

把持物体の位置・姿勢情報欠損にロバストな 視覚サーボによる物体把持・操作手法の実験的検証

Experimental Verification of Robust Visual Servoing for Object Manipulation
with Temporary Loss of Visual Information

○ 河村 晃宏(九大) 田原 健二(九大) 正 倉爪 亮(九大) 正 長谷川 勉(九大)

Akihiro KAWAMURA, Kyushu University, kawamura@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp

Kenji TAHARA, Ryo KURAZUME and Tsutomu HASEGAWA, Kyushu University

In this paper, experimental results of the visual servoing method proposed by us are shown to verify the robustness against temporary loss of visual information. The visual servoing method proposed in our previous work achieves stable grasping and manipulation of an object even if visual information becomes suddenly unavailable during manipulation. However, its effectiveness has only been shown by several numerical simulations. Thus, experiments are conducted using a mechanical hand, and its practical usefulness is verified in this paper. The experimental system consists of three fingers in which each finger has 4DOFs. Position and attitude control of a grasped object with temporary loss of the visual information during manipulation are conducted, and its practical usefulness is demonstrated through the experimental results.

Key Words: Multi-Fingered Hand, Manipulation, Visual Servoing, Virtual Object Frame

1 緒言

視覚センサから得られる物体形状や位置、姿勢の情報を用いた物体把持・操作は、正確性や信頼性、汎用性などが期待できるため、これまでに数多くの研究が行われている [1]。これらの研究の多くは、物体把持・操作を行う間、視覚情報が安定して得られることを前提としているが、現実には、障害物による隠蔽やセンサ視野からの逸脱などにより、視覚情報が一時的に部分欠損する、もしくは全く得られない状況が発生する。視覚情報欠損は、実時間視覚フィードバックを用いたサーボ系において、不安定な挙動を誘発する原因となるため、安定した物体把持・操作の実現には、何らかの対策が必要となる。

筆者らはこれまでに、視覚情報の大部分欠損にロバストな物体把持および位置姿勢制御手法を提案している [2]。本手法は、安定して画像情報が得られる間は、その情報を基に把持物体の位置・姿勢を制御対象とし、視覚情報の欠損が起こった場合は、ロボットハンドの各関節角度情報を用いて定義される仮想的な物体の位置・姿勢を制御対象とする。制御対象の切替え時、視覚情報欠損が起こる直前に得られた実際の物体位置・姿勢情報を用いて、仮想物体位置・姿勢の目標値を適宜設定することにより、切替え前後における入力の変換性を維持し、安定な物体把持・操作を実現する。しかし、これまで数値シミュレーションによる本手法の有効性は示されているが、実機を用いた検証は行われていない。

本稿では、視覚センサと3本指ロボットハンドを用いた把持物体の位置・姿勢制御実験を行い、物体の把持操作中に突然視覚情報が欠損した場合においても、提案手法により物体の把持・操作が破綻することなく安定に行えることを示す。

2 システム構成

実験に用いるロボットハンドは、各指4自由度をもつ指3本で構成され、指先は柔軟で半球形状である。実験機全体を図1に、各パラメータを表1に示す。また、実験機で使用したモータ、ギヤヘッドおよびエンコーダの各仕様を表2に示す。 i 番目の指の関節角を $q_i = [q_{i1}, q_{i2}, q_{i3}, q_{i4}]^T \in$

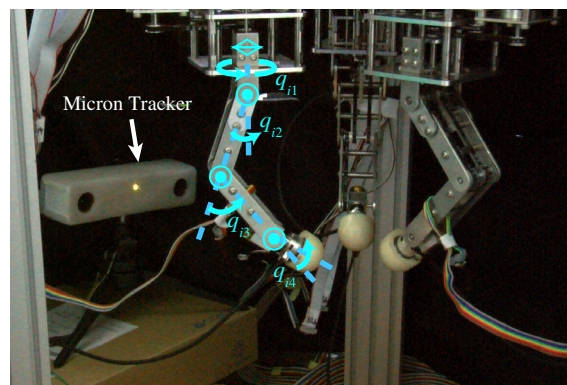


Fig.1 A triple fingered robotic hand and a vision sensor

\mathbb{R}^4 とし、ロボットハンド全体の関節角ベクトルを、 $q = [q_1^T, q_2^T, q_3^T]^T \in \mathbb{R}^{12}$ とする。各指先の半球中心位置を $x_{0i} \in \mathbb{R}^3$ と表し、指先半球中心における指先姿勢を以下に示す回転行列 R_{fi} で表す。

$$R_{fi} = [r_{x_{fi}}, r_{y_{fi}}, r_{z_{fi}}] \in \text{SO}(3), \quad (1)$$

ここで $r_{x_{fi}} \in \mathbb{R}^3$, $r_{y_{fi}} \in \mathbb{R}^3$, $r_{z_{fi}} \in \mathbb{R}^3$ は、それぞれ慣性座標系からみた指先座標系の x 軸, y 軸, z 軸を示す単位ベクトルである。

本実験では、視覚センサとして Claron Technology 社製の Micron Tracker を用いる。本センサは、把持物体に取り付けた専用マーカの3次元位置・姿勢を 50[ms] 毎に計測することが可能である。視覚センサによって得られる把持物体の位置を $x \in \mathbb{R}^3$ と表し、把持物体の姿勢を回転行列 R で表す。ここで

$$R = [r_x, r_y, r_z] \in \text{SO}(3) \quad (2)$$

であり、 $r_x \in \mathbb{R}^3$, $r_y \in \mathbb{R}^3$, $r_z \in \mathbb{R}^3$ は、それぞれ慣性座標系で表された物体座標系の x 軸, y 軸, z 軸を示す単位ベクトルである。

Table 1 Physical parameters

Triple-fingered hand system	
1 st link length l_{i1}	0.064[m]
2 nd link length l_{i2}	0.064[m]
3 rd link length l_{i3}	0.030[m]
1 st mass center l_{gi1}	0.023[m]
2 nd mass center l_{gi2}	0.035[m]
3 rd mass center l_{gi3}	0.010[m]
1 st mass m_{i1}	0.038[kg]
2 nd mass m_{i2}	0.024[kg]
3 rd mass m_{i3}	0.054[kg]
(Finger tip)	
Radius r_i	0.015[m]
Physical properties s_i	2.390×10^6 [N/m ²]

Table 2 Specification of the actuators

Motor Type	DC
Maximum speed [rpm]	9550
Maximum torque [Nm]	257
Reduction	5.4 : 1
Resolution [deg]	0.0167

3 仮想フレーム

提案する視覚サーボを用いた物体把持手法では、視覚情報の欠損時にロボットハンドの各指先位置・姿勢により決まる仮想物体位置・姿勢情報を利用する。以下、仮想物体位置・姿勢を表す仮想フレームの定義方法を示す。ロボットハンドの各指先位置により、仮想フレームの位置 x_c は以下のように定義する。

$$\mathbf{x}_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{x}_{0i} \in \mathbb{R}^3. \quad (3)$$

ここで N は指の本数を表し、本実験では3本指ロボットハンドを用いるため、 $N = 3$ である。

同様に物体の仮想姿勢を示す仮想フレームは、ロボットハンドの各指先姿勢を用いて、仮想位置 x_c を原点とする以下のような回転行列 R_{vir} として定義する。

$$\mathbf{R}_{vir} = [\mathbf{r}_{x_{vir}}, \mathbf{r}_{y_{vir}}, \mathbf{r}_{z_{vir}}] \in \text{SO}(3) \quad (4)$$

$$\mathbf{r}_{x_{vir}} = \frac{\tilde{\mathbf{r}}_{x_{vir}}}{\|\tilde{\mathbf{r}}_{x_{vir}}\|} \quad \left(\tilde{\mathbf{r}}_{x_{vir}} = \sum_{i=1}^N \mathbf{r}_{x_{fi}} \right) \quad (5)$$

$$\mathbf{r}_{y_{vir}} = \frac{\tilde{\mathbf{r}}_{x_{vir}} \times \tilde{\mathbf{r}}_{y_{vir}}}{\|\tilde{\mathbf{r}}_{x_{vir}} \times \tilde{\mathbf{r}}_{y_{vir}}\|} \quad \left(\tilde{\mathbf{r}}_{y_{vir}} = \sum_{i=1}^N \mathbf{r}_{y_{fi}} \right) \quad (6)$$

$$\mathbf{r}_{z_{vir}} = \mathbf{r}_{x_{vir}} \times \mathbf{r}_{y_{vir}}. \quad (7)$$

4 制御入力

視覚情報欠損時における制御対象および入力の切替えを、以下の手順でおこなう [2]。

1. 視覚センサから得られる実際の把持物体の位置・姿勢情報（実フレーム）を制御対象として物体把持・操作を行う。
2. 把持物体の隠蔽やセンサ視野からの逸脱などにより、視覚情報欠損が起こる。
3. 制御対象を仮想フレームへと切り替える。すなわち、エンコーダから得られるロボットハンドの各関節角情報のみを用いて物体把持・操作を行う。

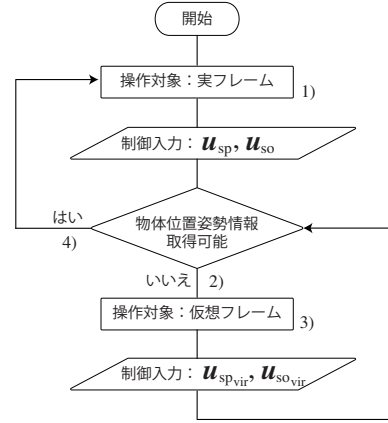


Fig.2 切り替え制御のフローチャート

4. 視覚センサによる物体の位置姿勢・情報が再び取得可能となる。
5. 手順1へと戻る。

これらの手順のフローチャートを図2に示す。

4.1 制御入力（把持物体の位置・姿勢情報取得可能時）

物体の位置・姿勢情報が視覚センサによって取得可能な時には、実際の把持物体の位置・姿勢（実フレーム）を制御対象とし、以下の制御入力を用いて物体把持制御を行う。

$$\text{<実フレーム位置制御時>} \quad \mathbf{u}_{sp} = \mathbf{u}_s + \mathbf{u}_p \quad (8)$$

$$\text{<実フレーム姿勢制御時>} \quad \mathbf{u}_{so} = \mathbf{u}_s + \mathbf{u}_o, \quad (9)$$

式(8),(9)において、 $\mathbf{u}_{sp} \in \mathbb{R}^{12}$ および $\mathbf{u}_{so} \in \mathbb{R}^{12}$ は各関節への入力トルクであり、 \mathbf{u}_s は物体の安定把持制御入力、 \mathbf{u}_p は把持物体の位置制御入力、 \mathbf{u}_o は姿勢制御入力とする。安定把持制御入力 \mathbf{u}_s は以下のように与える。

$$\mathbf{u}_s = \frac{f_d}{\sum_{i=1}^N r_i} \sum_{j=1}^N \mathbf{J}_{0j}^T (\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_{0j}) - \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g} \quad (10)$$

ここで $\mathbf{J}_{0i} \in \mathbb{R}^{3 \times 12}$ は各指半球中心の速度 $\dot{\mathbf{x}}_{0i}$ の各関節角速度 $\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{12}$ に関するヤコビ行列、 $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{12 \times 12}$ は関節粘性係数を表す正定対角行列、 $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^{12}$ はロボットハンド自身の重力補償項、 f_d はノミナルな目標把持力である。制御入力 \mathbf{u}_s は、それぞれの指先を仮想物体位置 x_c に向かって押しつけるように働く。

また、把持物体の位置制御入力 \mathbf{u}_p を以下のように与える。

$$\mathbf{u}_p = K_p \sum_{i=1}^N \mathbf{J}_{0i}^T (\mathbf{x}_d - \mathbf{x}), \quad (11)$$

ここで K_p は正のスカラー量であり、 $\mathbf{x}_d \in \mathbb{R}^3$ は把持物体の目標位置を表す。

さらに物体の姿勢制御入力 \mathbf{u}_o を以下のように与える。

$$\mathbf{u}_o = K_o \sum_{i=1}^N \mathbf{J}_{\Omega i}^T \mathbf{r}_{xyz} \quad (12)$$

ここで

$$\mathbf{r}_{xyz} = (\mathbf{r}_x \times \mathbf{r}_{xd}) + (\mathbf{r}_y \times \mathbf{r}_{yd}) + (\mathbf{r}_z \times \mathbf{r}_{zd}) \quad (13)$$

であり、 $\mathbf{J}_{\Omega i} \in \mathbb{R}^{3 \times 12}$ は各指先姿勢角速度の各関節角速度 $\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{12}$ に関するヤコビ行列を表す。また、実フレームの

目標姿勢は回転行列 $R_d = [r_{xd}, r_{yd}, r_{zd}] \in \text{SO}(3)$ で表す．式 (13) は，現在の物体姿勢と目標物体姿勢の誤差を表す瞬時回転軸ベクトルを表しており，このベクトル周りに物体を回転させるモーメントを与えることにより，目標姿勢が実現される．

4.2 制御入力（把持物体の位置姿勢情報欠損時）

物体の位置・姿勢情報欠損時には，制御入力 u_{sp} ， u_{so} に現在の把持物体の位置・姿勢情報をフィードバックすることが不可能となる．そこで本手法では，その瞬間に制御対象を切替えて，実フレームの代わりとして各指先位置・姿勢から定義される仮想フレームを制御する．制御対象の切替えに伴い，入力 u_{sp} ， u_{so} をそれぞれ以下のように切替える．

$$\langle \text{仮想フレーム位置制御時} \rangle \quad u_{sp_{vir}} = u_s + u_{p_{vir}} \quad (14)$$

$$\langle \text{仮想フレーム姿勢制御時} \rangle \quad u_{so_{vir}} = u_s + u_{o_{vir}} \quad (15)$$

ここで $u_{p_{vir}}$ は仮想フレームの位置制御入力であり， $u_{o_{vir}}$ は仮想フレームの姿勢制御入力を表す．仮想フレームの位置制御入力 $u_{p_{vir}}$ は，式 (11) における物体位置 x を仮想物体位置 x_c に置き換えることにより，以下のように与える．

$$u_{p_{vir}} = K_p \sum_{i=1}^N J_{0i}^T (x_{d_{vir}} - x_c) \quad (16)$$

ここで $x_{d_{vir}}$ は仮想フレームの目標位置を表している． $x_{d_{vir}}$ は，切替え時における入力トルクの連続性を維持するため，視覚情報欠損直前に得られた実フレーム情報を基に以下のように設定する．

$$x_{d_{vir}} = x_{c_{last}} + (x_d - x_{last}) \quad (17)$$

すなわち，仮想フレームの目標位置 $x_{d_{vir}}$ は視覚情報欠損直前に得られた最後の実フレーム位置情報 x_{last} と仮想フレーム位置情報 $x_{c_{last}}$ を用いて設定され，視覚情報が欠損している間はその値を保持し続ける．同様に仮想フレームの姿勢制御入力 $u_{o_{vir}}$ は以下のように与える．

$$u_{o_{vir}} = K_o \sum_{i=1}^N J_{\Omega i}^T r_{xyz_{vir}} \quad (18)$$

ここで

$$r_{xyz_{vir}} = (r_{x_{vir}} \times r_{xd_{vir}}) + (r_{y_{vir}} \times r_{yd_{vir}}) + (r_{z_{vir}} \times r_{zd_{vir}}) \quad (19)$$

である．また，仮想フレームの目標姿勢は回転行列 $R_{d_{vir}} = [r_{xd_{vir}}, r_{yd_{vir}}, r_{zd_{vir}}] \in \text{SO}(3)$ で表し，以下のように設定する．

$$R_{d_{vir}} = R_d R_{last}^T R_{vir_{last}} \quad (20)$$

ここで $R_{vir_{last}}$ ， R_{last} は，それぞれ視覚情報欠損直前に得られた最後の仮想物体姿勢および実際の物体姿勢である．すなわち，現在の物体位置・姿勢と目標とする物体位置・姿勢の誤差を用いて仮想フレームの目標位置・姿勢を設定することで，制御対象の切替え時においても，入力トルクの連続性が保証される [3]．

5 実機実験

第 2 章で示したロボットハンドおよび視覚センサを用いて把持物体の位置姿勢制御を行う．本稿では，以下に示す 2 種類の実験を行う．

Table 3 Details of the grasped object

Mass m	0.0015[kg]
Material	Styrene foam
(Figure)	
Length of side of triangle	0.060[m]
Height	0.039[m]

Table 4 Nominal desired grasping force and gains

f_d	1.0
K_p	60.0
K_o	7.0×10^{-2}
C_1	$\text{diag}(0.04, 0.04, 0.03, 0.02) \times 10^{-2}$ [Ns·m/rad]
C_2	$\text{diag}(0.04, 0.04, 0.03, 0.02) \times 10^{-2}$ [Ns·m/rad]
C_3	$\text{diag}(0.04, 0.04, 0.03, 0.02) \times 10^{-2}$ [Ns·m/rad]

- A. 視覚情報欠損時の物体位置制御実験
- B. 視覚情報欠損時の物体姿勢制御実験

本実験で用いる把持物体は，軽量のポリスチレン製の正三角柱とする（表 3 を参照）．質量が十分に小さいため，把持物体への重力の影響は小さいとして無視する．また，制御入力における各パラメータ設定値を表 4 に示す．両実験において，式 (10) で示した物体安定把持制御入力 u_s を用いて，物体を安定に把持した状態を初期状態とする．

A. 視覚情報欠損時の物体位置制御実験

本実験では，式 (8) で示した実フレーム位置制御入力 u_{sp} ，および式 (14) で示した仮想フレーム位置制御入力 $u_{sp_{vir}}$ を用いて，視覚情報を一時的に欠損させた場合の三角柱の位置制御を行う．

図 3，4 に，それぞれ実フレーム位置 x および仮想フレーム位置 x_{vir} の過渡応答を示す．図中の水色で示している区間は，視覚センサから物体の位置情報が得られない時間を示しており，例えば，図 3 中の水色の区間では x の値が欠落していることが確認できる．また同時に，図 4 中の仮想フレームの位置 x_{vir} の値は継続して得られていることがわかる．この区間では，仮想フレームを操作することで実フレームの位置が目標値に近づいている．しかし，完全には目標値へ収束していない．これは実フレームと仮想フレームとの相対関係，ここでは相対位置が変化することが原因であると考えられる．しかしその後，再び操作対象を実フレームに切り替えることで実フレームの位置を目標値へ収束させることができている．これらの図より，実フレームの位置が視覚センサから得られない場合についても，把持物体の位置制御を継続し，最終的に実フレームの位置が目標値に収束していることがわかる．

B. 視覚情報欠損時の物体姿勢制御実験

本実験では，式 (9) で示した実フレーム姿勢制御入力 u_{so} ，および (15) で示した仮想フレーム姿勢制御入力 $u_{so_{vir}}$ を用いて三角柱の姿勢制御を行う．

図 5，6 に，それぞれ実フレーム姿勢および仮想フレーム姿勢の過渡応答を示す．図中において，各姿勢を表す回転行列を XYZ オイラー角で表し，それぞれの回転角度を $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ として示す．物体の位置制御実験と同様に，仮想フレーム操作時に実フレームは目標値に近づいている．しかし，操作対象が実フレームに切り替わった後も完全に目標値には収束せず， R と R_d との間で偏差が残っている．これは柔軟指のせん断方向の変形の影響によるものと考えら

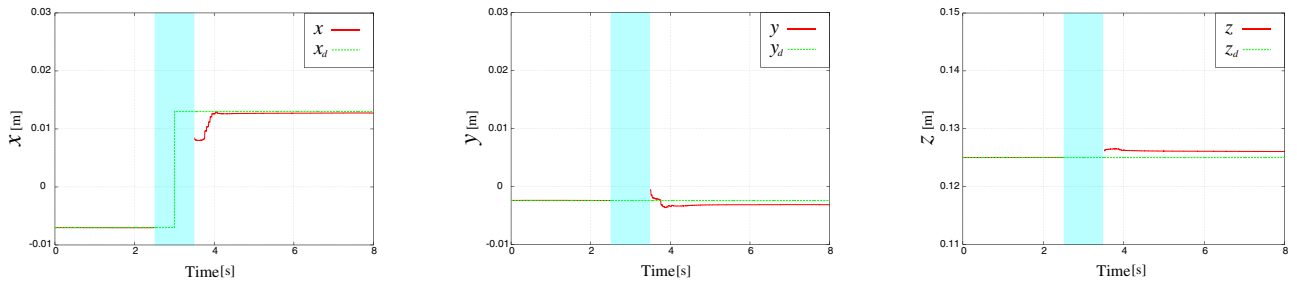


Fig.3 Transient responses of the actual position of the grasped object \boldsymbol{x}

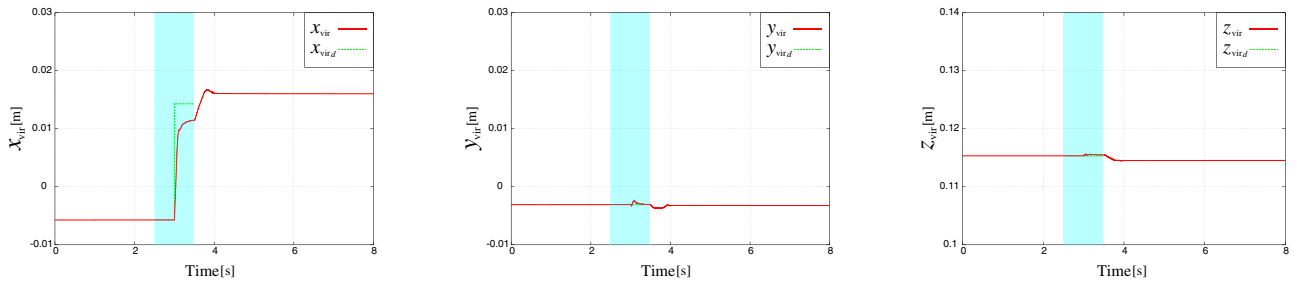


Fig.4 Transient responses of the position of the virtual frame \boldsymbol{x}_{vir}

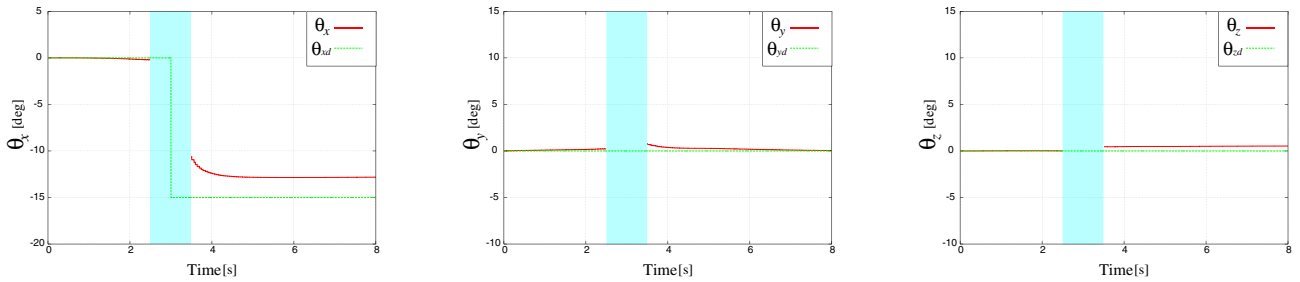


Fig.5 Transient responses of the actual attitude of the grasped object

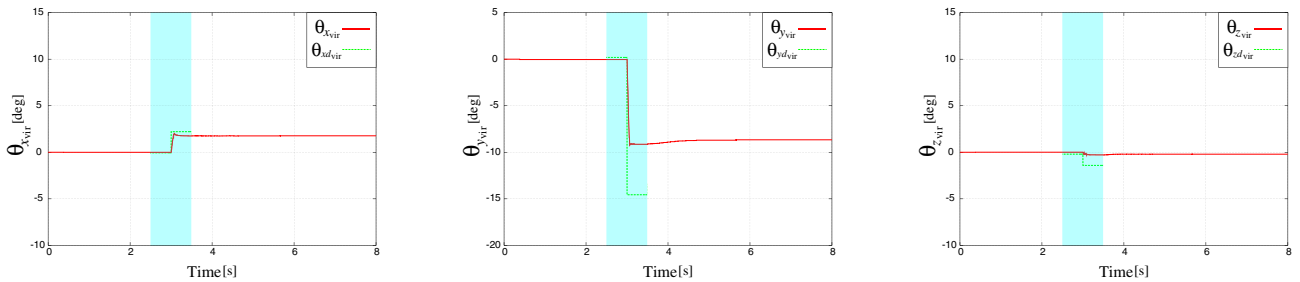


Fig.6 Transient responses of the attitude of the virtual frame

れる．これらの図より，実フレームの姿勢情報が視覚センサから得られない場合についても，位置制御実験と同様に把持物体の姿勢制御を継続し，最終的に実フレームの姿勢が概ね目標値に収束していることがわかる．

6 結言

本稿では，これまでに提案した把持物体の位置・姿勢情報欠損にロバストな視覚サーボによる動的物体操作手法の有効性を実験的に検証した．まず，全体のシステム構成を示し，仮想フレームの構築法を示した．その後，制御入力を示し，実機を用いて把持物体の位置制御実験および姿勢制御実験を行った．これらの実験結果から，実機実験下で把持物体の位置姿勢情報欠損が起きた場合においても，物体把持およ

び位置・姿勢制御が安定に実現できることを確認した．

文献

- [1] S. Hutchinson, G. D. Hager and P. I. Corke, "A tutorial on visual servo control," *IEEE Trans. on Robot. and Automation*, Vol. 12, No. 5, pp. 651-670, 1996.
- [2] A. Kawamura, K. Tahara, R. Kurazume and T. Hasegawa, "Robust manipulation for temporary lack of sensory information by a multi-fingered hand-arm system," *Proc. of the 2011 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4201-4206, San Francisco, CA, 2011.
- [3] 河村晃宏，田原健二，倉爪亮，長谷川勉：把持物体のオンライン位置姿勢情報欠損にロバストな動的物体操作手法- 入力切替時におけるトルクの連続性について - ，第 29 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，3E2-5, 2011.