

多指ハンドアームシステムによる把持物体の オンライン情報に基づいた姿勢操作手法

河村晃宏 田原健二 倉爪亮 長谷川勉 (九州大学)

Attitude Control of the Grasped Object based on the Real-Time Object Information

*Akihiro KAWAMURA (Kyushu Univ.), Kenji TAHARA (Kyushu Univ.),
Ryo KURAZUME (Kyushu Univ.), Tsutomu HASEGAWA (Kyushu Univ.)

Abstract— This paper proposes a novel object manipulation method which regulates the attitude of an arbitrary polyhedral object with fulfilling stable grasping by a multi-fingered hand-arm system. Assume that the grasped object is of an arbitrary polyhedral shape, and the attitude of it is available in real-time. A sensory-feedback control signal to regulate the attitude of the object safely is designed based on the acquired information. In addition, the stability of the overall system is proven through analysis of the closed-loop dynamics. First, the overall dynamics which considers contact conditions between each fingertip and the object surface is given. Second, a control signal to regulate the grasped object is designed on the basis of the acquired object attitude information. Next, the overall closed-loop dynamics is given and the convergence of the system is proven briefly. Finally, the effectiveness of our proposed controller is illustrated through a numerical simulation result.

Key Words: Multi-fingered Hand-arm System, Attitude Control, Soft Finger, Dynamic Stability

1. 緒言

多関節多指ハンドを有するハンドアームシステムは人の腕・手と同様の構造を持つことから、人に近い物体操作が実現できると期待される。しかし、多関節多指ハンドアームシステムを用いて物体の把持・操作を行う場合、システム全体が冗長劣駆動システムとなり、更に多点接触による複雑な拘束条件が加わることからシステムの安定性の解析は非常に困難である。そのためこれまでに、このシステムを用いた任意形状の物体に対する把持・操作の研究が数多く行われてきた [1, 2] が、動的な観点から指と物体の間の物理的相互作用を考慮し、安定解析までを詳細に取り扱った研究は少ない [3]。また、それらの数少ない研究においても、対象物体が平行な 2 平面を持つ物体に限定されていた。そこで筆者らはこれまでに、対象物体を任意多面体に拡張した物体把持手法 [4] を提案している。この手法は、物体形状や質量中心位置などの物体情報や逆運動学・逆動力学の複雑な計算を必要とせず、任意多面体の安定把持を実現する。しかし、把持した物体を操作する手法に関しては検討していない。

そこで本論文では、文献 [4] で提案した任意多面体の安定把持手法を拡張し、外界センサにより正確な物体姿勢情報がオンラインで得られる場合に対する多関節多指ハンドアームシステムを用いた把持物体の姿勢制御手法を提案する。この手法を用いることで、物体把持におけるシステムの安定性を維持しながら目標物体姿勢を実現することが可能となる。

2. 多関節多指ハンドを有するハンドアームシステムおよび把持物体のダイナミクス

本論文で扱うハンドアームシステムの一例を図 1 に示す。このモデルは、それぞれ物体姿勢の操作に十分な自

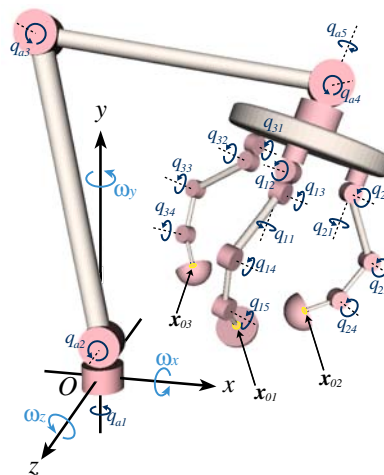


Fig.1 Multi-fingered hand-arm system

由度を持つ多指ハンド部とアーム部によって構成されている。また、把持対象物は、指先と物体との接触面が平面で構成されていること以外は、任意の形状の物体とする。全ての指先は柔軟で半球形状とし、物体表面上で滑ることなく面接触を伴った回転接触を行う。また、重力の影響については考慮しない。図 1 において、 O は慣性座標系の原点を、 $x_{0i} \in \mathbb{R}^3$ は指先半球中心位置を示す。以降、 i は i 番目の指を意味し、全て慣性座標系で表された値とする。また、腕部と i 番目の指はそれぞれ N_a と N_i の自由度を持つ。腕部の関節角は $q_a \in \mathbb{R}^{N_a}$ 、 i 番目の指の関節角は $q_i \in \mathbb{R}^{N_i}$ と表し、ハンドアームシステム全体の関節角ベクトルである q は、ハンド部が N 本の指を持つ時、 $(= (q_a^T, q_1^T, q_2^T, \dots, q_N^T)^T)$ のように表す。図 2 は把持対象物と指先との関係を示しており、 $O_{c.m.}$ は物体の質量中心を示す。 $x_i \in \mathbb{R}^3$ は接触面中心の位置を示し、 $x = (x, y, z)^T \in \mathbb{R}^3$ は質量中心 $O_{c.m.}$ の位置を、

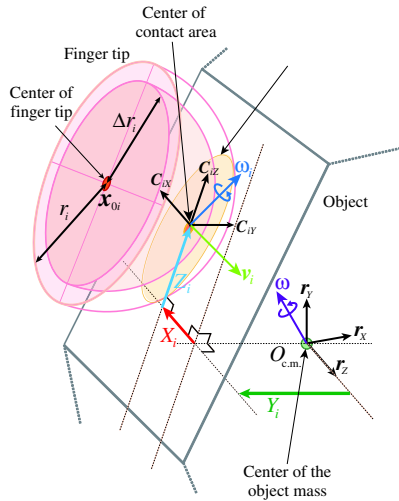


Fig.2 Contact model at the center of the contact area

ω は $O_{c.m.}$ における物体の姿勢角速度ベクトルを示す。更に物体姿勢を回転行列 $R = (r_X, r_Y, r_Z) \in SO(3)$ で表し、慣性座標系からみた接触面中心における座標系を、 $R R C_i = (C_{iX}, C_{iY}, C_{iZ})$ で表す。ただし、 $R C_i$ は接触面中心の姿勢を表す回転行列であり、 C_{iY} は接触面に対して垂直な単位ベクトルである。

2.1 3次元回転接触拘束

まず、3次元空間における滑りのない回転接触拘束をモデル化する。指先-把持物体間の滑りの起こらない回転接触の条件は、指先表面上で表される接触面中心の速度のうち接触面に対して平行な成分が、物体表面上で表された接触面中心の速度と等しいことである。すなわち以下の式で示される。

$$\begin{bmatrix} C_{iX}^T \\ C_{iZ}^T \end{bmatrix} v_i = \begin{bmatrix} \dot{X}_i \\ \dot{Z}_i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

ただし、 v_i は指先表面上で表される接触面中心の速度であり、 X_i, Z_i はそれぞれ C_{iX}, C_{iZ} 方向の接触面内における物体の質量中心と接触面中心との距離、 $\omega_i \in \mathbb{R}^3$ は各接触面中心座標系の回転角速度ベクトル、 r_i は指先半球の半径、 Δr_i は指先半球中心と接触面との距離を示す(図2)。

このとき、式(1)は非ホロノミックな回転拘束条件であり、全システムの速度に関する各ベクトル \dot{q}, \dot{x}, ω について線形となるため、Paffian 拘束として以下の様に表すことができる。

$$\begin{bmatrix} X_{iq} \\ Z_{iq} \end{bmatrix} \dot{q} + \begin{bmatrix} X_{ix} \\ Z_{ix} \end{bmatrix} \dot{x} + \begin{bmatrix} X_{i\omega} \\ Z_{i\omega} \end{bmatrix} \omega = 0, \quad (2)$$

ただし、

$$\begin{cases} X_{iq} = \Delta r_i C_{iZ}^T J_{\Omega i} - C_{iX}^T J_{0i}, & X_{ix} = C_{iX}^T \\ X_{i\omega} = \{C_{iX} \times (x - x_{0i})\}^T - \Delta r_i C_{iZ}^T \\ Z_{iq} = -\Delta r_i C_{iX}^T J_{\Omega i} - C_{iZ}^T J_{0i}, & Z_{ix} = C_{iZ}^T \\ Z_{i\omega} = \{C_{iZ} \times (x - x_{0i})\}^T + \Delta r_i C_{iX}^T, \end{cases} \quad (3)$$

$\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T \in \mathbb{R}^3$ は物体の瞬間回転軸ベクトルである。また、 $J_{\Omega i} \in \mathbb{R}^{3 \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)}$ は各指

の接触面中心における姿勢角速度ベクトルの各関節角 $\dot{q} \in \mathbb{R}^{N_a + \sum_{i=1}^N N_i}$ に関するヤコビ行列、 $J_{0i} \in \mathbb{R}^{3 \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)}$ は各指の接触面中心の位置 x_{0i} の各関節角 $q \in \mathbb{R}^{N_a + \sum_{i=1}^N N_i}$ に関するヤコビ行列である。

2.2 ダイナミクス

式(1)に示した拘束条件と柔軟指の接触モデルを考慮して、ハンドアームシステムと対象物についてのラグランジュの運動方程式は以下のように表される。

For the multi-fingered hand-arm system:

$$H(q) \ddot{q} + \left\{ \frac{1}{2} \dot{H}(q) + S(q, \dot{q}) \right\} \dot{q} + \sum_{i=1}^N \frac{\partial T_i}{\partial \dot{q}} + \sum_{i=1}^N \left(J_{0i}^T C_{iY} f_i + X_{iq}^T \lambda_{iX} + Z_{iq}^T \lambda_{iZ} \right) = u, \quad (4)$$

For the object:

$$M \ddot{x} + \sum_{i=1}^N \left(-f_i C_{iY} + X_{ix}^T \lambda_{iX} + Z_{ix}^T \lambda_{iZ} \right) = 0 \quad (5)$$

$$I \dot{\omega} + \omega \times I \omega - \sum_{i=1}^N \{ C_{iY} \times (x - x_{0i}) \} f_i + \sum_{i=1}^N \frac{\partial T_i}{\partial \omega^T} + \sum_{i=1}^N \left(X_{i\omega}^T \lambda_{iX} + Z_{i\omega}^T \lambda_{iZ} \right) = 0, \quad (6)$$

ただし、 $H \in \mathbb{R}^{(N_a + \sum_{i=1}^N N_i) \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)}$ はハンドおよびアームの慣性行列、 $M = \text{diag}(m, m, m)$ は把持物体の質量、 I は把持物体の慣性テンソル、 $S(q, \dot{q})$ はコリオリ力、遠心力などを含む歪対称行列、 u は入力トルクベクトル、 λ_{iX} と λ_{iZ} はラグランジュ乗数である。また、 f_i は指先接触面中心位置における最大変位量 $r_i - \Delta r_i$ によって発生する反力であり、 T_i は指先の面接触による捻り方向の粘性摩擦を示すエネルギー消散関数である。これらのラグランジュ乗数を含む項によって、ロボットと把持物体間で回転接触拘束を満足する動作を実現することが出来る。

3. 制御入力

外界センサにより計測された物体姿勢情報を用いた新たな物体の姿勢制御手法を提案する。本制御手法はオンライン型フィードバック制御手法であり、物体の安定把持と物体の姿勢制御を同時に実現する。提案手法では、安定把持の制御入力を u_s 、物体姿勢制御の制御入力を u_o とし、入力トルクベクトル u を以下のように与える。

$$u = u_s + u_o \quad (7)$$

安定把持の制御入力を以下に示す。

$$u_s = \frac{f_d}{\sum_{i=1}^N r_i} \sum_{j=1}^N J_{0j}^T (x_d - x_{0j}) - C \dot{q} \quad (8)$$

$$x_d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{0i}, \quad (9)$$

ただし、 $C \in \mathbb{R}^{(N_a + \sum_{i=1}^N N_i) \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)} > 0$ は関節粘性係数を表す正定対角行列、 f_d は目標把持力であ

る。この制御入力それぞれの指先が全ての指先位置の重心 x_d に向かうような制御を行う。

一方、物体の姿勢制御は安定把持の制御入力と同様に、以下のような制御入力によって実現される。

$$\mathbf{u}_o = \frac{K_o}{\sum_{i=1}^N r_i} \sum_{j=1}^N \mathbf{J}_{\Omega_j}^T \{(\mathbf{r}_x \times \mathbf{r}_{xd}) + (\mathbf{r}_y \times \mathbf{r}_{yd}) + (\mathbf{r}_z \times \mathbf{r}_{zd})\} \quad (10)$$

ただし、 K_o は正のスカラー量であり、物体の目標姿勢は $\mathbf{R}_d = (\mathbf{r}_{xd}, \mathbf{r}_{yd}, \mathbf{r}_{zd})$ である。このとき、 $\mathbf{r}_x \times \mathbf{r}_{xd}$ は \mathbf{r}_x が \mathbf{r}_{xd} に向かうような回転モーメントを発生させる瞬間回転軸ベクトルであり、 y 成分と z 成分についても同様である。

4. 閉ループダイナミクスの収束解析

出力ベクトルを以下のように表す。

$$\dot{\mathbf{A}} = (\dot{\mathbf{q}}^T, \dot{\mathbf{x}}^T, \dot{\boldsymbol{\omega}}^T)^T. \quad (11)$$

この出力ベクトル (11) とラグランジュの運動方程式 (4)–(6) および提案する制御入力 (8), (10) によって得られるハンドアームシステムと把持物体の閉ループダイナミクスとの内積和を取ると、以下の式を得る。

$$\frac{d}{dt} E = -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) - D \quad (12)$$

$$E = K + V + \Delta P \geq 0 \quad (13)$$

$$K = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{H} \dot{\mathbf{q}} + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{x}} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{I} \boldsymbol{\omega} \quad (14)$$

$$V = V_s + V_o \quad (15)$$

$$V_s = \frac{A}{2} \{(\mathbf{x}_{01} - \mathbf{x}_{02})^2 + (\mathbf{x}_{02} - \mathbf{x}_{03})^2 + \dots + (\mathbf{x}_{0N} - \mathbf{x}_{01})^2\} \quad (16)$$

$$V_o = \frac{NK_o}{2} \{(\mathbf{r}_x - \mathbf{r}_{xd})^2 + (\mathbf{r}_y - \mathbf{r}_{yd})^2 + (\mathbf{r}_z - \mathbf{r}_{zd})^2\} \quad (17)$$

$$\Delta P = \sum_{i=1}^N \int_0^{\delta r_i} \{f_i(\Delta r_{di} + \phi) - \bar{f}_i(\Delta r_{di})\} d\phi, \quad (18)$$

ただし、

$$\delta r_i = \Delta r_{di} - \Delta r_i \quad (19)$$

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{K_o}{\Delta r_i} \left[\frac{d}{dt} \{ \mathbf{C}_{iY} \times (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{0i}) \} \right]^T \mathbf{B} \quad (20)$$

である。

Δr_{di} は $f_i = f_d$ を満たす時の Δr_i の値であり、 ΔP は柔軟指の変形によって生じる弾性ポテンシャルエネルギーを示す。このとき、 $0 \leq \Delta r_{di} - \delta r_i < r_i$ が満たされる限り ΔP は正の値をとる。また、 V_s は安定把持の制御入力 \mathbf{u}_s によって生じるポテンシャルエネルギーを表し、 V_o は姿勢制御の制御入力 \mathbf{u}_o から生じるポテンシャルエネルギーである。提案する把持の制御入力のみを用いて物体把持を行った場合には、 V_o は発生しない。このとき、 K と V は正なので、 E は常に正の値となる (13)。また、式 (12) 中の D は以下のように変形できる。

$$D = \sum_{i=1}^N 2K_o \cos \alpha \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \quad (21)$$

ただし、 α は物体姿勢から目標姿勢への瞬間回転軸周りの回転角を示す。 $|\cos \alpha| \leq 1$ であるので式 (12) より以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} E - \left| \sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \right| \\ \leq -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2). \end{aligned} \quad (22)$$

ここで以下のような a を定義する。

$$\begin{cases} a = 1 & \text{if } \sum_{i=1}^N 2K_o \frac{d}{dt} \log \Delta r_i \geq 0 \\ a = -1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

このとき、式 (22) は a を用いて以下のように書き換えられる。

$$\frac{d}{dt} W \leq -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} - \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) \leq 0, \quad (24)$$

ただし、

$$W = E - a \sum_{i=1}^N 2K_o \log \Delta r_i. \quad (25)$$

$E \geq V_s$ であることから以下の式を得る。

$$\begin{aligned} W &\geq V_s - a \sum_{i=1}^N 2K_o \log \Delta r_i \\ &\geq V_s - \left| \sum_{i=1}^N 2K_o \log \Delta r_i \right|. \end{aligned} \quad (26)$$

式 (26) は姿勢制御の制御入力のゲインである K_o が

$$K_o \leq \frac{V_s}{\left| 2 \sum_{i=1}^N \log \Delta r_i \right|}. \quad (27)$$

の範囲内であれば

$$W \geq 0 \quad (28)$$

となることを示す。このとき、式 (24) と (28) から以下のような式が得られる。

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \left\{ \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} + \sum_{i=1}^N (T_i + \xi \Delta \dot{r}_i^2) \right\} dt \\ \leq W(0) - W(\infty) \leq W(0), \end{aligned} \quad (29)$$

式 (29) は、各関節角速度 $\dot{\mathbf{q}}(t)$ が時間 $t \in (0, \infty)$ において 2 乗可積分となることを示しており、これは $\dot{\mathbf{q}}(t) \in L^2(0, \infty)$ となることを表している。また、式 (1) で表された拘束条件を考慮することにより、物体の並進速度および姿勢速度もそれぞれ、 $\dot{\mathbf{x}} \in L^2(0, \infty)$ 、 $\boldsymbol{\omega} \in L^2(0, \infty)$ となる。よって、全システムの出力ベクトル $\dot{\mathbf{A}}(t)$ は時間 t について一様連続となり、 $t \rightarrow \infty$ の時 $\dot{\mathbf{A}} \rightarrow 0$ および $\ddot{\mathbf{A}} \rightarrow 0$ となることがいえる [5]。したがって、それぞれの指にかかる力の合力と把持物体にかかる力の合力がゼロに収束することが保証される。

$$\Delta \boldsymbol{\lambda}_\infty = (\Delta \boldsymbol{\lambda}_q, \Delta \boldsymbol{\lambda}_x, \Delta \boldsymbol{\lambda}_\omega) \rightarrow \mathbf{0} \quad (30)$$

Table 1 Physical parameters

Triple-fingered hand-arm system					
1 st link length	l_{a1}	1.300[m]	l_{i1}	0.300[m]	
2 nd link length	l_{a2}	1.000[m]	l_{i2}	0.200[m]	
3 rd link length	l_{a3}	0.175[m]	l_{i3}	0.140[m]	
1 st mass center	l_{ga1}	0.650[m]	l_{gi1}	0.150[m]	
2 nd mass center	l_{ga2}	0.500[m]	l_{gi2}	0.100[m]	
3 rd mass center	l_{ga3}	0.0875[m]	l_{gi3}	0.070[m]	
1 st mass	m_{a1}	1.300[kg]	m_{i1}	0.250[kg]	
2 nd mass	m_{a2}	1.000[kg]	m_{i2}	0.150[kg]	
3 rd mass	m_{a3}	0.400[kg]	m_{i3}	0.100[kg]	
1 st Inertia I_{a1}	diag(7.453, 7.453, 0.260) $\times 10^{-1}$ [kg·m ²]				
2 nd Inertia I_{a2}	diag(3.397, 3.397, 0.128) $\times 10^{-1}$ [kg·m ²]				
3 rd Inertia I_{a3}	diag(0.291, 0.291, 0.500) $\times 10^{-1}$ [kg·m ²]				
1 st Inertia I_{i1}	diag(7.725, 7.725, 0.450) $\times 10^{-3}$ [kg·m ²]				
2 nd Inertia I_{i2}	diag(2.060, 2.060, 0.120) $\times 10^{-3}$ [kg·m ²]				
3 rd Inertia I_{i3}	diag(0.538, 0.538, 0.031) $\times 10^{-3}$ [kg·m ²]				
Radius of fingertip r_i	0.070[m]				
Stiffness coefficient k_i	1.000×10^5 [N/m ²]				
Damping function ξ_i	$1.000 \times (r_i^2 - \Delta r_i^2) \pi$ [Ns/m ²]				
Object					
Mass m	0.037[kg]				
Inertia I	diag(1.273, 0.193, 1.148) $\times 10^{-3}$ [kg·m ²]				
Y_1	0.092[m]	θ_{t1}	1.833[rad]		
Y_2	0.048[m]	θ_{t2}	1.833[rad]		
Y_3	0.048[m]	θ_{t3}	2.618[rad]		

Table 2 Desired grasping force and gains

f_d	10.0[N]
C_a	diag(1.673, 1.085, 1.225, 0.463, 0.295) $\times 10^{-1}$ [Ns·m/rad]
C_1	diag(1.010, 1.095, 1.310, 0.535, 0.165) $\times 10^{-2}$ [Ns·m/rad]
C_2	diag(0.780, 1.300, 0.530, 0.165) $\times 10^{-2}$ [Ns·m/rad]
C_3	diag(1.065, 1.300, 0.530, 0.165) $\times 10^{-2}$ [Ns·m/rad]
K_o	0.24

ただし、 $\Delta\lambda_q$, $\Delta\lambda_x$, $\Delta\lambda_\omega$ はそれぞれ、ハンドアームシステムの各関節および物体の並進・回転方向にかかる見かけの外力である。

式(30)より、全ての外力とそれぞれの速度が、十分な時間が経過した後にゼロに収束することから、物体の姿勢制御が安定に実現されることが保証できる。

5. 数値シミュレーション

図1に示す5自由度の指1本と4自由度の指2本を持つハンドと5自由度のアームを持つハンドアームシステムを用いた三角柱の把持と姿勢制御の数値シミュレーションを行った。ハンドアームシステムおよび対象物体である三角柱のパラメータを表1に示す。ただし、 Y_i は物体の質量中心 $O_{c.m.}$ から i 番目の指先が接触している物体表面までの距離、 θ_{ti} は底面と平行な断面における外角である。本シミュレーションでは、まず物体把持の制御入力(8)のみを用いて三角柱の把持を行い、システム全体の運動が収束した後、式(10)に基づき三角柱の姿勢制御を行った。把持物体の姿勢制御を行った時の物体姿勢の時系列データを図3に示す。この図から物体の姿勢を表す各単位ベクトル(r_x, r_y, r_z)が目標姿勢での値に収束していることがわかる。同様に、ハンドアームシステムおよび対象物体に関する全ての速度および $\Delta\lambda_\infty$ の全ての要素がゼロに収束することを確認した。これより、本論文で提案した手法を用いることで、安定に物体の姿勢制御が実現できることが確認された。

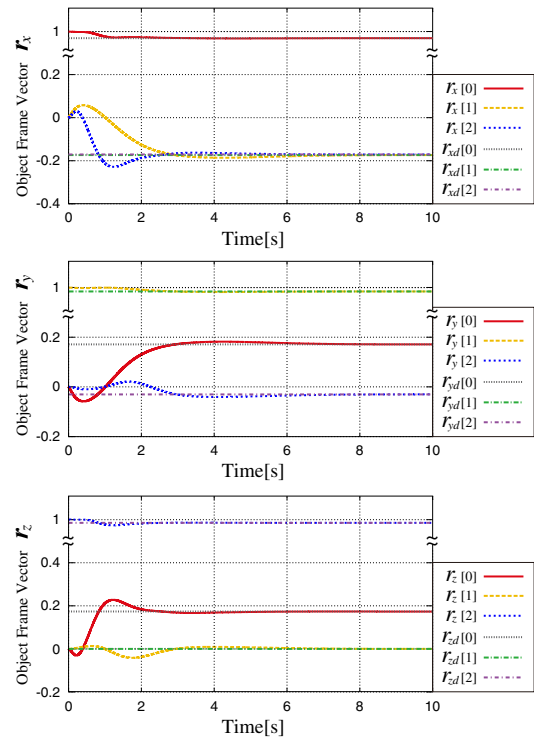


Fig.3 Transient responses of the object frame $R = (r_x, r_y, r_z)$

6. 結言

多指ハンドを有するハンドアームシステムによる把持物体の姿勢制御手法を提案した。この手法はシステム全体の安定性を保証した手法である。まず、非ホロノミック拘束である指先-把持物体間の回転接触拘束を定式化し、提案する簡便な制御入力によって、安定に物体の姿勢制御が実現できることを、収束性の解析および数値シミュレーションによって示した。実環境下で視覚センサや姿勢センサなどを用いた場合の有効性については、今後実機実験により検証する予定である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、日本学術振興会科学研究費補助金特別研究員奨励費の助成を受けました。ここに深く感謝致します。

参考文献

- [1] K. B. Shimoga, "Robot grasp synthesis algorithms: A survey," *Int. J. Robotics Research*, vol. 15, no. 3, pp. 230-266, 1996.
- [2] A. Bicchi, "Hands for dexterous manipulation and robust grasping: A difficult road towards simplicity," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 16, no. 6, pp. 652-662, 2000.
- [3] S. Arimoto, "A differential-geometric approach for 2-D and 3-D object grasping and manipulation," *Annual Review in Control*, Vol. 31, pp. 189-209, 2007.
- [4] A. Kawamura, K. Tahara, R. Kurazume and T. Hasegawa, "Dynamic Grasping for an Arbitrary Polyhedral Object by a Multi-fingered Hand-Arm System," *Proc. of the 2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2264-2270, St. Louis, USA, 2009.
- [5] S. Arimoto, *Control Theory of Multi-fingered Hands .A Modelling and Analytical-Mechanics Approach for Dexterity and Intelligence*, Springer; 2008.