

Eye-Vergence を用いたロボットのビジュアルサーボ周波数応答特性実験

Frequency Response Experiments of 3-D Full-Tracking Visual Servoing with Eye-Vergence Hand-Eye Robot System

学 前田 耕市 (岡山大) 正 見浪 護 (岡山大)
于 福佳 (岡山大) 正 矢納 陽 (岡山大)

Koichi MAEDA, Okayama University, maeda@suri.sys.okayama-u.ac.jp
Mamoru MINAMI, Okayama University
Fujia YU, Okayama University
Akira YANOU, Okayama University

Visual Servoing researches for hand-eye configuration having been presented so far seem to be vulnerable for tracking ability since it may lose a moving target. Our proposal to solve this problem is that the controller for visual servoing of the hand and the eye-vergence should be separated independently based on decoupling the motions each other. Based on this prerequisite the eye-vergence system to track target object by camera to be in view sight can have higher trackability than conventional visual servoing with fixed cameras. We have confirmed this superiority of eye-vergence system through frequency response visual servoing experiments with full 3-D pose tracking.

Key Words: Visual servoing, Eye-vergence, Frequency response

1. 緒 言

ハンドアイ構成は固定カメラ構成に比べて追従動作の際のハンドの振動によってサーボ動作が不安定になりやすい欠点を持つが、適応的に視点を選択できるといった長所がある。本報では二つのカメラを持つハンドアイ構成のビジュアルサーボについて考える。対象物形状が既知であることを仮定すると、単眼でも位置/姿勢の6変数を計測することは可能であるが、カメラ対象物間の距離の計測精度に問題があることは、良く知られており、ここでは複眼構成を採用する。

ハンドアイシステムであっても、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、下記の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。そこで上述の問題を解決するため、本論文ではEye-Vergenceという、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システムを提案する。カメラの姿勢を変えることが可能になるので、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システムにメリットを示す。(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って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。

本報告は、Eye-vergence ビジュアルサーボの追跡性能と安定性を周波数応答特性を測定し、固定カメラシステムに比べて優れた追従性を持つことを検証する。

2. ハンドアイビジュアルサーボシステム

2.1 目標軌道生成

図3に示すように、作業座標系を Σ_W で記述し、目標物に固定した座標系を Σ_M で記述する。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。ロボットアームの各関節の角度を $q_E = [q_1, \dots, q_7]$ とし、カメラ

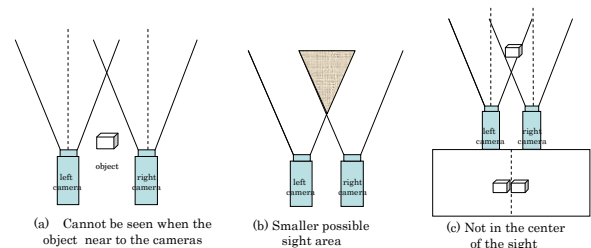


Fig. 1 Disadvantage of fixed camera system

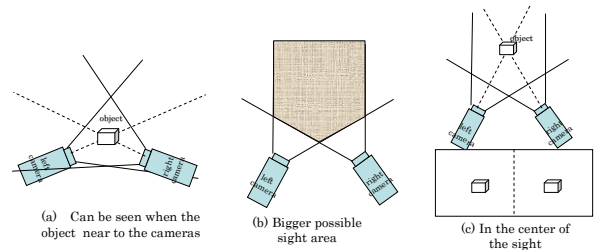


Fig. 2 Advantage of Eye-vergence system

のパンチルト角を $q_c = [q_8, q_9, q_{10}]$ とする。ハンドの目標状態と目標物との相対的な位置/姿勢関係は ${}^{Ed}T_M$ として同次変換によって与えられる。目標物と実際のハンドとの関係は ${}^E T_M$ によって与えられる。このとき、実際のハンド Σ_E とハンドの目標 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。

$${}^E T_{Ed}(t) = {}^E T_M(t) {}^{Ed} T_M^{-1}(t) \quad (1)$$

式(1)は任意の目標物の運動 ${}^W T_M(t)$ と任意の時変ビジュアルサーボの目標運動 ${}^{Ed} T_M(t)$ を含む一般的な形である。 ${}^E T_M(t)$ は1-step GA^[1]とオンラインモデルベース認識法を使ったカメラ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。そこでビジュアルサーボでは、式(1)で表される位置/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。

$${}^E T_{Ed}(t) = {}^E T_{\hat{M}}(t) {}^{Ed} T_{\hat{M}}^{-1}(t) \quad (2)$$

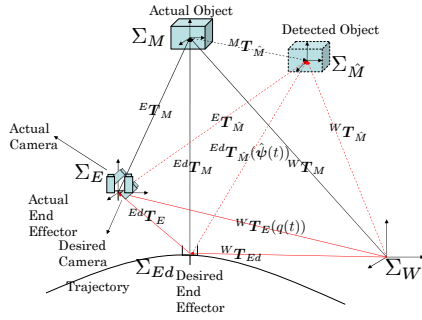


Fig. 3 Motion of hand and object

${}^{Ed}T_M^{-1} = \hat{M}T_{Ed}$ より式 (2) は,

$${}^E T_{Ed}(t) = {}^E T_{\hat{M}}(t) \hat{M} T_{Ed}(t) \quad (3)$$

時間に関して式 (3) を 2 回微分すると以下の式を得る.

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

ここで $\hat{M}T_{Ed}$, $\hat{M}\dot{T}_{Ed}$, $\hat{M}\ddot{T}_{Ed}$ はビジュアルサーボの目標として与えられ, ${}^E T_{\hat{M}}$, ${}^E \dot{T}_{\hat{M}}$, ${}^E \ddot{T}_{\hat{M}}$ 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. 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, ${}^M T_{\hat{M}}$ の誤差は 1-step GA のオンライン認識法, MFF 補償法によってゼロに収束することをリアプノフ法により確認し, 実験は小さい値に減少することを確認している [3]. さらに ${}^E T_{Ed}$ 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 [4].

2.2 ハンド指示加速度

提案するハンド Eye-Vergence 二重ビジュアルサーボコントローラを図 4 に示す. ハンドビジュアルサーボは外側のループで, ハンドビジュアルサーボに対して使用されるコントローラは B.Siciliano [2] によって提案されたものである. ${}^W T_{Ed}$ と ${}^W T_E$ に含まれる位置ベクトルを p_d, p_E とすると, 位置誤差 Δp_E は,

$$\Delta p_E = p_d - p_E \quad (5)$$

以下では, 左上の添え字はベクトルもしくは回転行列が作用する座標を表すものとし, この添え字がない場合は, ベクトルもしくは行列がワールド座標系で表されることを意味するものとする. また姿勢は次のように四元数によって表現する.

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

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

ここで $\Delta^E \epsilon$ は ${}^E T_{Ed}$ の中の回転行列 ${}^E R_{Ed}$ から取り出すことができる. 手先の目標速度はロボット手先の運動軌道を用いて,

$${}^W \dot{r}_d = K_{Pp} {}^W r_{E,Ed} + K_{Vp} {}^W \dot{r}_{E,Ed} \quad (8)$$

と計算される. ここで, ${}^W r_{E,Ed}$, ${}^W \dot{r}_{E,Ed}$ は Σ_E から Σ_W への座標変換を使って ${}^E T_{Ed}$ と ${}^E \dot{T}_{Ed}$ から求められる. K_{Pp} と K_{Vp} は PD ゲインとして与えられる行列である.

ハンドの手先の目標角速度ベクトル ${}^W \omega_d$ は,

$${}^W \omega_d = K_{Po} {}^W R_E^E \Delta \epsilon + K_{Vo} {}^W \omega_{E,Ed} \quad (9)$$

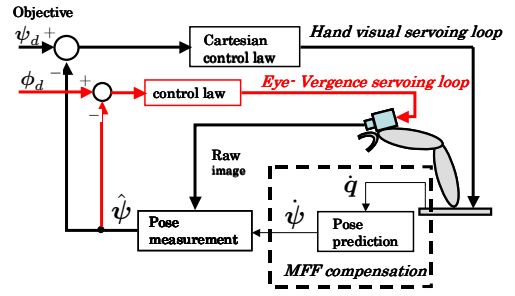


Fig. 4 Hand & Eye-Vergence Visual servo system

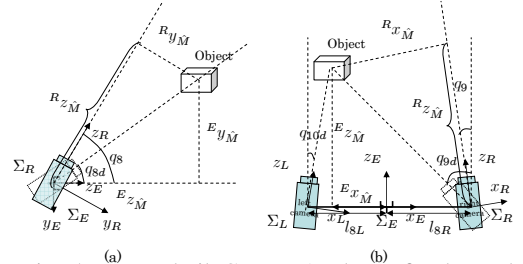


Fig. 5 Pan and Tilt Camera Angles Defined Based on Relation between Target object and Cameras

と与えられる. ここで, ${}^E \Delta \epsilon$ は Σ_E で表されたカメラ座標系から見た対象物の姿勢誤差であり, 認識結果から直接与えられる. ${}^W \omega_{E,Ed}$ は Σ_E から Σ_W への座標変換を使って ${}^E \omega_{E,Ed}$ から求められる. K_{Po} と K_{Vo} は PD ゲインとして与えられる行列である.

マニピュレータの各リンクの目標角度 q_{Ed} は逆運動学を使用して導出することができる.

$$q_{Ed} = f^{-1}({}^W \psi_{Ed}) \quad (10)$$

これを用いて, 目標角度と実際の角度の偏差を以下のように定義する.

$$\Delta q_E = q_{Ed} - q_E \quad (11)$$

以上より, マニピュレータの補償は以下のように計算できる.

$$\dot{q}_{Ed} = K_{Pq} \Delta q_E + J_E^+ \begin{bmatrix} {}^W \dot{r}_d \\ {}^W \omega_d \end{bmatrix} \quad (12)$$

この $J^+(q)$ は $J(q)$ の擬似逆行列であり, $J^+(q) = J^T(JJ^T)^{-1}$ によって得られる. ロボットへの入力トルクは PD 制御により次式によって与えられる.

$$\tau = K_{SP}(q_d - q) + K_{SD}(\dot{q}_d - \dot{q}) \quad (13)$$

ここで, K_{SP} と K_{SD} は PD ゲインとして与えられる行列である.

2.3 Eye-vergence 指示加速度

Eye-Vergence ビジュアルサーボは図 4 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. q_8 は左右カメラ共通のチルト角を表し, q_9 と 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, 認識対象物を左右のハンドアイカメラの中心に映し出す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.

$$q_{8d} = \text{atan2}({}^E y_{\hat{M}}, {}^E z_{\hat{M}}) \quad (14)$$

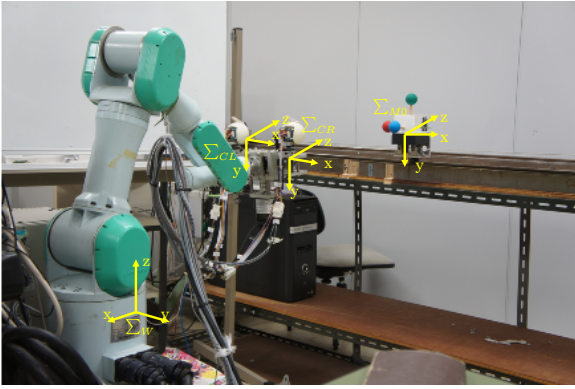


Fig. 6 Coordinate Systems

$$q_{9d} = \text{atan2}(-l_{8R} + {}^E x_{\hat{M}}, {}^E z_{\hat{M}}) \quad (15)$$

$$q_{10d} = \text{atan2}(l_{8L} + {}^E x_{\hat{M}}, {}^E z_{\hat{M}}) \quad (16)$$

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 z 軸とする。カメラシステムの角度の誤差は次のように定義する。

$$\Delta q_C = q_{Cd} - q_C \quad (17)$$

以上より、カメラの補償は以下のように計算できる。

$$\dot{q}_{Cd} = K_{PC} \Delta q_C \quad (18)$$

ここで、 K_{PC} は P ゲインとして与えられる行列である。カメラを制御することで、 ${}^M T_{\hat{M}}$ を減少させるためのより良い観測効果が得られる。

3. 周波数応答特性測定実験

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、Fig.6 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実験を行う。 Σ_M の原点から各ボールの中心までの長さは $95[\text{mm}]$ であり、ボールの半径は $20[\text{mm}]$ である。

3.1 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。 $\Sigma_W, \Sigma_{E_0}, \Sigma_{M_0}$ の関係を Fig.6 に示す。 Σ_W から Σ_{M_0} への同次変換行列、 Σ_W から Σ_{E_0} への同次変換行列は以下のように与えられる。

$${}^W T_{M_0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -1235[\text{mm}] \\ 1 & 0 & 0 & -150[\text{mm}] \\ 0 & -1 & 0 & 555[\text{mm}] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$${}^W T_{E_0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -690[\text{mm}] \\ 1 & 0 & 0 & -150[\text{mm}] \\ 0 & -1 & 0 & 465[\text{mm}] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

一方、物体の運動は Σ_{M_0} の x 軸に沿って運動し、次式で与える。

$${}^{M_0} \psi_M = [{}^{M_0} x_M(t), 0, 0, 0, 0]^T \quad (21)$$

$${}^{M_0} x_M(t) = 150 - 150 \cos(\omega t)[\text{mm}] \quad (22)$$

物体とハンドの相対的位置・姿勢の目標関係は時不変とし、

$${}^{Ed} \psi_M = [0, -90[\text{mm}], 545[\text{mm}], 0, 0, 0] \quad (23)$$

と定める。また、GA の探索範囲は $-200 \leq t_x \leq 200[\text{mm}]$,

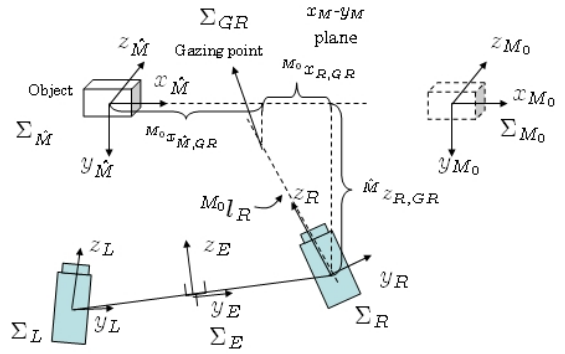


Fig. 7 Cameras' and End effector's Gazing Point

$-195 \leq t_y \leq 5[\text{mm}]$, $350 \leq t_z \leq 750[\text{mm}]$, $-0.3 \leq \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3 \leq 0.3$ と設定した。また、適合度の値が低い場合、対象物を誤認識していると考えられるので、実験中の安全性を考慮し、適合度の値が 0.1 以下の場合、PA10 ハンド部分は停止するように設定した。

ロボット本体のゲイン K_{Pq} , K_{Dp} , K_{Pp} , K_{D_o} , K_{P_o} の値は実験中における安全性を考慮した値を試行錯誤的に決定した。また、今回は $q_8 = 0$ と固定した。すなわち $K_{PC} = \text{diag}\{0, 0.8, 0.8\}$, $K_{DC} = \text{diag}\{0, 0.8, 0.8\}$, $K_{Pp} = K_{Po} = \text{diag}\{0.16, 0.16, 0.16\}$, $K_{Dp} = K_{D_o} = \text{diag}\{0.04, 0.04, 0.04\}$ と設定した。

3.2 Trackability の定義

3.2.1 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、Fig.7 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 x_{M_0} - y_{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 ${}^{M_0} T_R$ には姿勢行列 ${}^{M_0} R_R$ と位置ベクトル ${}^{M_0} p_R$ が含まれる。この姿勢行列は 3 つのベクトル $[{}^{M_0} x_R, {}^{M_0} y_R, {}^{M_0} z_R]$ で表現できる。Fig.7 の右カメラの注視線 ${}^{M_0} l_R$ は Σ_R の z 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。

$${}^{M_0} l_R = {}^{M_0} p_R + k_R {}^{M_0} z_R \quad (24)$$

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 ${}^{M_0} p_{GR}$ は ${}^{M_0} p_{GR} = [{}^{M_0} x_{GR}, {}^{M_0} y_{GR}, 0]^T$ であり、注視点では ${}^{M_0} l_R = {}^{M_0} p_{GR}$ が成立し、その z 成分の関係は $({}^{M_0} p_R)_z + k_R ({}^{M_0} z_R)_z = 0$ となる。通常 $({}^{M_0} z_R)_z \neq 0$ であり、 $k_R = -({}^{M_0} p_R)_z / ({}^{M_0} z_R)_z$ となる。この k_R を用いて、注視点の y, z 座標は

$${}^{M_0} x_{GR} = ({}^{M_0} p_R)_x + k_R ({}^{M_0} z_R)_x \quad (25)$$

$${}^{M_0} y_{GR} = ({}^{M_0} p_R)_y + k_R ({}^{M_0} z_R)_y \quad (26)$$

と求められ、 $[{}^{M_0} x_{GR}, {}^{M_0} y_{GR}, 0]$ 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 (21) の ${}^{M_0} \psi_M$ 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、 ${}^{M_0} \psi_{\hat{M}} = {}^{M_0} \psi_M$ である。物体 M は Σ_{M_0} の x 軸方向のみの並進運動で、式 (21) の x 軸方向の入力 ${}^{M_0} x_M(t)$ に対し、右カメラの注視点の応答は ${}^{M_0} x_{GR}(t)$ である。この入力 ${}^{M_0} x_M(t)$ に対する、注視点の出力 ${}^{M_0} x_{GR}(t)$ 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。

3.2 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 z_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。Fig.7 のように手先の注視線は次式となる方程式で表せる。

$${}^{M_0}l_E = {}^{M_0}p_E + k_E {}^{M_0}z_E \quad (27)$$

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

$${}^{M_0}x_{GE} = ({}^{M_0}p_E)_x + k_E ({}^{M_0}z_E)_x \quad (28)$$

$${}^{M_0}y_{GE} = ({}^{M_0}p_E)_y + k_E ({}^{M_0}z_E)_y \quad (29)$$

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

3.3 実験結果

対象物の初期位置 ${}^W T_{M_0}$ を式 (19) に、対象物の運動を式 (21) に、また、ハンドと対象物の目標位置姿勢関係を式 (23) に示している。式 (22) の ω を $\omega = 0.01 \sim 1.256$ と変化させ、それぞれに対して対象物の目標軌道が既知の場合、 ${}^E x_M$ のみを GA で探索する場合、 ${}^E x_M$ と ${}^E y_M$ を探索する場合、のように位置/姿勢全てを GA で探索する場合までの 7 通りに分け、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。

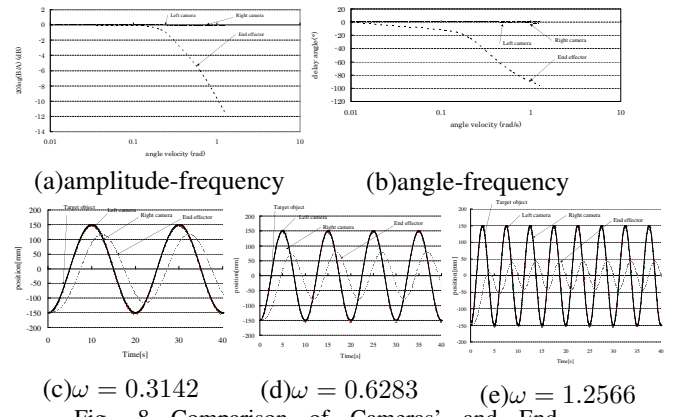
Fig.8 から Fig.10 の (a), (b) はそれぞれ固定カメラシステムと Eye-vergence システムの振幅周波数曲線と位相周波数曲線を表す。両図において、横軸は ω の対数目盛りとしている。また、 $\omega = 0.3142, 0.6283, 1.2566$ の場合の、それぞれの周波数における時間応答波形を (c), (d), (e) に示す。縦軸は、手先カメラの Gazing point と対象物の振幅を示し、横軸は時間である。(a), (b), (c), (d), (e) の図中 “End effector” と指示している曲線は固定カメラ/手先 Trackability を表し、Right camera, Left camera と指示している曲線は Eye-vergence システムのゲイン曲線と位相曲線である。

3.4 考察

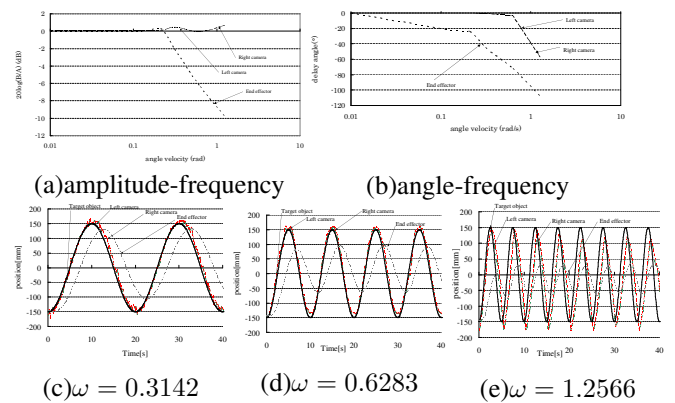
Fig.8 から Fig.10 の (b) より、同じ $\omega = 0.3142$ ではカメラの位相はほぼ遅れのない状態であるが、ハンドは 10 度程度遅れている。Fig.8 から Fig.10(c)-(e) より、EV システムは固定カメラシステムに比べて、振幅の差と位相の遅れが両方とも小さい。よって、EV システムは固定カメラシステムよりも優れた安定性を有し、良い追跡性/Trackability を有することが分かる。しかし、GA による探索空間が増加する程に、カメラの振幅も低下しており、位相の遅れも大きくなっている。これは、GA による対象物の認識の安定性が原因であり、移動物体に対する認識精度の向上は、今後の課題として考えられる。

4. 結言

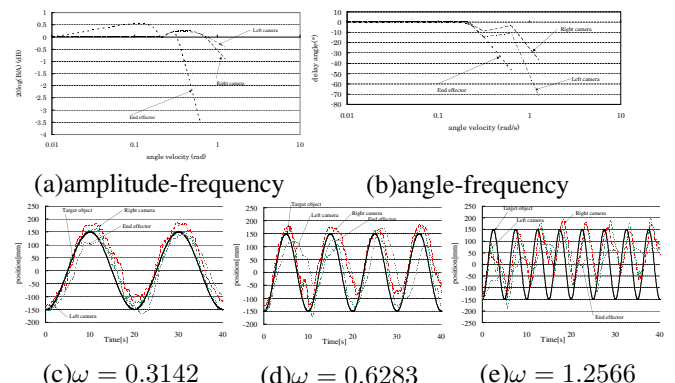
本報では、Eye-Vergence を用いたロボットのビジュアルサーボの周波数応答特性を、実験により測定した。しかし、GA による対象物の誤認識により追従性が落ちてしまったため、今後は移動物体に対する認識精度の向上が課題である。



(c) $\omega = 0.3142$ (d) $\omega = 0.6283$ (e) $\omega = 1.2566$
Fig. 8 Comparison of Cameras' and End-effector's Trackabilities by Frequency Response When a target trajectory is known



(c) $\omega = 0.3142$ (d) $\omega = 0.6283$ (e) $\omega = 1.2566$
Fig. 9 Comparison of Cameras' and End-effector's Trackabilities by Frequency Response when GA searches only ${}^E x_M$



(c) $\omega = 0.3142$ (d) $\omega = 0.6283$ (e) $\omega = 1.2566$
Fig. 10 Comparison of Cameras' and End-effector's Trackabilities by Frequency Response when GA searches ${}^E x_M, {}^E y_M, {}^E z_M, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$

文献

- [1] 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.
- [2] B.Siciliano and L.Villani: *Robot Force Control*, ISBN 0-7923-7733-8.
- [3] 宋 薇, 見浪 護, 青柳 誠司 "クォ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 pp.55-64, 2010.
- [4] 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 pp.591-598, 2010.