Bilateral Teleoperation through Networks

Kenji Natori Student Member (Keio University, natori@sum.sd.keio.ac.jp)

Toshiaki Tsuji Student Member (Keio University, tsuji@sum.sd.keio.ac.jp)

Takahiro Yakoh Member (Keio University, yakoh@sd.keio.ac.jp)

Kouhei Ohnishi Member (Keio University, ohnishi@sd.keio.ac.jp)

Keywords: haptics, tactile sensation, acceleration control, bilateral system, time delay, transparency

In this paper, the effect of time delay on bilateral systems is mainly described. In particular, firstly the effect is analysed using frequency response of hybrid matrix based on the notion of transparency. Then bilateral teleoperation experiment through an actual network is executed.

The bilateral system used in this paper is shown in Fig. 1. Here

Fig. 1. Bilateral teleoperation system

T_1 and T_2 mean delay time from master side to slave side and that of opposite direction, respectively. $T (= T_1 + T_2)$ means round trip time delay. In this system, almost ideal robust acceleration control for tactile sensation is realized in both master and slave systems. In other words, stiffness of the control system can be changed arbitrarily. The acceleration reference is generated by the controller that consists of a servo system for sum of force information and a regulator system for difference of position information.

Then the notion of transparency is described. It is one of useful indices for bilateral systems. Fig. 2 shows the flow of environmental information of bilateral systems.

Fig. 2. Flow of environmental information

F_m is force applied to master manipulator by operator. F_s indicates force applied to the environment from slave manipulator. X_m and X_s are the position information of master and slave, respectively. Then this information is associated with hybrid matrix as (1).

$$\begin{bmatrix} F_m \\ X_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ F_s \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

Here the meaning of transparency is ideal state of bilateral systems. It is formulated as below.

$$X_m = X_s, \quad F_m = -F_s \dots\dots\dots (2)$$

Therefore representation of transparency using hybrid matrix is shown as next equation.

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

Then the frequency responses of $H_{21}(H_{12})$ are shown in Fig. 3.

Fig. 3. Bode diagram of $H_{21}(H_{12})$

Finally, an actual experiment of bilateral teleoperation through a campus network of Keio university is conducted. Experimental results are shown in Figs. 4 and 5.

Fig. 4. Contact to soft environment

Fig. 5. Contact to hard environment

Transmission of tactile sensation from remote environment is achieved.

ネットワークを介したバイラテラル遠隔操作

学生員 名取 賢二* 学生員 辻 俊明*

正員 矢向 高弘* 正員 大西 公平*

Bilateral Teleoperation through Networks

Kenji Natori*, Student Member, Toshiaki Tsuji*, Student Member, Takahiro Yakoh*, Member,
Kouhei Ohnishi*, Member

Nowadays haptics (tactile sensation) is receiving much attentions. To transmit a vivid tactile sensation, real-time processing is necessary. In these circumstances, time delay caused in networks or some devices is a very serious problem. Therefore in this paper, influence of time delay on bilateral systems for haptics is examined.

At first, the influence is verified by the analysis based on an evaluation index "Transparency". Characteristic behavior of time delay can be found out. Then experimental results via the network between Shinanomachi and Yagami campus (Keio University) are shown. Transmission of vivid tactile sensation of remote environment is realized.

キーワード：触覚，力覚，加速度制御，バイラテラルシステム，通信遅延，透明性

Keywords: haptics, tactile sensation, acceleration control, bilateral system, time delay, transparency

1. 序 論

近年，環境からの力覚情報を伝達するための研究が注目を集めている。力覚情報は，現代の情報化社会において主にやり取りされる視覚や聴覚の情報と同様，人間の五感の1つであり，非常に重要な情報であるということが出来る。ここで述べている力覚情報とは，接触動作時に環境がマニピュレータに加える反力のことであるが，これは作用・反作用の法則によって得られるものである。よって，力覚情報の伝達を実現するためにはより高速な実時間処理が必要となる。

しかし，特に遠隔地環境の力覚情報を伝達しようとする場合には，遠隔地側と操作者側の間に必然的に通信遅延が生じてしまう。前述のように，力覚情報が作用・反作用の法則によって得られる情報であることを考えると，通信遅延は，鋭敏な力覚の伝達を阻害する要素であり，かつ制御系全体の不安定化を招く可能性もあることから，非常に深刻な問題である。このような理由から，現在までに様々な研究がなされている。力覚情報伝達のためのシステムの多くは，マスタースレーブ型マニピュレータを用いたバイラテラルシステムであるから，それらの研究の多くは，通信遅

延が存在するバイラテラルシステムについてのものであるということになる。

通信遅延が存在するバイラテラル制御システムの，安定性に関する代表的な研究が，Anderson らによるものである⁽¹⁾。彼らは，システムの安定性を受動性という観点から捉え，散乱理論を提案した。これは，以後の安定性に関する研究の基礎となった。一方，システムの性能評価に関する研究で代表的なのが，Hannaford によるものである⁽²⁾。この研究では，バイラテラルシステムを二端子対回路とみなし，マスタ・スレーブの力情報，位置情報をハイブリッド行列によって結びつけた。さらに，バイラテラルシステムの理想的な状態をハイブリッド行列の要素で示した。この理想状態は，後に Lawrence⁽³⁾ や Hashtrudi-Zaad ら⁽⁴⁾ によって透明性という概念として確立され，バイラテラルシステムの代表的な性能評価指標の1つとなっている。

本研究では，通信遅延がバイラテラルシステムの性能に与える影響を，この透明性という指標を用いて検証する。本研究で用いるバイラテラルシステムでは，マスタ・スレーブ双方において外乱オブザーバによるロバストな加速度制御系が実現されており⁽⁵⁾⁽⁶⁾，かつ力情報の和に対するサーボ系と位置情報の差に対するレギュレータからなる，力覚伝達にとってほぼ理想的な制御器⁽⁷⁾⁽⁸⁾が導入されている。つまり，通信遅延が存在しない状況ではほぼ理想的なバイラテラルシステムに対し，通信遅延がどのような影響を与えるかを解析していく。さらに，実際に慶應義塾大学の信濃町キャンパスと矢上キャンパスを繋ぐキャンパス間ネット

* 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科
〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1

Department of System Design Engineering, Faculty of Science and Technology, Keio University
3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522

表 1 パラメータおよび変数一覧

Table 1. Parameters and variables list.

J	Inertia (mass)
K_t	Thrust constant
g_d	Cutoff frequency of disturbance observer
g_r	Cutoff frequency of reaction force observer
K_p	Position gain
K_v	Velocity gain
K_f	Force gain
X	Position
$\dot{X}$	Velocity
$\ddot{X}$	Acceleration
F	Force
I_a	Torque current
I_{cmp}	Compensation current

表 2 添え字一覧

Table 2. Subscripts list.

$\bigcirc_n$	Nominal value
$\bigcirc^{ref}$	Reference value
$\bigcirc_m$	Master
$\bigcirc_s$	Slave

ワーク（直線距離約 15 km）を介したバイラテラルシステムを構築し、遠隔地環境との接触実験を行い、通信遅延存在下での力覚情報の伝達を実現する。

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章で、以後の議論の前提となる、通信遅延（むだ時間）の特徴的な挙動について簡単に述べる。第 3 章では外乱オブザーバによる加速度制御系および反力推定オブザーバによるセンサレス反力推定について述べ、さらにそれらをマスタ・スレーブ双方に備え、かつ通信遅延が存在するバイラテラル制御系を示す。第 4 章では、バイラテラルシステムの代表的な性能指標である透明性について述べ、本研究で用いた制御系における通信遅延の影響を解析する。第 5 章では本研究で用いたキャンパス間ネットワークについて述べ、さらに実験結果を示す。第 6 章で本研究の結論を述べる。

尚、本文の図中で用いたパラメータや変数および添え字は表 1、表 2 の通りである。

2. 通信遅延

情報伝達の際にネットワーク等で生じる通信遅延は、制御系におけるむだ時間と捉えることができる。むだ時間の挙動は、通常の物理システムで見られる一次遅れ、二次遅れ要素などの挙動とは本質的に異なり、有限次元の線形微分方程式では表現できないものであるため、数学的な扱いが非常に困難である。よって一般的に制御系の解析および設計には特別な注意が必要となる。本章では、次章以降の議論の前提として、むだ時間の特徴的な挙動について述べる。

むだ時間 T を持つシステム $g(t-T)$ をラプラス変換すると、次のようになる。

$$g(t-T) \Rightarrow G(s)e^{-sT} \dots \dots \dots (1)$$

つまり、むだ時間要素はラプラス領域においては e^{-Ts} と表される。よってむだ時間を含む制御系の伝達関数は、一般的な s の多項式では表せない非有理関数となってしまう。一般に、むだ時間要素を含んだ制御系の設計の際には、むだ時間を多項式で近似することが多いが、これは直接的な扱いが困難であるためである。また、実際に多項式で近似しても次式のような無限次元の多項式になってしまう。

$$e^{-Ts} = 1 - Ts + \frac{1}{2}T^2s^2 - \frac{1}{6}T^3s^3 + \dots \dots \dots (2)$$

次に、周波数領域におけるむだ時間の挙動について述べる。 $s = j\omega$ とすると、オイラーの公式より、周波数領域におけるむだ時間要素は、次式のように表される。

$$e^{-j\omega T} = \cos \omega T - j \sin \omega T \dots \dots \dots (3)$$

よって、この要素の絶対値および位相は、次の 2 式のように表される。

$$|e^{-j\omega T}| = |\cos \omega T - j \sin \omega T| = 1 \dots \dots \dots (4)$$

$$\angle e^{-j\omega T} = -\omega T \dots \dots \dots (5)$$

これらの式から、むだ時間要素は、特に位相特性に非常に深刻な影響を与えるものであることがわかる。つまりこの特徴的な位相遅れがシステムの不安定化を招く大きな要因となるのである。

3. バイラテラル制御系

本章では、本研究で用いた制御系全体の構成について述べる。まず最初に外乱オブザーバによる加速度制御系について述べ、次に反力推定オブザーバによる、センサレスの反力推定手法について述べる。最後に、通信遅延が存在するバイラテラル制御系全体の構成を示す。

〈3・1〉 外乱オブザーバによる加速度制御系⁽⁵⁾⁽⁶⁾

力覚情報を伝達するバイラテラル制御系においては、力情報と位置情報を同時に制御し、制御系の剛性を任意に変化させることが可能な制御器を用いなければならない。ここで力情報と位置情報が加速度次元で結びつくことを考えると、加速度制御系が不可欠であることになる。よって本節では、外乱オブザーバによる加速度制御系について述べる。図 1 中の破線部が外乱オブザーバである。外乱オブザーバにより、システムに加わる負荷およびパラメータ変動等による影響はすべて外乱として推定される。

$$F_{dis} = F_{reac} + f + D\dot{X} + \Delta J\ddot{X} + \Delta K_t I_a^{ref} \dots \dots \dots (6)$$

F_{dis} : 外乱

F_{reac} : 環境反力

f : クーロン摩擦

$D\dot{X}$: 粘性摩擦

$\Delta J\ddot{X}$: 変動慣性による慣性力

$\Delta K_t I_a^{ref}$: トルクリプル

図 1 外乱オブザーバ
Fig. 1. Disturbance observer.

図 2 加速度制御系
Fig. 2. Acceleration control system.

図 3 反力推定オブザーバ
Fig. 3. Reaction force observer.

推定された外乱をフィードバックすると、システムに加わる外乱に対するフィードフォワード効果となり、その影響を打ち消すことができる。また、外乱オブザーバ中の低域通過フィルタのカットオフ周波数が、仮に無限大とした場合、図 1 は、図 2 に等価変換することができる。図 02 から、外乱オブザーバが全帯域で外乱を補償できるとすれば、理想的な加速度制御系が実現できることがわかる。

〈3・2〉 センサレス反力推定⁽⁹⁾ 本研究では、反力の推定手法として、外乱オブザーバをもとにした反力推定オブザーバを用いる。前節で述べたように、外乱オブザーバは反力を含むすべての外乱を推定する。それに対し、反力推定オブザーバは、外乱オブザーバによって推定される外乱の中から、反力以外のすべての項を除くことにより反力のみを推定する機構である。よって、図 3 中の $F_{dis} - F_{reac}$ は、次式のように表される。

図 4 通信遅延が存在するバイラテラル制御系
Fig. 4. Bilateral teleoperation system.

$$F_{dis} - F_{reac} = f + D\dot{X} + \Delta J\ddot{X} + \Delta K_t I_a^{ref} \dots \dots \dots (7)$$

つまり、反力推定オブザーバを実装する際には、反力以外の項の値をあらかじめ同定試験等によって求めておき、外乱の推定値からそれらの値を除くことによって、反力の値のみを得るのである。この反力推定手法を用いることにより、反力のセンシング帯域は任意に決定することができる。よって、高分解能のエンコーダや高速なプロセッサ等を使用することにより、より広い帯域で反力の推定を行うことができる。

〈3・3〉 通信遅延が存在するバイラテラル制御系 図 4 が、本研究で用いたバイラテラル制御系である。ここで、図中の T_1 はマスタからスレーブまでの通信遅延、 T_2 はスレーブからマスタまでの通信遅延であり、 $T (= T_1 + T_2)$ は往復の通信遅延である。また、 G_H 、 G_L は次のように表される。

$$G_H(s) = \frac{s}{s + g_d} \dots \dots \dots (8)$$

$$G_L(s) = \frac{g_r}{s + g_r} \dots \dots \dots (9)$$

つまり、本システムではマスタ・スレーブ双方に外乱オブザーバおよび反力推定オブザーバが導入されている。また、制御器は力情報の和についてのサーボシステムと位置情報の差についてのレギュレータ (PD 制御) から成っており⁽⁸⁾、これと外乱オブザーバにより、ロバストな加速度制御系が実現されている。

4. 透 明 性

本章では、バイラテラルシステムの代表的な評価指標である透明性を用いて、通信遅延がバイラテラルシステムの性能に与える影響について解析する。まず、バイラテラルシステムをハイブリッド行列を用いて表現し、ハイブリッド行列を用いて透明性の定式化を行う。その後、本研究で用いたバイラテラル制御系のハイブリッド行列を導出し、

図5 環境情報の流れ

Fig. 5. Flow of environmental information.

その要素の周波数応答を解析することにより、透明性の評価を行う。

〈4・1〉 ハイブリッド行列による定式化 バイラテラルシステムの環境情報の流れを二端子対回路モデルで表現したのが図5である。図中で、 F_m は操作者がマスタに加える力情報、 F_s はスレーブが環境に加える力情報を表し、 X_m 、 X_s はそれぞれマスタ、スレーブの位置情報を表す。図5をもとに、バイラテラルシステムをハイブリッド行列を用いて表すと次式のようにになる。

$$\begin{bmatrix} F_m \\ X_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ F_s \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、透明性とは次式で表されるようなマスタとスレーブの力情報・位置情報の完全な一致である（力情報の符号が異なるのは、作用・反作用の法則による）。

$$F_m = -F_s \dots\dots\dots (11)$$

$$X_m = X_s \dots\dots\dots (12)$$

よって、完全な透明性が実現されているときのハイブリッド行列は次式のようにになる。

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

〈4・2〉 周波数応答による透明性の解析 本節では、本研究で用いたバイラテラル制御系のハイブリッド行列を導出し、その要素の周波数応答を解析することにより、通信遅延が与える影響について検証する。

本研究で用いたバイラテラル制御系（図4）のハイブリッド行列を導出すると、次式のようにになる。

$$\begin{aligned} H_{11}(s) &= \frac{C_p(s)^2(e^{-sT} - 1) - (s^4 + 2C_p(s)s^2)}{D(s)} \\ H_{12}(s) &= \frac{-(G_L K_f(s^2 + 2C_p(s)) + \frac{G_H}{J_n} C_p(s))e^{-sT_2}}{D(s)} \\ H_{21}(s) &= \frac{(G_L K_f(s^2 + 2C_p(s)) + \frac{G_H}{J_n} C_p(s))e^{-sT_1}}{D(s)} \\ H_{22}(s) &= \frac{G_L^2 K_f^2(e^{-sT} - 1) - (2\frac{K_f G_L G_H}{J_n} + \frac{G_H^2}{J_n^2})}{D(s)} \\ (C_p(s) &= K_v s + K_p) \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

ここで、 $D(s)$ は次式のように表される。

$$\begin{aligned} D(s) &= (s^2 + (K_v s + K_p)(1 + e^{-sT}))G_L K_f \\ &+ \frac{G_H}{J_n}(s^2 + K_v s + K_p) \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

表3 パラメータ

Table 3. Parameters.

K_p	K_v	K_f	g_d	g_r	J_n
1700	100	0.4	600	600	0.3

図6 $H_{21}(H_{12})$ のゲイン線図

Fig. 6. Gain diagram of $H_{21}(H_{12})$.

図7 $H_{21}(H_{12})$ の位相線図

Fig. 7. Phase diagram of $H_{21}(H_{12})$.

以下では、導出されたハイブリッド行列の要素の周波数応答を求める。ここで(10)より、 H_{21} および H_{12} は、位置情報および力情報の伝達の性能を示しており、また(12)、(11)から、これらの要素の理想的な値は直感的に理解しやすい。よってここでは、 $H_{21}(H_{12})$ についてのみ解析を行う（(14)より両要素のゲインは等しく、位相に関しても F_m と $-F_s$ の間の伝達と考えれば、両要素間において本質的な差異はない）。解析において用いたパラメータは表3に示す通りである。また、本解析で用いた往復の通信遅延（ $T = 8 \text{ ms}, 9 \text{ ms}$ ）の値は、図12をもとにしている。つまり、実験で用いたネットワーク環境における往復の通信遅延の最小値と最大値である。

$H_{21}(H_{12})$ のゲイン線図および位相線図を、それぞれ図6、図7に示す。図6から、力情報（位置情報）伝達の帯域は、通信遅延の影響により外乱オブザーバおよび反力推定オブザーバの帯域より明らかに狭くなっていることがわかる。また、通信遅延が大きいほどピーク値は大きくなり、ピー

ク値をとる周波数は小さくなっていることがわかる。図 7 からは、むだ時間要素特有の位相遅れが観察できる。この位相遅れは、制御系の安定性に深刻な影響をもたらす。

5. 実験

本章では、本研究で用いた実験装置について述べた後、実験結果を示す。

〈5・1〉 実験装置 マスタおよびスレーブのマニピュレータを図 8、図 9 に示す。いずれも 1 自由度直動型の機構であり、リニアモータによって駆動される。また、光学式エンコーダにより位置情報を計測する。尚、マスタを信濃町キャンパス側、スレーブを矢上キャンパス側に設置した。両キャンパス間の直線距離は約 15 km である。

次に、本研究で使用したネットワーク構成を図 10 に示す。ネットワークの設定としては、末端 Catalyst 同士を帯域予約なしの VLAN で接続した。すなわち 4 台の PC は、仮想的に 2 台のスイッチングハブを介してサブネット結合されていることとした。VLAN 接続した理由は、4 台の PC の設定が容易となることと、遅延の短縮と遅延揺らぎの低減が期待できることである（経由するルータが IP 経路表を参照せずに TAG 参照だけで転送するため）。

キャンパス間ネットワークには学事・教育・研究用途など本実験以外のパケットが往来しているため、それらの存在や流通量の変動などが本実験の通信遅延や遅延の揺らぎを引き起こす可能性がある（なお、キャンパス間ネットワークを管理している部署によると、平常時のトラフィックデータによれば常に 1 Gbps 以上の帯域が空いているため、他のトラフィックによる影響はほとんどない）。そこで、事前にライブ中継用の PC 同士で通信遅延の揺らぎを測定した。一方の PC では RT Linux と RT Messenger⁽¹⁰⁾ を用いて 10 ms 周期で 1 つのパケットを 1 万回送信するプログラムを動作させ、他方のキャンパスにある PC でそれらパケットの到着時刻をプロセッサ内の TSC (Time Stamp Counter) を用いて高精度測定した。連続する 2 つの測定時刻の差、すなわち 10 ms の送信間隔で送信したパケットが到着した間隔、の測定結果を図 11 に示す。9999 サンプル中の 99% 以上が時差 0.2 ms 以内であり、最大で時差 0.6 ms 以下であることがわかる。また、往復の通信遅延を、マニピュレータ制御用 PC 同士で、出発時と到着時のサンプル数の差によって測定した。その結果を図 12 に示す。通信のサンプリングタイムは 1 ms であったため、1 ms 刻みのデータとなっている。つまり、往復の通信遅延は、すべて 8 ms～9 ms の間の値であるということになる。

〈5・2〉 実験結果 図 13～図 16 に実験結果を示す。図 13、図 14 は、スレーブを柔らかい環境へ接触させた場合の応答であり、図 15、図 16 は、硬い環境へ接触させた場合の応答である。すべての図において、太線（実線）はマスタ、細線（破線）はスレーブの応答を示している。また、図中の網かけ部分は接触していることを表す。尚、制御系のサンプリングタイムは 0.1 ms とした。

図 8 マスタ（信濃町キャンパス）

Fig. 8. Master manipulator (Shinanomachi campus).

図 9 スレーブ（矢上キャンパス）

Fig. 9. Slave manipulator (Yagami campus).

図 10 ネットワーク構成

Fig. 10. Setup of network.

図 11 通信遅延の揺らぎ（片道）

Fig. 11. Fluctuation of delay (one way).

図 12 通信遅延（往復）

Fig. 12. Round trip delay.

図 13、図 14 より、柔らかい環境に対する接触は安定に行われ、かつ反力が正確に伝達されていることがわかる。一方、図 15、図 16 を見ると、環境が硬い分、接触した瞬間のマスタの位置の行き過ぎ量が大きくなってしまっている

図 13 位置応答 (柔らかい環境)

Fig. 13. Position response (soft environment).

図 16 力応答 (硬い環境)

Fig. 16. Force response (hard environment).

図 14 力応答 (柔らかい環境)

Fig. 14. Force response (soft environment).

図 15 位置応答 (硬い環境)

Fig. 15. Position response (hard environment).

が、接触は安定に行われ、反力も正確に伝達されていることがわかる。さらに、図 13～図 16 から、非接触時の位置の追従性は非常に良好であることがみてとれる。

以上より、実際の通信遅延存在下において、良好な力覚の伝達と、質の良いバイラテラル制御を行うことができた。

6. 結 論

本研究では、通信遅延がバイラテラルシステムの性能に与える影響を、透明性という指標を用いて評価した。具体的には、ハイブリッド行列の要素の周波数応答を取ったが、ゲイン特性、位相特性それぞれにむだ時間の特徴的な挙動が現れていた。さらに、実際に慶應義塾大学のキャンパス間ネットワーク (直線距離約 15 km) を介したバイラテラルシステムを構築し、遠隔操作実験を行った。実験結果から、遠隔地からの良好な力覚情報の伝達を実現できたといえる。

(平成 17 年 2 月 22 日受付, 平成 17 年 7 月 28 日再受付)

文 献

- (1) R.J. Anderson and M.W. Spong: "Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay", *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol.34, No.5, pp.494–501 (1989)
- (2) B. Hannaford: "A Design Framework for Teleoperators with Kinesthetic Feedback", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.5, No.4, pp.426–434 (1989)
- (3) D.A. Lawrence: "Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.9, No.5, pp.624–637 (1993)
- (4) K. Hashtrudi-Zaad and S.E. Salcudean: "On the Use of Local Force Feedback for Transparent Teleoperation", *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1863–1869 (1999)
- (5) K. Ohnishi, M. Shibata, and T. Murakami: "Motion Control for Advanced Mechatronics", *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol.1, No.1, pp.56–67 (1996)
- (6) K. Ohnishi: "Robust Motion Control by Disturbance Observer", *JRSJ*, Vol.11, No.4, pp.486–493 (1993) (in Japanese)
大西公平:「外乱オブザーバによるロボasts・モーションコントロール」, 日本ロボット学誌, **11**, 4, pp.486–493 (1993)
- (7) W. Hida and K. Ohnishi: "Reproducibility and Operationality in Bilateral Teleoperation", *Proc. of IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, pp.217–222 (2004)
- (8) Y. Matsumoto, S. Katsura, and K. Ohnishi: "An Analysis and Design of Bilateral Control Based on Disturbance Observer", *Proc. of IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp.802–807 (2003)
- (9) T. Murakami, F. Yu, and K. Ohnishi: "Torque Sensorless Control in Multidegree-of-Freedom Manipulator", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol.40, No.2, pp.259–265 (1993-2)
- (10) H. Sato and T. Yakoh: "A Real-time Communication Mechanism for Hard Time-constrained Multimedia", *IPSJ Journal*, Vol.42, No.2, pp.189–196 (2001-2) (in Japanese)
佐藤秀雄・矢向高弘:「時間制約の厳しいマルチメディアのためのリアルタイム通信機構」, 情報処理学論誌, **42**, 2, pp.189–196 (2001-2)

名 取 賢 二 (学生員) 1980 年生。2004 年 3 月慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科卒業。同年 4 月同大学大学院修士課程入学。現在、主としてバイラテラル制御，むだ時間システムに関する研究に従事。

矢 向 高 弘 (正員) 1965 年生。1994 年 3 月慶應義塾大学大学院理工学研究科計算機科学専攻博士課程単位取得退学。同年 4 月日本鋼管入社，1996 年慶應義塾大学メディアネット本部，1998 年 4 月同大学理工学部システムデザイン工学科助手，現在，同学科助教授。工学博士。主として実時間処理，コンピュータネットワーク，ネットワークベース制御に関する研究に従事。

辻 俊 明 (学生員) 1978 年生。2001 年 3 月慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科卒業。2003 年 3 月同大学大学院修士課程修了。同年 4 月同大学大学院博士課程入学，現在，主として 2 足歩行ロボット，バイラテラル制御，分散制御に関する研究に従事。

大 西 公 平 (正員) 1952 年生。1980 年 3 月東京大学大学院工学系研究科電気工学専門課程博士課程修了。同年 4 月慶應義塾大学工学部電気工学科助手，現在，慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科教授。工学博士。