セーフティーオペレーションのためのシステム結合の動的再構成に基づく バイラテラル力覚フィードバック制御*

大 倉 武** 桂 誠 一 郎***

Bilateral Force Feedback Control Based on Dynamic Reconfiguration of System Connection for Safety Operation

Takeshi OKURA and Seiichiro KATSURA

Recently, haptic information is studied as the third multimedia information. In order to control haptic information, bilateral control with a master-slave system is used widely. Since the plural systems are handled, it becomes important to think of the connection condition among the systems. In this paper, the multilateral control which changes the system connection depending on movement of the operator is proposed. The system connection is able to be changed without a switch by this proposed control. By using this proposed system, an operator can feel the environmental reaction force in the distant place. Moreover the operator can feel binding force from the system by changing the system connection when the slave system goes to the dangerous space. The effectiveness of this proposal is shown by an experiment.

Key words: bilateral control, motion control, force feedback control, real-world haptics, system connection

1. 序 論

近年、ラジオやテレビ、電話といった遠隔コミュニケーション技術が発達してきている。人がコミュニケーションを取るには聴覚や視覚、触覚などの感覚情報が重要である。これまでのところ、聴覚情報、視覚情報に関する技術は広く研究されている¹⁾²⁾。そのため、聴覚と視覚に対応する音声や画像は遠隔地に伝達することや、これらの情報を保存することも再生することも現在では行われている。

触覚情報は聴覚、視覚に続く第3のマルチメディア情報として注目されており、研究が進められている。しかしながら、この技術は未だ実用化には至っていない。その原因の一つに、情報伝達の方向性が他の情報とは異なることが挙げられる。聴覚や視覚は情報伝達が単方向に行われるものである。一方、触覚とは物体に触れて初めて得られる感覚情報であり、情報伝達が双方向に行われる。これは、触覚情報が「作用反作用の法則」に基づいているためであり、人間が環境に力を加えると同時に環境から反作用力が還ってくることで認識されるのである。そのため、バーチャルリアリティでの触覚の再現は行われているものの、実世界における触覚情報の伝達、保存、再生は困難となっている³⁾。

触覚を扱う研究としてハプティクス（触覚学）という学問分野があり、遠隔で操作するロボットからの触覚伝達や触覚情報の保存及び再生を目的として研究が行われてきている⁴⁾。触覚情報を制御するためには双方向性を有するバイラテラル制御^{5)~12)}が有効であり、広く用いられている。このバイラテラル制御はマスタシステムとスレーブシステムという二つのシステムから構成されており、実世界における遠隔地からの力覚フィードバックを実現する制御手法である。操作者はマスタシステムを操作することでスレーブシステムの遠隔操作が可能となり、かつスレーブシステムが受ける力がマスタシ

Fig. 1 Overview of bilateral control.

ステムにフィードバックされる。バイラテラル制御の概念図を図1に示す。図1において、 F , X はそれぞれ力と位置を表し、下付き文字の m , s はそれぞれマスタシステムとスレーブシステムを表している。

バイラテラル制御において、マスタシステムとスレーブシステムとの間の情報伝達の実現が望まれており、情報伝達の度合いは透明性と定義され、指標とされてきた⁷⁾。この指標となる透明性や再現する触覚情報は周波数帯域で評価することができ、多自由度で広帯域な力覚フィードバックを実現するためにロバストな加速度制御が必要となる。また、触覚とは位置情報と力情報の二つの情報からなるものであるため、触覚を制御するには二つを同時に制御することが必要となる。しかし、この二つの情報は次元が異なるものであり、このままでは同時に制御することが不可能である。そこで位置と力を同時に制御するために共通の加速度次元に変換する必要がある¹³⁾。つまり、触覚の再現においてはロバストな加速度制御が重要である。この加速度制御に有効な制御として外乱オブザーバ¹⁴⁾がある。また、外乱オブザーバを利用することで広帯域の周波数情報を力覚センサレスで取得することも可能となる¹⁵⁾。このような利点を備えている外乱オブザーバ技術に基づいたハプティクス技術は、遠隔操作における触覚フィードバックの実現に役立つだけでなく、触覚情報の保存や再生を行う技術にも利用可能である¹⁶⁾。このように、ハプティクス技術は様々な応用例が考えられ注目を集めている。

遠隔操作において、操作者へ遠隔地からの力覚情報をフィードバックすれば安全な操作が実現できると考えられる。それ

* 原稿受付 平成 22 年 11 月 15 日
** 学生会員 慶應義塾大学 (横浜市港北区日吉 3-14-1)
*** 正 会 員 慶應義塾大学

は操作者が力覚を感じることでシステムと環境との接触を感知することができるからである。一方、遠隔システムが環境に触れたにも関わらず、システムを動かそうとすると多大な力が環境に印加されてしまう。システムが環境を押し続け、環境に対して過度な力が印加されると環境やシステムの破壊を起してしまう可能性がある。これは遠隔システムが危険領域に近づいていることを意味する。このようにシステムが危険領域に進もうとするとときに、操作者に知らせることができる制御系が望ましいと言える。

また、遠隔システムを扱う際にはシステム間の結合状態を考える必要がある。システム結合を設計者の任意に変化させることができれば力覚フィードバック制御の未知環境に対する柔軟性が上がると考えられる。そこで本論文では、操作者の動作に応じてシステムの結合状態を変化させるバイラテラル力覚フィードバック制御系を提案する。なお本論文では、スレーブシステムが危険領域に進まぬように操作者が安全な操作を行うことを目標とする。本制御手法により、遠隔地のスレーブシステムにかかる力がマスタシステムに伝達され、システムの変更を伴うことなくシステムの結合を変化させることが可能となる。

本論文の構成を以下に述べる。2章において提案するシステム結合の動的再構成の概念について述べる。3章では、システムを実現するための制御系の構成及び提案手法の制御系について述べる。4章で本研究の実験システム及び実験結果を示す。最後に、5章において、本論文をまとめる。

2. システム結合の動的再構成

システム間の情報伝達において、システム同士は情報の入出力の関係で結合していると見なすことができる。触覚情報はマスタ・スレーブシステムにおいて位置と力の情報を相互に伝達している。本論文ではこのシステム結合を動的に構成する制御を行う。

本提案の制御手法は、セーフティーオペレーションを実現するためにバイラテラル制御を行っているマスタ・スレーブシステムに対して、ある条件下において新たに仮想システムを付加することでシステム全体がマルチラテラル制御¹⁷⁾に変化するというものである。つまり、通常はマスタシステムとスレーブシステムにおいて両者の位置を同期させること、システム同士で人工的に「作用反作用の法則」を成立させることの二つを制御目標とする。そして、制御設計者の定めた条件の下では仮想システムがシステム結合し、全体に影響を与えるようになるというものである。仮想システムとは仮想空間上に存在するシステムであり、仮想システムの概念図を図2に示す。ここで、下付き文字の v は仮想システムを表している。また、仮想システムは実在するシステムから影響を受けないシステムであるため、情報伝達は仮想システムから実在するシステムへの一方向のみ行われる。図2において、仮想システムからのみ情報伝達が行われており、操作者は仮想システムの力や動作の影響を感じることができる。このとき、実

Fig. 2 Overview of virtual system.

Fig. 3 Overview of change of system connection.

在するマスタ・スレーブシステムは二つのシステム間で力覚フィードバックを実現しつつ、他のシステムの情報からの影響を受けることになる。

これは仮想システムがマスタ・スレーブシステムに影響を与えることで、システム間における情報伝達の透明性を下げ、セーフティー動作を優先させることを意味する。本制御系の概念図を図3に示す。ここで、 m , s , v はそれぞれマスタシステム、スレーブシステム、仮想システムを表す。

仮想システムの位置が固定されている場合、マルチラテラル制御により、マスタシステムとスレーブシステムは仮想システムに同期しようとする。つまり、マスタシステムとスレーブシステムは仮想システムの位置に移動しようとするため操作者は拘束力を受ける感覚が得られる。また、マルチラテラル制御になる条件が満たされなくなったときには仮想システムはシステム全体から切り離される。それゆえ、元のシステム結合にもどることとなり、マスタシステムとスレーブシステムはバイラテラル制御を実現する。この、システムの結合を変化させる条件は制御設計者が自由に決めることができ、システム結合を操作者の動作に応じて動的に構成していくことが可能となる。

3. 制 御 設 計

3.1 マスタ・スレーブシステムの遠隔操作制御

本章ではマスタ・スレーブシステムの遠隔操作の制御系について述べる。既に述べたように、本提案では通常時はバイラテラル制御によりマスタシステムとスレーブシステムが結合しており、この時の力制御および位置制御の目標は式(1)、式(2)となる¹⁸⁾。

$$F_m + F_s = 0 \quad (1)$$

$$X_m - X_s = 0 \quad (2)$$

本論文で用いる制御系は外乱オブザーバを用いたロバスト加速度制御に基づいており、力と位置を同時に制御するために二つの情報を同じ次元である加速度に変換する必要がある。力制御の目標式を加速度次元に変換すると式(3)となる。

$$\ddot{X}_m^F + \ddot{X}_s^F = \ddot{X}_C^F = 0 \quad (3)$$

ここで、上付き文字の F は力の等価加速度を示し、下付き文字の c は和のモードを示す。式(3)において $\ddot{X}_m^F$ はマスタシステムにかかる操作力の等価加速度を表し、 $\ddot{X}_s^F$ はスレーブシステムにかかる環境からの反作用力の等価加速度を表しており、式(4)、(5)から求まる。

$$\ddot{X}_m^F = \frac{1}{M_n} \hat{F}_m \quad (4)$$

$$\ddot{X}_s^F = \frac{1}{M_n} \hat{F}_s \quad (5)$$

ここで、 $\hat{F}_m$ は外乱オブザーバによって推定された人間の操作力を表し、 $\hat{F}_s$ は推定された環境からの反作用力を表す。また、 M_n はモータのノミナル質量を表す。 $\hat{F}_m$, $\hat{F}_s$ は、外乱オ

ブザーバを基盤とした反力推定オブザーバを用いることにより力覚センサを使用せず推定することができる¹⁵⁾。

$\ddot{X}_C^F$ は力の和のモードを表し、人間の操作力と環境からの反作用力の等価加速度の和を示す。和のモードにおける加速度参照値 $\ddot{X}_C^{ref}$ は力サーボを用いることで式 (6) のように表される。

$$\ddot{X}_C^{ref} = -C_f \ddot{X}_C^F \quad (6)$$

ここで、 C_f は力ゲインである。

また、位置制御の目標式を加速度次元に変換すると式 (7) となる。

$$\ddot{X}_m - \ddot{X}_s = \ddot{X}_D \rightarrow 0 \quad (7)$$

式 (7) において、 $\ddot{X}_m$ 、 $\ddot{X}_s$ は位置から得られる加速度応答を示す。 $\ddot{X}_D$ は差のモードを表し、マスタ・スレーブシステムの加速度応答の偏差を示す。ここで、2 階積分された位置偏差が 0 になることを示すために「=」ではなく「 $\rightarrow$ 」を用いている。差のモードは、位置レギュレータ $C_p(s)$ を構成することで式 (8) のように加速度参照値 $\ddot{X}_D^{ref}$ が得られる。なお、位置レギュレータは式 (9) で表される。

$$\ddot{X}_D^{ref} = -C_p(s) \ddot{X}_D \quad (8)$$

$$C_p(s) = \frac{1}{s^2} K_p + \frac{1}{s} K_v \quad (9)$$

ここで、 K_p 、 K_v はそれぞれ位置ゲインと速度ゲインである。和のモードと差のモードは直交する座標で表現されるため、加速度制御に基づいてそれぞれのモードで独立に制御系を設計することで、上記の目標を満たすことが可能になる。

和のモードと差のモードを同時に制御するために実世界空間からモード空間へ座標変換を行う Quarry 行列¹³⁾¹⁹⁾を用いる。2 次の Quarry 行列 Q_2 を式 (10) に示す。

$$Q_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Quarry 行列を用いたモード空間への変換は式 (11)、式 (12) のように表される。

$$\begin{bmatrix} \ddot{X}_C^F \\ \ddot{X}_D^F \end{bmatrix} = \frac{1}{M_n} Q_2 \begin{bmatrix} \hat{F}_m \\ \hat{F}_s \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{X}_C \\ \ddot{X}_D \end{bmatrix} = Q_2 \begin{bmatrix} \ddot{X}_m \\ \ddot{X}_s \end{bmatrix} \quad (12)$$

各モードの加速度参照値は Quarry 逆行列 Q_2^{-1} を用いて式 (13) のようにモード空間から実世界の空間へと変換できる。ここで、 $\ddot{X}_m^{ref}$ 、 $\ddot{X}_s^{ref}$ はそれぞれマスタシステム、スレーブシステムの加速度参照値を表す。なお、Quarry 逆行列 Q_2^{-1} は式 (14) で表される。

$$\begin{bmatrix} \ddot{X}_m^{ref} \\ \ddot{X}_s^{ref} \end{bmatrix} = Q_2^{-1} \begin{bmatrix} \ddot{X}_C^{ref} \\ \ddot{X}_D^{ref} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$Q_2^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

3.2 セーフティーオペレーションのための力覚フィードバック制御

2 章で述べたように仮想システムを用いてシステム結合を操作者の動作に応じて動的に変化させることが可能である。一アプリケーションとして本論文では、スレーブシステムの安全な操作を目的として、システム結合が動的に変化しながら

力覚フィードバックを実現する制御系を提案する。スレーブシステムが危険領域に進まないようにすることが目的であるため、システムの結合が変化する条件はスレーブシステムの位置応答に着目し、これが設定した閾値を越えないこととした。この時の目標式としては式 (15) のようになる。なお、本論文での閾値は仮想システムの設定位置としている。

$$\begin{cases} X_m = X_s & (X_s < X_v) \\ X_m = X_s = X_v & (\text{other}) \end{cases} \quad (15)$$

式 (15) に示すように、仮想システムが加わるとシステム全体がマルチラテラル制御に基づいた新たな制御系へと変化する。マルチラテラル制御とはバイラテラル制御を拡張したもので、複数のロボット間において「作用反作用の法則」を実現する制御である。マルチラテラル制御はシステムの数が増えるため、その構造がより複雑になるが、加速度制御に基づくインタラクションモード制御を適用することにより和のモードと差のモードに分解することができる¹⁹⁾²⁰⁾。本提案を用いることで通常は実在するアクチュエータにおけるバイラテラル制御により遠隔操作を実現しつつ、操作者の動作に応じてシステムの結合数を変えることが可能となる。

この時、バイラテラル制御と同様の理由から本制御系も加速度次元で取り扱う。仮想システムが付加された後の位置の目標式を加速度次元に変換すると式 (16)、式 (17) となる。

$$\ddot{X}_s - \ddot{X}_v = \ddot{X}_{D1} \rightarrow 0 \quad (16)$$

$$2\ddot{X}_m - \ddot{X}_s - \ddot{X}_v = \ddot{X}_{D2} \rightarrow 0 \quad (17)$$

ここで、 $\ddot{X}_{D1}$ 、 $\ddot{X}_{D2}$ は 1 つ目の差のモードと 2 つ目の差のモードを表し、それぞれスレーブシステムと仮想システムの加速度応答の偏差、マスタシステムと他の二つのシステムとの加速度応答の偏差を示す。

また、三つのシステムを制御するため Quarry 行列は式 (18) に示す 3 次の行列 Q_3 を用いる。

$$Q_3 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

3 次の Quarry 行列を用いた場合のモード空間への変換は式 (19)、式 (20) のように表される。

$$\begin{bmatrix} \ddot{X}_C^F \\ \ddot{X}_{D1}^F \\ \ddot{X}_{D2}^F \end{bmatrix} = \frac{1}{M_n} Q_3 \begin{bmatrix} \hat{F}_m \\ \hat{F}_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{X}_C \\ \ddot{X}_{D1} \\ \ddot{X}_{D2} \end{bmatrix} = Q_3 \begin{bmatrix} \ddot{X}_m \\ \ddot{X}_{s1} \\ \ddot{X}_{s2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

各モードの加速度参照値は Quarry 逆行列 Q_3^{-1} を用いて式 (21) のようにモード空間から実世界の空間へと変換できる。なお、Quarry 逆行列 Q_3^{-1} は式 (22) で表される。

$$\begin{bmatrix} \ddot{X}_m^{ref} \\ \ddot{X}_s^{ref} \\ \ddot{X}_v^{ref} \end{bmatrix} = Q_3^{-1} \begin{bmatrix} \ddot{X}_C^{ref} \\ \ddot{X}_{D1}^{ref} \\ \ddot{X}_{D2}^{ref} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$Q_3^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & \frac{3}{2} & -\frac{1}{2} \\ 1 & -\frac{3}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Fig. 4 Block diagram of multilateral control with virtual system.

Fig. 5 Linear motor.

Fig. 6 Experimental system.

Table 1 Parameters of the linear motor.

M_n	Mass of motor	0.245 kg
K_{tn}	Force constant	3.3 N/A
	Rated Force	2 N
	Resolution of linear encoder	100 nm

Table 2 Experimental parameters.

K_p	Position gain	10000 s ²
K_v	Velocity gain	200 s
K_f	Force gain	5
g_{dis}	Cut-off frequency of disturbance observer	700 rad/s
g_{reac}	Cut-off frequency of reaction force observer	700 rad/s

えて進ませようとするとは操作者は拘束力を感じるようになる。つまり、スレーブシステムの位置が X_v を超えると仮想システムがシステム全体に加わるようになっており、このため操作者に拘束力がかかることでスレーブシステムの安全な操作を実現することができる。

4. 実 験

4.1 実験システム

提案するシステムの有効性を確認するために一軸リニアモータを用いて実験を行った。図 5 に本論文で用いる一軸リニアモータを示す。リニアモータの詳細を表 1 に示す。図 6 に本論文で用いる実験システムを示す。図にはマスタシステム、スレーブシステム、環境、操作者が示してある。環境にはゴムボールを用意し、操作者から環境までの実験システムは 2 次遅れ系のモデルとして与えられる。仮想システムは操作者の動作に応じてシステム結合が変化し、操作者が受ける力が変化することで認識できる。なお、本実験にはジイェムシーヒルストーン社の一軸のリニアモータと分解能 100nm の Renishaw 社の光学式位置エンコーダを用いた。また、本実験においては全てのシステムを一つの制御パソコンによって制御しているため、通信遅れの影響はないものとした。

本制御系のブロック線図を図 4 に示す。ここで、DOB は外乱オブザーバを表し、RFOB は反力推定オブザーバ¹⁵⁾を表している。反力推定オブザーバは外乱オブザーバを基盤としており、操作力や環境反力などシステムにかかる力を力覚センサレスで加速度情報から推定するものである。また、仮想システムがシステム全体に加わるかどうかはスレーブシステムの位置応答によって切り替わる構成となっている。図 4 に示すとおり、仮想システムには加速度参照値のフィードバック項が入力されないため、実在するアクチュエータから影響を受けないこととなる。そのため仮想システムの位置は常に一定の位置に存在することになる。

このように、仮想システムが付加されシステム全体の結合数が増加してからはマスタシステムもスレーブシステムも仮想システムの設定位置に同期しようとするため、この値を越

Fig. 7 Position responses of Conventional Method.

Fig. 8 Force responses of Conventional Method.

Fig. 9 Common of the master system and the slave system of force responses of Conventional Method.

本論文では提案手法の有効性を示すために、比較対象として従来手法であるマスタ・スレーブシステムによるバイラテラル制御の実験も行った。従来手法においても実験システムは同じものを用いており、操作者の動作も同じようにシステムを動かすものとした。

提案手法の本実験の概要を以下に述べる。通常はバイラテラル制御によりマスタシステムを操作することで遠隔地にあるスレーブシステムの遠隔操作を行い、スレーブシステムにかかる力がマスタシステムにフィードバックされる。ここでスレーブシステムの初期位置には柔らかい環境を配置することで、操作者はこの柔らかい環境からの反力を感じるものとな

Fig. 10 Position responses of Proposed Method.

Fig. 11 Force responses of Proposed Method.

Fig. 12 Common of the master system and the slave system of force responses of Proposed Method.

る。スレーブシステムが危険領域に進もうとする、即ちスレーブシステムの位置がある閾値を越えようとするシステム結合が変化し、仮想システムが全体のシステムに加わることでマスタシステムにかかる力が変化することとなる。これにより、操作者は普段はスレーブシステムに触れる環境からの反力を感じているが、条件を満たすと仮想システムからの新たな拘束力がかかることでスレーブシステムが危険領域に入ろうとしていることが感覚として認識できるようになり、結果的にスレーブシステムの安全な動作を実現することができる。

また、実験で用いるパラメータを表2に示す。ここで用いている g_{dis} 、 g_{reac} はそれぞれ外乱オブザーバのカットオフ周

波数, 反力推定オブザーバのカットオフ周波数を表している。この値を高くすることが外乱抑圧特性を向上させ、実世界環境からの広帯域な力覚フィードバックを実現することができる。なお、本実験で用いるリニアモータは2台とも同じモータを用いており、制御パラメータも同じ値を用いている。本実験ではシステム結合を変化させる条件となる閾値を5mmとした。

4.2 実験結果

図7に従来のバイラテラル制御のマスタ・スレーブシステムの位置応答を示し、図8に力応答を示す。また、図9にマスタシステムとスレーブシステムの力応答の和の結果を示す。続いて、図10に提案手法におけるマスタシステムとスレーブシステムの位置応答を示し、図11に力応答を示す。図12にマスタシステムとスレーブシステムの力応答の和の結果を示す。

図7, 図8より、バイラテラル制御において、二つのシステムの位置応答は追従し、力応答は作用反作用を実現していることがわかる。力応答については、図9より、マスタ・スレーブシステム間において力の合計が0となっていることから「作用反作用の法則」が遠隔地間で実現されていることがわかる。

また、図10, 図11より、スレーブシステムが閾値に達していないときはマスタシステムはスレーブシステムからの環境反力のみを感じている。これは従来のバイラテラル制御による操作と同じ状況であることが図8と図11を比較することからもわかる。また、マスタシステムとスレーブシステムの位置応答は一致しており遠隔操作が実現できていることも確認できる。一方、スレーブシステムが閾値に達したときに限り、システム結合が動的に変化し、仮想システムが加わったことによりマスタシステムには大きな力がフィードバックされている。図12より、スレーブシステムが閾値に達しているときのみマスタシステムに力がかかっていることがわかる。なお、図で網掛けをしている部分がシステムが閾値に達したときを示している。

このとき操作者に、システムが危険領域に近づいていることを力感覚として知らせることができると、当初の目的を達していることが確認できる。つまり、操作者は遠隔地の環境反力を感じながらスレーブシステムを操作することが可能であり、かつスレーブシステムが危険領域に向かう際には拘束力を感じることが実現されている。閾値は本当の危険領域の手前で設定しておくことで、事前に危険領域への侵入を回避することにつながる。

このように、操作者は触覚情報伝達によりスレーブシステムを安全に操作することが可能になる。

5. 結 論

本論文では、操作者の動作に応じてシステム結合が動的に変化するバイラテラル力覚フィードバック制御系を提案した。本提案手法により、通常はバイラテラル制御により遠隔地からの環境反力を感じつつスレーブシステムを操作することを可能とし、設定している閾値を越え危険領域に向かう際には、仮想システムが加わることでシステム結合を変化させることが実現された。仮想システムからの影響により操作者には拘束力がかかり、操作者に危険領域への接近が力感覚として呈示できるため、結果的にスレーブシステムの安全な操作を実現した。本論文では1次元のシステムを扱ったが、本制御系は将来的に多自由度のシステムへの応用が期待される。例えば、

遠隔手術用ロボットなどスレーブシステムを実際の患者の体内で操作する場合、危険領域に進まないことが必要不可欠である。このとき、本制御系の概念を用いれば危険領域の手前でシステムを操作することが可能になるものと考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、NEDO 産業技術研究助成事業（プロジェクトID: 07C46047a）によって行われたことを記し、関係各位に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) B. Chen, C.-E. W. Sundberg : "An Integrated Error Correction and Detection System for Digital Audio Broadcasting," *IEEE Transactions on Broadcasting*, **46**, 1 (2000) 68.
- 2) S. Liapis, G. Tziritas : "Color and Texture Image Retrieval Using Chromaticity Histograms and Wavelet Frames," *IEEE Transactions on Multimedia*, **6**, 5 (2004) 676.
- 3) P. Hinterseer, S. Hirche, S. Chaudhuri, E. Steinbach, M. Buss : "Perception-based data reduction and transmission of haptic data in telepresence and teleaction systems," *IEEE Transactions on Signal Processing*, **56**, 2 (2008) 588.
- 4) A. E. Saddik : "The Potential of Haptics Technologies," *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, **10**, 1 (2007) 10.
- 5) N. Koizumi, T. Tsuda, S. Warisawa, H. Hashizume, M. Mitsuishi : "Development of a Remote Ultrasound Diagnostic System and Its Remote Experiment," *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, **68**, 11 (2002) 1425.
- 6) B. Hannaford : "A Design Framework for Teleoperators with Kinesthetic Feedback," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **9**, 5 (1989) 426.
- 7) D. A. Lawrence : "Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **9**, 5 (1993) 624.
- 8) K. Hashtrudi-Zaad, S. E. Salcudean : "On the Use of Local Force Feedback for Transparent Teleoperation," *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1999) 1863.
- 9) Y. Yokokohji, T. Yoshikawa : "Bilateral Control of Master-slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling - Formulation and Experiment", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **10**, 5 (1994) 605.
- 10) K. Hashtrudi-Zaad, S. E. Salcudean : "Bilateral Parallel Force / Position Teleoperation Control," *Journal of Robotic Systems*, **19**, 4 (2002) 155.
- 11) S. Tachi, T. Sakaki : "Impedance Controlled Master Slave Manipulation System Part I: Basic Concept and Application to the System with Time Delay," *Journal of the Robotics Society of Japan*, **8**, 3 (1990) 241.
- 12) W. Iida, K. Ohnishi : "Reproducibility and Operationality in Bilateral Teleoperation," *The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control. AMC '04*, (2004) 217.
- 13) S. Katsura, K. Ohnishi : "Quarry of Modal Information from Environment for Advanced Motion Control," *IEEE Transactions on Industrial Applications*, **126**, 4 (2006) 372.
- 14) K. Ohnishi, M. Shibata, T. Murakami : "Motion Control for Advanced Mechatronics," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **1**, 1 (1996) 56.
- 15) T. Murakami, F. Yu, K. Ohnishi : "Torque Sensorless Control in Multidegree-of-freedom Manipulator," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **40**, 2 (1993) 259.
- 16) Y. Yokokura, S. Katsura, K. Ohishi : "Stability Analysis and Experimental Validation of a Motion-Copying System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **56**, 10 (2009) 3906.
- 17) S. Katsura, Y. Matsumoto, K. Ohnishi : "Realization of "Law of Action and Reaction" by Multilateral Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **52**, 5 (2005) 1196.
- 18) S. Katsura, W. Iida, K. Ohnishi : "Medical Mechatronics - an Application to Haptic Forceps -," *IFAC Annual Reviews in Control*, **29**, 2 (2005) 237.
- 19) S. Katsura, K. Ohishi : "Modal System Design of Multirobot Systems by Interaction Mode Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **54**, 3 (2007) 1537.
- 20) Y. Kakinuma, S. Katsura, K. Ohnishi, T. Aoyama, J. Isogai, K. Yokoi : "Imaginary Motor Control for the Table of Machine Tools with 3 Linear Servo Motors," *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, **73**, 1 (2007) 150.