

## 2 ステージ機構を用いたマニピュレータによる広帯域ハプティックインタフェースの一構成法

### A Wide Bandwidth Haptic Interface Using Manipulator with Two-stage Mechanism

○ 市瀬 瑠奈 (東京電機大学) 正 石川 潤 (東京電機大学)

Runa ICHINOSE, Tokyo Denki University, ichinose@robotics.fr.dendai.ac.jp  
Jun ISHIKAWA, Tokyo Denki University

This article proposes a method of configuring a two-stage mechanism with a wide range of motion and wide bandwidth control by adding a one-degree-of-freedom actuator with a narrower moving range but wider control bandwidth to a general-purpose manipulator. Then, the proposed band-separation control system is implemented in a manipulator with a linear actuator, and its effectiveness is verified by comparing it with conventional methods, constructing impedance control as an example. As a result, it was confirmed that the proposed method can reduce the displacement of the second stage compared to the conventional methods, and can achieve an impedance characteristic of an equivalent mass of 50 g in a wide moving range. Furthermore, as an application of the proposed method, a haptic interface based on variable impedance control was implemented and its performance was evaluated.

**Key Words:** Coordinated motion control, Haptics, Two-stage mechanism, Collaborative robots

### 1. 緒言

近年、仮想現実やロボットの遠隔操作に関してハプティックインタフェースが多く用いられている[1][2]。人間がロボットを用いて遠隔で操作を行うリーダー・フォロシステムにおいて高精密なハプティックインタフェースの実現が望まれており、例えば、人間が立ち入ることのできない宇宙空間や災害現場での作業、腹腔手術などでの活用が期待されている [3][4]。このようなシステムを実現するためのバイラテラル制御では、より高い透明性を実現する様々な手法が提案されており[5][6]、その実現には広帯域で制御可能なアクチュエータの使用が必須となっている。しかし、そのようなアクチュエータは、一般的に高価なものとなる。そのため、特性の異なる2種類のアクチュエータを組み合わせて、広可動範囲で、かつ高性能なアクチュエータを廉価に構成し、透明性の高いバイラテラル制御を実現する方法が提案されている[7]。

本稿では、可動範囲が広いが、運動制御の性能は低い粗動アクチュエータとして汎用マニピュレータを用いて、可動範囲は狭いが、高速かつ高精度で運動可能な微動アクチュエータとしてリニアアクチュエータを組み合わせる2ステージアクチュエータシステムの一構成法を提案する。さらに、その応用として、高性能かつ広可動範囲を実現するハプティックインタフェースを構築した結果について報告する。

### 2. 設計のための制御対象のモデリング

1段目の汎用マニピュレータと、2段目のリニアアクチュエータに対して位置の次元の制御則を設計するため、その基となる2ステージアクチュエータシステムのモデルを図1に示す。ここでは、一般性を失うことなく、汎用マニピュレータの $x$ 軸方向の運動について独立して考える。また、このモデルのパラメータと、変数の定義を表1に示す。

1段目および2段目の運動方程式を求めると、

$$M_1\ddot{x} = u_1 - K_1x_1 - D_1\dot{x}_1 - \{-K_2(x_2 - x_1) - D_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)\} - u_2 \quad (1)$$

$$M_2\ddot{x} = u_2 - K_2(x_2 - x_1) - D_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (2)$$

となる。式(1)および(2)から状態空間表現を導出する。このとき、状態を  $x_r = [x_1 \ x_2 \ \dot{x}_1 \ \dot{x}_2]^T$ 、入力を1段目と2段目の力指令として  $u = [u_1 \ u_2]^T$  とすると、状態空間表現は、

$$\begin{aligned} \dot{x}_r &= Ax_r + Bu \\ y_r &= Cx_r \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ただし、

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -K_1 - K_2 & K_2 & -D_1 - D_2 & D_2 \\ K_2 & K_2 & D_2 & D_2 \\ M_1 & M_1 & M_1 & M_1 \\ M_2 & M_2 & M_2 & M_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & -1 \\ M_1 & -M_1 \\ 0 & 1 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

である。

Table 1 Definitions of variables and parameters

Definition	Symbol	Value [unit]
Position of first stage	$x_1$	— [m]
Input to first stage	$u_1$	— [m]
Position of second stage	$x_2$	— [m]
Input to second stage	$u_2$	— [m]
Reference of first stage	$r_1$	— [m]
Reference of second stage	$r_2$	— [m]
Equivalent mass of first stage	$M_1$	5.0 [kg]
Equivalent damping of first stage	$D_1$	0.0 [N/(m/s)]
Equivalent stiffness of first stage	$K_1$	0.0 [N·m/(rad/s)]
Mass of first stage	$M_2$	$1.1 \times 10^{-1}$ [kg]
Damping of first stage	$D_2$	3.0 [N/(m/s)]
Stiffness of first stage	$K_2$	0.0 [N·m/(rad/s)]

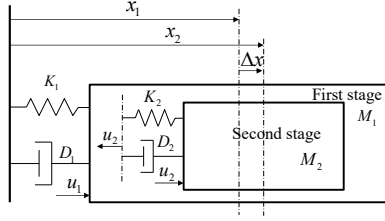


Fig. 1 Simplified model of two-stage system for controller design

### 3. 帯域分離制御系の設計

2章のモデルに対して位置指令値による帯域分離制御系を設計するため、式(3)に対して設計上の位置制御系を、実機の帯域を考慮して構成した制御対象モデルを考える。すなわち、目標位置に対して追従するようなフィードバック系を構成する。1段目のフィードバックゲイン  $K_{p1}$ 、 $K_{v1}$  および2段目のフィードバックゲイン  $K_{p2}$ 、 $K_{v2}$  を用いると、制御則  $u_1$ 、 $u_2$  は、

$$u_1 = -K_{p1}K_{v1}(x_1 - r_1) - K_{v1}\dot{x}_1 \quad (5)$$

$$u_2 = -K_{p2}K_{v2}(x_2 - r_2) - K_{v2}\dot{x}_2 \quad (6)$$

となる。式(3)に入力として式(5)と式(6)を代入し、あらためて目標位置  $\mathbf{u}_r = [r_1 \ r_2]^T$  を入力とする状態空間表現を求めると、

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_r &= \mathbf{A}_r \mathbf{x}_r + \mathbf{B}_r \mathbf{u}_r \\ \mathbf{y}_r &= \mathbf{C}_r \mathbf{x}_r \end{aligned} \quad (7)$$

となる。ただし、

$$\mathbf{A}_r = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -K_1 - K_2 - K_{p1}K_{v1} & K_2 + K_{p2}K_{v2} \\ \frac{M_1}{M_2} & -K_2 - K_{p2}K_{v2} \\ \frac{1}{M_1} & 0 \\ 0 & 1 \\ -D_1 - D_2 - K_{v1} & D_2 + K_{v2} \\ \frac{M_1}{M_2} & -D_2 - K_{v2} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{B}_r = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ K_{p1}K_{v1} & -K_{p2}K_{v2} \\ \frac{M_1}{M_2} & \frac{K_{p2}K_{v2}}{M_2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

である。この式(7)が目標位置を入力とする制御対象となる。

この制御対象(7)に対して、定常偏差をなくすために積分補償を加えた拡大系に対して状態フィードバック制御系を設計する(図2)。なお、 $r_1$ と $r_2$ は1段目と2段目の位置制御系個別の目標位置であり、2ステージシステムとして追従すべき共通の目標位置を  $r$  としていることに注意されたい。このような制御対象モデルに基づき制御系を設計することで、位置指令値しか受け付けられない汎用マニピュレータに対して、状態フィードバックに基づく制御系を構成することができる。

この拡大系の状態を  $\mathbf{x}_{re} = [z_1 \ z_2 \ x_1 \ x_2 \ \dot{x}_1 \ \dot{x}_2]^T$  とすると、その状態空間表現は、

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_{re} &= \mathbf{A}_{re} \mathbf{x}_{re} + \mathbf{B}_{re} \mathbf{u}_{re} \\ \mathbf{y}_{re} &= \mathbf{C}_{re} \mathbf{x}_{re} \end{aligned} \quad (9)$$

となる。ただし、

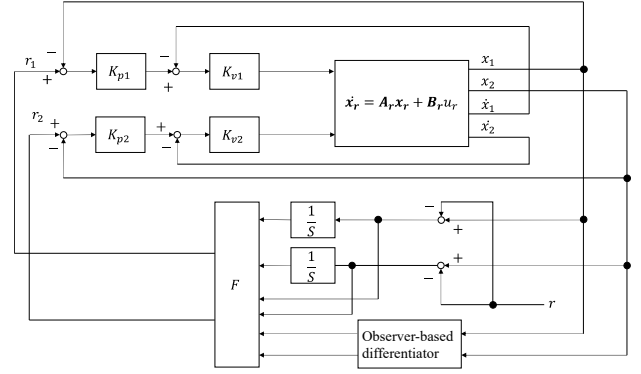


Fig. 2 Block diagram of coordinated-motion control system for two-stage system using state feedback with integral compensation based on augmented system

$$\mathbf{A}_{re} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_1 - K_2 - K_{p1}K_{v1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{M_1}{M_2} & -K_2 - K_{p2}K_{v2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_2}{M_2} & \frac{K_2 + K_{p2}K_{v2}}{M_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{K_2 + K_{p2}K_{v2}}{M_1} & \frac{-D_1 - D_2 - K_{v1}}{M_1} & \frac{D_2 + K_{v2}}{M_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_2 - K_{p2}K_{v2}}{M_2} & \frac{D_2}{M_2} & \frac{-D_2 - K_{v2}}{M_2} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_{re} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{K_{p1}K_{v1}}{M_1} & -\frac{K_{p2}K_{v2}}{M_1} \\ 0 & \frac{K_{p2}K_{v2}}{M_2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_{re} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

である。式(9)の拡大系をサンプリング時間 10 ms で 0 次ホールドを仮定して離散化し、その制御対象に対して最適制御問題を解くことで状態フィードバックゲイン  $F$  を決定する。帯域分離、すなわち 1 段目より広い制御帯域を 2 段目を実現するために、最適制御の重みは、

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= [200 \ 10000 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \\ \mathbf{R} &= [1 \ 1] \end{aligned} \quad (11)$$

と設計した。おおよそであるが、上記の設計により達成される制御系の目標位置を  $r$  に対する立ち上がり時間は 1 段目が約 0.1 s、2 段目が約 0.01 s となっている。

### 4. 2ステージシステムの性能評価実験

本章では、設計した 2 ステージシステムに対してインピーダンス制御を実装し、その性能を評価した結果について述べる。また、そのインピーダンス制御を用いて簡単なハプティックインタフェースを構築し、提案手法の有効性を検証する。

#### 4.1 実験装置の構成

はじめに、実験で使用する実験装置について説明する。実験装置の構成およびシステム構成を図3、図4に示す。1段目の汎用マニピュレータの手先に2段目のリニアアクチュエータを搭載する。このリニアアクチュエータには力センサが付いており、人間が加えた力を計測してインピーダンス制御を実現する。図4に示すように、マニピュレータ制御用PCとリニアアクチュエータ制御用マイコンはシリアル通信で結ばれている。なお、汎用マニピュレータは10ms、リニアアクチュエータは0.5msのサンプリング時間で制御を行っている。

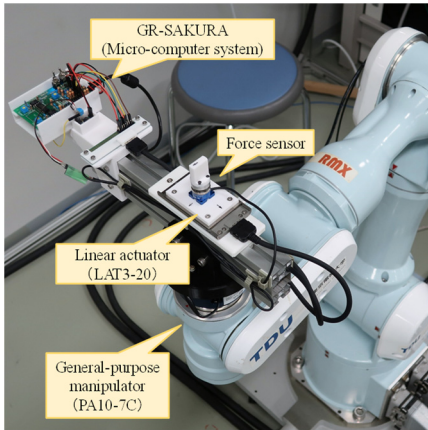


Fig. 3 Experimental setup consisting of manipulator and linear actuator equipped with force sensor

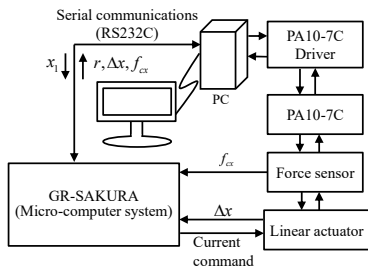


Fig. 4 Schematic diagram of experimental system configuration

#### 4.2 実験内容

図5に示すように、リニアアクチュエータ側にインピーダンスモデルを実装し、人間が加える力 $f_x$ によりこれを駆動し、目標値 $r$ を生成する。表2にインピーダンスモデルのパラメータを示したが、質量50gの一般的なマニピュレータでは実現し難い軽量な特性となっている。この目標値 $r$ と位置偏差 $\Delta x (= x_2 - x_1)$ が1段目側に送信される。また、汎用マニピュレータが備える位置制御系は目標値 $r_1$ により駆動され、その現在位置 $x_1$ が2段目に送信される。なお、1段目と2段目でサンプリング時間が異なることを考慮し、10ms周期で動く1段目の制御系においては、2段目の追従誤差は常に0として制御則を計算する(図5のスイッチ部)。また、2段目については、目標値 $r$ に追従するように、外乱オブザーバに基づく状態フィードバック制御系を別に設計、0.5ms周期で実装している。

今回は、比較として、1段目の目標値として $r_1$ を与える提案手法(図5)と、以下の2つの方法を合わせて評価した。

従来手法A: 1段目の目標位置として $x_2$ を与える。

従来手法B: 1段目の目標位置として $r$ を与える。

評価実験では、人間がなるべくランダムに力センサに力を加えて、その時の変位や力を計測し、その時間応答からスペクトル解析法で周波数応答を求め、3手法を比較する。

Table 2 Parameters of impedance model

Definition	Symbol	Value [Unit]
Mass	$M_I$	0.05 [kg]
Stiffness	$K_I$	10 [N·m / (rad / s)]
Damping	$D_I$	2.83 [N / (m / s)]

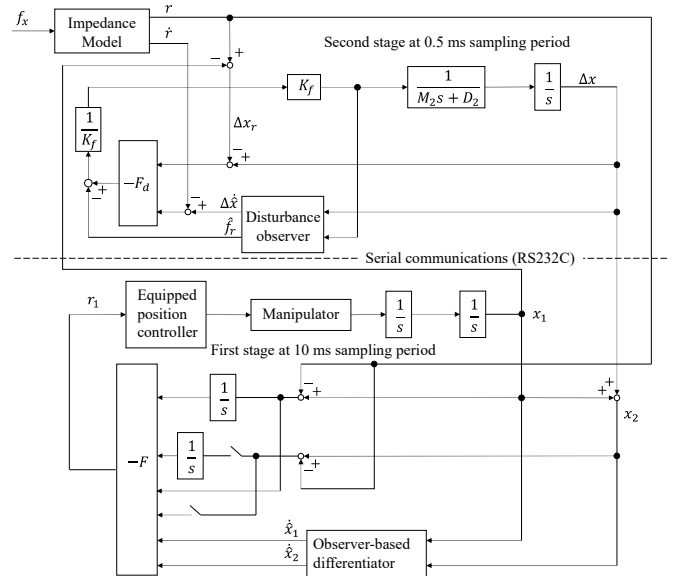


Fig. 5 Block diagram of proposed band-separated coordinated motion control for two system

#### 4.3 実験結果

図6に力 $f_x$ から2段目の位置 $x_2$ まで、図7に目標値 $r$ から位置偏差 $\Delta x$ まで、図8に目標値 $r$ から1段目の位置 $x_1$ までの周波数応答を示した。

図6は、達成されたインピーダンス特性を示しているが、リニアアクチュエータが広帯域で可動をしているため、いずれの方法もほぼインピーダンスモデル通りの応答が実現できている。図7より、目標位置 $r$ の変化に対して生じた位置偏差 $\Delta x$ は、0.7 Hz以下では提案手法が約4 dB (1.6倍)ほど小さかった。すなわち、その帯域においては、提案手法は位置偏差 $\Delta x$ を低く抑え、2段目の狭い可動範囲を有効に活用できていることを示している。このことは、図8の周波数応答(1段目の制御性能)を見ても、提案手法の帯域が最も広いことからわかる。

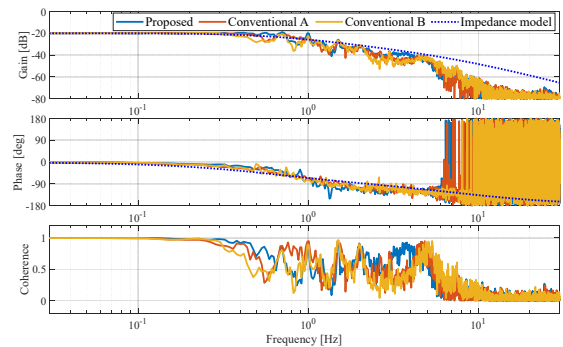


Fig. 6 Frequency response from force applied by human to position of second stage: This response shows the impedance characteristics as perceived by human.

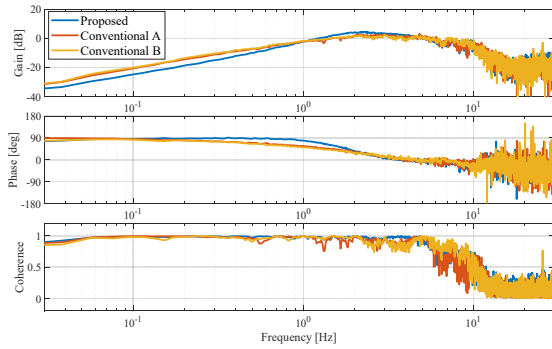


Fig. 7 Frequency response from reference position  $r$  to second stage displacement  $\Delta x$ : The lower the gain, the smaller the displacement of the second stage  $\Delta x$  is.

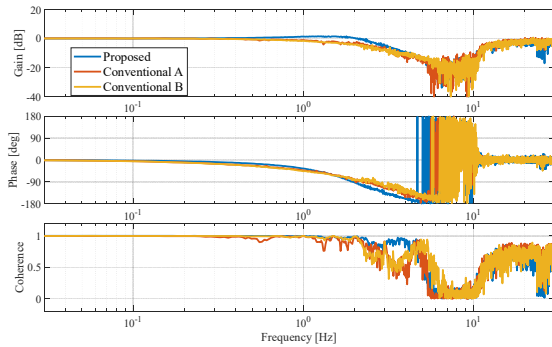


Fig. 8 Frequency response from reference position,  $r$ , to position of first stage  $x_1$ : This response shows the control performance of the first stage, *i.e.* the manipulator.

### 5. 可変インピーダンス制御系への応用

4章で基本性能を確認した提案手法の応用として、可変インピーダンス制御に基づく簡単なハプティックインタフェースを実現し、その機能を検証する。

#### 5.1 実験内容

提案手法を用いて、2段目の位置に応じてインピーダンスの特性が変化するような可変インピーダンス制御系を実装した。2段目位置の範囲（ゾーン A から D）に応じた、それぞれのインピーダンスモデルのパラメータを表 3 に示す。いずれも設計質量は 50 g であり、ゾーン A では表 2 と同じモデル、ゾーン B ではバネ特性のない、ダンピングを重くしたモデル、ゾーン C ではバネ特性のない、ダンピングを軽くしたモデルにシームレスに切り替わるようにした。また、ゾーン D では、バネ剛性が硬めのモデルを設定し、壁に当たるような感覚を実現する。実験では、ゾーン A、ゾーン B、ゾーン C、ゾーン D の順に、手先位置を移動させ、それぞれの位置で、そのインピーダンス特性を確認する。

#### 5.2 実験結果

実験の結果として、操作中のマニピュレータ位置  $x_1$ 、リニアアクチュエータ位置  $x_2$ 、目標値  $r$ 、さらに位置偏差  $\Delta x$  と力  $f_x$  の時間応答を図 9 に示す。ゾーン A では基準点に戻る力が働いていることがわかる。また、ゾーン B では、動作が重くなり、手を離すとその場に留まるようになり、ゾーン C では、動作が軽く、少し力を加えるだけで流れるように動作した。さらに、レンジ D では力を加えたら反発するような力を感じた。

Table 3 Parameter values of variable impedance model

Zone	Domain for $x_2$	$M_i$ [kg]	$K_i$ [N/m]	$D_i$ [N/(m/s)]
B	$x_2 < -0.02$	0.05	0.0	14.14
A	$-0.02 \leq x_2 \leq 0.02$	0.05	10.0	2.83
C	$0.02 < x_2 \leq 0.12$	0.05	0.0	0.71
D	$0.12 < x_2$	0.05	100.0	8.94

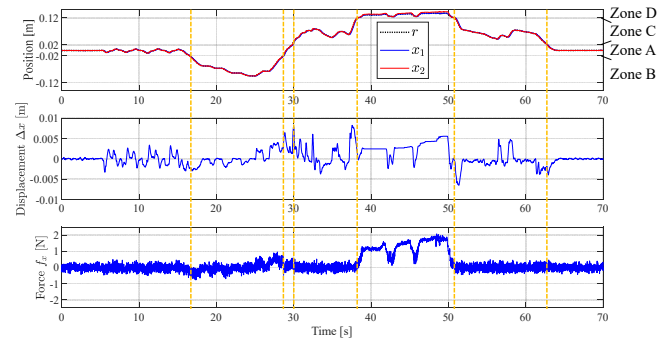


Fig. 9 Time responses of position  $x_1$  and  $x_2$  with reference  $r$ , displacement  $\Delta x$  and applied force  $f_x$  during operation under variable impedance control: The displacement of the second stage  $\Delta x$  is within 0.01 m of the allowable moving range even while the position of the stage system is moved beyond 0.1 m.

## 6. 結論

本稿では、汎用マニピュレータとリニアアクチュエータを用いて、可動範囲が広くかつ広帯域に制御可能な 2 ステージ機構の一手法を提案した。その結果、提案手法は従来手法と比べて 2 段目の変位を小さく抑えることができた。また、等価質量でいえば 50 g の軽量なインピーダンスモデル特性を実現できることを確認した。

## 参考文献

- [1] 菊池智, 濱本和彦, “没入型 VR 環境で使用可能な力覚提示装置 (HAMA デバイス) の開発”, 電気学会論文誌 C, Vol. 129, No. 10, pp. 1859-1864, 2009.
- [2] 黒田真嗣, 坂本哲三, “リニア同期モータを用いたハプティックインターフェースの研究”, 電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, 07-2A-06, 2010.
- [3] G.S, Guthart. and J.K, Salisbury., “The intuitive telesurgery system: overview and application,” IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 618-622, 2000.
- [4] 安藤裕, 中澤和夫, 森川康英, “微細手術における対象物判別のための可変インピーダンス型バイラテラル制御”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 74, No. 742, pp. 140-145, 2008.
- [5] MOTOI, N., Kubo, R., Shimono, T. and Ohnishi, K., “Bilateral control with different inertia based on modal decomposition,” *Proceedings of the IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 697-702, 2010.
- [6] Motooka, W., Nozaki, T., Mizoguchi, T., Sugawara, K., Mitome, F., Okuda, K., Miyagaki, M., Yashiro, D., Yakoh, T., Ohnishi, K., Morikawa, Y. and Shimojima, N., “Development of 16-DOF telesurgical forceps master/slave robot with haptics,” *Proceedings of the 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2081-2086, 2010.
- [7] 国立彩織, “2 ステージアクチュエータシステムを用いた広帯域バイラテラル制御”, 日本機械学会論文集, vol.81, pp.1-16, 2015.