

可追跡性を高めた Hand/Eye-Vergence 二重ビジュアルサーボ系の提案*

見浪 護^{*1}, 于 福佳^{*2}, 矢納 陽^{*1}

A Proposal of Hand/Eye-Vergence Dual Visual Servoing for Enhancing Trackability

Mamoru MINAMI^{*1}, Fujia YU and Akira YANOU

^{*1} Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University.
3-1-1, Tsushima-naka, Okayama, 700-8530, Japan

Visual servoing with a hand-eye configuration tends to be vulnerable for hand's dynamical oscillations, since nonlinear dynamical effects of whole manipulator and dynamical coupling among actuating joints stand against tracking ability—abbreviated here as trackability, i.e. a performance to keep a target object projected at the center of camera's view while the target moves. A proposal to achieve high trackability is that visual servoing of the hand and the camera be separately controlled independently by decoupling each other, and such controlling method is proposed in this paper. The effectiveness of the decoupled hand and eye-vergence visual servoing method has been evaluated through simulations incorporated with actual dynamics of 7-DoF robot with additional 3-DoF eye-vergence mechanism, where the stability of closed loop dynamics has been verified by Lyapunov analysis.

Key Words : Visual Servoing, Eye-Vergence, Trackability, Nonlinear Dynamics, Lyapunov Analysis

1. はじめに

ハンドアイ構成でのビジュアルサーボ（以下 VS）は、ハンドと対象物との相対的位置姿勢誤差を用いて制御するとき、サーボ特性はロボットの運動学モデルの誤差に依存しないという長所がある⁽¹⁾⁽²⁾が、対象物体の一部がカメラ画像視野から外れる可能性があり、正常なビジュアルフィードバックを阻害する。この問題は Field of View（以下 FoV）問題⁽³⁾と呼ばれ、VS の重要な課題である。

VS の手法は位置ベースト (PBVS) 制御とイメージベースト (IBVS) 制御に大別される。PBVS⁽⁴⁾ は作業座標系で表された対象物の位置・姿勢に対してハンドアイを制御するため、対象物の全体をカメラ視野内に保持することを意図した制御方法ではない。つまり PBVS は FoV 問題を解決しない。また IBVS⁽⁵⁾⁽⁶⁾ でも VS が局所最適解に陥る可能性があり⁽⁷⁾、同様に FoV 問題を解決しない。このため FoV 問題について提案されている方法は種々のサーボ方法を組み合わせて解決しようとする手法がとられてきた。すなわち PBVS または IBVS に FoV 問題に対処する機能を附加した方法やそれらを組み合わせた方法⁽⁸⁾⁽⁹⁾が提案されている。また画像枠と対象物の画像面内での距離と予想される対象物の画像面内での運動に基づいて制御する方法⁽³⁾も提案されている。

ここで、人間の Eye-Vergence(両眼が寄り目になること、以下 EV) 機能について考えてみる。人間は顔を対象物に向けて対象物を認識することと眼球をそれに向けて認識することを同時に使う。それぞれの機能はハンドアイロボットでは、ハンドとハンドアイを対象物に向ける機能に対応している。アイススケートの選手が高速にスピンド回転しているとき顔は定的に回転していて外界の対象物に一時的でも位置・姿勢を合わせている状態は無い。しかし眼球を周期的に逆の回転方向に回転させて頭部の回転運動を相殺させ、周囲環境に対する眼球の運動を一時的に静的な関係にして、周囲環境の認識を助けている。これはロボットにおいてハンドの運動とハンドアイカメラの運動を分け、ハンドの対象物追跡制御とカメラの追跡制御を個別に制御することで FoV 問題

* 原稿受付 2012年11月27日

*1 正員、岡山大学大学院自然科学研究科（〒700-8530 岡山県岡山市津島中3-1-1）

*2 岡山大学大学院自然科学研究科

E-mail: minami@suri.sys.okayama-u.ac.jp



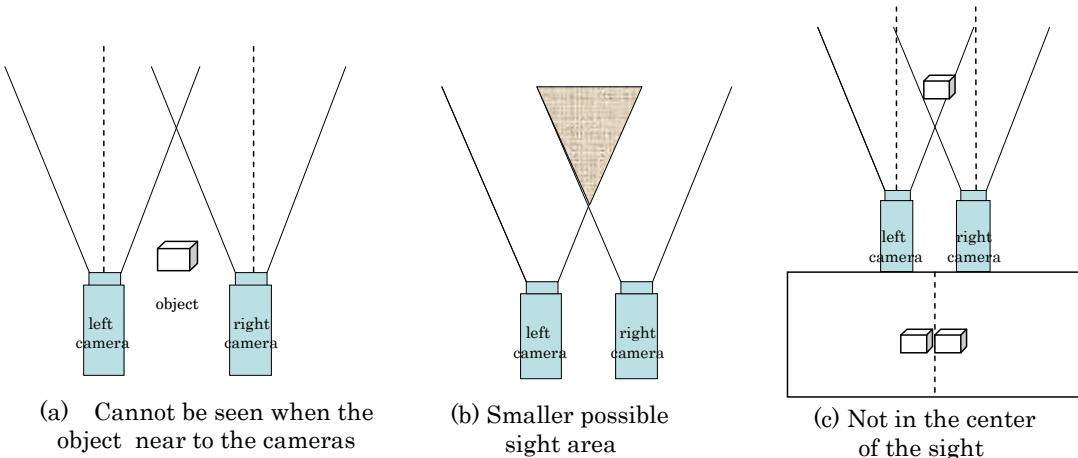


Fig. 1 Defects of Hand-Fixed Camera System

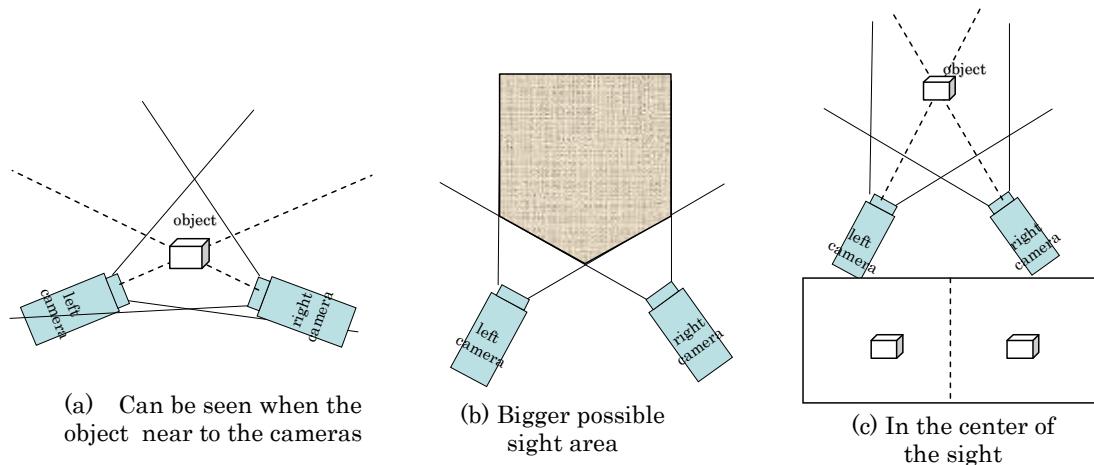


Fig. 2 Merits of Eye-Vergence System

のひとつの解決策を提案できることを示唆している。ここで上記⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾の研究ではハンドアイカメラはロボットハンドに固定されており工学的なEV機能を持たない。このためハンドの対象物追従特性とカメラの追従特性は同一であり、それぞれの特性を分離して議論することはできない。

EVに関する研究は主に医工学分野で行われており、眼の焦点調節機能とEVとの関係を調べた研究⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾がある。画像認識の分野ではEVを用いてピクセル分解能以下の認識能力を持つ両眼ビジュアルトラッキング⁽¹²⁾が提案された。最近では眼球運動の制御について人工的な盲膜としてFPGAを用いた方法の提案⁽¹³⁾や、脊椎動物のEV制御の非対称性についての報告⁽¹⁴⁾もある。以上のように医工学分野ではEVの研究は行われているものの、ロボットの制御に関する論文は著者の知る限りほとんど無いと言ってよい。

著者らはVSについて遺伝的認識法を用いた実時間認識方法⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾の研究を続け、ビデオレートで入力される動画像に遅れることなく運動する対象物を認識するシステムを構築した。さらにその提案手法をEV機能付きのハンドアイビジュアルサーボに適用し⁽¹⁸⁾⁻⁽²²⁾、位置・姿勢6自由度の周波数応答特性を実験的に示した^{(23),(24)}。しかしながら著者の知る限りEV機能付きのVSについて閉ループ系の安定性について確認されたEV制御系は提案されていないようである。

このような状況の中で、本報ではVSのFoV問題について工学的EV機能をカメラ姿勢制御により実現する方法について検討し、ハンドとハンドアイの運動を独立に制御する加速度のコントローラを提案する。また、提案するコントローラによって、ロボットの閉ループ系の運動特性が漸近安定であること、また同時にカメラから見た対象物は画像中央に収束することをリアプロノフ法により示す。さらにハンドとハンドアイの周波数応答特性を調べ、EV機能によりハンドアイのTrackabilityはハンドのそれよりも向上することを示す。

2. Eye-Vergence システム

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ること(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球面収差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。

そこで上述の問題を解決するため、画像の中心で目標物を捉えるためにカメラ自身に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EVのメリットを示す⁽¹⁹⁾。(a), (b)は両眼撮像可能領域が拡大すること、(c)はレンズの中心で目標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ることができることを示している。

ビジュアルサーボでは、対象物とハンドの位置/姿勢関係を一定に保つレギュレータ制御を中心に研究されてきた⁽¹⁾⁽²⁵⁾。このような定位置制御型のサーボは、動く対象物に近づきハンドで把持するなどの時変目標軌道を追従する問題に対しては無力であり、ハンドの位置/姿勢を時間の関数として対象物に接近させるアプローチ過程の制御を議論する必要がある。この場合、当然カメラと物体の位置/姿勢関係は時間とともに変化する。よって図2のようなEVは、アプローチ過程を含むビジュアルサーボを考える上で重要なメカニズムであることがわかる。またアプローチ過程においてビジュアルフィードバックが切断されないようにするために、カメラ視界に対象物を捉え続ける“可追跡性、Trackability”が重要である。またEV機能は、対象物とハンドの位置・姿勢目標値が時間的に変動する場合に有効である。

3. ハンドアイビジュアルサーボ

3.1 マニピュレータのダイナミクス

マニピュレータの一般的な運動方程式は以下で与えられる。

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

ここで \mathbf{q} は関節角度で $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_E^T, \mathbf{q}_C^T]^T$ であり、 $\mathbf{q}_E = [q_1, \dots, q_7]^T$ 、 $\mathbf{q}_C = [q_8, q_9, q_{10}]^T$ 。 $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \dots, \tau_{10}]$ は関節の駆動トルクを表す。また $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ は慣性行列を表し、 $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ は遠心力とコリオリ力を表すベクトルである。また、 $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ は重力に関するベクトルである。

シミュレーションに用いたロボットは三菱重工製 PA-10 は 7 自由度のロボットアームである。PA-10 の実際の物理パラメータは文献⁽²⁶⁾に記載されている諸量を使用した。PA-10 のハンド部にパンチルト角を変更できるアイカメラを 2 台取り付けている。2 つのカメラはソニー製の FCB-1X11A で、フレーム周波数は 33fps である。マニピュレータのハンド部とカメラの構成及び \mathbf{q} の要素の回転方向の定義を図3 に示す。シミュレーションプログラムはニュートン・オイラー法を用いて自作した。EV システムは、2 台のカメラの姿勢が可動であるため単純な直鎖リンク構造ではなく枝分かれを持つ構造となる。このため枝分かれをしているリンクでは分岐に対する考慮を行っている⁽²⁷⁾。ニュートンオイラー法を用いて慣性行列、遠心力・コリオリ力、重力など運動方程式中の項を計算する方法⁽²⁸⁾は、関節角加速度の算出時に運動方程式を陽にもとめる必要が無いため有効である。求めた関節角加速度をルンゲクッタで数値積分(積分時間 0.001 秒)し運動を生成した。

3.2 目標軌道生成

図4 にハンドと物体の関係を示す。作業座標系を Σ_W 、目標物に固定した座標系を 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目標物との相対的位置/姿勢関係を同次変換行列を用いて ${}^{Ed}\mathbf{T}_M$ と表し、目標物と実際のハンドとの関係を ${}^E\mathbf{T}_M$ と表す。このとき、 Σ_E と Σ_{Ed} との差は ${}^E\mathbf{T}_{Ed}$ であり、 ${}^E\mathbf{T}_{Ed}$ は以下のように記述できる。

$${}^E\mathbf{T}_{Ed}(t) = {}^E\mathbf{T}_M(t) {}^{Ed}\mathbf{T}_M^{-1}(t) \quad (2)$$

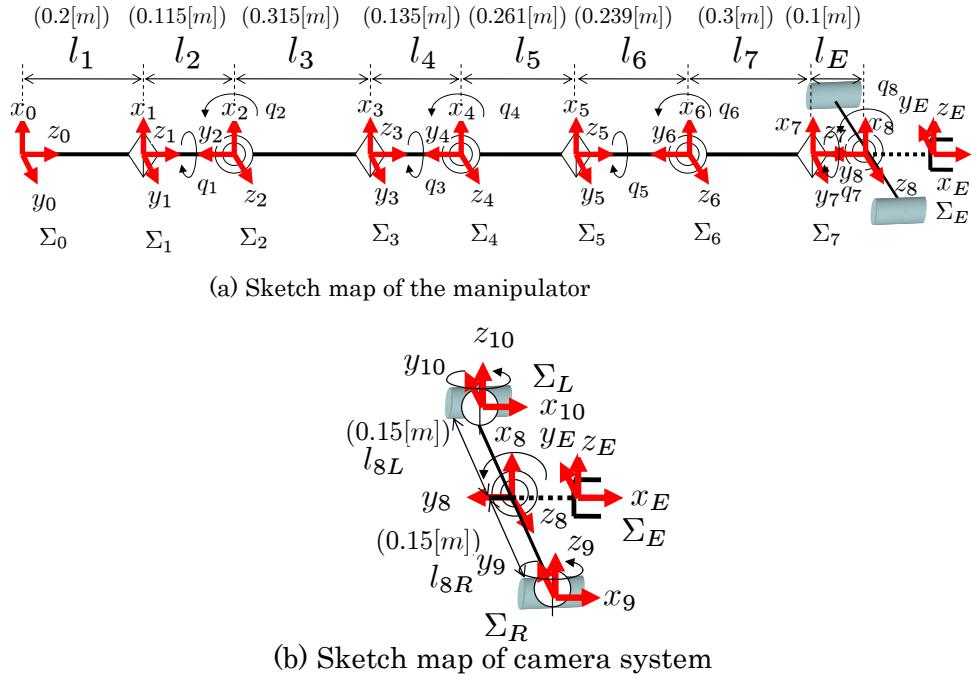


Fig. 3 Frame Structure of Manipulator

式(2)は任意の目標物の運動 ${}^W\mathbf{T}_M(t)$ ($= {}^W\mathbf{T}_E(t){}^E\mathbf{T}_M(t)$)と任意の時変ビジュアルサーボの目標運動 ${}^{Ed}\mathbf{T}_M(t)$ を含む ${}^E\mathbf{T}_M(t)$ は1-step GA⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾によって観測される。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。そこでここでは、式(2)で表されるハンドの位置/姿勢誤差 ${}^E\mathbf{T}_{Ed}(t)$ 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。

$${}^E\mathbf{T}_{Ed}(t) = {}^E\mathbf{T}_{\hat{M}}(t)\hat{M}\mathbf{T}_{Ed}(t) \quad (3)$$

式(3)を時間に関して2回微分すると以下の式を得る。

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

ここで $\hat{M}\mathbf{T}_{Ed}$, $\hat{M}\dot{\mathbf{T}}_{Ed}$, $\hat{M}\ddot{\mathbf{T}}_{Ed}$ は観測した対象物に対する相対的位置・姿勢の目標運動であり、対象物独自の運動に依存しない。このためこれらはビジュアルサーボの目標軌道としてあらかじめ与えることができる。また ${}^E\mathbf{T}_{\hat{M}}$, ${}^E\dot{\mathbf{T}}_{\hat{M}}$ はカメラによって観測される。図4に示すように、ビジュアルサーボ過程においてゼロ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 ${}^M\mathbf{T}_{\hat{M}}$ の計測誤差である。もう一つはハンドの目標状態と実際のハンド ${}^E\mathbf{T}_{Ed}$ の制御誤差である。著者らの研究では、 ${}^M\mathbf{T}_{\hat{M}}$ の誤差は1-step GAオンライン認識法とMFF補償法によって一定の誤差の範囲に留まることを実時間認識性能実験で確認している⁽¹⁶⁾。さらに ${}^E\mathbf{T}_{Ed}$ の誤差はハンドビジュアルサーボコントローラによって減少することも実験により確認している⁽²¹⁾。

3.3 ハンド指示加速度

提案するハンドEV二重VSコントローラを図5に示す。図中ハンドビジュアルサーボは外側のループで、そのコントローラはB.Siciliano⁽²⁹⁾によって提案された。以下に簡単に紹介する。 ${}^W\mathbf{T}_{Ed}$ と ${}^W\mathbf{T}_E$ に含まれる位置ベクトルを \mathbf{p}_d , \mathbf{p}_E とすると、ハンドの位置誤差 $\Delta\mathbf{p}_E$ は、

$$\Delta\mathbf{p}_E = \mathbf{p}_d - \mathbf{p}_E \quad (5)$$

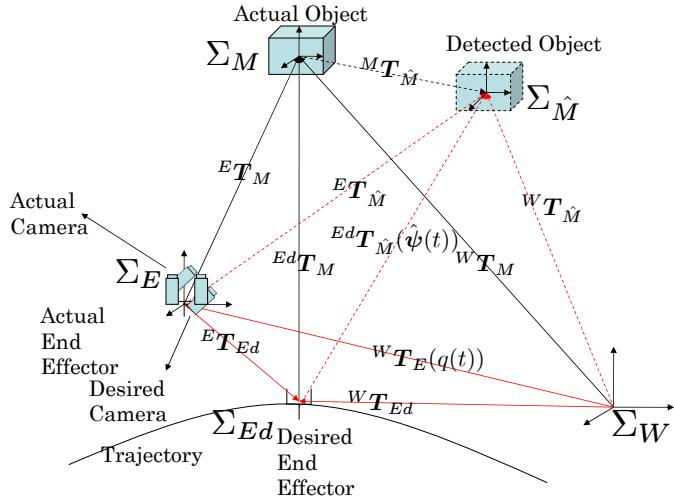


Fig. 4 Relation of Hand Tracking Error and Pose Estimation Error

また姿勢は次のようにクォータニオンによって表現する。

$${}^E\eta = \cos \frac{\theta_{Ed}}{2} \quad (6)$$

$$\Delta^E \boldsymbol{\epsilon} = \sin \frac{\theta_{Ed}}{2} {}^E\mathbf{k}_{Ed} \quad (7)$$

ここで ${}^E\theta_{Ed}$, ${}^E\mathbf{k}_{Ed}$ はアングル / アクシス姿勢表現のアングルとアクシスである。 $\Delta^E \boldsymbol{\epsilon}$ は ${}^E\mathbf{T}_{Ed}$ の中の回転行列 ${}^E\mathbf{R}_{Ed}$ から取り出すことができる。一方、目標角速度と実際の角速度との誤差は次のように定義される。

$$\Delta\boldsymbol{\omega}_E = \boldsymbol{\omega}_d - \boldsymbol{\omega}_E \quad (8)$$

以上の変数を用いて、ハンドのコントローラを構成する。

$$\mathbf{a}_{pE} = \ddot{\mathbf{p}}_d + \mathbf{K}_{D_p} \Delta \dot{\mathbf{p}}_E + \mathbf{K}_{P_p} \Delta \mathbf{p}_E \quad (9)$$

$$\mathbf{a}_{oE} = \ddot{\boldsymbol{\omega}}_d + \mathbf{K}_{D_o} \Delta \boldsymbol{\omega}_E + \mathbf{K}_{P_o} \mathbf{R}_E \Delta^E \boldsymbol{\epsilon} \quad (10)$$

$\ddot{\mathbf{p}}_d$, $\ddot{\boldsymbol{\omega}}_d$ は目標加速度、目標角加速度であり。 \mathbf{K}_{D_p} , \mathbf{K}_{P_p} , \mathbf{K}_{D_o} , \mathbf{K}_{P_o} は正定な対角行列である。 $\mathbf{a}_E = [\mathbf{a}_{pE}^T, \mathbf{a}_{oE}^T]^T$ として、マニピュレータのハンドの制御入力を以下のように与える。

$$\mathbf{s}_E = \mathbf{J}_E^+(\mathbf{q}_E) \{ \mathbf{a}_E - \mathbf{J}_E(\mathbf{q}_E, \dot{\mathbf{q}}_E) \dot{\mathbf{q}}_E \} + \{ \mathbf{I} - \mathbf{J}_E^+(\mathbf{q}_E) \mathbf{J}_E(\mathbf{q}_E) \} \{ \mathbf{E}_p(\mathbf{q}_{Ed} - \mathbf{q}_E) + \mathbf{E}_d(\dot{\mathbf{q}}_{Ed} - \dot{\mathbf{q}}_E) \} \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{J}_E(\mathbf{q}_E)$ はハンドの関節角に関するヤコビ行列、また $\mathbf{J}_E^+(\mathbf{q}_E)$ はその擬似逆行列である。 \mathbf{E}_p , \mathbf{E}_d は、位置と速度ゲインを表す正定対角行列である。ここで、式(11)の右辺第2項の位置 / 速度制御はハンドの位置姿勢制御には無関係であるが、冗長自由度の運動により、全体の形状が大きく変化することを防ぐために必要である。

3.4 Eye-vergence 指示加速度

ここでは、前節で述べた既存のコントローラに提案するEV用コントローラを追加する。EVビジュアルサーボは図5のビジュアルサーボシステムの内側のループである。図6(a)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。

$$q_{8d} = \text{atan2}({}^E z_{\hat{M}}, {}^E x_{\hat{M}}) \quad (12)$$

$$q_{9d} = \text{atan2}(l_{8R} + {}^E y_{\hat{M}}, {}^E x_{\hat{M}}) \quad (13)$$

$$q_{10d} = \text{atan2}(-l_{8L} + {}^E y_{\hat{M}}, {}^E x_{\hat{M}}) \quad (14)$$

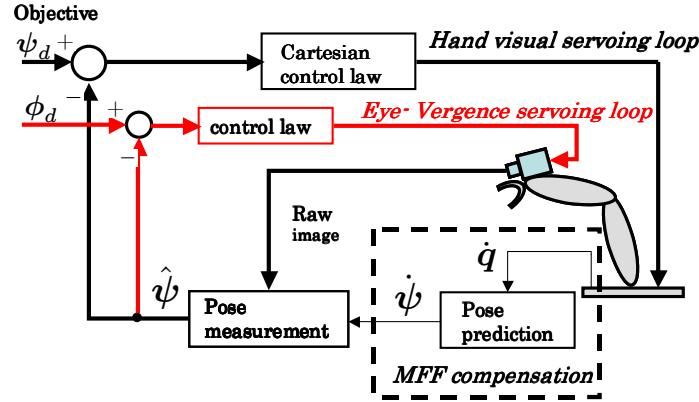


Fig. 5 Hand & Eye-Vergence Visual servo system

ここで $l_{8L} = l_{8R} = 150[\text{mm}]$ 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 x 軸とする。 $\mathbf{q}_{Cd} = [q_{8d}, q_{9d}, q_{10d}]^T$ と表すと、カメラシステムの角度の誤差は次のように定義される。

$$\Delta \mathbf{q}_C = \mathbf{q}_{Cd} - \mathbf{q}_C \quad (15)$$

以上より $\Delta \mathbf{q}_C = \mathbf{0}$ とするとき、対象物は左右カメラの画像面の中心に撮像されることがわかる。以上より Eye-Vergence の加速度指示値 s_C を以下で与える。

$$\mathbf{s}_C = \ddot{\mathbf{q}}_{Cd} + \mathbf{K}_{D_C} \Delta \dot{\mathbf{q}}_C + \mathbf{K}_{P_C} \Delta \mathbf{q}_C \quad (16)$$

ここで \mathbf{K}_{D_C} , \mathbf{K}_{P_C} は正定対角行列である。またカメラ中央に対象物を撮像する EV 機能をアイカメラサーボシステムに与える場合、式(12)-(14)の ${}^E x_{\hat{M}}$, ${}^E y_{\hat{M}}$, ${}^E z_{\hat{M}}$ の目標位置は一定値になるため \mathbf{q}_{Cd} は一定である。この場合 $\ddot{\mathbf{q}}_{Cd} = \dot{\mathbf{q}}_{Cd} = \mathbf{0}$ となる。

3.5 Hand / Eye-vergence コントローラ

式(11), 式(16)により得られたハンド指示加速度 s_E 及び EV 指示加速度 s_C を総合して、以下の入力トルク τ を与える。

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_E \\ s_C \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\tau = \mathbf{M}(\mathbf{q})\mathbf{s} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) \quad (18)$$

上式のコントローラが、図5に示すEV二重VSコントローラである。

4. 安定性解析

4.1 ハンドダイナミクス

ここでは提案したEVコントローラの安定性について考える。まず、ハンドの閉ループ系の安定性を以下に考える。式(18)の各ジョイントの入力トルクをシステムの運動方程式(1)に代入して、閉ループ系の運動を求める。

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{s} \quad (19)$$

よって

$$\ddot{\mathbf{q}}_E = \mathbf{s}_E \quad (20)$$

式(11)を式(20)に代入し、マニピュレータ形状が特異姿勢でないことを仮定すると、 $\mathbf{J}_E(\mathbf{q}_E)$ は行フルランクであるため、式(20)は以下の方程式に帰着する。

$$\mathbf{a}_E = \mathbf{J}_E(\mathbf{q}_E)\ddot{\mathbf{q}}_E + \mathbf{J}_E(\mathbf{q}_E, \dot{\mathbf{q}}_E)\dot{\mathbf{q}}_E \quad (21)$$

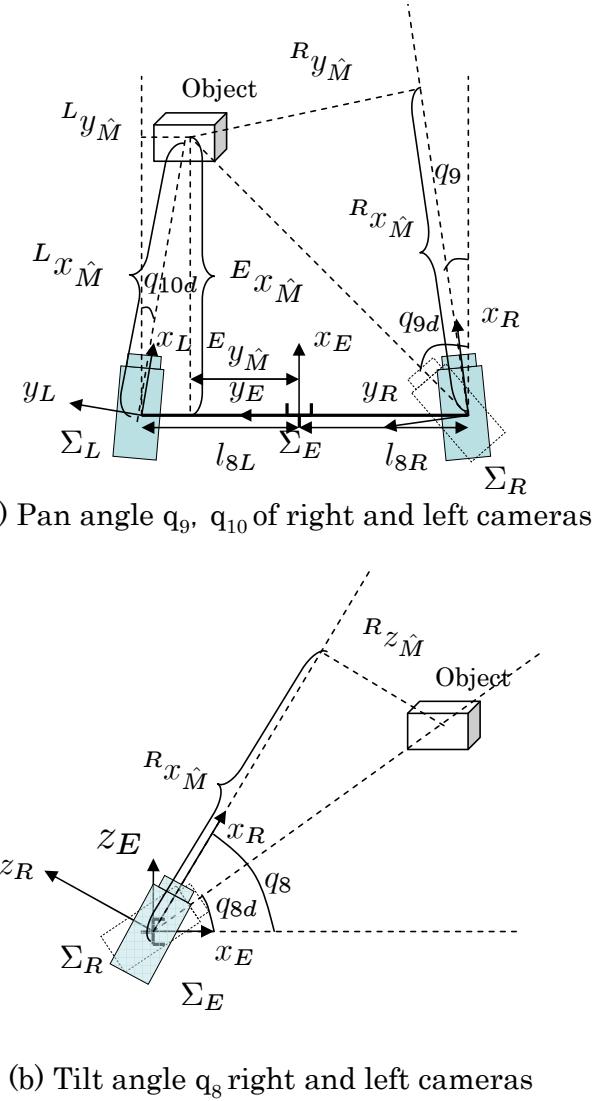


Fig. 6 Pan and Tilt Camera Angles Defined Based on Relation between Target object and Cameras

ここで

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}}_E \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_E \end{bmatrix} = \mathbf{J}_E(\mathbf{q}_E)\dot{\mathbf{q}}_E \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{p}}_E \\ \ddot{\boldsymbol{\omega}}_E \end{bmatrix} = \mathbf{J}_E(\mathbf{q}_E)\ddot{\mathbf{q}}_E + \mathbf{J}_E(\mathbf{q}_E, \dot{\mathbf{q}}_E)\dot{\mathbf{q}}_E \quad (23)$$

が成り立つため、式(21)は、次式となる。

$$\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{p}}_E \\ \ddot{\boldsymbol{\omega}}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{pE} \\ \mathbf{a}_{oE} \end{bmatrix} \quad (24)$$

式(24)の \mathbf{a}_{pE} , \mathbf{a}_{oE} にハンドのコントローラの式(9)と(10)を代入し、閉ループを構成することで以下のハンド位置および姿勢の閉ループ系の運動方程式を得る。

$$\Delta\ddot{\mathbf{p}}_E + \mathbf{K}_{D_p}\Delta\dot{\mathbf{p}}_E + \mathbf{K}_{P_p}\Delta\mathbf{p}_E = \mathbf{0} \quad (25)$$

$$\Delta\dot{\boldsymbol{\omega}}_E + \mathbf{K}_{D_o}\Delta\boldsymbol{\omega}_E + \mathbf{K}_{P_o}\mathbf{R}_E\Delta^E\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{0} \quad (26)$$

ここで \mathbf{R}_E は Σ_E で表されたベクトルを作業座標系で表されたものに変換する回転行列である。式(25)は安定な線形システムである。しかし式(26)は、角速度誤差である $\Delta\boldsymbol{\omega}_E$ とクオータニオン姿勢誤差である $\Delta^E\boldsymbol{\epsilon}$ を含んでるので非線形である。

4.2 カメラダイナミクス

つぎに、カメラシステムについて考える。式(17),(19)から

$$\ddot{\mathbf{q}}_C = \mathbf{s}_C. \quad (27)$$

であり、式(16)より、カメラの関節角偏差 $\Delta\mathbf{q}_C$ が満たす閉ループ系の方程式は次式となる。

$$\Delta\ddot{\mathbf{q}}_C + \mathbf{K}_{D_C}\Delta\dot{\mathbf{q}}_C + \mathbf{K}_{P_C}\Delta\mathbf{q}_C = \mathbf{0} \quad (28)$$

4.3 安定性解析

フィードバックゲイン行列はすべて正定な対角行列であるから、 \mathbf{K}_{P_o} の最小の固有値を $K_{P_o} > 0$ が存在し、 K_{P_o} を用いて、以下のリアブノフ法による安定解析において、一般性を失うことなく \mathbf{K}_{P_o} を $K_{P_o}\mathbf{I}$ で代替して用いる。これを用いて以下のリアブノフ関数の候補について考える。

$$\begin{aligned} V = & \Delta\mathbf{p}_E^T \mathbf{K}_{P_p} \Delta\mathbf{p}_E + (\Delta\dot{\mathbf{p}}_E)^T \Delta\dot{\mathbf{p}}_E + K_{P_o} \{ (\eta - 1)^2 + \Delta\boldsymbol{\epsilon}^T \Delta\boldsymbol{\epsilon} \} + \frac{1}{2} \Delta\boldsymbol{\omega}_E^T \Delta\boldsymbol{\omega}_E + \Delta\mathbf{q}_C^T \mathbf{K}_{P_C} \Delta\mathbf{q}_C + \Delta\dot{\mathbf{q}}_C^T \Delta\dot{\mathbf{q}}_C \\ & \geq 0 \end{aligned} \quad (29)$$

このとき

$$\dot{V} = 2\Delta\dot{\mathbf{p}}_E^T (\Delta\dot{\mathbf{p}}_E + \mathbf{K}_{P_p} \Delta\mathbf{p}_E) + 2K_{P_o} \{ (\eta - 1)\dot{\eta} + \Delta\boldsymbol{\epsilon}^T \Delta\dot{\boldsymbol{\epsilon}} \} + \Delta\boldsymbol{\omega}_E^T \Delta\dot{\boldsymbol{\omega}}_E + 2\Delta\dot{\mathbf{q}}_C^T (\Delta\dot{\mathbf{q}}_C + \mathbf{K}_{P_C} \Delta\mathbf{q}_C) \quad (30)$$

ここで $\dot{V} \leq 0$ を示す準備として、式(25)から、以下を得ておく。

$$\Delta\dot{\mathbf{p}}_E + \mathbf{K}_{P_p} \Delta\mathbf{p}_E = -\mathbf{K}_{D_p} \Delta\dot{\mathbf{p}}_E \quad (31)$$

また、クオータニオンの定義から以下を得る⁽²⁹⁾。

$$\dot{\eta} = -\frac{1}{2} \Delta\boldsymbol{\epsilon}^T \Delta\boldsymbol{\omega}_E \quad (32)$$

さらに

$$\Delta\dot{\boldsymbol{\epsilon}} = \frac{1}{2} \mathbf{E}(\eta, \Delta\boldsymbol{\epsilon}) \Delta\boldsymbol{\omega}_E \quad (33)$$

ここで、 $\mathbf{E}(\eta, \Delta\boldsymbol{\epsilon})$ は、

$$\mathbf{E}(\eta, \Delta\boldsymbol{\epsilon}) = \eta \mathbf{I} - \mathbf{S}(\Delta\boldsymbol{\epsilon}) \quad (34)$$

である、また $\mathbf{S}(\mathbf{a})$ は $\mathbf{S}(\mathbf{a})\mathbf{b} = \mathbf{a} \times \mathbf{b}$ を満たす歪対称行列である。さらに、式(28)から、

$$\Delta\ddot{\mathbf{q}}_C + \mathbf{K}_{P_C} \Delta\mathbf{q}_C = -\mathbf{K}_{D_C} \Delta\dot{\mathbf{q}}_C \quad (35)$$

以上の準備をもとに式(32)、式(33)を式(30)に代入することで、

$$\begin{aligned} \dot{V} = & 2\Delta\dot{\mathbf{p}}_E^T (\Delta\dot{\mathbf{p}}_E + \mathbf{K}_{P_p} \Delta\mathbf{p}_E) + 2K_{P_o} \left\{ (\eta - 1) \left(-\frac{1}{2} \Delta\boldsymbol{\epsilon}^T \Delta\boldsymbol{\omega}_E \right) + \frac{1}{2} \Delta\boldsymbol{\epsilon}^T \mathbf{E}(\eta, \Delta\boldsymbol{\epsilon}) \Delta\boldsymbol{\omega}_E \right\} \\ & + \Delta\boldsymbol{\omega}_E^T \Delta\dot{\boldsymbol{\omega}}_E + 2\Delta\dot{\mathbf{q}}_C^T (\Delta\dot{\mathbf{q}}_C + \mathbf{K}_{P_C} \Delta\mathbf{q}_C) \end{aligned} \quad (36)$$

さらに式(31)、式(35)または式(26)の $\Delta\dot{\boldsymbol{\omega}}_E$ を上式に代入して、

$$\begin{aligned} \dot{V} = & 2\Delta\dot{\mathbf{p}}_E^T (-\mathbf{K}_{D_p} \Delta\dot{\mathbf{p}}_E) + K_{P_o} \left\{ -(\eta - 1) \Delta\boldsymbol{\epsilon}^T \Delta\boldsymbol{\omega}_E + \Delta\boldsymbol{\epsilon}^T \mathbf{E}(\eta, \Delta\boldsymbol{\epsilon}) \Delta\boldsymbol{\omega}_E \right\} \\ & + \Delta\boldsymbol{\omega}_E^T (-\mathbf{K}_{D_o} \Delta\boldsymbol{\omega}_E - \mathbf{K}_{P_o} \mathbf{R}_E \Delta^E \boldsymbol{\epsilon}) + 2\Delta\dot{\mathbf{q}}_C^T (-\mathbf{K}_{D_C} \Delta\dot{\mathbf{q}}_C) \end{aligned} \quad (37)$$

次に式(34)と $\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{S}(\Delta\boldsymbol{\varepsilon})\Delta\boldsymbol{\omega} = \Delta\boldsymbol{\varepsilon}^T (\Delta\boldsymbol{\varepsilon} \times \Delta\boldsymbol{\omega}) = \mathbf{0}$ および $\mathbf{R}_E \Delta^E \boldsymbol{\varepsilon} = \Delta\boldsymbol{\varepsilon}$ と $\mathbf{K}_{P_o} = K_{P_o} \mathbf{I}$ に注意すると

$$\begin{aligned}\dot{V} &= -2\Delta\dot{\mathbf{p}}_E^T \mathbf{K}_{D_p} \Delta\dot{\mathbf{p}}_E + K_{P_o} \left\{ -(\eta-1)\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^T \Delta\boldsymbol{\omega}_E + \eta\Delta\boldsymbol{\varepsilon}^T \Delta\boldsymbol{\omega}_E - \Delta\boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{S}(\Delta\boldsymbol{\varepsilon})\Delta\boldsymbol{\omega}_E \right\} \\ &\quad - \Delta\boldsymbol{\omega}_E^T \mathbf{K}_{D_o} \Delta\boldsymbol{\omega}_E - K_{P_o} \Delta\boldsymbol{\omega}_E^T \Delta\boldsymbol{\varepsilon} - 2\Delta\dot{\mathbf{q}}_C^T \mathbf{K}_{D_C} \Delta\dot{\mathbf{q}}_C \\ &= -2\Delta\dot{\mathbf{p}}_E^T \mathbf{K}_{D_p} \Delta\dot{\mathbf{p}}_E + K_{P_o} \Delta\boldsymbol{\varepsilon}^T \Delta\boldsymbol{\omega}_E \\ &\quad - \Delta\boldsymbol{\omega}_E^T \mathbf{K}_{D_o} \Delta\boldsymbol{\omega}_E - K_{P_o} \Delta\boldsymbol{\omega}_E^T \Delta\boldsymbol{\varepsilon} - 2\Delta\dot{\mathbf{q}}_C^T \mathbf{K}_{D_C} \Delta\dot{\mathbf{q}}_C \\ &= -2\Delta\dot{\mathbf{p}}_E^T \mathbf{K}_{D_p} \Delta\dot{\mathbf{p}}_E - \Delta\boldsymbol{\omega}_E^T \mathbf{K}_{D_o} \Delta\boldsymbol{\omega}_E - 2\Delta\dot{\mathbf{q}}_C^T \mathbf{K}_{D_C} \Delta\dot{\mathbf{q}}_C \leq 0\end{aligned}\quad (38)$$

ここで、 \mathbf{K}_{D_p} 、 \mathbf{K}_{D_o} と \mathbf{K}_{D_C} は正定であるから、 $\Delta\dot{\mathbf{p}}_E = \mathbf{0}$ 、 $\Delta\boldsymbol{\omega}_E = \mathbf{0}$ および $\Delta\dot{\mathbf{q}}_C = \mathbf{0}$ の場合のみ、 $\dot{V} = 0$ となる。 $\Delta\dot{\mathbf{p}}_E = \mathbf{0}$ に対して $\Delta\dot{\mathbf{p}}_E = \mathbf{0}$ となり、式(25)から $\Delta\mathbf{p}_E = \mathbf{0}$ を得る。同様に $\Delta\dot{\mathbf{q}}_C = \mathbf{0}$ のとき式(28)から $\Delta\mathbf{q}_C = \mathbf{0}$ となる。さらに $\Delta\boldsymbol{\omega}_E = \mathbf{0}$ となる時、 $\Delta\dot{\mathbf{q}}_C = \mathbf{0}$ となる。よって式(26)から、 $\Delta^E \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{0}$ となることが分かる。

以上よりクオータニオンの回転角の定義域は $(-\pi, \pi)$ であるためこの範囲で、マニピュレータとカメラは次の不变集合 s に漸近的に収束する。

$$s = \{\Delta\mathbf{p}_E = \mathbf{0}, \Delta\dot{\mathbf{p}}_E = \mathbf{0}, {}^E \eta = 1, \Delta^E \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{0}, \Delta\boldsymbol{\omega}_E = \mathbf{0}, \Delta\mathbf{q}_C = \mathbf{0}, \Delta\dot{\mathbf{q}}_C = \mathbf{0}\} \quad (39)$$

したがって以下が成り立つ。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta\mathbf{p}_E = \mathbf{0}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta\dot{\mathbf{p}}_E = \mathbf{0}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta^E \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{0} \quad (40)$$

このとき以下を得る。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} {}^E \mathbf{T}_{Ed} = \mathbf{I}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} {}^E \dot{\mathbf{T}}_{Ed} = \mathbf{0} \quad (41)$$

上式はハンドを意味する座標系 Σ_E が目標の座標系 Σ_{Ed} に収束することを示している。

また、式(39)より

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{q}_C = \mathbf{q}_{Cd} \quad (42)$$

となる。よって、以下が与えられる。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} {}^R z_{\hat{M}} = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} {}^R y_{\hat{M}} = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} {}^L y_{\hat{M}} = 0 \quad (43)$$

ここで ${}^R z_{\hat{M}} = {}^L z_{\hat{M}}$ であるから、上式はカメラが回転することで射影された物体がカメラの中心に収束することを示している。

以上の $V \geq 0, \dot{V} \leq 0$ 議論は、式(25), (28)の安定な時不变線形独立なシステムと式(26)を同時に評価する形で考えた。しかし式(25), (28), (26)は互いに独立であるので、上記の安定性解析から式(25)と(28)に関する評価を除外しても結果は同じ意味を持つ。この場合式(29)の右辺第1,2,5,6項を除いてV関数を定義すればよい。

5. Hand / Eye-Vergence ビジュアルサーボ

提案するハンドアイビジュアルサーボシステムの有効性を確認するため、図7のように赤、緑、青のボールから構成される3次元マーカへのビジュアルサーボのシミュレーションを行う。

5.1 シミュレーション条件

Hand / Eye-Vergence の動特性に関して認識誤差 ${}^M \mathbf{T}_{\hat{M}}$ は関与しない。したがって、ここでは ${}^M \mathbf{T}_{\hat{M}} = \mathbf{I}$ を仮定し、認識系は、 Σ_E で表された対象物の正しい位置 / 姿勢 ${}^E \mathbf{T}_M$ を計測できるものとする。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 、 Σ_{E_0} 、 Σ_{M_0} の関係を図7に示す。 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。

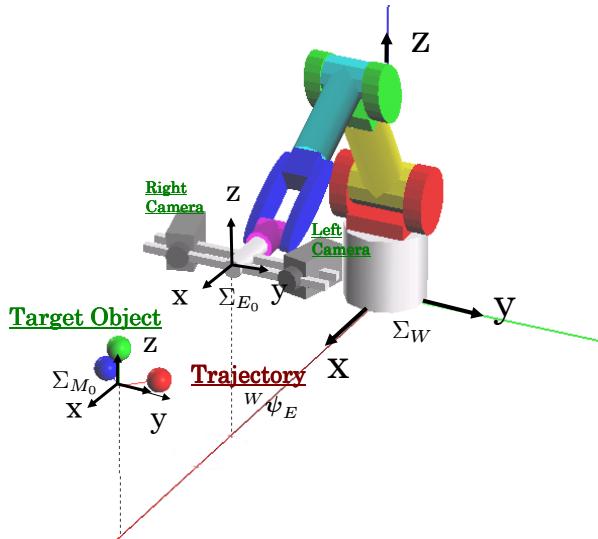


Fig. 7 Coordinate Systems

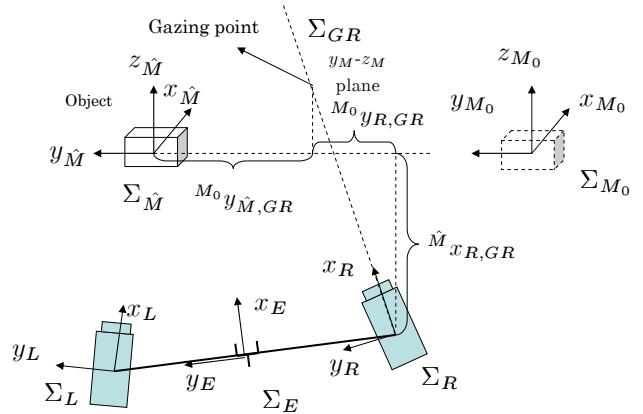


Fig. 8 Cameras' and End effector's Gazing Point

$${}^W \mathbf{T}_{M_0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1388[\text{mm}] \\ 0 & 1 & 0 & 0[\text{mm}] \\ 0 & 0 & 1 & 455[\text{mm}] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (44)$$

図 7において Σ_{E_0} と Σ_{M_0} の原点の距離は Σ_{E_0} の x 軸方向に 1388[mm] であり、カメラ位置と Σ_{E_0} の原点の Σ_{E_0} の z 方向の距離は 455[mm] である。 Σ_{E_0} の y 軸方向と Σ_{M_0} の y 軸方向は一致している。一方、物体の運動は Σ_{M_0} の y 軸に沿って運動し、次式で与える。次式は Σ_{M_0} で表した目標対象物が Σ_{M_0} の y 軸方向に時変目標位置として与えられていること、周期 $T = (2\pi/\omega)$ は、式 (46) の ω の設定によって変更可能であることを表す。この設定は、EV 機能の評価を周波数応答特性を通して調べるためにある。

$${}^{M_0} \boldsymbol{\psi}_M = [0, {}^{M_0} y_M(t), 0, 0, 0, 0]^T \quad (45)$$

$${}^{M_0} y_M(t) = 200 \sin(\omega t)[\text{mm}] \quad (46)$$

物体とハンドの相対的位置・姿勢の目標関係は時不变とし、

$${}^E \boldsymbol{\psi}_{Md} = [500[\text{mm}], 0, 0, 0, 0, 0] \quad (47)$$

と定める。またロボット本体のゲイン \mathbf{K}_{D_p} , \mathbf{K}_{P_p} , \mathbf{K}_{D_o} , \mathbf{K}_{P_o} の値はロボットの慣性質量、駆動アンプの出力等多くの原因に関係する。一般的にアイカメラ部の慣性質量はロボット本体のそれに比べて非常に小さいことから、固有振動数が大きくなる。これらの状況をシミュレーション条件に考慮するため、 \mathbf{K}_{D_C} , \mathbf{K}_{P_C} の値を \mathbf{K}_{D_p} 等に比べて大きく設定した。すなわち $\mathbf{K}_{P_C} = \text{diag}\{5, 5, 5\}$, $\mathbf{K}_{D_C} = \text{diag}\{3, 3, 3\}$, $\mathbf{K}_{P_p} = \mathbf{K}_{P_o} = \mathbf{K}_{D_p} = \mathbf{K}_{D_o} = \text{diag}\{1, 1, 1\}$ と設定した。

5.2 Trackability の定義

5.2.1 カメラ Trackability

ここでは、カメラ Trackability を定義する。カメラの観測能力を調べるため、まず、カメラの注視点を規定する。右カメラの注視点とは、図 8 に示す右カメラ Σ_R の Gazing Point を意味し、右カメラのカメラ視線方向と Σ_{M_0} の $y_{M_0}-z_{M_0}$ 平面上の交点を表している。 Σ_{M_0} から Σ_R までの同次変換行列 ${}^{M_0} \mathbf{T}_R$ には姿勢行列 ${}^{M_0} \mathbf{R}_R$ と位置ベクトル ${}^{M_0} \mathbf{p}_R$ が含まれる。この姿勢行列は 3 つのベクトル $[{}^{M_0} \mathbf{x}_R, {}^{M_0} \mathbf{y}_R, {}^{M_0} \mathbf{z}_R]$ で表現できる。図 8 の右カメラの注視線 ${}^{M_0} \mathbf{l}_R$

は Σ_R の x 軸方向であるから Σ_{M_0} で表した注視線の方程式は、次式の方程式で表せる。

$${}^{M_0}\mathbf{l}_R = {}^{M_0}\mathbf{p}_R + k_R {}^{M_0}\mathbf{x}_R \quad (48)$$

ここで k_R スカラー変数である。 Σ_{M_0} で表した右カメラ注視点 ${}^{M_0}\mathbf{p}_{GR}$ は ${}^{M_0}\mathbf{p}_{GR} = [0, {}^{M_0}y_{GR}, {}^{M_0}z_{GR}]^T$ であり、注視点では ${}^{M_0}\mathbf{l}_R = {}^{M_0}\mathbf{p}_{GR}$ が成立し、その x 成分の関係は $({}^{M_0}\mathbf{p}_R)_x + k_R({}^{M_0}\mathbf{x}_R)_x = 0$ となる。通常 $({}^{M_0}\mathbf{x}_R)_x \neq 0$ であり、 $k_R = -({}^{M_0}\mathbf{p}_R)_x / ({}^{M_0}\mathbf{x}_R)_x$ となる。この k_R を用いて、注視点の y, z 座標は

$${}^{M_0}y_{GR} = ({}^{M_0}\mathbf{p}_R)_y + k_R({}^{M_0}\mathbf{x}_R)_y \quad (49)$$

$${}^{M_0}z_{GR} = ({}^{M_0}\mathbf{p}_R)_z + k_R({}^{M_0}\mathbf{x}_R)_z \quad (50)$$

と求められ、 $[0, {}^{M_0}y_{GR}, {}^{M_0}z_{GR}]$ が Σ_{M_0} で表された注視点の座標である。 Σ_{M_0} で表された対象物の運動は式(45)の ${}^{M_0}\boldsymbol{\psi}_M$ で与えられ、前節で位置・姿勢の計測誤差は零と仮定しているので、 ${}^{M_0}\boldsymbol{\psi}_{\hat{M}} = {}^{M_0}\boldsymbol{\psi}_M$ である。物体 M は Σ_{M_0} の y 軸方向のみの並進運動で、式(45)の y 軸方向の入力 ${}^{M_0}y_M(t)$ に対し、右カメラの注視点の応答は ${}^{M_0}y_{GR}(t)$ である。この入力 ${}^{M_0}y_M(t)$ に対する、注視点の出力 ${}^{M_0}y_{GR}(t)$ の周波数応答を右カメラの Trackability と定義する。左カメラの Trackability も同様に定義する。

5.2.2 固定カメラ / 手先 Trackability

固定カメラシステムの Trackability を調べるため、固定カメラの注視点の定義も必要である。ここでは、単眼カメラが Σ_E の x_E 方向が注視線と一致するように固定されているものとする。したがって、 Σ_E が設定されているハンドの注視点は固定カメラシステムの注視点と等しい。この手先の注視点は右カメラの注視点と全く同様に定義できる。図 8 のように手先の注視線は次式となる方程式で表せる。

$${}^{M_0}\mathbf{l}_E = {}^{M_0}\mathbf{p}_E + k_E {}^{M_0}\mathbf{x}_E \quad (51)$$

ここで k_E もスカラー変数である。手先の注視点も $y_{M_0}-z_{M_0}$ 平面内にあるので、 $k_E = -({}^{M_0}\mathbf{p}_E)_x / ({}^{M_0}\mathbf{x}_E)_x$ である。手先注視点の y, z 座標は

$${}^{M_0}y_{GE} = ({}^{M_0}\mathbf{p}_E)_y + k_E({}^{M_0}\mathbf{x}_E)_y \quad (52)$$

$${}^{M_0}z_{GE} = ({}^{M_0}\mathbf{p}_E)_z + k_E({}^{M_0}\mathbf{x}_E)_z \quad (53)$$

と求められ、 $[0, {}^{M_0}y_{GE}, {}^{M_0}z_{GE}]$ が Σ_{M_0} で表された手先の注視点の座標である。

5.3 シミュレーション結果

対象物の初期位置 ${}^W\mathbf{T}_{M_0}$ を式(44)に、対象物の運動を式(45)に、また、ハンドと対象物の目標位置姿勢関係を式(47)に示している。式(46)の ω を $\omega = 0.01 \sim 2.00$ と変化させて Hand/EV ビジュアルサーボの周波数応答実験を行った。ゲイン曲線、位相曲線をそれぞれ図 9(a), (b) に示す。図 9(a) および図 9(b) は固定カメラシステムと EV システムの振幅周波数曲線と位相周波数曲線を表す。ここで固定カメラシステムの場合、 $A = {}^{M_0}y_M(t)$ で、 $B = {}^{M_0}y_{GE}(t)$ である。また右カメラの Eye-Vergence システムの場合、 $A = {}^{M_0}y_M(t)$, $B = {}^{M_0}y_{GR}(t)$ 、左カメラの場合、 $A = {}^{M_0}y_M(t)$, $B = {}^{M_0}y_{GL}(t)$ である。両図において、横軸は ω の対数目盛りとしている。(a), (b) 中に $\omega = 0.1256, 0.5024, 1.256$ の記述があるが、それぞれの周波数における時間応答波形を (c), (d), (e) に示す。(a), (b) の図中 “End effector” と指示している曲線は固定カメラ / 手先 Trackability を表し、Right Camera, Left Camera と指示している曲線は EV システムのゲイン曲線と位相曲線である。

$\omega = 0.1256$ は、ハンドとカメラの動きが対象物を追従できる周波数であり、 $\omega = 0.5024$ はカメラは追従できるがハンドは追従できない、 $\omega = 1.256$ のとき、カメラがまだ対象物を追跡できる周波数である。

図 9(a)において、カメラの注視点の振幅はハンドよりも小さい。 $\omega = 0.1$ までは、ハンドとカメラの可追跡性はほぼ等しいが、 ω が増すにしたがってハンドの共振の振幅は、カメラよりも大きくなる。 ω が 0.5024 となるとき、固定カメラシステムはその視界から物体を見失う。このため図 9(a)の点線は、 $\omega = 0.5024$ 付近で途切れている。一方、EV システムにおいては、カメラの視界に物体を常に捉えつづけることができる角速度の最大値は

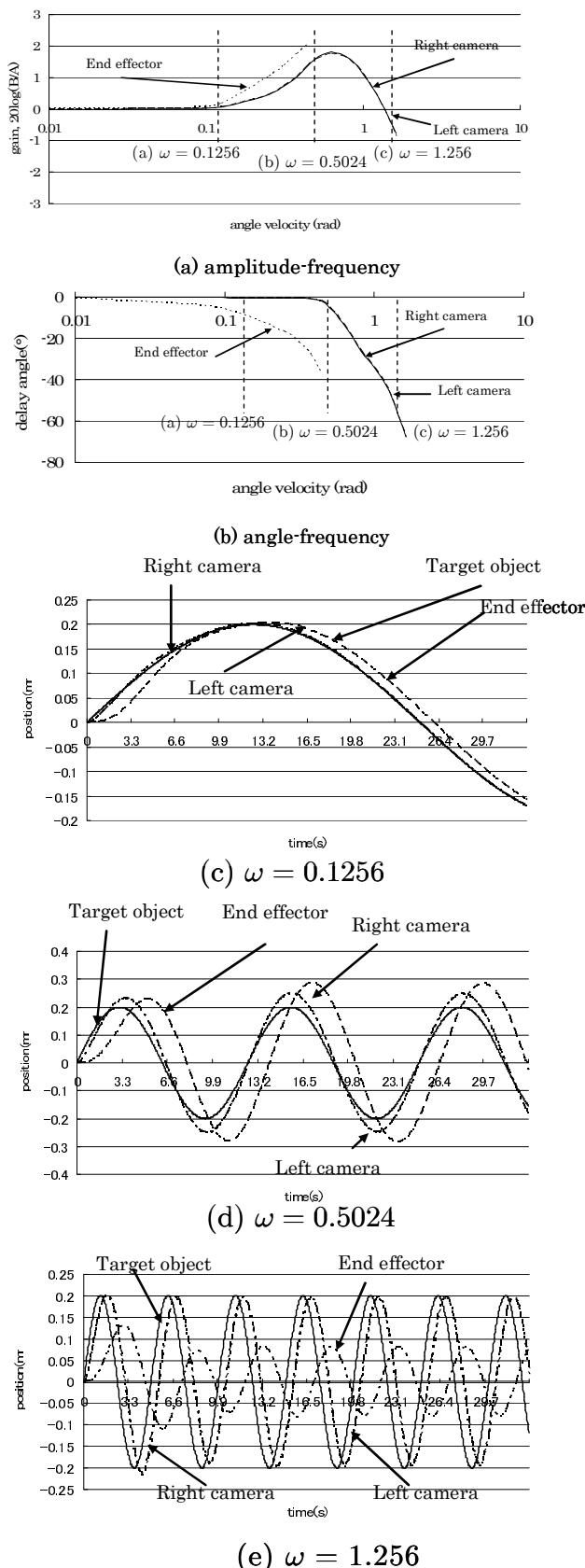


Fig. 9 Comparison of Cameras' and End-effector's Trackabilities by Frequency Response

1.6956 である。図 9 (b) から同じ ω でカメラの位相はほぼ遅れのない状態であるが、ハンドは 40 度程度遅れている。図 9 (c)-(e) に対象物と手先と両眼の時間応答波形を示す。この三つ図より、EV 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。よって、EV 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 / Trackability を有することが分かる。

おわりに

本論文では、ビジュアルサーボシステムの移動物体に対する観測能力を向上させるために Hand/Eye-Vergence システムを提案し、その重要性について紹介した。提案するシステムのコントローラは、対象物の方向にマニピュレータのハンドを向ける従来のビジュアルサーボループと、目標物をカメラ中央で正確に観測するための両眼カメラの能動的な姿勢制御ループの二つを持つ。本報では、提案した二重 EV システム定常目標位置/姿勢のハンドとカメラの安定性について、両方とも漸近安定であることを確認した。さらに本報では、能動カメラシステムの観測性能を評価するための指標となる可追跡性、Trackability を提案した。この指標を用いて、固定カメラシステムと EV システムのカメラの周波数特性を比較し、EV 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。

文献

- (1) S.Hutchinson, G.Hager, and P.Corke, "A Tutorial on Visual Servo Control," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 5(1996), pp. 651-670.
- (2) F. Chaumette and S. Hutchinson, "Visual Servo Control, Part 1: Basic Approaches," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, December(2006), pp.82-90.
- (3) G. Chesi, K. Hashimoto, D. Prattichizzo, and A. Vicino, "Keeping features in the field of view in eye-in-hand visual servoing: a switching approach," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 20, Issue 5(2004), pp.908-914.
- (4) W. J. Wilson, C. C. Williams Hulls, and G. S. Bell, "Relative End-effector Control Using CartesianPosition Based Visual Servoing," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 5(1996), pp. 684-696.
- (5) T. Omar and C. Francois, "Point-Based and Region-Based Image Moments for Visual Servoing of Planar Objects," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No. 6(2005), pp.1116-1127.
- (6) T. Hamel and R. Mahony, "Visual Servoing of an Under-Actuated Dynamic Rigid-Body System: An Image-Based Approach," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 18, Issue 2(2002), pp.187-198.
- (7) F. Chaumette, "Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing," in *The Confluence of Vision and Control*, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 237(1998), pp 66-78.
- (8) G. Morel, T. Leibezeit, J. Szewczyk, S. Boudet, and J. Pot, "Explicit incorporation of 2D constraints in vision based control of robot manipulators," in *Experimental Robotics VI*, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 250(2000), pp.99-108.
- (9) B. Thuilot, P. Martinet, L. Cordesses, and J. Gallice, "Position based visual servoing: Keeping the object in the field of vision," in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*(2002), pp.1624-1629.
- (10) G.K. Hung, "Comments on Effect of Vergence Adaptation on Convergence Accommodation: Model Simulations," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 57, Issue 11(2010), pp.2787-2789.
- (11) V. Sreenivasan, W.R. Bobier, E.L. Irving, and V. Lakshminarayanan, "Effect of Vergence Adaptation on Convergence-Accommodation: Model Simulations," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 56, Issue 10(2009), pp.2389-2395.
- (12) L. Ziyi and B.E. Shi, "Subpixel resolution binocular visual tracking using analog VLSI vision sensors," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, Vol. 47, Issue 12(2000), pp.1468-1475.
- (13) K. Shimonomura and T. Yagi, "Neuromorphic vergence eye movement control of binocular robot vision," *Proceedings of International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*(2010), pp.1774-1779.

- (14) M. Shah, Kim Eun, B. Granger-Donetti, J.L. Semmlow, and T.L. Alvarez, "Neural control in vergence eye movements," *Proceedings of Bioengineering Conference*(2010), pp.1-2.
- (15) W. Song, M. Minami, Y. Mae, and S. Aoyagi, "On-line Evolutionary Head Pose Measurement by Feedforward Stereo Model Matching," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*(2007), pp.4394-4400.
- (16) 宋薇, 見浪護, 青柳誠司, "クオータニオンを用いたフィードフォワードオンラインポーズ遺伝的認識法", 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.1(2010), pp.55-64.
- (17) F. Yu, M. Minami, W. Song, J. Zhu, and A. Yanou, "On-line Head Pose Estimation with Binocular Hand-eye Robot Based on Evolutionary Model-Based Matching," *Journal of Computer and Information Technology*, Vol.2, No.1(2012), pp.43-54.
- (18) W. Song and M. Minami, "Stability / Precision Improvement of 6-DoF Visual Servoing by Motion Feedforward Compensation and Experimental Evaluation," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*(2009), pp.722-729.
- (19) W. Song and M. Minami, "Hand and Eye-Vergence Dual Visual Servoing to Enhance Observability and Stability," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*(2009), pp.714-721.
- (20) F. Yu, W. Song, and M. Minami, "Visual Servoing with Quick Eye-Vergence to Enhance Trackability and Stability," *Proceedings of SI2009*, 1D2-6(2009).
- (21) 宋薇, 見浪護, "フィードフォワード遺伝的認識法を用いた3-Dビジュアルサーボ", 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.5(2010), pp.591-598.
- (22) W. Song, M. Minami, F. Yu., A. Yanou, and M. Deng, "High Tracking Experimental Performances by Approaching Hand/Eye-Vergence Visual Servoing," *Proceedings of International Conference of SCIS/ISIS 2010*(2010), pp.956-962.
- (23) F. Yu, W. Song, M. Minami, and A. Yanou, "Frequency Response of 3-D Full-tracking Visual Servoing Experiment with Eye-Vergence," *Proceedings of IECON 2011*(2011), pp.106-111.
- (24) K. Maeda, M. Minami, A. Yanou, H. Matsumoto, F. Yu, and S. Hou, "Frequency Response Experiments of 3-D Full Tracking Visual Servoing with Eye-Vergence Hand-Eye Robot System," *Proceedings of SICE Annual Conference*(2012), pp.101-107.
- (25) P.Y.Oh and P.K.Allen, "Visual Servoing by Partitioning Degrees of Freedom," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 1(2001), pp. 1-17.
- (26) 関本昌紘, 有本卓, "仮想バネ・ダンパー仮説に基づいた冗長関節ロボットアーム制御法の実験的検証", 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 5(2007), pp.785-791.
- (27) T. Maeba, M. Minami, A. Yanou, and J. Nishiguchi, "Dynamical Analyses of Humanoid's Walking by Visual Lifting Stabilization Based on Event-driven State Transition," *Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*(2012), pp.7-14.
- (28) 美多勉, 大須賀公一, ロボット制御工学入門 (1989), コロナ社.
- (29) B.Siciliano and L.Villani, *Robot Force Control* (1999), Springer.