

パッシブフォースフィードバックを用いた多指エグゾスケルトン型ハプティックデバイスの開発

小山 辰也^{*1} 山野 郁男^{*1} 竹村 研治郎^{*2} 前野 隆司^{*2}

Development of Multi-Fingered Exoskeleton Haptic Device
using Passive Force Feedback

Tatsuya Koyama^{*1}, Ikuo Yamano^{*1}, Kenjiro Takemura^{*2}, and Takashi Maeno^{*2}

Abstract - A control methodology for master-slave systems using passive force feedback has proposed by the authors. The methodology solves the conventional problems of previously developed master-slave systems with force feedback, such as oscillations, complex structures and complicated control algorithm. In the present paper, a multi-fingered exoskeleton haptic device (master hand) with passive force feedback function is developed. First, the exoskeleton master hand with three fingers (12 degrees of freedom) is designed and produced. Each finger of the master hand consists of a link mechanism with elastic-shaft joints and clutches. The master hand makes fingertip positions and angles of index finger, middle finger and thumb to be measured using link mechanisms. Furthermore, it also enables passive force feedback to an operator by the same link mechanism used for the geometric measurements. Then, a virtual reality system of human hand is constructed using the master hand and the control methodology. Using the system, sensory evaluations are conducted to confirm the usability of the developed master hand and the possibility of the control methodology in virtual reality system. Virtual reality system using the master hand and the methodology is constructed. As a result, the subjects possibly recognize the stiffness of the objects in the virtual environment.

Key Words: Haptic Device, Exoskeleton, Force Feedback, Multi-Finger, Clutch

1. はじめに

近年、仮想空間や遠隔地での単純動作を人に提示するための低自由度力覚提示デバイスの開発が盛んに行われている[1]-[4]。一方、外科手術・微細組立といった緻密な作業や、原子炉・宇宙空間といった極限空間における道具の操り・持ち替えを伴う複雑な作業を遠隔操作により遂行したり、これらの作業を人がシミュレーションにより習熟するためには、人の多指による協調動作を入力情報とする多自由度入出力システムの開発が不可欠である。このため、これまでに様々な多指ハプティックデバイスの開発が行われてきた[5]-[13]。しかし、従来のハプティックデバイスには、一般に以下のような問題点がある。

- (1)装置が大型になりがちである
- (2)構造上、自然な手指動作を妨げる場合がある
- (3)近似的に指の位置を計測している場合が多い
- (4)力覚提示の動力伝達方法にワイヤ駆動を用いた場合、摩擦や伸縮、遅れが生じる
- (5)指先へ力覚を提示する際に、指先以外にも力の影響が及ぶ動力伝達機構となっている場合が多い

(1)-(3)が指先の姿勢計測上の問題点であり、(4)-(5)が指先への力覚提示上の問題点である。また、指先の姿勢計測と指先への力覚提示を1つの機構によって実現しているハプティックデバイスの例はまだ少ない。本研究は、これらの問題点を解決し、人の手指動作の計測および指先への力覚提示が可能なハプティックデバイスを開発することを目的とする。まず、筆者らが考案したパッシブフォースフィードバックに基づくマスタ・スレーブ装置の制御法[14]を修正することにより構築した、仮想空間内の物体ハンドリングのための制御法について述べる。つぎに、本手法を適用した多指ハプティックデバイスの試作と評価について述べる。さらに、応用例の1つとして、出力側に仮想空間内のハンドモデルを用いたバーチャルリアリティ(VR)システムを構築し、心理物理実験を行うことによって、指先への力覚提示の有効性を確認した結果について述べる。

2. 制御法

2.1 概要

一般に、仮想空間内の物体をハンドリングするための、力覚を有するハプティックデバイスにおいては、マスタ・スレーブ装置におけるバイラテラル制御に準ずる制御が行われる。すなわち、図1(a)に示したように、人が操作するハプティックデバイス(マスタデバイス)か

*1:慶応義塾大学大学院 理工学研究科

*2:慶応義塾大学 理工学部機械工学科

*1:Graduate School of Science and Technology, Keio University

*2:Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science and Technology, Keio University

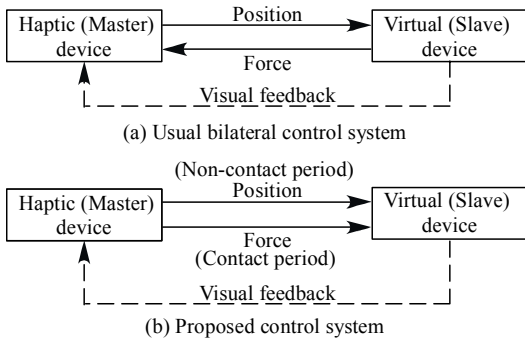


図1 制御法の概要

Fig. 1 Conceptual figures of control systems

らコンピュータ内の仮想デバイス(仮想スレーブデバイス)に位置指令を与えると同時に、仮想空間内の物体との接触力をハプティックデバイスにフィードバックする。ハプティックデバイス側における位置と力の情報が常に仮想スレーブ側と同じになることを目標に制御される結果、繊細で臨場感のある操作が可能である。しかし、この方式では仮想空間からのフィードバック情報を提示するためにハプティックデバイス側にモータを配する必要があるため、構造が複雑になる、データ転送や制御に伴う遅れが生じるなどの問題があった。このため、近年、モータ等の能動的なアクチュエータを利用しない力覚提示法の研究が行われている。古荘ら[15]は、ER ブレーキを用いた 2 自由度のパッシブ型力覚提示システムにより、壁なぞり感覚や衝突感覚を提示する手法を提案している。しかし、ER 流体の粘性を利用しているため、ハプティックデバイスが静止しているときに仮想物体の接触反力を提示することはできない。川村ら[16]は空気圧により積層梁の弾性特性を変化させる装置を用いて操作者に力を提示しているが、応答性や精度が十分とはいえない。村田ら[17]は、パウダクラッチを用いた力覚提示装置を開発し、操作者に対して壁や塑性物体、粘性抵抗等の感覚を提示する実験を行っている。しかし、1 自由度の装置であるため、用途は限定される。また、これらの装置はいずれも、接触する対象物の剛性の違いを操作者に提示することを想定していない。このため、本節では、クラッチと弾性要素を利用したハプティックデバイスに対し、人の深部運動感覚に対する視覚による位置フィードバックの優位性を陽に利用した簡便な制御を適用することによって、スレーブデバイスに接触する仮想物体の剛性の違いをハプティックデバイス操作者に提示する手法を提案する。

本手法における情報の流れを図 1(b)に示す。本手法は、仮想スレーブデバイスが仮想対象物と接触する前後で位置制御と力制御を切り替えることを特徴とする。すなわち、非接触時には仮想スレーブデバイスの変位をハプティックデバイスに変位に追従させる。また、接触時には仮想スレーブデバイスの仮想物体との接触力をハプティックデバイスの弾性要素の変形による受動的な力に追従させる。これにより、ハプティックデバイス操作者は、非接触時には仮想空間内の変位情報を、接触時には力情報を、それぞれ深部運動感覚によ

表 1 制御の切り替え
Table 1 switching of control

	Non-contact period	
Clutch	Release	Lock
Virtual slave device	Controlled to be $\theta_1 = \theta_2$	Controlled to be $T = k \cdot (\theta_1 - \theta_1')$
Control method	Position control	Force control

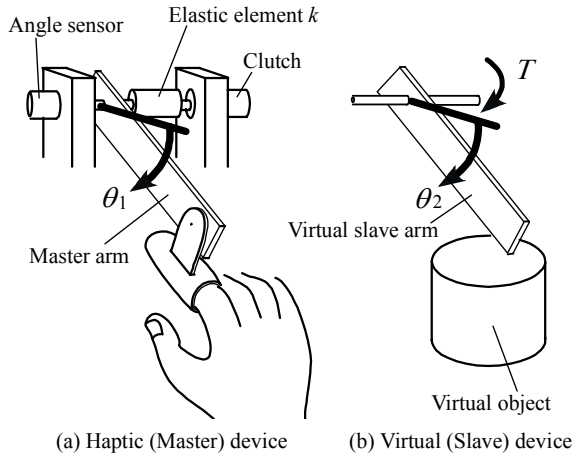


図2 1 自由度装置模式図

Figure 2: outline of proposed system

り知覚できることになる。情報の流れが一方向であるにもかかわらず、操作者に位置または力を提示できる理由の詳細は次節で述べる。

図 2 に、本制御法を説明するための 1 自由度アーム装置の模式図を示す。ハプティックデバイス(a)は、角度センサ、アーム、弾性要素、クラッチから成る。クラッチの軸の一端は固定されており、他端は弾性要素を介してアームに接続されている。また、図中の k は弾性要素のねじりばね定数を表す。仮想空間内のスレーブデバイス(b)はハプティックデバイスからの位置指令および力指令に応じてハプティックデバイスに追従するものとする。本装置を用いて仮想空間内の変位情報および力情報をハプティックデバイス操作者に提示するための手法を、接触時および非接触時に分けて以下に述べる。

2.2 制御の流れ

2.2.1. 非接触時

仮想スレーブアームが対象物に接触していないときには、ハプティックデバイスのクラッチを保持解除状態とする。ハプティックデバイスが操作されると、 θ_1 (図 2(a))に追従するように仮想スレーブアームの回転角 θ_2 (図 2(b))が計算され、表示される。また、クラッチが保持解除の状態にあるため、弾性要素 k はねじれない(表 1, Non-contact period. 図 1(b)における位置のユニラテラル制御に相当)。結果として、ハプティックデバイスの操作者には、

仮想スレーブアームの変位情報が提示されることになる。

2.2.2. 接触時

仮想スレーブアームの回転に伴い、仮想スレーブアームが仮想対象物に接触した場合には、ハプティックデバイスのクラッチを保持状態に切り替える。また、この時点におけるハプティックデバイスの角度を θ_1 として記憶する。この状態から、操作者がハプティックデバイスをさらに動かすと、弾性要素 k にはねじり変形が生じ、ねじれ角 $(\theta_1 - \theta_2)$ の大きさに比例した反力が生じる。このため、ハプティックデバイスの操作者には力が提示される(能動的なフィードバック制御による力覚提示ではなく受動弾性による力覚提示であるので、パッシブフォースフィードバックであるといえる)。同時に、仮想スレーブアームと仮想物体に対しては以下の計算が行われる。仮想スレーブアームと仮想物体の接触部には、ハプティックデバイスの操作者に提示された力と等しい仮想接触力が加えられる。仮想物体は仮想スレーブアームとの仮想接触力により、あらかじめ設定された仮想物体の剛性に応じて変形する(表 1, Contact period. 図 1(b)における力のユニラテラル制御に相当)。結果として、受動弾性要素 k の復元力により、ハプティックデバイス操作者の指には仮想スレーブアームと仮想物体との接触反力に等しい力が提示されることとなる。この際、一般的なバイラテラル制御手法を用いた力覚提示時とは異なり、仮想対象物と弾性要素 k の剛性の違いにより、ハプティックデバイスの角変位と仮想スレーブアームの角変位には差が生じてしまう。操作者は仮想空間を眼で見ている(ハプティックデバイスおよび実際の指は見ない)ことを想定すると、当然、視覚的には仮想空間での仮想スレーブアームと仮想物体の変位を正確に知覚することができる。

人に対象物の剛性を認識させる際には、何らかの形で変位と力を提示すればよい。このため、バイラテラル制御(図 1(a))では、操作者の体性感覚による力情報と変位情報の組み合わせによって、対象物の剛性を操作者に提示する。しかし、2自由度の力覚提示装置を利用して仮想空間内のばね剛性識別の比較を行った Srinivasan ら[18]の研究によると、仮想対象物の剛性を認識する際には、視覚による変位情報が体性感覚による変位情報に対して優位に働くことが示されている。また、力覚提示グローブを用いて仮想対象物の剛性の識別実験を行った藤田ら[19]の研究においても、視覚情報の効果が仮想対象物の剛性の認識に大きな影響を与えることが示されている。これらより、図 1(b)のような制御システムを用いた場合にも、体性感覚による力情報と視覚による変位情報の組み合わせによって、仮想対象物の剛性を操作者に精度良く提示できると考えられる。筆者らは、図 2 と同様な構成のマスター・スレーブ装置[14]によりこれを確認して

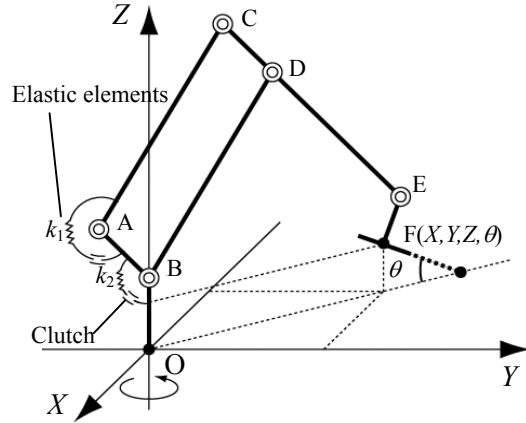


図 3 3次元幾何モデル
Fig. 3 3-D geometrical model of the haptic device

いる。筆者らの提案したマスター・スレーブ装置の制御法[14]を修正した上述の制御法においても、操作者は仮想対象物の剛性を精度良く判断できると考えられる。

なお、本制御法では、図 1(b)に示したように、情報が常にハプティックデバイス側から仮想スレーブデバイス側へ伝達されるため、操作対象物が能動的に運動する場合には、運動に伴う反力変化をハプティックデバイス側に反映することができない。このため、本手法は、物体や道具の操作など、能動的に運動しない仮想対象物をハンドリングする場合に有効である。本制御法では、ハプティックデバイス操作者に受動的に力覚を提示するため、ハプティックデバイスにアクチュエータを付加する必要がなく、位置と力の制御を同時に行わないため、簡便な装置と制御系を構成することが可能である。また、装置が簡便であるため、本制御法を多自由度システムに適用することが容易である。さらに、システムの暴走によって装置が操作者に危害を加える危険性がないことから、安全性の高いシステムであるといえる。また、仮想スレーブ側からハプティックデバイス側へのフィードバック信号は接触・非接触の切り替えを行うための情報のみであり、従来のバイラテラル制御と比較して情報量が少ないため、通信ネットワークの伝達遅れ時間変動に起因する過大な力の提示や発振がハプティックデバイス側に生じ得ないという利点を有する。

3. ハプティックデバイス

3.1 設計と製作

本デバイスを用いた入出力システムの用途としては、微細な作業や物作りを想定している。このような作業の際には主に指先を使用するため、本デバイスでは各指の指先位置と指先で対象物に与える力のみを計測するものとする。2章で述べたクラッチおよび弾性要素

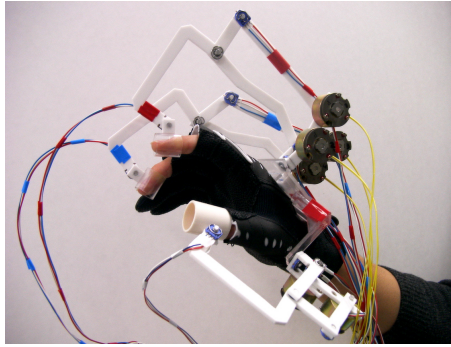


図4 多指ハプティックデバイス外観図
Fig. 4 Multi-fingered haptic device

を用いたパッシブフォースフィードバックによる制御法を適用し、前述の(1)~(5)の問題点を解決できるハプティックデバイスを設計する。(1)~(5)の問題点を解決し、各指の指先位置と指先力を計測するためには、手の甲と指先を両端とするリンク機構を用いたエグズケルトン型の装置を用いることが適していると考えられる。手とハプティックデバイスの固定箇所を、手の甲と指先のみによって、(2)の問題点の影響を減少させることができる。また、本デバイスには指先の位置と角度の計測を行うためのシリアルリンク機構と、指先へ力覚を提示するためのパラレルリンク機構を組み合わせた機構を用いることとする。

図3に本機構の3次元幾何モデルを示す。点Oが手の甲の上部に、点Fが指先に位置する。四角形ABDCは平行四辺形を形成しており、リンクは点OにおいてBO軸まわりの回転1自由度を有する。

本デバイスでは、1指につき4自由度の運動計測が可能であり、指先の位置と角度を近似することなく計測できる。各リンクのなす角は、点B, C, E, Oに設置する角度センサにより計測する。指先の位置と角度は、これらの角度とリンク長より順運動学を用いて求められる。これより、(3)の問題点が解決される。

指先への力覚提示は点A, Bに設置するクラッチにより行う。それぞれのクラッチの軸は、前述の制御法を適用するために弾性要素を介してリンク部材と接続されている。図3では、クラッチおよび弾性要素を模式的に示しているが、実際にはねじりばねとクラッチを回転軸上に直列に配する。2章の装置と同様、クラッチは接触・非接触の切り替えのために、ねじりばねは力提示のために用いる。点AのクラッチによりリンクACとリンクABのなす角を保持し、点BのクラッチによりリンクABとリンクBOのなす角を保持する。クラッチを動作させることにより、屈伸運動する指先に対してねじりばねの復元力による受動的な力

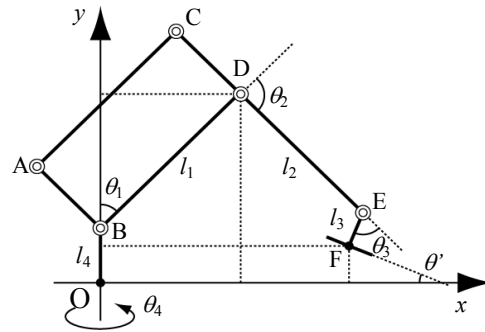


図5 2次元幾何モデル
Fig. 5 2-D geometrical model of the haptic device

表2 各リンク長 [mm]
Table 2 Length of l_1 - l_4 [mm]

part	l_1	l_2	l_3	l_4
index	105	70	6	21
middle	105	70	6	21
thumb	55	70	6	16

を提示する。このとき、ハプティックデバイスの指先部に加わる力は、角度センサによる計測角度と弾性要素のねじりばね定数から求められる。

パラレルリンク機構を用いることにより、力覚提示用のクラッチをベース部に近い点A, Bに配置することができる。そのため、クラッチの重量が指先へ提示する力覚に与える影響は軽減される。さらに、手とハプティックデバイスは指先と手の甲のみで固定されているため、指先にのみ力覚を提示することができる。また、本ハプティックデバイスは将来的にはアームから吊るして使用することを想定して設計・製作した。本ハプティックデバイスをアームから吊るすことによってその自重が補償され、手の甲への反力の影響が解消される。この場合には(5)の問題点が解消される。また、動力の伝達にリンク機構を用いるため、(4)の問題点が解消される。

このように、ハプティックデバイスにシリアルリンク機構とパラレルリンク機構を組み合わせた1つのリンク機構を用いるとともに、適当な位置に角度センサ、クラッチ、弾性要素を配することによって、指先の姿勢計測、指先に加わる力の計測、そして指先への受動的な力覚提示が実現できる。また、このリンク機構により、ハプティックデバイスの構造は簡略化され、装着の容易性が向上し、(1)の問題点が解決される。試作した3指ハプティックデバイスを図4に示す。図では3指に装着しているが、4指または5指装置への拡張も可能である。各リンク部材にはアクリル板を、角度センサにはポテンショメータを用い、弾性要素にはアクリル棒を使用した。

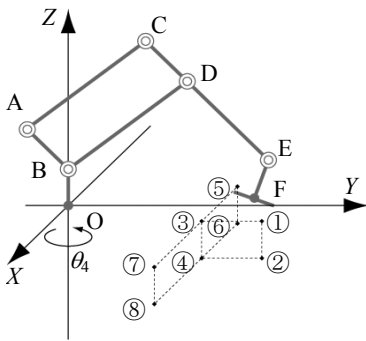


図6 8箇所での計測位置
Fig. 6 8 measurement points

表3 各指先位置の座標 [mm]
Table 3 Coordinate values of each fingertip measurement point [mm]

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
X	0	0	0	0	-30	-30	30	30
Y	100	100	85	85	85	85	85	85
Z	-30	-95	-30	-95	-30	-95	-30	-95

表4 各指の指先位置計測誤差 [mm]
Table 4 Error of each fingertip measurement at 8 points [mm]

part	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
index	3.05	2.24	1.89	2.89	6.00	5.05	6.07	5.08
middle	1.19	2.00	2.65	1.70	4.06	3.98	1.37	4.33
thumb			2.16	2.05	1.82		2.08	

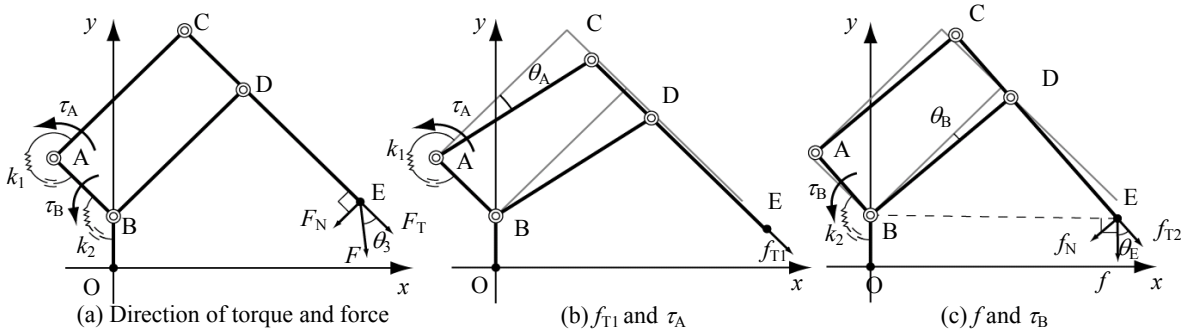


図7 指先反力計測の概要
Fig. 7 Outline of reaction force measurement

3.2 計測と評価

3.2.1. 指先位置の計測

図5に示す本デバイスの2次元幾何モデルを用いて、指先の位置と角度の計測方法について述べる。図中の記号を用いると、指先のxy平面上の位置と角度は、

$$x = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (1)$$

$$y = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_4 \quad (2)$$

$$\theta' = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 - 90^\circ \quad (3)$$

と表される。また、指先の位置と角度は、図3のXYZ空間内において、点Oの回転角度 θ_4 を用いて、

$$X = x \sin \theta_4 \quad (4)$$

$$Y = x \cos \theta_4 \quad (5)$$

$$Z = y \quad (6)$$

$$\theta = \theta' \quad (7)$$

のように表される。表2に示指、中指、母指の各リンク長を示す。

試作した多指ハプティックデバイスを用いた指先位置の計測精度を求めめるため、姿勢計測実験を行った。すなわち、米国 Immersion社の3次元計測器 MicroScribe-3Dを用いて計測した指先位置と、ハプティックデバイスより計測した指先位置とを比較することによ

て、指先位置の計測精度を求めた。計測した指先位置は、図6に示した指先の可動範囲内にある8点である。8点の座標を表3に示す。母指部はリンク長が短いので、③～⑤、⑦の4点のみについて計測した。各指の各位置での誤差を表4に示す。示指部指先の最大計測誤差は6.07mm、中指部では4.33mm、母指部では2.16mmであった。ここで、示指部、中指部のいずれの場合も、誤差が大きかった指先位置は θ_4 方向の回転を伴う4箇所の位置(⑤～⑧)であった。これは、示指部および中指部の点Fが点Oまわりに回転する際の回転半径(OF)が母指部と比較して長いことや、装置の剛性が低いために発生したねじれが原因であると考えられる。このように、試作機の精度は微細な作業や物作りを行うためには十分とはいえない。ただし、ハプティックデバイス全体の剛性を高くすることや、よりよい角度センサを用いることによって、計測精度の向上は十分可能である。たとえば、本ハプティックデバイスに用いたポテンショメータの線形性は $\pm 2\%$ であり、キャリブレーション後も誤差は最大 0.5° であったが、このポテンショメータの代わりにパルス数500のエンコーダを4倍倍して使用すれば、分解能および誤差を 0.18°

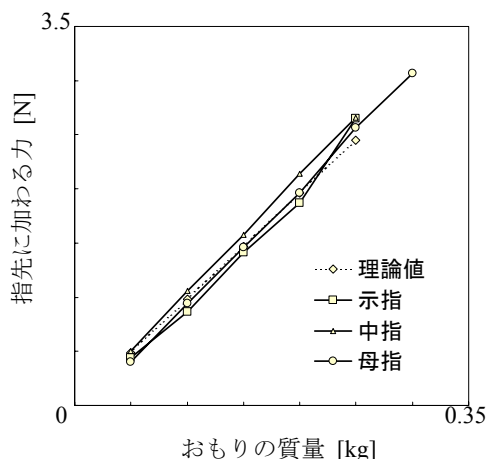


図8 指先反力計測結果

Fig. 8 Result of reaction force measurement

まで小さくすることができる。

3.2.2. 指先反力の計測

図 7(a)-(c)に、指先に加わる受動的な力の計測方法について概説するための模式図を示す。図中の k_1 (2.42×10^{-2} Nm/deg)と k_2 (2.33×10^{-2} Nm/deg)はそれぞれのアクリル棒のねじりばね定数である。力覚提示を行う際、2個のクラッチは同時に軸を固定する。そのため、指先の屈伸運動に対して、点 A, B には図 7(a)に示したトルク τ_A , τ_B が加わる。 F は、力覚を提示した際に指先に加わる反力である。 F は図 7(a)のようにリンク CE に対して接線方向の成分 F_T と、法線方向の成分 F_N に分解され、それぞれ、

$$F_T = F \cos \theta_3 \quad (8)$$

$$F_N = F \sin \theta_3 \quad (9)$$

$$F = \sqrt{F_T^2 + F_N^2} \quad (10)$$

と表される。点 A, B におけるアクリル棒のねじれ角をそれぞれ θ_A , θ_B とすると、 τ_A , τ_B は、

$$\tau_A = k_1 \theta_A \quad (11)$$

$$\tau_B = k_2 \theta_B \quad (12)$$

で表される。図 7(b)は、リンク AB と BO のなす角を一定として、点 E にリンク CE 軸方向の力 f_{T1} を加えたと仮定したときの図である。モーメントのつりあいより、 f_{T1} と τ_A は、

$$f_{T1} = \tau_A / l_1 \quad (13)$$

で表される。同様に図 7(c)は、リンク AB と AC のなす角を一定として、点 E に力 f を加えたときの図である。 f は接線方向成分 f_{T2} と法線方向成分 f_N に分解され、それぞれ、

$$f = \tau_B / BE \quad (14)$$

$$f_{T2} = f \cos \theta_E \quad (15)$$

$$f_N = f \sin \theta_E \quad (16)$$

と表される。したがって、 F は、

$$F = \sqrt{(f_{T1} + f_{T2})^2 + f_N^2} \quad (17)$$

となる。

表 5 指先反力計測誤差の最大値と θ_E Table 5 Maximum errors of reaction force measurement and θ_E

	theoretical force [N]	actual force [N]	error [N]	θ_E [deg]
index	2.45	2.65	0.20	21.45
middle	2.45	2.65	0.20	45.59
thumb	2.94	3.07	0.13	20.06

指先反力の計測誤差を評価するため、質量が既知のおもりを点 F に吊るし、点 E の θ_E 方向に力を加える実験を行った。おもりを 50g から 250g(母指部は 300g)まで 50g ずつ増加させたときの力を、前述の式より算出した値と比較した(図 8)。この結果得られた各指の誤差の最大値およびその際の θ_E を表 5 に示す。本ハプティックデバイスの力覚提示に用いた電磁クラッチは保持トルクが 0.25Nm であり、指先に加えられる最大力は約 3N である。上記の誤差は最大力に比べれば十分小さく、動作試験を行うには問題のないレベルであるといえる。今後、より緻密な作業を行うためには、機械要素等の改良により精度を向上する必要があると考えられる。

3.3 力覚提示

本ハプティックデバイスでは、クラッチと弾性要素によるパッシブフォースフィードバックを用いて操作者に力覚を提示する。すなわち、前述のように 2 個のクラッチを同時に固定することにより 1 指につき 2 自由度の力覚を提示している。クラッチを図 5 の点 A および点 B に設置しているため、xy 平面内における 2 自由度方向の力 (F_T および F_N) を点 E に対して提示することが可能である。ただし、支持点 E にはクラッチを設置していないため、 θ_3 を固定するようなトルクは提示されない。その結果、人の指先位置 F では、 F_T および F_N につりあうための力 F_T および F_N と、点 E まわりのトルクを 0 にするためのトルクが加わることとなる。ただし、ハプティックデバイスの形状は、どのような姿勢の場合にも物体把持時に指に加える力の方向がなるべくリンク EF の方向と近くなるように設計されているため、指先力と釣り合うためのトルクは常に小さくなる。リンク EF の長さが十分短くなるように設計されていることも、指先トルクが指先力よりも十分小さくなる要因である。実際に製作したハプティックデバイスに指を装着して力を提示した結果、指の可動範囲内では不要なトルクによる違和感をあまり感じないことを確認できているため、結局、本装置によって、点 F では適切な力を提示できているといえる。

また、2 章の制御法の場合と同様に、 F_T , F_N

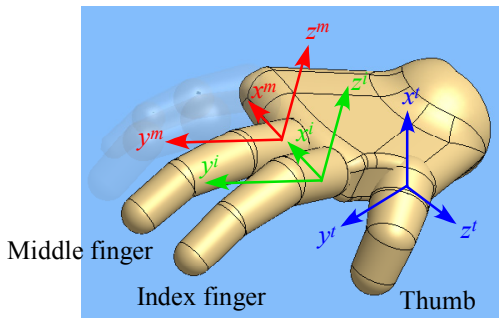


図9 ハンドモデル各指の座標系[20]
Fig. 9 Frame of references for each finger [20]

を計測し、計測した力と同じ大きさの力を仮想スレーブデバイスと仮想対象物の間に加えることにより、ハプティックデバイス操作者の指先に加えられる力と仮想スレーブデバイスが仮想対象物に加える力が一致する。この結果、操作者には力覚が提示される。

しかし、上述のように、本ハプティックデバイスでは支持点Eで支持されたリンクEFを介して人に力覚を提示しているため、人の指先位置Fでは、点Eまわりのトルクを0にするためのトルクが加わることとなる。このため、厳密な意味では2自由度の力を独立に提示できているとはいえない。不要な指先トルクを極小化するような構造についての詳細な検討は今後の課題である。

4. VRシステムを用いた心理物理実験

本デバイスを用いた入出力システムの1例として、VRシステムを構築した。VRシステムの入力側は本デバイスにより計測する人の手指動作とし、出力側はPCの画面上に表示する仮想空間内のハンドモデルとした。

本デバイスのそれぞれのポテンショメータからの出力電圧は、A/D・D/A変換カード(CONTEC, AD12-8(PM))によってPCに取り込まれ、角度に変換される。これより本デバイスの指先の位置と角度が計算され、ハンドモデルにおける各関節の角度は逆運動学を用いて算出される。また、本デバイスにおける接触・非接触の切り替え制御は、PCからの出力信号により行われる。

図9に、仮想空間内のハンドモデル各指の根元における座標系の定義を示す。ハンドモデルの各指先がZ軸の負方向にZ=-50mmを越えて屈曲運動する際に非接触から接触へ切り替わるように制御系を設定した。すなわち、各座標系のZ=-50mmの位置に仮想的な壁が存在する状態を表現した。仮想的な壁は画面上には表示されないが、接触時のハンドモデル各指先の変位を増減させることによって、あたかもばね定数の異なる対象物を把持しているかのように表示を変更することが可能であ

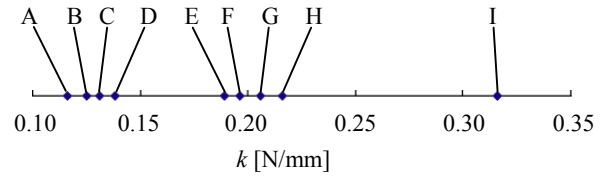


図10 ばね定数の分布
Fig. 10 Distribution of spring coefficient

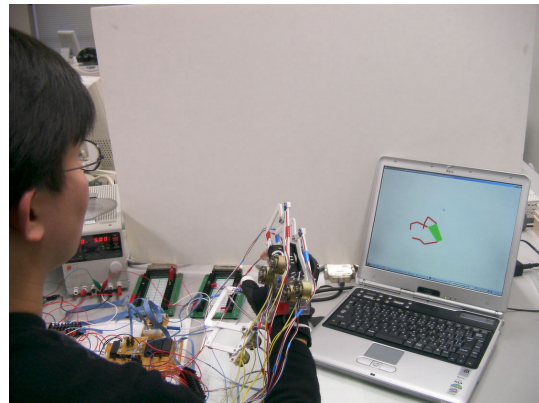


図11 心理物理実験外観図
Fig. 11 View of sensory evaluation

る。

構築したVRシステムを用いて被験者8人に対して心理物理実験を行い、本デバイスの有効性を評価した。心理物理実験の概要を以下に示す。

- (1) 仮想空間内の把持対象を、ばね定数の異なる9種類の仮想的な壁A~Iとする。A~Iのばね定数はそれぞれ0.116, 0.125, 0.131, 0.138, 0.189, 0.196, 0.206, 0.216, 0.316N/mm(図10)とした。
- (2) 9種類の把持対象の中から異なる2種類を任意に選び、被験者にどちらの剛性が高いかを尋ねた。把持対象の組は14組とした。
- (3) 各被験者につき(2)を任意の順序で2度ずつ行った。

各ばね定数の設定と把持対象14組の具体的な構成は以下の通りである。まず、比較的ばね定数の差が小さいA~Dを設定した。ここで、A~D同士の組み合わせ(A-B, A-C, A-D, B-C, B-D, C-Dの6組)による二者択一の心理物理実験を行うことにより、ばね定数の差が小さいものの比較を行った。次に、ばね定数の差が大きいものの比較を行うためにE~Iを設定した。ここで、A~DのそれぞれをEと比較し(A-E, B-E, C-E, D-Eの4組)、さらにF~IをAと比較することで(A-F, A-G, A-H, A-Iの4組)、十分高い正答率が得られるばね定数の差を求めた。

表 6 心理物理実験結果
Table 6 Results for sensory evaluations

(a) Comparison between subjects	
Subjects	Percentage of correct answers [%]
1	89
2	100
3	93
4	71
5	100
6	86
7	89
8	89
Average	90

(b) Comparison between the difference of stiffness

Difference of stiffness [N/mm]	Average of percentage of correct answers [%]
0.006	81
0.007	63
0.009	100
0.013	56
0.015	88
0.022	100
0.051	94
0.058	81
0.064	94
0.073	100
0.080	100
0.090	100
0.100	100
0.200	100

被験者は 20 代の学生 8 人とし、実験は各被験者に対して前述の 14 組を 2 度ずつ合計 224 回行った。図 11 に心理物理実験の様子を示す。実際には、被験者にハプティックデバイスを見せずに実験を行った。また、ハプティックデバイスを装着する際、被験者ごとに指の形状に差があるため、指が細い人は薄い紙等を詰めることや、指先と指先リンクをテープで貼ることで装着感を調整した。指が太くて装着できない被験者はいなかったものの、多少圧迫感を感じた被験者もいたため、今後指先リンクに直径の調節機構を付加することが必要である。

表 6(a)(b) に心理物理実験結果を示す。表 6(a) には各被験者の結果の比較を示し、表 6(b) には 2 組の把持対象におけるばね定数の差と正答率の関係を示す。表より、被験者 4 の正答率はやや低いものの、他の被験者の正答率は 86% 以上であり、全体の平均は 90% と十分高い値であることが確認できた。この結果は、マスタ側の変位とハンドモデルの変位が異なっているにもかかわらず、両者の力が等しく、ハンドモデルの変位が視覚によりフィードバックされる

ならば、ヒトは剛性の違いをほぼ認識できることを示している。すなわち、剛性の違いの認識には、体性感覚による変位情報よりも視覚による変位情報の方が大きな影響をもつことを表しており、筆者らによる 1 自由度装置 (図 2) を用いた計測の結果 [14] と一致している。また、表 6(b) より、ばね定数の差が 0.064N/mm 以上の場合には、ほぼ 100% の正答率で把持対象の剛性の違いを認識できることが確認できた。

さらに、この結果の有効性を確認するために、比較実験を行った。本手法および装置では、同じ実験条件下で、力覚を提示せず視覚情報のみを提示するという厳密な意味でのコントロール実験は行えない。なぜなら、仮想空間内モデルにはハプティックデバイスと同じ力を加えるという方式だからである。このため、比較実験としては、以下の 2 種類の実験 A, B を行うこととした。

比較実験 A では、前述の力覚提示実験と同様に被験者に本デバイスを装着させ、すべてのクラッチを常に解除し、力覚を提示せずに、どちらの把持対象の剛性が高いかを回答させた。把持対象の条件は前述の実験と同じとした。この実験は、仮想空間内のハンドモデルが仮想物体から受ける力と比例した量の変位情報をヒト指の体性感覚に提示することに相当する。すなわち、体性感覚に対しては力情報を変位情報に変換して提示し、視覚に対しては変位情報を提示するという手法の可能性を試験していることとなる。この場合、被験者に任意角度まで各指を運動させることを許すと、力覚を提示したときよりも指を大きく変位させ、変位量の大きな差から仮想物体の剛性を判別できてしまい、比較対象として好ましくない。このため、ハンドモデルの指先変位が前述の力覚提示実験時と同じ範囲内の時にのみハンドモデルが表示されるようにした。これより、力覚提示時と同等な量だけ指を変位させた際に、力情報を変位情報で代替して体性感覚に提示することの可能性を試験することができる。

比較実験 B では、被験者に本デバイスを装着させず、仮想空間内ハンドモデルの指先変位を観察させることのみによって、一対の対象物のうち、どちらの把持対象の剛性が高いかを回答させた。把持対象の条件は前述の実験と同じとした。ハンドモデルの変位量と速度は、力覚提示実験時と同等な量とした。

これらの実験の結果、比較実験 A および B の正答率の平均は、それぞれ 72% および 66% であった。いずれも力覚を提示した実験の正答率 90% を下回っている。また、これらの実験を行った後に、各被験者に対して心理物理実験に関するアンケート調査を行った。この

結果、全員の被験者が、力情報を変位情報に変換して提示した比較実験 A に違和感を感じたと回答した。また、8 名中 7 名の被験者は、力覚を提示した場合の方が比較実験 A よりも剛性の違いを直感的に識別し易いとともに仮想空間内での作業を行い易いと感じたと回答した。これより、これら 3 つの実験の中では、力情報をそのまま提示する本手法が最も剛性を認識しやすく、違和感や操作の行いにくさも少ないといえる。ただし、違和感や作業の行いにくさは残されているものの、比較実験 A においても 72% という割合で剛性を提示できたことは、力情報を変位情報に代替してヒト指に提示するという比較実験 A の方式による簡便な力覚提示もあり得ることを示唆しているといえる。なお、比較実験 B は自動的にハンドモデルに変位を与えたのであるから、比較実験 A 以上に違和感を感じる結果となっていた。以上の結果より、力情報を正確かつ違和感なく提示するとともに変位情報を視覚により提示する本デバイスおよび本手法の有効性を確認することができた。

5. おわりに

本研究では、パッシブフォースフィードバックに基づく力覚提示法を用いた多指ハプティックデバイスを設計・製作した。また、製作した多指ハプティックデバイスを用いた計測の結果、本デバイスの姿勢計測方法、力覚提示方法の有効性を確認した。さらに、構築した VR システムを用いた心理物理実験を行った結果、本ハプティックデバイスにより、対象物の剛性の違いを認識できることを確認した。

ハプティックデバイスの高精度化を図る、4 指または 5 指のハンドに拡張する、といったシステムのリファインは今後の課題である。また、今後、出力側に小型多指多関節ロボットを用いて微細な作業や道具ハンドリングの可能性を検討する、出力側を VR として手指の動作特性の解析を行う、といった応用展開を図る予定である。

謝辞

本研究の一部は、慶應義塾先端科学技術研究センター指定研究プロジェクトおよび(財)神奈川高度技術支援財団育成試験により行われた。

参考文献

- [1] 横小路泰義,小川亮,吉川恒夫: ハンド・アーム統合型マスタ・スレーブシステムの操作性評価, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol.17, 第 3 分冊, pp. 837-838, (1999)

- [2] 岩田洋夫,中川博憲: 着用型力覚帰還ジョイスティック, Human Interface N&R, Vol.13, pp. 135-138, (1998)
- [3] E. Chen: Six Degree-of-Freedom Haptic System For Desktop Virtual Prototyping Application, Proc. of the First International Workshop on Virtual Reality and Prototyping, pp. 97-106, (1999)
- [4] <http://www.sensable.com/>
- [5] 須田正徳,川崎晴久,小松恒雄: フォースフィードバックグローブと物体操作の研究, 日本機械学会東海支部第 47 期総会講演会講演論文集, No.983-1, pp. 303-304, (1998)
- [6] 永田和之,齋藤史倫: 人間の手作業分析のための把握データ入力装置の開発, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会'00 講演論文集, 1B25, pp. 61-62, (2000)
- [7] 大橋俊之,太田昌宏,橋本秀紀: グローブ型ハプティックデバイスを用いた VR インタフェース, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演論文集, 2P1-34-035, (1999)
- [8] D. Gomez, G. Burdea, and N. Langrana: Integration of the Rutgers Master II in a Virtual Reality Simulation, IEEE Virtual Reality Annual Int. Symp. (VRAIS), pp. 198-202, (1995)
- [9] <http://www.immersion.com/>
- [10] 佐藤誠,平田幸広,河原田弘: 空間インタフェース装置 SPIDAR の提案, 信学論(D-II), J74-D-II, 7, pp. 887-894, (1991)
- [11] <http://www.sarcos.com/>
- [12] Grigore C. Burdea, Force and touch feedback for Virtual Reality, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 75-132, (1996)
- [13] Bruno M. Jau: Dexterous Telemanipulation with Four Fingered Hand System, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 338-343, (1995)
- [14] I. Yamano, K. Takemura, K. Endo and T. Maeno, : Method for Controlling Master-Slave Robots using Switching and Elastic Elements, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1717-1722 (2002)
- [15] 坂口正道, 古荘純次: ER ブレーキを用いたパッシブ型力覚提示システムに関する基礎研究, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.5, No.4, pp.1121-1128, (2000)
- [16] 石田大二郎, 中山雄一郎, 嶋誠司, 川村貞夫: 積層型可変拘束要素を用いたウエラブルな力覚提示装置, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集, 1P1-F05, (2002)
- [17] 斉藤理, 小森谷清, 村田良司: パッシブな力覚提示手法—パウダークラッチを用いた力覚提示装置—, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集, 2A II 1-6, (1998)
- [18] M. A. Srinivasan, G. L. Beauregard and D. L. Brock: The impact of visual information in the haptic perception of stiffness in virtual environments, Proc. ASME Dynamic System and Control Div., DSC, vol.58, pp. 555-559, (1996)
- [19] 佐々木博, 藤田欣也: 力覚提示装置を用いた硬さ提示における視覚情報の寄与と改変効果に関する実験的検討, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.5, No.1, pp.795-802, (2000)
- [20] <http://www.cbliss.com>

(2002 年 4 月 30 日受付)

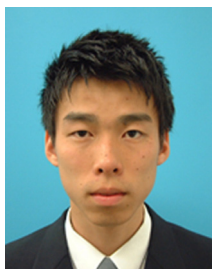
[著者紹介]

小山 辰也



2002年慶應義塾大学工学部機械工学科卒業。現在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在学中。マスタ・スレーブシステム, VRの研究に従事。

山野 郁男



2002年慶應義塾大学工学部機械工学科卒業。現在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在学中。マスタ・スレーブシステム, VRの研究に従事。

竹村 研治郎



2000年慶應義塾大学大学院理工学研究科生体医工学専攻修士課程修了。2002年同大学院総合デザイン工学専攻博士課程修了。2001年日本学術振興会特別研究員。2002年より慶應義塾大学機械工学科助手。USM, ロボット, VRの研究に従事。博士(工学)。

前野 隆司



(正会員)

1986年東京工業大学大学院機械工学専攻修士課程修了。同年キヤノン(株)入社。1995年慶應義塾大学機械工学科専任講師。現在助教授。アクチュエータ, センサ, ロボット, VRの研究に従事。博士(工学)。