Multilateral Control with Haptic Transmission Ratio

Tomoyuki Shimono Student Member (Keio University, shimono@sum.sd.keio.ac.jp)

Ryogo Kubo Member (Keio University, kubo@sum.sd.keio.ac.jp)

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

Seiichiro Katsura Member (Nagaoka University of Technology, katsura@vos.nagaokaut.ac.jp)

Kiyoshi Ohishi Senior Member (Nagaoka University of Technology, ohishi@vos.nagaokaut.ac.jp)

Keywords: motion control, haptics, bilateral control, multilateral control, disturbance observer, skill training

In these years, skill education has been a serious problem in various fields. Since haptic information from the real environment is so important for human advanced skill as well as visual and audio information, the only conventional technology of visual and audio information could not realize accurate skill education. Thus, bilateral control that is able to transmit force sensation from the real environment may become a key technology. Then, multilateral control based on bilateral control with disturbance observer that is able to transmit force sensation to several operators may be suitable for skill education system. However, position responses of all systems are synchronized in the plain multilateral control. It is necessary for application of multilateral control to skill education based on haptic information that the influences from the operators are variable according to the trainee's skill acquisition level. Thus, this paper proposes multilateral control with the transmission ratio (TR) that is able to be designed according to the trainee's skill acquisition level.

Fig. 1 shows the proposed multilateral control with transmission ratio. There are two kinds of transmission ratio. One is the transmission ratio of force information $\mathbf{TR}_i^f$. The other is the transmission ratio of position information $\mathbf{TR}_i^p$. Then, as the results, five types of multilateral control are able to be realized by designing the transmission ratio. $\mathbf{TR}_i^f$ means the transmission ratio of force information for i -th master system. $\mathbf{TR}_i^p$ means the transmission ratio of position information for i -th master system. Fig. 2 shows the design model of transmission ratio for realization of five types of multilateral control.

(1) Plain multilateral control

$$\mathbf{TR}_i^f = 1.0, \quad \mathbf{TR}_i^p = 1.0$$

The design model for plain multilateral control is shown as a black circle in Fig. 2.

(2) Position dimension corresponding multilateral control with TR (Position corresponding)

$$\mathbf{TR}_i^f: \text{given}, \quad \mathbf{TR}_i^p = 1.0$$

The design model for position dimension corresponding multilateral control with TR is shown as a thin solid line in Fig. 2.

(3) Impedance corresponding among master systems multilateral control with TR (Impedance corresponding)

$$\mathbf{TR}_i^f: \text{given}, \quad \mathbf{TR}_i^p = \frac{1}{\mathbf{TR}_i^f}$$

The design model for impedance corresponding among master systems multilateral control with TR is shown as a dashed line in Fig. 2.

(4) Operability corresponding among master systems multilateral control with TR (Operability corresponding)

$$\mathbf{TR}_i^f: \text{given}, \quad \mathbf{TR}_i^p = \mathbf{TR}_i^f$$

The design model for operability corresponding among master systems multilateral control with TR is shown as a dotted line in Fig. 2.

(5) Force dimension corresponding multilateral control with TR (Force corresponding)

$$\mathbf{TR}_i^f = 1.0, \quad \mathbf{TR}_i^p: \text{given}$$

The design model for force dimension corresponding multilateral control with TR is shown as a heavy solid line in Fig. 2.

Finally, the experimental results are shown in order to verify the validity of the proposed methods in the paper.

Fig. 1. Multilateral control system with TR

Fig. 2. Design of transmission ratio

触覚伝達率を実装したマルチラテラル制御

学 生 員 下野 誠通* 正 員 久保 亮吾*
 上級会員 大西 公平* 正 員 桂 誠一郎**
 上級会員 大石 潔**

Multilateral Control with Haptic Transmission Ratio

Tomoyuki Shimono*, Student Member, Ryogo Kubo*, Member, Kouhei Ohnishi*, Senior Member,
 Seiichiro Katsura**, Member, Kiyoshi Ohishi**, Senior Member

Skill education has been a serious problem in various fields. Since haptic information from the real environment is so important for human advanced skill as well as visual and audio information, the only conventional technology of visual and audio information could not realize accurate skill education. Thus, bilateral control that is able to transmit force sensation from the real environment may become a key technology. Then, multilateral control based on bilateral control that is able to transmit force sensation to several operators is suitable for skill education system. However, it is necessary for application of multilateral control to skill education based on haptic information that the influences from the operators are variable according to the trainee's skill acquisition level. Thus, this paper proposes multilateral control with the transmission ratio that is able to be designed according to the trainee's skill acquisition level. Then, five types of multilateral control are realized by designing the transmission ratio. Finally, the experiments results are shown in order to verify the validity of the proposed method.

キーワード：モーションコントロール，ハプティクス，バイラテラル制御，マルチラテラル制御，外乱オブザーバ，技術教育
Keywords: motion control, haptics, bilateral control, multilateral control, disturbance observer, skill training

1. 序 論

近年，高齢化などの理由から様々な分野において熟練技術者の減少が大きな問題となってきた。またこれに伴い，若手技術者の技術教育が大きな課題として挙げられている。この社会的課題に対して，もし技術教育システムといった科学的な技術伝承手法が実現されれば，一つの解決策となり得るであろう。しかしながら既存の視覚情報および聴覚情報の伝達・保存・再現技術のみでは，熟練者の技術伝承システムの実現には不十分である。これは熟練者の技術のほとんどは，道具や器具，および装置といったある種のシステムを用いた動作であり，操作するシステムを通じて得られる実環境からの触覚情報が大変重要な感覚情報

となるからである。したがって，高度な熟練技術の科学的伝承システムの実現のためには，人工的に実環境からの触覚情報を伝達する技術が大変重要であるといえる。しかし，触覚情報は作用・反作用の双方向情報であるため，システムを通じて人工的に操作者に触覚情報を伝達するためには，システムもまた同時に双方向性を有していなければならない。まずシステムが双方向性を有するための制御手法としては，マスタシステムとスレーブシステムからシステムを構成するバイラテラル制御が挙げられる。

バイラテラル制御に関しては今日までに非常に多くの研究が行われてきた。B. Hannaford はマスタ・スレーブの位置と力の関係をハイブリッド行列を用いて定式化を行い，理想条件を提案した⁽¹⁾。また，Hannaford の提案したバイラテラル制御のマスタ・スレーブ間の理想条件はその後拡張され，D.A. Lawrence によって安定性と透明性として議論された⁽²⁾。また，Hashtrudi-Zaad らによってマスタ・スレーブ間で透明性を獲得するためのバイラテラル制御系が提案された⁽³⁾⁽⁴⁾。横小路らもまたマスタ・スレーブ間で透明性を確保するための制御系を提案した⁽⁵⁾。小菅らはインピーダンス制御の概念を拡張した Task-Oriented 仮想ツールを導入した制御系を提案した⁽⁶⁾。しかしながら，これま

* 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, Keio University
 3-14-1, Hiyoshi, Kouhoku, Yokohama 223-8522

** 長岡技術科学大学電気系
 〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1
 Department of Electrical Engineering, Nagaoka University of
 Technology
 1603-1, Kamitomiokamachi, Nagaoka 940-2188

で提案されてきたバイラテラル制御は単一のマスタシステムと単一のスレーブシステムから構成されていた。触覚情報に基づいた科学的技術教育を行うためには、スレーブシステムが環境と接触した際の触覚情報を熟練者と訓練者といった複数の操作者が同時に知覚する必要があるため、複数のマスタシステムに同時に触覚情報を伝達しなければならない。したがって、マルチラテラル制御における作用・反作用則の人工的な実現が必要不可欠である。

既往の研究としてまずはじめに、バイラテラル制御に基づき通信遅延を含んだ場合の複数ロボットの制御手法が提案された⁽⁷⁾⁽⁸⁾。また複数のマスタシステムと複数のスレーブシステムからシステムを構成し、協調遠隔操作を行うための手法も提案された⁽⁹⁾。しかしながら、実環境からの鮮明な力覚情報の伝達を実現するためには、すべてのシステム間において作用・反作用則を厳密に実現する必要がある。そこで加速度制御に基づくバイラテラル制御を拡張したマルチラテラル制御による作用・反作用則の実現手法が提案された⁽¹⁰⁾。

マルチラテラル制御はすべてのシステム間での双方向情報伝達が可能なため、様々な技術応用が期待できるが、一般的なマルチラテラル制御ではすべてのシステム間で位置応答は同一化されてしまう。したがってマルチラテラル制御において、各システムに情報を分離して伝達する手法に関しても研究が行われてきている。まずはじめに将来的な触覚情報通信を目的とし、アイデンティティ比を用いることで位置応答を印加された力の比に応じて各システムに対して分離するマルチラテラル制御手法が提案された⁽¹¹⁾。これに対して、技術教育にマルチラテラル制御を応用するためには、訓練者の技術習得レベルに応じて、教育を行う熟練者からのシステムへの影響度を変化させることが望まれる。これまでに技術教育への応用を目的として Shared-Control 手法が提案されたが、マスタシステムはジョイスティックであったため、厳密な操作技術の教育は実現できなかった⁽¹²⁾。そこで本論文では、触覚情報に基づいた科学的技術教育システム実現のための基礎技術として、各操作者からの影響度を調節するための伝達率というパラメータを導入した新しいマルチラテラル制御系を提案する。

本論文の構成を以下に述べる。まず続く第2章では、本論文で提案するマルチラテラル制御系に実装されている外乱オブザーバについて簡易な説明を行う。そして第3章で、将来的な触覚情報に基づいた技術教育への応用を目的として、触覚伝達率を導入したマルチラテラル制御手法を提案する。また、提案する伝達率の設計についても考察を行う。第4章では、提案手法の有効性を確認するために実験結果を示す。そして最後に第5章において、結論として本論文をまとめる。

本章の最後に、本論文で用いる主なパラメータや添え字の定義を表1に示す。

表1 パラメータ定義一覧
Table 1. List of parameter definition.

F	Force
x	Position
$\dot{x}$	Velocity
$\ddot{x}$	Acceleration
M	Mass
TR	Haptic transmission ratio
C_p	Position regulator
C_f	Force servoing
K_f	Force coefficient
D	Viscosity coefficient
I_a	Current value
g_{dis}	Cut-off frequency of disturbance observer
g_{reac}	Cut-off frequency of reaction force estimation
s	Laplace operator
(superscript) cmd	Command value
(superscript) ref	Reference value
(superscript) $\wedge$	Estimated value
(superscript) res	Response value
(superscript) f	Value associated with force information
(superscript) p	Value associated with position information
(subscript) n	Nominal value
(subscript) com	Common mode
(subscript) $diff$	Differential mode

2. 外乱オブザーバ

外乱オブザーバ (DOB: Disturbance Observer) は力センサレスでシステムの外乱力を観測することができる⁽¹³⁾。直動型リニアモータをアクチュエータとして想定した場合の外乱オブザーバのブロック線図を図1に示す。

外乱オブザーバにおいて、外乱力は(1)式のように表される。

$$F_{dis} = F_{ext} + F_{int} + F_C + D\dot{x} + (M - M_n)\ddot{x} + I_a^{ref}(K_m - K_f) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 F_{ext} はシステムに外部から印加される外乱力を、 F_{int} は内部干渉力を、 F_C はクーロン摩擦力を、 $D\dot{x}$ は粘性摩擦力をそれぞれ表すものとする。また、 $(M - M_n)\ddot{x}$ の項は慣性変動による外乱力を表し、 $I_a^{ref}(K_m - K_f)$ の項は推力リップルを表している。そして、外乱力は外乱オブザーバによりローパスフィルタを通過して(2)式のように推定される。

$$\hat{F}_{dis} = \frac{g_{dis}}{s + g_{dis}} F_{dis} \dots \dots \dots (2)$$

推定された外乱力のフィードバックループを設けると、外乱の低周波成分を補償することができ、ロバスト性を得ることができる。したがって、外乱オブザーバを用いることでロバスト性を確保することができる。このとき、システムには外乱オブザーバによって外乱の低周波成分が補償されて印加されることとなり、等価的にはハイパスフィルタを通過して外乱が印加されることとなる。

外乱オブザーバはまた、(3)式のように力センサを用いることなく反力のみを推定することが可能となる⁽¹⁴⁾。

図 1 外乱オブザーバ

Fig. 1. Disturbance observer (DOB).

$$\hat{F}_{ext} = \frac{g_{reac}}{s + g_{reac}} F_{ext} \dots\dots\dots (3)$$

この機能を外乱オブザーバの反力推定機能（RFE：Reaction Force Estimation）と本論文では呼ぶこととする。外乱オブザーバはそのカットオフ周波数を安定範囲内において上げることによって、できるだけ速く反力を推定することができる^{(14) (15)}。

3. 伝達率を実装したマルチラテラル制御

本論文では操作者が直接操作するシステムをマスタシステムとし、マルチラテラル制御を通じて遠隔環境と接触するシステムをスレーブシステムと定義する。そして本章では、複数のマスタシステムと単一のスレーブシステムから構成されるマルチラテラル制御システムについて検討する。すなわち $(N-1)$ 人の操作者が $(N-1)$ 台のマスタシステムをそれぞれ操作し、一つのスレーブシステム（ N 番目とする）が実環境と接触する場合を考察する。また本論文では、マルチラテラル制御は外乱オブザーバによって実現される加速度制御に基づいて設計される。

このとき、マルチラテラル制御において、複数の操作者が複数のマスタシステムにそれぞれ加える作用力と単一のスレーブが実環境と接触して受ける反作用力との間に、作用反作用の法則を人工的に成立させるための目標式として、システムの力の関係は (4) 式のように表される。

$$F_1 + F_2 + \dots + F_N = 0 \quad (N : \text{Natural number}) \dots\dots\dots (4)$$

しかしながら技術教育システムにマルチラテラル制御を適用するためには、訓練者の技術習得レベルに応じて、各操作者からのシステムへの影響度を変化させる必要がある。そこで、各操作者からシステムへ印加される入力の影響度を調節するための力の伝達率 $\mathbf{TR}^f$ (Transmission Ratio) を導入する。提案する力の伝達率 $\mathbf{TR}^f$ は力の情報の伝達の割合を決定する要素であるので、以下の条件を持つ。

$$0.0 \leq \mathbf{TR}^f \dots\dots\dots (5)$$

このとき、伝達率を用いると力に関する目標式は (6) 式の

図 2 伝達率の設計

Fig. 2. Design of transmission ratio.

ようになる。

$$\mathbf{TR}_1^f F_1 + \mathbf{TR}_2^f F_2 + \dots + \mathbf{TR}_{(N-1)}^f F_{(N-1)} + F_N = 0 \dots\dots\dots (6)$$

一方で、すべてのシステムがお互い追従し合うための位置に関する目標式は (7) 式のように示される。

$$x_1 = x_2 = \dots = x_{(N-1)} = x_N \dots\dots\dots (7)$$

またマルチラテラル制御においては、力情報の伝達率のみならず位置情報の伝達率も導入することで様々な応用が期待できる。したがって、位置の情報に関する伝達率 $\mathbf{TR}^p$ も併せて導入する。提案する位置情報の伝達率は次式のような条件を持つ。

$$0.0 \leq \mathbf{TR}^p \dots\dots\dots (8)$$

このとき、伝達率を用いると位置に関する目標式は (9) 式のようになる。

$$\mathbf{TR}_1^p x_1 = \mathbf{TR}_2^p x_2 = \dots = \mathbf{TR}_{(N-1)}^p x_{(N-1)} = x_N \dots\dots\dots (9)$$

結果として、これらの力の伝達率と位置の伝達率を設計することで、それぞれの伝達率の設計により、従来手法である一般的なマルチラテラル制御⁽¹⁰⁾の他に、以下のような 4 種類のマルチラテラル制御を実現することができる。また、 $\mathbf{TR}_i^f$ は i 番目のマスタシステムの力の伝達率を表し、 $\mathbf{TR}_i^p$ は i 番目のマスタシステムの位置の伝達率を表すものとする。このとき、各マスタシステムのそれぞれの伝達率は独立である。伝達率の設計モデルを図 2 に示す。

(1) 一般的なマルチラテラル制御 (Plain multilateral control)

$$\mathbf{TR}_i^f = 1.0, \quad \mathbf{TR}_i^p = 1.0$$

一般的なマルチラテラル制御の伝達率設計は、図 2 においては黒丸点によって示されている。このとき、全てのマスタ

システムの力の伝達率 $\mathbf{TR}_1^f, \mathbf{TR}_2^f, \dots, \mathbf{TR}_{(N-1)}^f$ および全てのマスタシステムの位置の伝達率 $\mathbf{TR}_1^p, \mathbf{TR}_2^p, \dots, \mathbf{TR}_{(N-1)}^p$ は 1.0 に設定される。

(2) 伝達率を用いた位置次元一致型マルチラテラル制御 (Position dimension corresponding)

$$\mathbf{TR}_i^f: \text{given}, \quad \mathbf{TR}_i^p = 1.0$$

伝達率を用いた位置次元一致型マルチラテラル制御のための伝達率設計は、図 2 においては細い実線によって示されている。このとき、全てのマスタシステムの力の伝達率 $\mathbf{TR}_1^f, \mathbf{TR}_2^f, \dots, \mathbf{TR}_{(N-1)}^f$ は独立に任意の値に設定できる。それに対して、全てのマスタシステムの位置の伝達率 $\mathbf{TR}_1^p, \mathbf{TR}_2^p, \dots, \mathbf{TR}_{(N-1)}^p$ は 1.0 に設計しなければならない。すなわち、位置次元一致型マルチラテラル制御を実現するときには、全てのマスタシステムの伝達率が図 2 の細い実線上になるように設計しなければならない。

(3) 伝達率を用いたマスタシステム間でのインピーダンス一致型マルチラテラル制御 (Impedance corresponding)

$$\mathbf{TR}_i^f: \text{given}, \quad \mathbf{TR}_i^p = \frac{1}{\mathbf{TR}_i^f}$$

伝達率を用いたマスタシステム間でのインピーダンス一致型マルチラテラル制御のための伝達率設計は、図 2 においては破線によって示されている。このとき、全てのマスタシステムにおいてインピーダンスを一致させるためには、各マスタシステムの力の伝達率 $\mathbf{TR}_1^f, \mathbf{TR}_2^f, \dots, \mathbf{TR}_{(N-1)}^f$ は任意の値に設定することができる。そして、位置の伝達率 $\mathbf{TR}_1^p, \mathbf{TR}_2^p, \dots, \mathbf{TR}_{(N-1)}^p$ は、対応するそれぞれのマスタシステムの力の伝達率 $\mathbf{TR}_i^f$ の逆数に設定しなければならない。すなわち、インピーダンス一致型マルチラテラル制御を実現するときには、全てのマスタシステムの伝達率を図 2 の破線上になるように設計しなければならない。これにより、スレーブシステムが環境と接触した時に、各マスタシステム側で人工的に再現されるインピーダンスが一致する。つまり、インピーダンス一致型マルチラテラル制御においては、スレーブシステムが環境と接触した際に、各マスタシステムに等しい力を印加した場合に、 $\frac{\mathbf{TR}_i^f F_i}{x_i}$ の値が等しくなる。

(4) 伝達率を用いたマスタシステム間での操作性一致型マルチラテラル制御 (Operationality corresponding)

$$\mathbf{TR}_i^f: \text{given}, \quad \mathbf{TR}_i^p = \mathbf{TR}_i^f$$

伝達率を用いたマスタシステム間での操作性一致型マルチラテラル制御のための伝達率設計は、図 2 においては点線によって示されている。このとき、各マスタシステムの力の伝達率 $\mathbf{TR}_1^f, \mathbf{TR}_2^f, \dots, \mathbf{TR}_{(N-1)}^f$ は任意の値に設定することができる。そして、位置の伝達率 $\mathbf{TR}_1^p, \mathbf{TR}_2^p, \dots, \mathbf{TR}_{(N-1)}^p$ は、対応するそれぞれのマスタシステムの力の伝達率 $\mathbf{TR}_i^f$ と等しい値に設定しなければならない。すなわち、操作性

一致型マルチラテラル制御を実現するときには、全てのマスタシステムの伝達率を図 2 の点線上になるように設計しなければならない。また本論文では操作性を、各マスタシステムを各操作者が操作する際に感じる操作感覚と定義する。つまり操作性はフリーモーション時における等価慣性の逆数を意味する。操作性一致型マルチラテラル制御においては、操作者が印加した実際の力とそれに応じたシステムの実際の加速度の比 $\frac{\ddot{x}_i}{F_i}$ が、環境と接触していない時に等しくなる。

(5) 伝達率を用いた力次元一致型マルチラテラル制御 (Force dimension corresponding)

$$\mathbf{TR}_i^f = 1.0, \quad \mathbf{TR}_i^p: \text{given}$$

伝達率を用いた力次元一致型マルチラテラル制御のための伝達率設計は、図 2 においては太い実線によって示されている。このとき、全てのマスタシステムの位置の伝達率 $\mathbf{TR}_1^p, \mathbf{TR}_2^p, \dots, \mathbf{TR}_{(N-1)}^p$ は独立に任意の値に設定できる。それに対して、全てのマスタシステムの力の伝達率 $\mathbf{TR}_1^f, \mathbf{TR}_2^f, \dots, \mathbf{TR}_{(N-1)}^f$ は 1.0 に設計しなければならない。すなわち、力次元一致型マルチラテラル制御を実現するときには、全てのマスタシステムの伝達率が図 2 の太い実線上になるように設計しなければならない。

マルチラテラル制御では上記の力の目標と位置の目標とが同時に理想的に達成されることが必要となる。しかしながら、力情報と位置情報は次元が異なるために、単純に和差計算を行い、その情報をシステム間で伝送することは不可能である。そこで本論文では、加速度次元という共通の次元において力制御と位置制御のそれぞれの目標を統一し、それぞれの目標を同時に達成するための加速度制御に基づくマルチラテラル制御系を設計する。そこで伝達率を用いた力に関する目標式と、位置に関する目標式を (10), (11) 式のように加速度次元の目標式に変換する。

$$\mathbf{TR}_1^f \ddot{x}_1^f + \mathbf{TR}_2^f \ddot{x}_2^f + \dots + \mathbf{TR}_{(N-1)}^f \ddot{x}_{(N-1)}^f + \ddot{x}_N^f = \ddot{x}_{com}^{res} = 0 \quad (10)$$

$$\mathbf{TR}_1^p \ddot{x}_1^p - \mathbf{TR}_2^p \ddot{x}_2^p = \ddot{x}_{dif(1-2)}^{res} \rightarrow 0$$

$$\mathbf{TR}_2^p \ddot{x}_2^p - \mathbf{TR}_3^p \ddot{x}_3^p = \ddot{x}_{dif(2-3)}^{res} \rightarrow 0$$

$$\vdots \quad \dots \quad (11)$$

$$\mathbf{TR}_{(N-1)}^p \ddot{x}_{(N-1)}^p - \ddot{x}_N^p = \ddot{x}_{dif((N-1)-N)}^{res} \rightarrow 0$$

$$\ddot{x}_N^p - \mathbf{TR}_1^p \ddot{x}_1^p = \ddot{x}_{dif(N-1)}^{res} \rightarrow 0$$

ここで、 $\ddot{x}^f$ と $\ddot{x}^p$ は力情報と位置情報から得られた加速度次元の情報であることをそれぞれ表している。力情報からの加速度次元情報は、(12) 式で表されるように外乱オブザーバの反力推定機能を通じて得られる。

$$\ddot{x}^f = \frac{1}{M_n} \hat{F}_{ext} \quad (12)$$

それに対して、位置情報からの加速度次元情報は (13) 式のように得られる。

$$\ddot{x}^p = s^2 x \dots\dots\dots (13)$$

また位置情報から得られる加速度次元の情報は(13)式のように2階微分より算出するため、どうしても2サンプリング時間遅れた情報となってしまう。したがって(11)式において等号ではなく矢印を用いて表現しており、これは位置情報から得られた加速度次元情報が出来るだけ早く収束し、定常状態で一致するという目標式を意味している。

また(10)式は、加速度次元での力の和の追従値を0としたときの力サーボを示している。そこで本論文では力の目標を加速度次元において達成するために次式に示される力サーボを用いる。

$$\ddot{x}_{com}^{ref} = C_f (\ddot{x}_{com}^{cmd} - \ddot{x}_{com}^{res}) = -C_f \ddot{x}_{com}^{res} \dots\dots\dots (14)$$

また(14)式に示される加速度次元における力サーボを図3に表す。この加速度次元における力の目標を、システムとの和に関する目標式であることから、仮想的なモード空間におけるコモンモードと呼ぶ。またコモンモードは、外乱としてシステムに印加される外力を加速度次元において制御するという反力制御を意味している。

これに対して、(11)式は、加速度次元での位置の偏差の目標値を0としたときの位置レギュレータを示している。本論文では位置の目標を加速度次元において達成するために次式に示される位置レギュレータを用いる。

$$\ddot{x}_{dif}^{ref} = C_p(s) \ddot{x}_{dif}^{res} \dots\dots\dots (15)$$

また(15)式に示される加速度次元における位置レギュレータを図4に表す。この加速度次元における位置の目標を、

図3 力サーボ

Fig. 3. Force servoing.

図4 位置レギュレータ

Fig. 4. Position regulator.

システムの差に関する目標式であることから、仮想的なモード空間におけるディファレンシャルモードと呼ぶ。このように、力と位置の目標をそれぞれ同時に達成するために、加速度次元においてコモンモードとディファレンシャルモードという仮想的なモード空間に配置することで、それぞれを独立に設計することが可能となる。また、 C_f と $C_p(s)$ はそれぞれ力サーボのゲインと位置レギュレータのゲインを示している。本論文で用いた力サーボのゲイン C_f と位置レギュレータのゲイン $C_p(s)$ を(16)式と(17)式に示す。

$$C_f = K_f \dots\dots\dots (16)$$

$$C_p(s) = \frac{1}{s^2} K_p + \frac{1}{s} K_v + K_a \dots\dots\dots (17)$$

K_f , K_p , K_v および K_a は力ゲイン, 位置ゲイン, 速度ゲインおよび加速度ゲインをそれぞれ表している。

また、位置情報から得られた加速度情報の、仮想的なモード空間とアクチュエータ空間との空間変換を、次の変換行列 (Transformation matrix) T_N と逆変換行列 (Inverse transformation matrix) T_N^{inv} を用いて行う。

$$T_2 = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad T_2^{inv} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T_3^{inv} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\vdots \dots\dots\dots (18)$$

$$T_N = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_N^{inv} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

変換行列 T_N を用いることで、アクチュエータ空間から仮想的なディファレンシャルモード空間への空間変換は(19)式のように実現される。

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_{dif(1-2)}^{res} \\ \ddot{x}_{dif(2-3)}^{res} \\ \vdots \\ \ddot{x}_{dif((N-1)-N)}^{res} \\ \ddot{x}_{dif(N-1)}^{res} \end{bmatrix} = T_N \begin{bmatrix} \mathbf{TR}_1^p \ddot{x}_1^p \\ \mathbf{TR}_2^p \ddot{x}_2^p \\ \vdots \\ \mathbf{TR}_{(N-1)}^p \ddot{x}_{(N-1)}^p \\ \ddot{x}_N^p \end{bmatrix} \dots\dots\dots (19)$$

それに対し T_N^{inv} を用いることで、仮想的なディファレンシャル

図5 触覚伝達率を実装したマルチラテラル制御系
Fig. 5. Multilateral control system with haptic transmission ratio.

ルモード空間からアクチュエータ空間への空間変換は (20) 式のように達成される。

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_{dif1}^{ref} \\ \ddot{x}_{dif2}^{ref} \\ \vdots \\ \ddot{x}_{dif(N-1)}^{ref} \\ \ddot{x}_{difN}^{ref} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_N^{inv} \begin{bmatrix} \ddot{x}_{dif(1-2)}^{ref} \\ \ddot{x}_{dif(2-3)}^{ref} \\ \vdots \\ \ddot{x}_{dif((N-1)-N)}^{ref} \\ \ddot{x}_{dif(N-1)}^{ref} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (20)$$

そして、ディファレンシャルモードにおける加速度参照値とコモンモードにおける加速度参照値が合計されて、(21) 式のように各システムに対する加速度参照値となる。

$$\ddot{x}_N^{ref} = \ddot{x}_{com}^{ref} + \ddot{x}_{difN}^{ref} \dots\dots\dots (21)$$

本論文で提案する伝達率を実装したマルチラテラル制御系のブロック線図を図5に示す。

4. 実験

〈4・1〉 実験設定 本研究における実験装置を図6に示す。この実験装置はロッド型リニアモータがアクチュエータとして実装されている。本論文の実験では2つのリニアモータをマスタシステムとして、1つのリニアモータをスレーブシステムとして用いた。そして、二人の操作者が2つのマスタシステムを直接それぞれ操作し、残りのスレーブシステムを発泡スチロール製の環境に接触させた。そして提案手法の伝達率を様々に設計することで、従来手法である一般的なマルチラテラル制御のほかに、4種類の伝達率

図6 実験システム
Fig. 6. Experimental system.

表2 実験における制御パラメータ設定
Table 2. Control parameters in the experiment.

Parameter	Description	Value
K_p	Position gain	900
K_v	Velocity gain	60
K_a	Acceleration gain	0.1
K_f	Force gain	0.1
K_{in}	Force coefficient	32.5 N/A
M_n	Mass	0.50 kg
g_{dis}, g_{reac}	Cut-off frequency of disturbance observer	500 rad/s

を導入したマルチラテラル制御手法について考察を行った。なおシステムの制御プログラムはC言語によって書かれ、コンピュータのオペレーションシステムにはRT-Linux3.1が用いられている。実験はサンプリング時間を0.1msとして行われる。表2にその他の実験パラメータを示す。

〈4・2〉 実験結果

〈4・2・1〉 一般的なマルチラテラル制御における実験結果
 まずはじめに、従来手法である一般的なマルチラテラル制御における実験結果を図7に示す。また網掛け部は発泡スチロール製の環境と接触している状態を示している。従来手法であるマルチラテラル制御は、提案する伝達率をすべて1.0に設定することで容易に実現できる。このとき、位置情報と力情報のすべてが完全に伝達されるため、すべてのシステムの位置応答が一致し、すべてのシステム間で作用反作用則が人工的に実現されていることがわかる。つまりマルチラテラル制御における目標式である、(4)式と(7)式が成立されていることがわかる。

〈4・2・2〉 位置次元一致型マルチラテラル制御の実験結果
 次に伝達率を導入した位置次元一致型マルチラテラル制御の実験結果を図8に示す。また網掛け部は発泡スチロール製の環境と接触している状態を示している。本実験では、マスタシステム2の力情報の伝達率 TR_2^f を0.5に設計し、そのほかの伝達率を1.0とした。実験結果より、操作者よりマスタシステム2に印加された力の半分だけがマルチラテラルシステム全体に伝達されていることがわかり、マルチラテラルシステムにおいて(6)式が満たされていると言える。またそれに対して位置応答に関しては、すべてのシステムで一致されていることがわかる。したがって、伝達率を導入した位置次元一致型マルチラテラル制御では、力情報の伝達率のみを訓練者の技術習得レベルに応じて変化させて設計することで、訓練者の影響度を変化させながら熟練動作を学ぶことができる。

図7 一般的なマルチラテラル制御による実験結果
 Fig. 7. Experimental results on plain multilateral control.

図8 位置次元一致型マルチラテラル制御の実験結果
 Fig. 8. Experimental results on multilateral control with transmission ratio for position dimension corresponding.

〈4・2・3〉 マスタ間でのインピーダンス一致型マルチラテラル制御の実験結果
 図9にマスタ間でのインピーダンス一致型マルチラテラル制御の実験結果を示す。また網掛け部は発泡スチロール製の環境と接触している状態を示しており、図9(c)は各システムでのインピーダンス応答を示している。本実験では、マスタシステム2の力の情報の伝達率 TR_2^f を0.5に、位置情報の伝達率 TR_2^p を2.0に設計した。これにより、スレーブシステムが環境と接触したとき、操作者が各マスタシステムに等しい力を印加すると、マスタシステム側で再現されるインピーダンスがマスタシステム間で一致する。しかし、この再現されたインピーダンスはスレーブシステム側の環境インピーダンスとは一致しない。これは本論文において提案する伝達率をマスタシステムのみの実装したためだと思われる。しかしながら、すべてのシステムにおいての接触インピーダンス共有は、アイデンティティ比を用いたマルチラテラル制御手法を用いることで実現することができるため⁽¹¹⁾、目的や用途に応じてマルチラテラル制御系の構成を変更することが望ましいと言える。また今後の課題として、スレーブシステム側にも伝達率を実装した場合に於ける伝達率設計を検討することがあげられる。

〈4・2・4〉 マスタ間での操作性一致型マルチラテラル制御の実験結果
 図10にマスタ間での操作性一致型マルチラテラル制御の実験結果を示す。本実験はフリーモーションにおいて行った。操作者がまずはじめにマスタシステム1を操作し、次にマスタシステム2を操作している。本実験ではマスタシステム2の力情報の伝達率 TR_2^f を0.5に設計し、位置情報の伝達率 TR_2^p も0.5に設定した。これに

図9 マスタ間でのインピーダンス一致型マルチラテラル制御の実験結果

Fig. 9. Experimental results on multilateral control with transmission ratio for impedance corresponding among master systems.

図 10 マスタ間での操作性一致型マルチラテラル制御の実験結果

Fig.10. Experimental results on multilateral control with transmission ratio for operability corresponding among master systems.

より、操作者がシステムを操作する際のフリーモーション時、すなわち環境と接触しないときの操作性が一致される。図 10(c) は各マスタシステムの操作性の逆数を示している。図 10(c) より、各マスタシステムの操作性がおおよそ一致していることがわかる。実験結果から見られるマスタシステム間の若干の相違は、操作の仕方の違いによるものと、各マスタシステムでの補償しきれなかった摩擦力の違いによるものだと考えられる。また、環境接触時にマスタシステム側で再現されるインピーダンスはすべてのシステムにおいて一致しない。したがって、実用上は自由動作時には操作性一致型を適用し、接触時に制御系をインピーダンス一致型に切り替えることでより良い触覚情報に基づく技術教育が実現されることが考えられる。しかし、その場合には制御系切り替えの連続性や安定性などといった問題点を明らかにし、解決することが今後の課題として挙げられる。

〈4・2・5〉 力次元一致型マルチラテラル制御の実験結果

最後に図 11 に力次元一致型マルチラテラル制御の実験結果を示す。また網掛け部は発泡スチロール製の環境と接触している状態を示している。本実験では、マスタシステム 2 の位置情報の伝達率 TR_2^p のみを 0.5 に設定し、その他の伝達率をすべて 1.0 とした。これにより、すべてのマスタシステムが力次元において一致され、マルチラテラルシステム間で作用反作用則が人工的に実現されていることがわかる。それに対して、マスタシステム 2 の位置応答はマスタシステム 1 の位置応答の 2 倍となっていることがわかる。このことは (9) 式が満足されていることを意味している。

図 11 力次元一致型マルチラテラル制御の実験結果

Fig.11. Experimental results on multilateral control with transmission ratio for force dimension corresponding.

以上の実験結果より、提案する伝達率の設計を変えることで様々な種類のマルチラテラル制御が実現できることを確認した。本論文で提案している伝達率 TR はシステムごとに独立であるため、システムの台数に関係なくマルチラテラル制御を拡張して用いることが可能である。実際に提案手法をマルチラテラル制御に基づく技術教育に適用する際には、訓練者の技術習得レベルに応じた伝達率 TR の設計が必要となる。特に、人の技術習得レベルを定量的に評価する手法の開発が望まれる。

5. 結 論

本論文では触覚情報に基づいた技術教育を実現するための加速度制御に基づいた新しいマルチラテラル制御を提案した。技術教育に適応するためのマルチラテラル制御は、訓練者の技術の習得レベルに応じて、操作者からのシステムへの影響度を変化させられることが必要となる。したがって本論文では、各操作者からの影響度を調節するための伝達率というパラメータを導入した新しいマルチラテラル制御系を提案した。提案した伝達率の設計を変更することにより、様々なマルチラテラル制御を実現できることを示した。これらの提案手法の有効性を実験により確認した。提案した伝達率を導入したマルチラテラル制御手法は、技術教育システム実現のための基礎技術となりうるだろう。

謝 辞

本研究の一部は、株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモとの共同研究「リアルタイムロボティクスの遠隔制御」によって行われたことを記すと共に、関係各位に謝意を表す。

(平成 18 年 9 月 25 日受付, 平成 19 年 2 月 15 日再受付)

文 献

- (1) B. Hannaford: "A Design Framework for Teleoperators with Kinesthetic Feedback", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.5, No.4, pp.426-434 (1989-8)
- (2) D.A. Lawrence: "Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.9, No.5, pp.624-637 (1993-10)
- (3) K.H. Zaad and S.E. Salcudean: "Bilateral Parallel Force / Position Teleoperation Control", *Journal of Robotic Systems*, Vol.19, No.4, pp.155-167 (2002)
- (4) K.H. Zaad and S.E. Salcudean: "Transparency in Time-Delayed Systems

and the Effect of Local Force Feedback for Transparent Teleoperation”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.18, No.1, pp.108–114 (2002-2)

- (5) Y. Yokokohji and T. Yoshikawa: “Bilateral Control of Master–Slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling–Formulation and Experiment”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.10, No.5, pp.605–620 (1994-10)
- (6) K. Kosuge, T. Itoh, T. Fukuda, and M. Otsuka: “Telemanipulation System Based on Task-Oriented Virtual Tool”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.351–356 (1995)
- (7) D. Lee and M.W. Spong: “Bilateral Teleoperation of Multiple Cooperative Robots with Delayed Communication: Theory”, *Proceedings of The IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA’05*, 18th–22nd (2005-4)
- (8) D. Lee and M.W. Spong: “Bilateral Teleoperation of Multiple Cooperative Robots with Delayed Communication: Application”, *Proceedings of The IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA’05*, 18th–22nd (2005-4)
- (9) S. Sirouspour: “Modeling and Control of Cooperative Teleoperation Systems”, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.21, No.6, pp.1220–1225 (2005)
- (10) S. Katsura, Y. Matsumoto, and K. Ohnishi: “Realization of “Law of Action and Reaction” by Multilateral Control”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.52, No.5, pp.1196–1205 (2005-10)
- (11) T. Suzuyama, S. Katsura, and K. Ohishi: “Decoupled Haptic Transmission by Multilateral Control”, *Proceedings of the 9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, AMC’06–ISTANBUL*, pp.334–339 (2006-3)
- (12) S.S. Nudehi, R. Mukherjee, and M. Ghodoussi: “A Shared–Control Approach to Haptic Interface Design for Minimally Invasive Telesurgical Training”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.13, No.4, pp.588–592 (2005-7)
- (13) K. Ohnishi, N. Matsui, and Y. Hori: “Estimation, Identification, and Sensorless Control in Motion Control System”, *Proceedings of the IEEE*, Vol.82, No.8, pp.1253–1265 (1994-8)
- (14) T. Murakami, N. Oda, Y. Miyasaka, and K. Ohnishi: “A Motion Control Strategy Based on Equivalent Mass Matrix in Multidegree-of-Freedom Manipulator”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.42, No.2, pp.123–130 (1995-4)
- (15) T. Doi, K. Osuka, T. Ono, and R. Kawatani: “A Study on the Robust Stability for Disturbance Observers”, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.34, No.10, pp.1401–1410 (1998-10) (in Japanese)
土井智晴・大須賀公一・小野敏郎・川谷亮治:「外乱オブザーバのロバスト安定性に対する一考察」, 計測自動制御学会論文集, Vol.34, No.10, pp.1401–1410 (1998-10)

下野 誠通 (学生員) 1980年2月23日生。2004年3月早稲田大学理工学部機械工学科卒業。2006年3月慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻修士課程修了。同年4月同大学大学院同専攻後期博士課程入学。2007年4月より日本学術振興会特別研究員 (DC2), 現在に至る。主としてモーションコントロール, ハプティクス, ロボティクスの研究に従事。

久保 亮吾 (正員) 1983年1月13日生。2005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。2007年3月同大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻修士課程修了。同年4月日本電信電話 (株) 入社。在学中, 主としてモーションコントロール, ハプティクス, ロボティクスに関する研究に従事。

大西 公平 (上級会員) 1952年7月25日生。1980年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月慶應義塾大学理工学部電気工学科助手。現在, 理工学部システムデザイン工学科教授。工学博士。

桂 誠一郎 (正員) 1978年9月23日生。2004年9月慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻後期博士課程修了。2003年4月から2005年3月まで日本学術振興会特別研究員 (DC1 および PD)。2005年4月長岡技術科学大学電気系助手, 2007年4月より同助教, 現在に至る。主としてモーションコントロール, ハプティクス, ロボティクス, メカトロニクスの研究に従事。博士 (工学)。

大石 潔 (上級会員) 1957年10月14日生。1986年3月慶應義塾大学大学院工学研究科博士課程修了。大阪工業大学講師, 助教授を経て, 1993年4月長岡技術科学大学電気系助教授, 2003年に同教授, 現在に至る。主として制御工学, パワーエレクトロニクス, ロボティクスに関する研究に従事。工学博士。