

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 -

河村晃宏 田原健二 倉爪亮 長谷川勉 (九州大学)

1. 諸言

多指ハンドアームを用いた物体把持・操作システムの一つに、視覚サーボ系がある [1]。このシステムは、視覚センサによって得られる物体の位置姿勢情報をフィードバックすることで、高精度なマニピュレーションを実現できる。しかし、オクルージョンやフレームアウトなどに起因する情報欠損が起きた場合は、システムの安定な制御が困難となる。これに対して、情報欠損に頑健な制御手法がこれまで幾つか提案されている [2, 3]。しかし、いずれの手法においても、オクルージョンやフレームアウトなどによる大部分情報欠損は考慮されておらず、また把持物体の詳細な幾何情報が事前知識として与えられることが必須である。

これに対し筆者らはこれまでに、把持物体のオンライン位置姿勢情報の欠損に頑健な動的物体操作手法 [4] を提案している。本手法は、物体の事前知識を必要とせず、大部分情報欠損に対しても安定な制御が可能である。具体的には、何らかの原因によって視覚情報が得られなくなった場合に、制御対象を物体の実フレームから指先位置・姿勢から決定される仮想フレームへ切り替えることで、安定把持を維持しながら大まかな目標位置・姿勢への制御を行う。その際、仮想フレームの目標位置・姿勢を適切に設定することで、トルクの連続性を維持している。しかし、この連続性に関する理論的な裏付けは与えられていない。

本報告では、実フレームから仮想フレームへの切り替え時におけるトルクの連続性に関する解析を行う。

2. システムのモデルと仮想フレーム

本論文で扱うハンドアームシステムおよび操作対象となる実フレームと仮想フレームの一例を図1に示す。ハンドアームシステムは、それぞれ物体の位置姿勢の操作に十分な自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、 $x_{0i} \in \mathbb{R}^3$ 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す。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は $q = (q_a^T, q_1^T, q_2^T, \dots, q_N^T)^T$ で表す。のように表す。 $x = (x, y, z)^T \in \mathbb{R}^3$ は把持物体の質量中心位置、 ω は物体の姿勢角速度ベクトルを示す。また、実

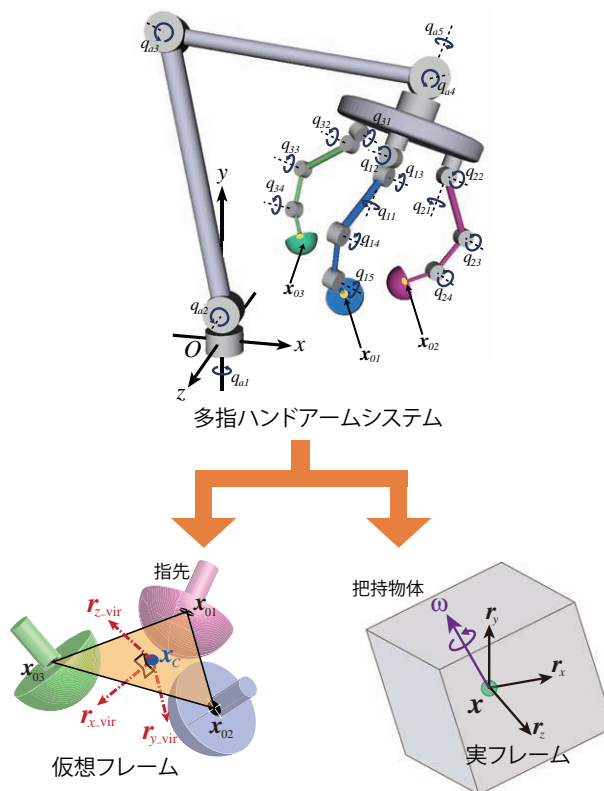


図1 多指ハンドアームシステムと実・仮想フレーム

フレームの姿勢を回転行列 $R = (r_x, r_y, r_z) \in SO(3)$ で表す。

2.1 仮想フレーム

把持物体の位置姿勢情報の欠損時に用いる仮想フレームの位置姿勢を以下のように定義する。まず、仮想フレームの位置 x_c をロボットの各指先位置より以下のように定める。

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

この位置における仮想フレームの姿勢をロボットの各指先姿勢から決定される以下のような回転行列 R_{vir} で表す。

$$R_{\text{vir}} = (r_{x_{\text{vir}}}, r_{y_{\text{vir}}}, r_{z_{\text{vir}}}) \quad (2)$$

$$r_{x_{\text{vir}}} = \frac{\tilde{r}_{x_{\text{vir}}}}{\|\tilde{r}_{x_{\text{vir}}}\|} \quad \tilde{r}_{x_{\text{vir}}} = \sum_{i=1}^N r_{x_{fi}} \quad (3)$$

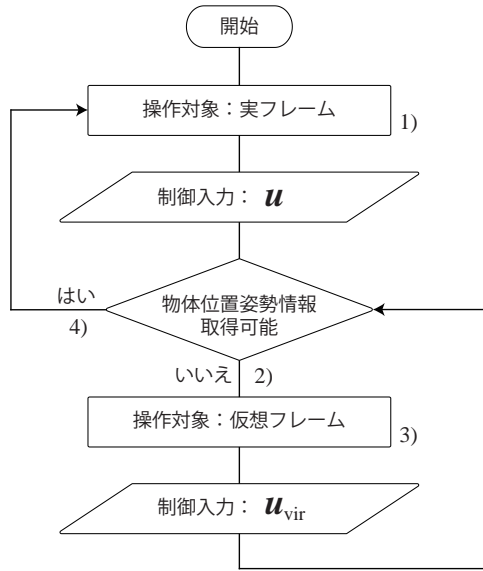


図2 切り替え制御のフローチャート

$$\mathbf{r}_{y_{\text{vir}}} = \frac{\tilde{\mathbf{r}}_{x_{\text{vir}}} \times \tilde{\mathbf{r}}_{y_{\text{vir}}}}{\|\tilde{\mathbf{r}}_{x_{\text{vir}}} \times \tilde{\mathbf{r}}_{y_{\text{vir}}}\|} \quad \tilde{\mathbf{r}}_{y_{\text{vir}}} = \sum_{i=1}^N \mathbf{r}_{y_{fi}} \quad (4)$$

$$\mathbf{r}_{z_{\text{vir}}} = \mathbf{r}_{x_{\text{vir}}} \times \mathbf{r}_{y_{\text{vir}}} \quad (5)$$

ただし, $\mathbf{r}_{x_{fi}}, \mathbf{r}_{y_{fi}}$ は指 i の指先姿勢を表す回転行列 \mathbf{R}_{fi} の x 軸と y 軸を示すベクトルである.

3. 制御入力

操作対象および制御入力の切り替えは、以下の手順でおこなう [4].

1. 操作対象を実フレームとし、制御入力 u を用いて物体の位置姿勢制御を行う.
2. 物体位置姿勢情報の取得ができなくなる.
3. 操作対象を仮想フレームへと切り替える. 制御入力を u_{vir} とする.
4. 物体位置姿勢情報の取得が可能となる.
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. 次に各制御入力 u および u_{vir} を示す.

3.1 制御入力 u (把持物体の位置姿勢情報取得時)

物体の位置姿勢情報の取得時には、操作対象を実フレーム、つまり実際の把持物体の位置・姿勢とし、以下のような制御入力 u を用いて制御を行う.

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_s + \mathbf{u}_p + \mathbf{u}_o, \quad (6)$$

式(6)において, \mathbf{u}_s は安定把持の制御入力であり, \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. まず, 安定把持の制御入力 \mathbf{u}_s を以下に示す.

$$\mathbf{u}_s = \frac{f_d}{\sum_{i=1}^N r_i} \sum_{j=1}^N \mathbf{J}_{0j}^T (\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_{0j}) - \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} \quad (7)$$

ただし, \mathbf{J}_{0i} は各指の接触面中心の位置 \mathbf{x}_{0i} の各関節角 $\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{N_a + \sum_{i=1}^N N_i}$ に関するヤコビ行列, \mathbf{C} 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. 制御入力 \mathbf{u}_s はそれぞれの指先が全ての指先位置の重心

\mathbf{x}_c に向かうような制御を行う. 次に把持物体の位置制御入力 \mathbf{u}_p を以下に示す.

$$\mathbf{u}_p = K_p \sum_{j=1}^N \mathbf{J}_{0j}^T (\mathbf{x}_d - \mathbf{x}), \quad (8)$$

ただし, K_p は正のスカラー量であり, \mathbf{x}_d は目標位置を表す. 更に物体の姿勢制御入力 \mathbf{u}_o を以下に示す.

$$\mathbf{u}_o = K_o \sum_{j=1}^N \mathbf{J}_{\Omega j}^T \mathbf{r}_{xyz} \quad (9)$$

ただし,

$$\mathbf{r}_{xyz} = (\mathbf{r}_x \times \mathbf{r}_{xd}) + (\mathbf{r}_y \times \mathbf{r}_{yd}) + (\mathbf{r}_z \times \mathbf{r}_{zd}) \quad (10)$$

である. また, $\mathbf{J}_{\Omega i} \in \mathbb{R}^{3 \times (N_a + \sum_{i=1}^N N_i)}$ 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 $\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{N_a + \sum_{i=1}^N N_i}$ に関するヤコビ行列であり, 目標姿勢は回転行列 $\mathbf{R}_d = (\mathbf{r}_{xd}, \mathbf{r}_{yd}, \mathbf{r}_{zd})$ で表される. 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.

3.2 制御入力 u_{vir} (把持物体の位置姿勢情報欠損時)

物体位置姿勢情報の欠損時には把持物体の位置姿勢制御のための制御入力 \mathbf{u}_p と \mathbf{u}_o に正しい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ため, 物体の操作が困難となる. そこで本手法では, 操作対象の切り替えを行い, 実フレームの代わりに各指先位置および姿勢から決定される仮想フレームを操作する. このとき, 操作対象の切り替えに伴い, 制御入力 u を以下に示す制御入力 u_{vir} に切り替える.

$$\mathbf{u}_{\text{vir}} = \mathbf{u}_s + \mathbf{u}_{p_{\text{vir}}} + \mathbf{u}_{o_{\text{vir}}} \quad (11)$$

ただし, $\mathbf{u}_{p_{\text{vir}}}$ は仮想フレームの位置制御入力であり, $\mathbf{u}_{o_{\text{vir}}}$ は仮想フレームの姿勢制御入力である. まず, 仮想フレームの位置制御入力 $\mathbf{u}_{p_{\text{vir}}}$ を示す. 式(8)中の物体位置 \mathbf{x} を仮想物体位置 \mathbf{x}_c に置き換え, 入力を以下のように構築する.

$$\mathbf{u}_{p_{\text{vir}}} = K_p \sum_{j=1}^N \mathbf{J}_{0j}^T (\mathbf{x}_{d_{\text{vir}}} - \mathbf{x}_c). \quad (12)$$

ただし, $\mathbf{x}_{d_{\text{vir}}}$ は仮想フレームの目標位置であり, 以下のように設定する.

$$\mathbf{x}_{d_{\text{vir}}} = \mathbf{x}_{c_{\text{last}}} + (\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_{\text{last}}) \quad (13)$$

仮想目標位置 $\mathbf{x}_{d_{\text{vir}}}$ は, 制御入力の切り替え時の実フレームの位置 \mathbf{x}_{last} および仮想フレームの位置 $\mathbf{x}_{c_{\text{last}}}$ によって決定し, 情報欠損が起きている間はその値を保持し続けるものとする. 同様に, 仮想フレームの姿勢制御入力 $\mathbf{u}_{o_{\text{vir}}}$ を以下のように構築する.

$$\mathbf{u}_{o_{\text{vir}}} = K_o \sum_{i=1}^N \mathbf{J}_{\Omega i}^T \mathbf{r}_{xyz_{\text{vir}}} \quad (14)$$

ただし,

$$\mathbf{r}_{xyz_{vir}} = (\mathbf{r}_{x_{vir}} \times \mathbf{r}_{xd_{vir}}) + (\mathbf{r}_{y_{vir}} \times \mathbf{r}_{yd_{vir}}) + (\mathbf{r}_{z_{vir}} \times \mathbf{r}_{zd_{vir}}) \quad (15)$$

である. また, 仮想フレームの目標姿勢は $\mathbf{R}_{d_{vir}} = (\mathbf{r}_{xd_{vir}}, \mathbf{r}_{yd_{vir}}, \mathbf{r}_{zd_{vir}})$ である. このとき, 目標姿勢 $\mathbf{R}_{d_{vir}}$ を以下のように定める.

$$\mathbf{R}_{d_{vir}} = \mathbf{R}_d \mathbf{R}_{last}^T \mathbf{R}_{vir_{last}} \quad (16)$$

ただし, $\mathbf{R}_{vir_{last}}$ は切り替え前の最後の仮想フレームの姿勢であり, \mathbf{R}_{last} は最後に取得した物体の姿勢である.

目標位置姿勢と実フレームの位置姿勢との誤差の切り替え前最後の値を用いて仮想目標位置姿勢を設定することによって, 制御対象を仮想フレームに切り替えた際のトルクの連続性が保証される.

4. 制御入力切り替え時のトルクの連続性解析

本章では, 把持物体の位置姿勢情報欠損時に制御入力 \mathbf{u} から制御入力 \mathbf{u}_{vir} へとの切り替えを行う際においても, 入力トルクの連続性が保持されることを示す. 具体的には, 切り替え時の制御入力の誤差 $\mathbf{u} - \mathbf{u}_{vir}$ がゼロとなることを示す. $\mathbf{u} - \mathbf{u}_{vir}$ は以下ようになる.

$$\begin{aligned} \mathbf{u} - \mathbf{u}_{vir} &= \mathbf{u}_s + \mathbf{u}_p + \mathbf{u}_o - (\mathbf{u}_s + \mathbf{u}_{p_{vir}} + \mathbf{u}_{o_{vir}}) \\ &= \mathbf{u}_p - \mathbf{u}_{p_{vir}} + \mathbf{u}_o - \mathbf{u}_{o_{vir}} \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)より, $\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_{p_{vir}} = \mathbf{0}$ かつ $\mathbf{u}_o - \mathbf{u}_{o_{vir}} = \mathbf{0}$ のとき $\mathbf{u} - \mathbf{u}_{vir} = \mathbf{0}$ となることがわかる. まず, $\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_{p_{vir}} = \mathbf{0}$ となることを示す. ただし, 制御入力の切り替え時には, $\mathbf{x} = \mathbf{x}_{last}$, $\mathbf{x}_c = \mathbf{x}_{c_{last}}$ である.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_p - \mathbf{u}_{p_{vir}} &= K_p \sum_{i=1}^N \mathbf{J}_{0i}^T \{(\mathbf{x}_d - \mathbf{x}) - (\mathbf{x}_{d_{vir}} - \mathbf{x}_c)\} \\ &= K_p \sum_{i=1}^N \mathbf{J}_{0i}^T \{(\mathbf{x}_d - \mathbf{x}) \\ &\quad - \{\mathbf{x}_c + (\mathbf{x}_d - \mathbf{x}) - \mathbf{x}_c\}\} \\ &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (18)$$

次に $\mathbf{u}_o - \mathbf{u}_{o_{vir}} = \mathbf{0}$ となることを示す. ただし, 切り替え時には $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{last}$, $\mathbf{R}_{vir} = \mathbf{R}_{vir_{last}}$ である.

$$\mathbf{u}_o - \mathbf{u}_{o_{vir}} = K_o \sum_{i=1}^N \mathbf{J}_{\Omega i}^T (\mathbf{r}_{xyz} - \mathbf{r}_{xyz_{vir}}) \quad (19)$$

このとき, 式(19)中の \mathbf{r}_{xyz} および $\mathbf{r}_{xyz_{vir}}$ は, ロドリゲスの公式より, 回転行列 $\mathbf{R}_d \mathbf{R}^T$ の回転軸を表す単位ベクトル \mathbf{n} , 回転角 θ を用いて以下のように表される.

$$\mathbf{r}_{xyz} = \mathbf{r}_{xyz_{vir}} = 2 \sin \theta \mathbf{n} \quad (20)$$

よって, 式(19)は以下ようになる.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_o - \mathbf{u}_{o_{vir}} &= K_o \sum_{i=1}^N \mathbf{J}_{\Omega i}^T (2 \sin \theta \mathbf{n} - 2 \sin \theta \mathbf{n}) \\ &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (21)$$

表 1 物理パラメータ
三本指ハンドアームシステム

(リンク長)				
第一リンク	l_{a1}	1.300[m]	l_{i1}	0.300[m]
第二リンク	l_{a2}	1.000[m]	l_{i2}	0.200[m]
第三リンク	l_{a3}	0.175[m]	l_{i3}	0.140[m]
(質量中心位置)				
第一リンク	l_{ga1}	0.650[m]	l_{gi1}	0.150[m]
第二リンク	l_{ga2}	0.500[m]	l_{gi2}	0.100[m]
第三リンク	l_{ga3}	0.0875[m]	l_{gi3}	0.070[m]
(質量)				
第一リンク	m_{a1}	1.300[kg]	m_{i1}	0.250[kg]
第二リンク	m_{a2}	1.000[kg]	m_{i2}	0.150[kg]
第三リンク	m_{a3}	0.400[kg]	m_{i3}	0.100[kg]
(慣性テンソル)				
第一リンク I_{a1}	diag(7.453, 7.453, 0.260) × 10 ⁻¹ [kg·m ²]			
第二リンク I_{a2}	diag(3.397, 3.397, 0.128) × 10 ⁻¹ [kg·m ²]			
第三リンク I_{a3}	diag(0.291, 0.291, 0.500) × 10 ⁻¹ [kg·m ²]			
第一リンク I_{i1}	diag(7.725, 7.725, 0.450) × 10 ⁻³ [kg·m ²]			
第二リンク I_{i2}	diag(2.060, 2.060, 0.120) × 10 ⁻³ [kg·m ²]			
第三リンク I_{i3}	diag(0.538, 0.538, 0.031) × 10 ⁻³ [kg·m ²]			
指先半径 r_i	0.070[m]			

把持物体

把持物体	
質量 m	0.037[kg]
Y_1	0.092[m]
Y_2	0.048[m]
Y_3	0.048[m]
θ_{t1}	1.833[rad]
θ_{t2}	1.833[rad]
θ_{t3}	2.618[rad]
慣性テンソル I	diag(1.273, 0.193, 1.148) × 10 ⁻³ [kg·m ²]

表 2 各ゲインおよび目標位置姿勢

f_d	10.0[N]		
K_p	4.762		
K_o	0.238		
C_a	diag(1.003, 0.651, 0.735, 0.278, 0.177) × 10 ⁻¹ [Ns·m/rad]		
C_1	diag(0.606, 0.687, 0.786, 0.642, 0.198) × 10 ⁻² [Ns·m/rad]		
C_2	diag(0.468, 0.780, 0.318, 0.099) × 10 ⁻² [Ns·m/rad]		
C_3	diag(0.648, 0.780, 0.318, 0.099) × 10 ⁻² [Ns·m/rad]		
\mathbf{x}_d	(0.100, 0.500, 0.700) ^T [m]		
\mathbf{R}_d	0.88	-0.32	-0.34
	0.34	0.94	0.00
	0.32	-0.12	0.94

よって, $\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_{p_{vir}} = \mathbf{0}$ かつ $\mathbf{u}_o - \mathbf{u}_{o_{vir}} = \mathbf{0}$ となるため, 制御入力の切り替え時のトルク入力誤差 $\mathbf{u} - \mathbf{u}_{vir}$ はゼロとなり, トルクの連続性が保たれていることがわかる.

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 x 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. 表 2 には目標把持力および各ゲイン, 把持物体の目標位置・姿勢を示す. 更にシステムの初期状態を表 3 に示す. このときの入力トルクの時系列データを図 3 に示す. 図 3 中の操作対象はその時間帯に実フレームと仮想フレームの位置姿勢のどちらを操作対象としているかを示しており, 制御入力は \mathbf{u} と \mathbf{u}_{vir} のどちらを用いているかを示す. また, 全ての入力トルクのうち, 腕部および指 1 に関する値を表記している. 図 3 から, 操作対象が実フレームから仮想フレームへ切り替わる際, 入力トルクの連続性が保持されていることがわかる.

表 3 初期状態の各パラメータ

\dot{q}	$\mathbf{0}$ [rad/s]									
q_a	$(-0.183, -1.369, 1.898, 1.343, -0.787)^T$ [rad]									
q_{01}	$(1.007, 0.235, -0.771, 1.338, 0.328)^T$ [rad]									
q_{02}	$(0.242, -0.733, 1.122, 0.754)^T$ [rad]									
q_{03}	$(2.019, -0.924, 0.912, 1.088)^T$ [rad]									
\dot{x}	$\mathbf{0}$ [m/s]									
x	$(0.158, 0.501, 0.681)^T$ [m]									
ω	$\mathbf{0}$ [rad/s]									
R	<table border="1"> <tr> <td>1.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>0.00</td> <td>1.00</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>1.00</td> </tr> </table>	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
1.00	0.00	0.00								
0.00	1.00	0.00								
0.00	0.00	1.00								

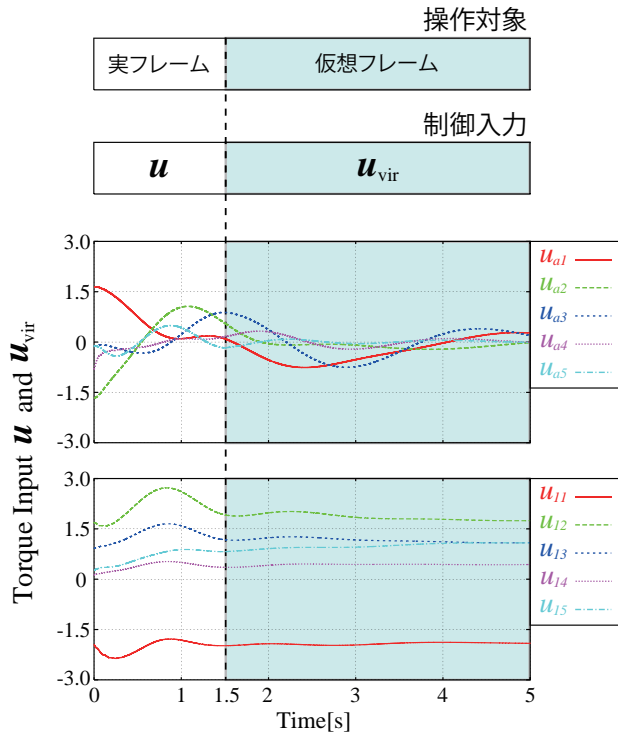


図 3 入力トルクの時系列データ

6. 結言

把持物体のオンライン位置姿勢情報の欠損にロバストな動的物体操作手法の制御入力切り替え時におけるトルクの連続性の検証を行った。まず、多指ハンドアームシステムと把持物体のモデルおよび指先の位置姿勢から定義される仮想フレームを示した。次に把持物体の位置姿勢情報取得時と欠損時の制御入力を示し、実フレームから仮想フレームへの切り替え時のトルクの連続性が保証されることを示した。最後に制御入力の切り替え時にトルクが連続となることを数値シミュレーションによって確認した。実環境下で本手法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。

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] 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] K. Honda, T. Hasegawa, T. Kiriki and T. Matsuoka, “Real-time pose estimation of an object manipulated by multi-fingered hand using 3D stereo vision and tactile sensing,” *1998 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1814–1819, Victoria, B.C., Canada, 1998.
- [3] Y. Yokokohji, M. Sakamoto and T. Yoshikawa, “Vision-aided object manipulation by a multifingered hand with soft fingertips,” *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, pp. 3201–3208, Detroit, Michigan, May 1999.
- [4] 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の欠損にロバストな動的物体操作”, 計測自動制御学会 SI 部門講演会予稿集, pp. 1940–1943, 2010.
- [5] A. Kawamura, K. Tahara, R. Kurazume and T. Hasegawa, “Dynamic Grasping for an Arbitrary Polyhedral Object by a Multi-fingered Hand-Arm System,” *2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2264–2270, St. Louis, Missouri, 2009.