奥行き方向に移動する対象物に対するビジュアルサーボの 実時間ポーズトラッキング性能の解析 前田耕市*,見浪護, 侯森, 矢納陽(岡山大学)

Analysis of real-time pose tracking performance of visual servoing for longitudinal moving objects Koichi Maeda^{*}, Mamoru Minami, Sen Hou, Akira Yanou (Okayama University)

Abstract

Visual servoing to moving target with hand-eye cameras fixed at the hand is inevitably be affected by hand dynamical oscillations, then it is hard to keep target's position at the center of camera's view, since nonlinear dynamical effects of whole manipulator stand against tracking ability. Our proposal to solve these problems are that the visual servoing controller of the hand and eye-vergence should be 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 because of the eyes' light mass. In this report merits of eye-vergence visual servoing for tracking have been confirmed through frequency response experiments on condition of full six DOF pose being estimated in real time.

キーワード:ビジュアルサーボ,周波数応答 (Visual servoing, Frequency response)

1. 緒 言

近年. ロボットビジョンの分野では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⁾⁻⁽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. Eye-Vergence システムは運動学と 動力学についてのメリットがある.まず,運動学についての メリットを説明する. 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(図 1 (a)), また二つのカメラの可視可能領域が狭い (図 1 (b)), さらに可視可能領域内の対象物であっても図1(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、図2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.図2の(a)-(c)は図1の問題点(a)-(c) に対応した Eye-Vergence システムのメリットを示す.(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 入力画像のひずみによる影響を避けられることを示してい



🗵 1 Disadvantage of Fixed Camera System



 \boxtimes 2 Advantage of Eye-vergence System

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⁽⁵⁾,⁽⁶⁾.しかし、ビジュアルサーボの目的は 手先を対象物に近づい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.図2に示す ような Eye-Vergence 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.

Eye-Vergence システムのもう一つのメリットは動力学の 影響から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



 \boxtimes 3 Motion of the end-effector and object

定なサーボ動作を保つ必要がある. ロボットのカメラがハ ンドに固定されている場合,対象物が速く動くと,マニピュ レータ全体の運動特性に依存して対象物のスピードに追い つくことができない. このとき対象物はカメラの視界から 消失し,制御系は暴走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.

従来の研究⁽¹¹⁾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「Eye-Vergence システム」を提案し、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、Eye-Vergence 運動学と動力学のメリットを実験で確認してない. 本論文では、提案した Eye-Vergence システムの優位性を確 認するために、正弦波周波数応答実験を行った.また、実験 の結果から運動学と動力学のメリットを確認して、そして 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確認する.

2. ハンドアイビジュアルサーボ

〈2・1〉目標軌道生成 図 3 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.

式 (1) は任意の対象物の運動 ${}^{W}\boldsymbol{T}_{M}(t) = ({}^{W}\boldsymbol{T}_{E}(t){}^{E}\boldsymbol{T}_{M}(t))$ と任意の時変ビジュアルサーボの目標運動 ${}^{Ed}\boldsymbol{T}_{M}(t)$ を含 む. ${}^{E}\boldsymbol{T}_{M}(t)$ は 1-step GA (^{10) (12)} 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,



🗵 4 Block diagram of the hand visual servoing system

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 Σ_{ij} に基づいて再構成する.

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

式(2)を時間に関して微分すると以下の式を得る.

F

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

時間に関してもう一回微分すると以下の式を得る.

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}} はカ メラによって観測される. 図3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. – 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⁽¹²⁾(¹³⁾, MFF 補償法⁽¹⁰⁾ 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⁽¹⁴⁾. 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、"1-step GA 法"⁽¹²⁾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 で探索する.この方法は対象物をリアルタイムで認識することができる.新しい入力画像に対する最適なモデルを出力でき、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 3D 空間内で、6 個のパラ



 \boxtimes 5 Calculation of tilt and pan angles

メータがあるので,探索する時間が増して,認識効果が悪 くなる.提案した MFF 認識法⁽¹⁰⁾ 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.この方法を利用 して,カメラは高速で移動する対象物を追従することがで きる.

〈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いる.ブロック線図を図.4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^Wr_dは,

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

と 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 ${}^{E}\dot{\boldsymbol{T}}_{Ed}$ から求められ る. $\boldsymbol{K}_{P_{o}}$ はバネ定数、 $\boldsymbol{K}_{V_{o}}$ は粘性抵抗を表す行列である. ハンドの目標位置/姿勢は ${}^{W}\boldsymbol{\psi}_{d}^{T} = [{}^{W}\boldsymbol{r}_{d}^{T}, {}^{W}\boldsymbol{\epsilon}_{d}^{T}]^{T}$ 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⁽¹²⁾ 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_{Po} はバネ定数、 K_{Vo} 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 q1 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.この方法を利用し,冗長性の問題を解決 する.ロボットの目標関節角度 q_d と角速度 **q**_d は

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



☑ 6 Frame structure of manipulator

であり,
$$J^+(q) = J^T (JJ^T)^{-1}$$
によって得られる.
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 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 けて,回ることができる. 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.図5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.

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,右カメラは 対象物を見える.

Eye-Vergence ビジュアルサーボコントローラは

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

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

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

と与えられる. ここで, *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



図 7 3D marker



🗵 8 Object and the visual-servoing system

の有効性を実機によって確認するために、アームロボット 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、 復眼で対象物を観測する.本研究は、カメラ CCD-TRV86(撮 影素子:1/6 インチ CCD, 焦点距離:f = 3.6[mm], 視野角: $\alpha = 38[deg]$)を使用する. 画像認識およびアームロボット 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 はサイバーテック製 CT3001Rev2を用いている.マニピュ レータとカメラの構造は図 6(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、図7に示す.実験の対 象物とマニピュレータの座標を図8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.

	0	0	-1	-890[mm]]
$^{W}\boldsymbol{T}_{E_{0}}=$	1	0	0	0[mm]	$\cdots \cdots (16)$
	0	-1	0	500[mm]	
	0	0	0	1	



 \boxtimes 10 Calculation cameras' gazaing point

$${}^{W}\boldsymbol{T}_{M_{0}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -1435[mm] \\ 1 & 0 & 0 & 0[mm] \\ 0 & -1 & 0 & 500[mm] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdots \cdots (17)$$

対象物の移動は次式に示す.

$${}^{M_0}z_M(t) = 150 - 150\cos(\omega t)[mm] \cdots (18)$$

対象物と手先の関係は

$$^{Ed}\boldsymbol{\psi}_{M} = [0, -90[mm], 545[mm], 0, 0, 0]$$
 (19)

と与えられる.

以上の条件で式 (18) の $\omega \varepsilon \omega = 0.209 \sim 1.256$ と変化さ せ、それぞれに対して、認識結果に真値を与えた場合、 $^{E}z_{\hat{M}}$ のみを 1-step GA で探索する場合、位置 3 変数を探索する 場合、位置/姿勢 6 変数全てを探索する場合に分け、ハンド アイビジュアルサーボの周波数応答実験を行った.

〈3·3〉 Gazing point の定義 ここでは、カメラの Gazing point を定義する.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.図9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.1-step 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.以前までは、右カメラの視線方向と対象物のx - y平面上の点を Gazing point として定義していた⁽¹⁴⁾が、こ れでは左右カメラが対象物を注視できているか確認できな かったため、今回新しく定義をし直した.

図 10 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.

$$\frac{z}{x} = tan(\frac{\pi}{2} - q_{10_d}) \cdots (20)$$
$$\frac{z}{240 - x} = tan(\frac{\pi}{2} - q_{9_d}) \cdots (21)$$

となる. この2式を連立して, x,z はそれぞれ

と表せる.式 (3), (4), (5) より左カメラ座標系から見た Gazing point^LPは,

$${}^{L}\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} \frac{240tan(\frac{\pi}{2} - q_{9_{d}})}{tan(\frac{\pi}{2} - q_{10_{d}}) + tan(\frac{\pi}{2} - q_{9_{d}})} \\ 0 \\ \frac{240tan(\frac{\pi}{2} - q_{10_{d}})tan(\frac{\pi}{2} - q_{9_{d}})}{tan(\frac{\pi}{2} - q_{10_{d}}) + tan(\frac{\pi}{2} - q_{9_{d}})} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (25)$$

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.

〈3・4〉 実験結果 図 11, 図 13, 図 15, 図 17 は手先の目標位置,現在の位置,対象物の位置,カメラの Gazing pointの時間変化を示しており,横軸は時間,縦軸は奥行き方向の位置である.図 12,図 14,図 16,図 18 は本実験における手先と Gazing pointのボード線図で,(a)が振幅周波数曲線,(b)が位相周波数曲線を示しており,横軸は周波数,縦軸はゲイン・位相である.

図11は対象物の真値すべてをコントローラに与えた場合の実験結果であり、認識による誤差を含んでいない.よっ てダイナミクスによる誤差のみあらわれる.図13,図15, 図17は、認識する自由度を増やしていった結果で、認識誤 差及びダイナミクスによる誤差が含まれている.

図 13, 図 15, 図 17 より, Gazing point は手先に比べて, 振幅の差,位相の遅れ共に小さいことがわかる.また,図 12,図 14,図 16,図 18 より, ω =0.1rad/s までは,手先と Gazing point の可追跡性はほぼ等しいが, ω が増加するに したがって,手先の共振の振幅と位相は,Gazing point よ りも大きくなることがわかる. ω が 0.5rad/s より増加して 行く場合,手先の振幅は減少していく.一方,Gazing point においては, ω が 1.256rad/s までの範囲ではカメラの視界 に対象物を常にとらえ続けることができている.よって, Eye-Vergence システムは高い安定性と可追従性を有するこ とがわかる.

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、新しいコントロールを作り、関節角度を 目標角度にアプローチするようにした.提案したビジュア



 \boxtimes 11 Gazing point and end-effector's position of the experiments in which the true object's pose is given to the system



 \boxtimes 12 Gazing point and end-effector's frequency response of the experiments in which the true object's pose is given to the system



 \boxtimes 13 Gazing point and end-effector's position of the experiments in which the true object's pose, x, y, ε_1 , ε_2 , ε_3 , are given to servoing controller-only z position of the target is variable

ルサーボシステムの有効性を確認するために、奥行き方向 に移動する対象物に対するビジュアルサーボ実機実験をし て、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、振幅周波数曲線と位相周波数曲線を求めた. 実機実験の結果から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

- S.Hutchinson, G.Hager, and P.Corke, "A Tutorial on Visual Servo Control", IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 12, no. 5, pp. 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, pp. 1-17, 2001.



 \boxtimes 14 Gazing point and end-effector's frequency response of the experiments in which the true object's pose, x, y, ε_1 , ε_2 , ε_3 , are given to servoing controller-only z position of the target is variable



⊠ 15 Gazing point and end-effector's position of the experiments in which the object's positions x, y, z are measured, and orientations ε_1 , ε_2 , ε_3 , are given to servoing controller



☑ 16 Gazing point and end-effector's frequency response of the experiments in which the object's positions x, y, z are measured, and orientations ε_1 , ε_2 , ε_3 , are given to servoing controller



☑ 17 Gazing point's and end-effector's position of the experiments in which all object's pose x, y, z, ε_1 , ε_2 , ε_3 are recognized

- (3) E.Malis, F.Chaumentte and S.Boudet, "2-1/2-D Visual Servoing", IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 15, no. 2, pp. 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.



⊠ 18 Gazing point and end-effector's frequency response of the experiments in which all object's pose x, y, z, ε_1 , ε_2 , ε_3 are recognized

on Robotics and Automation, vol. 9, no. 2, pp. 152-165, 1993.

- (5) 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, Dec 2005.
- (6) 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, APRIL 2002.
- (7) 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)
- (8) 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
- (9) 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
- (10) W. Song, M. Minami, Y. Mae and S. Aoyagi, "On-line Evolutionary Head Pose Measurement by Feedforward Stereo Model Matching", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp.4394-4400, 2007.
- (11) 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.
- (12) 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, Page 127-139 (2007).
- (13) 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, pp.709-719 (2009.12)
- (14) 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 Page 739-755 (2010).