K_{V_{o}}$ は粘性抵抗を表す行列で ある.ハンドの目標位置/姿勢は ${}^{W}\psi_{d}^{T} = [{}^{W}r_{d}^{T}, {}^{W}\epsilon_{d}^{T}]^{T}$ とする.

本研究で使用しているアーム型ロボット PA-10(三菱 重工製) は一つの冗長自由度を持っている.システムの 不安定さを改善するため,第1リンクの角度 q_1 を 0 と することで,手先の目標位置から各リンクの目標角度 を逆運動学により計算できる.本論文ではこの方法を 利用することで,冗長性の問題を解決している.ロボッ トの目標関節角度 q_d と角速度 \dot{q}_d は

$$\boldsymbol{q}_d = \boldsymbol{f}^{-1}(^W \boldsymbol{\psi}_d^T) \tag{7}$$

$$\dot{\boldsymbol{q}}_{d} = \boldsymbol{K}_{p_{a}}(\boldsymbol{q}_{d} - \boldsymbol{q}) + \boldsymbol{J}^{+}(\boldsymbol{q}) \begin{bmatrix} W \dot{\boldsymbol{r}}_{d} \\ W \boldsymbol{\omega}_{d} \end{bmatrix}$$
(8)

と求められる.ここで、 $f^{-1}({}^{W}\psi_{d}^{T})$ は逆運動学を表し、 $K_{p_{a}}$ はバネ定数として与えられる. $J^{+}(q)$ はJ(q)の擬 似逆行列であり、 $J^{+}(q) = J^{T}(JJ^{T})^{-1}$ によって得ら



Fig. 7: Block diagram of the hand visual servoing system



Fig. 8: Calculation of tilt and pan angles れる. また,ロボットへの入力トルクは次式によって与 えれらる.

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{K}_{SP}(\boldsymbol{q}_d - \boldsymbol{q}) + \boldsymbol{K}_{SD}(\dot{\boldsymbol{q}}_d - \dot{\boldsymbol{q}})$$
(9)

上式の **K**_{SP} はバネ定数, **K**_{SD} は粘性抵抗を表す行列 である.

2.3.2 Eye-Vergence ビジュアルサーボコントローラ

Eye-Vergence ビジュアルサーボは Fig.6 のビジュア ルサーボシステムの内側のループである.本論文では Eye-Vergence ビジュアルサーボに対して二つのパンチ ルトカメラを使う.カメラは手先に取り付けられてお り,回転することができる. q_8 は左右カメラ共通のチ ルト角を表し, $q_9 \ge q_{10}$ はパン角を表す. さらに q_8 は 両方のカメラで共通である. Fig.8 に示すように, ${}^{E}x_{\hat{M}}$, ${}^{E}y_{\hat{M}}$ および ${}^{E}z_{\hat{M}}$ はハンド座標において検出された物 体の位置を表す.また,カメラジョイントの望ましい 角度は以下によって計算される.

$$q_{8d} = atan2({}^{E}y_{\hat{M}}, {}^{E}z_{\hat{M}}) \tag{10}$$

$$q_{9d} = atan2(l_{8R} - {}^{E}x_{\hat{M}}, {}^{E}z_{\hat{M}})$$
(11)

$$a_{10d} = atan2(l_{8L} + {}^{E}x_{\hat{\mathcal{M}}}, {}^{E}z_{\hat{\mathcal{M}}})$$
(12)

ここで, $l_{8L} = l_{8R} = 120[mm]$ はカメラの位置を表し, カメラの中心線を各カメラ座標の z 軸とする.カメラ から探索した対象物の位置は右カメラ座標系に ${}^{R}x_{\hat{M}}$, ${}^{R}y_{\hat{M}}$ および ${}^{R}z_{\hat{M}}$ と定義する. ${}^{R}x_{\hat{M}} = 0$, ${}^{R}y_{\hat{M}} = 0$ の時,右カメラが対象物を捉えることができる.

Eye-Vergence ビジュアルサーボコントローラは

$$\dot{q}_8 = K_P(q_{8d} - q_8) + K_D(\dot{q}_{8d} - \dot{q}_8)$$
 (13)

$$\dot{q}_9 = K_P(q_{9d} - q_9) + K_D(\dot{q}_{9d} - \dot{q}_9)$$
 (14)

$$\dot{q}_{10} = K_P(q_{10d} - q_{10}) + K_D(\dot{q}_{10d} - \dot{q}_{10})$$
 (15)



Fig. 9: Frame structure of manipulator



Fig. 10: 3D marker

と与えられる. ここでトル K_P はバネ定数, K_D は粘 性抵抗を表す.

3 ハンドアイビジュアルサーボ実験

3.1 実験環境

提案したビジュアルサーボシステムの有効性を実機 によって確認するために、アーム型ロボット PA-10(三 菱重工製) を利用する. PA-10の手先には SONY 製の ステレオカメラ (ビデオレート 30[fps]) を二台取り付 け,複眼で対象物を観測する.本研究は、カメラとして CCD-TRV86(撮影素子:1/6インチ CCD,焦点距離:f = 3.6[mm],視野角: α = 38[deg])を使用する.画像認識お よび PA-10の制御を行う PC には、DELLOptiplex(OS: windows2000. CPU: Pentium4, 2GHz)を使用してお り、画像入力ボードは PCI5520を用いている.マニピュ レータとカメラの構造は Fig.9(a) と (b) に示す.

対象物は赤,緑,青のボールを組み合わせた 3D マー カであり,ボールの直径は 40[mm],ボールの中心と マーカの中心点の距離は 100[mm] であり, Fig.10 に 示す.実験における対象物とマニピュレータの座標を Fig.11 に示す.白い矢印は対象物の移動方向を示す.

3.2 実験条件

ハンドの初期姿勢を Σ_{E_0} とする.一方,物体の初期 位置は Σ_{M_0} として定義する. Σ_W から Σ_{E_0} への同次 変換行列, Σ_W から Σ_{M_0} への同次変換行列は以下のよ うに与えられる.

$${}^{W}\boldsymbol{T}_{E_{0}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -690[mm] \\ 1 & 0 & 0 & -150[mm] \\ 0 & -1 & 0 & 485[mm] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(16)

$${}^{W}\boldsymbol{T}_{M_{0}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -1235[mm] \\ 1 & 0 & 0 & -150[mm] \\ 0 & -1 & 0 & 585[mm] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(17)



Fig. 11: Object and the visual-servoing system $\sum_{x \in Gazing point}$



Fig. 12: Cameras' and End Effector's gazing point 3D マーカの運動は次式で与えるものとする.

$${}^{W}\boldsymbol{T}_{M} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -1235[mm] \\ 1 & 0 & 0 & -150\cos(\omega t)[mm] \\ 0 & -1 & 0 & 585[mm] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(18)

対象物と手先の関係は

$$^{Ed}\boldsymbol{\psi}_{M} = [0, -100[mm], 545[mm], 0, 0, 0]$$
 (19)

と与えている.

3.3 Gazing point の定義

カメラの観測能力を調べるため、カメラの注視点を規 定する. Fig.12に示す左右カメラの視線方向が交わる点 をカメラの注視点とし、これを Gazing point と呼ぶ. 1step GA による対象物の認識結果をもとに Gazing point を算出しているため、認識誤差が Gazing point に含ま れる. Fig.13 のように左右カメラのパン角回りの回転 を q_{9_d}, q_{10_d} とおく. ただし $0 < q_{9_d} < \frac{\pi}{2}, 0 < q_{10_d} < \frac{\pi}{2}$ とする.

$$\frac{z}{x} = tan(\frac{\pi}{2} - q_{10_d})$$
(20)

$$\frac{z}{240-x} = tan(\frac{\pi}{2} - q_{9_d}) \tag{21}$$

となる.この2式を連立して,x,zを求める.これらの 結果より左カメラ座標系から見た Gazing point^LP は,

$${}^{L}P = \begin{bmatrix} \frac{240tan(\frac{\pi}{2} - q_{9_{d}})}{tan(\frac{\pi}{2} - q_{10_{d}}) + tan(\frac{\pi}{2} - q_{9_{d}})} \\ 0 \\ \frac{240tan(\frac{\pi}{2} - q_{10_{d}})tan(\frac{\pi}{2} - q_{9_{d}})}{tan(\frac{\pi}{2} - q_{10_{d}}) + tan(\frac{\pi}{2} - q_{9_{d}})} \end{bmatrix}$$
(22)

となり、これに世界座標系から左カメラまでの同次変 換行列をかけることにより世界座標系からみた Gaing point が求まる.



Fig. 13: Calculation cameras' gazing point



Fig. 14: Hand eye system and object position **3.4** 実験結果

Fig. 14 は位置姿勢の 6 変数を認識させる条件の下, 対象物の運動周期 T = 20[s] の場合の追従結果のデータ として手先と対象物の位置関係を示している. 白い矢 印はカメラの視線を示す. (b) の時,手先はちょうど対 象物の前にある. (a) と (c) の時,対象物の移動速度が 速いため,手先は対象物を追従できていない. 固定カメ ラシステムの場合,追従状態と手先の追従状態は同じ であるため,図中の End effector が示す線はそれらの 追従運動を表している. この時図より手先と対象物の 距離がカメラの注視点と対象物の距離より明 らかに遠いことが分かる. 一方,Gazing Point(注視点) と対象物の距離から Eye-vergence システムは対象物を 追従しやすいことがわかる. 以上より,Eye-Vergence システムは固定カメラシステムより良い追跡性がある ことがわかる.

カメラから対象物位置/姿勢を認識した場合の実験結 果をFig.15に示す.即ち、すべての位置姿勢の変数が正 しく認識されたとして、 $\omega=0.314(0.1\pi)$, 0.628(0.2\pi) と 1.256(0.4π) の時の Eye-Vergence システムと固定シス テムカメラ注視点の結果を Fig.15(a), (b) 及び (c) に示 す. 各実験は60[s]行い, さらにゲイン曲線と位相曲線を トル (d) と (e) に示す. ここで、固定カメラシステムの場合、 $A = {}^{M_0}x_{M(t)}$ で、 $B = {}^{M_0}x_{E(t)}$ である.また、Eye-Vergence システムの場合、 $A = {}^{M_0}x_{M(t)}$ 、 $B = {}^{M_0}x_{\hat{M}(t)}$ である. 両図において, 横軸は周波数 f の対数目盛り としている. (a)-(e) の図中 End effector と記した曲線 は固定カメラシステムの手先追従能力を表し, Gazing point と指示している曲線は Eye-Vergence システムの 追従能力を表している. Fig.15 (d) において, ハンドの 振幅はカメラの注視点よりも小さい. f = 0.05[Hz]ま では、ハンドとカメラの可追跡性はほぼ等しいだ.一方、 Eye-Vergence システムにおいては、ゲインがほぼ 0[dB] であることから f = 0.2[Hz] までの範囲ではカメラの

視界に物体を常に捉えつづけることができる.Fig.15, Fig.16に対象物と手先とGazing Point(注視点)の時間 応答波形を示す.これらの図より,Eye-Vergenceシス テムは固定カメラシステムに比べて,振幅の差と位相 の遅れが両方とも小さいことが分かる.また,Fig.17, Fig.18とFig.19から,目標物体は手先座標系のx軸の みに倒立振子という運動を行うけれども,図中のEnd effectorが示す線に示すようにx,y,z軸の三つの方向 にカメラで物体を認識し、マニピュレータを制御して,物体を追従している.

よって、Eye-Vergence システムは固定カメラシステムよりも優れた安定性を有し、良い追跡性を有することが分かる.

4 結言

本研究では、逆運動学を利用して、各関節の目標角度 を計算した.また、新しいコントローラを作り、関節角 度を目標角度に追従するようにした.提案したビジュア ルサーボシステムの有効性を確認するために、移動対 象物のビジュアルサーボ実機実験を行った具体的には、 Eye-Vergence システムと固定システムのカメラ注視点 の結果を取り、ゲイン曲線と位相曲線を求めた.実機実 験の結果を用いて固定カメラシステムと Eye-Vergence システムのカメラの周波数特性を比較し、Eye-Vergence システムの可追跡性が固定カメラシステムよりも優れ ているという結論を得た.

参考文献

- 1) S.Hutchinson, G.Hager, and P.Corke: A Tutorial on Visual Servo Control, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.12, No.5, 651/670(1996)
- 2) P.Y.Oh, and P.K.Allen: Visual Servoing by Partitioning Degrees of Freedom, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.17, No.1, 1/17(2001)
- E.Malis, F.Chaumentte and S.Boudet: 2-1/2-D Visual Servoing, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.15, No.2, 238/250(1999)
- 4) P.K.Allen, A.Timchenko, B.Yoshimi, and P.Michelman: Automated Tracking and Grasping of a Moving object with a Robotic Hand-Eye System, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.9, No.2, 152/165(1993)
- 5) Wolfgang Sepp, Stefan Fuchs and Gerd Hirzinger: Hierarchical Featureless Tracking for Position-Based 6-DoF Visual Servoing, Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems (IROS), 4310/4315(2006)
- 6) Toshifumi Hiramatsu, Takanori Fukao, Keita Kurashiki, Koichi Osuka "Image-based Path Following Control of Mobile Robots with Central Catadioptric Cameras" IEEE International Conference on Robotics and Automation Kobe, Japan, May 12-17(2009)
- 7) Omar Tahri, Youcef Mezouar "Generic Decoupled Image-Based Visual Servoing for Cameras Obeying the Unified Projection Model" IEEE International Conference on Robotics and Automation Kobe, Japan, May 12-17(2009)
- 8) Amei massoud Farahmand, Azad Shademan, Martin Jägersand, Csaba szepesvári "Model-based and Model-free Reinforcement Learning for Visual Servoing" IEEE International Conference on Robotics and Automation Kobe, Japan, May 12-17(2009)
- 9) Dae-Jin Kim, Ryan Lovelett, and Aman Behal "Eyein-Hand Stereo Visual Servoing of an Assistive Robot Arm in Unstructured Environments" IEEE International Conference on Robotics and Automation Kobe, Japan, May 12-17(2009)

- 10) 松浦・丸: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,日本機械学会論文集 (C編). 77-776,186/195(2011)
- 11) V.Brandou.et al : Active Stereovision Using Invariant Visual Servoing. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intellignet Robots and Systems (IROS'06), 2326/2331(2006)
- 12) D.H Kim, et al. : An image-based control scheme for an active stereo vision system Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'04), 3375/3380(2004)
- 13) W. Song, M. Minami, Y. Mae and S. Aoyagi, "Online Evolutionary Head Pose Measurement by Feedforward Stereo Model Matching", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), 4394/4400(2007)
- 14) J. Stavnitzky, D. Capson, "Mutiple Camera Model-Based 3-D Visual Servoing", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.16, No.6(2000)
- 15) C. Dune, E. Marchand, C. leroux, "One Click Focus with Eye-inhand/Eye-to hand Cooperation", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), 2471/2476(2007)
- 16) Wei. Song, M. Minami, Fujia Yu, Yanan Zhang and Akira Yanou "3-D Hand & Eye-Vergence Approaching Visual Servoing with Lyapunouv-Stable Pose Tracking, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp.11, 2011.
- 17) Omar Tahri and Francois Chaumette: Point-Based and Region-Based Image Moments for Visual Servoing of Planar Objects, IEEE Tran. on Robotics, Vol.21, No.6(2005)
- 18) Tarek Hamel and Robert Mahony: Visual Servoing of an Under-Actuated Dynamic Rigid-Body System: An Image-Based Approach, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.18, No.2(2002)
- 19) W. Song, M. Minami, S. Aoyagi: On-line Stable Evolutionary Recognition Based on Unit Quaternion Representation by Motion-Feedforward Compensation, International Journal of Intelligent Computing in Medical Sciences and Image Processing (IC-MED) Vol.2, No.2, 127/139(2007).
- 20) M.Minami, W.Song: Hand-eye-motion Invariant Pose Estimation with On-line 1-step GA -3D Pose Tracking Accuracy Evaluation in Dynamic Hand-eye Oscillation, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.21, No.6,709/719(2009)
- 21) W. Song, F. Yu, M. Minami: 3D Visual Servoing by Feedforward Evolutionary Recognition, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing (JAMDSM) Vol.4, No.4,739/755(2010).
- 22) Tsuneo Yoshikawa: Foundations of Robotics: analysis and control, ISBN 0-262-24028-9.
- 23) J. Stavnitzky, D. Capson, "Mutiple Camera Model-Based 3-D Visual Servoing, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.16, No.6(2000).
- 24) C. Dune, E. Marchand, C. leroux: One Click Focus with Eye-in-hand/Eye-to hand Cooperation, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), 2471/2476(2007).
- 25) Tomoyuki Shiozaki, Toshiyuki Murakami: Trackability Based Motion Control in Mobile Hand-Eye System". SICE-ICASE International Joint Conference, 5304/5309(2006)
- 26) Tsuneo Yoshikawa: Foundations of Robotics Analysis and Control, ISBN 0-2622-4028-4.27













Fig. 15: True object's pose is directly given to the system, which can cancel the recognition error, so in - 30- this figure we can see only the dynamic error, such as the system of the dynamic resource and the dynamic re

the camera can track the object much better than the end-effector.



(e) angle-frequency

Fig. 16: The object's pose $\varepsilon 1$, $\varepsilon 2$ and $\varepsilon 3$ are assumed to be given to servoing controller and the object's pose_{31} x, y and z are recognized by camera.



Fig. 17: Movement of the x-axis direction of hand coordinate system. The object's pose x, y, z, $\varepsilon 1$, $\varepsilon 2$ and $\varepsilon 3$ are recognized by camera.





Fig. 18: Movement of the y-axis direction of hand coordinate system. The object's pose x, y, z, $\varepsilon 1$, $\varepsilon 2$, $\varepsilon 3$, are recognized by camera.





