

対向型多指ハプティックインターフェイス

川崎 晴久* 堀

匠* 毛利 哲也*

Multi-Fingered Haptic Interface Opposed to Human Hand

Haruhisa Kawasaki*, Takumi Hori* and Tetsuya Mouri*

This paper presents a multi-fingered haptic interface opposed to human hand, which consists of 6 DOF interface arm and three-haptic fingers with 3 DOF. The haptic interface is demanded to be safe, to work in wide operation space, and to present not only force at contact points but also weight feeling of virtual objects, to have no oppressive feeling when it is attached to humans, and to have no weight feeling of itself. The haptic interface was designed to be completely safe and to be similar to the human upper limb in shape and motion ability. The interface is placed opposed to the human hand, which brings safety and no oppressive feeling, but causes difficulty in controlling the haptic interface because it should follow the hand poses of the operator. Two control methods of the haptic fingers are tested and two approaches to oppose the interface hand to the human hand are studied. A computer graphics simulation and experiments are also presented.

Key Words: Haptic Interface, Multi-fingers, Virtual Reality, Manipulability, Robot Hand

1. はじめに

人間の複数の指先に力感覚を提示するハプティックインターフェイスは、ロボットの遠隔操作 [1]~[4]、バーチャルリアリティ (VR) 環境での医学訓練システム [5][6]、精密作業のための力感覚の提示 [7][8] 等に応用が期待されている。これまでのハプティックインターフェイスは 1 点での力覚提示 [9][10] がほとんどであるが、1 点ではその応用に制限が多い。複数の指先に提示するインターフェイスとして、手や腕に機構部を取り付ける装着型 [11]~[14] が開発されているが、これらは手に装置を確実に取り付けるようにするため、操作者に圧迫感や違和感を与え、また微妙な力の提示が困難である。この問題を解決する方法として、遭遇型の多指ハプティックインターフェイス [15][16] が提案されている。吉川ら [15] は、指先 1 点の力覚装置を 2 台設置する遭遇型ハプティックシステムを提案しているが、2 台以上の設置は難しく、操作空間は狭い。横小路ら [16] はこれを拡張した多指の遭遇型ハプティックデバイスを提案している。しかし、遭遇型のシステムでは、人間の指先が遭遇させる表面に固定されないためその表面の摩擦係数に依存した重力感の提示に限定され、挟み把持したときに様々な摩擦特性を持つ仮想物体の重量感の提示が難しい。多指ハプティックインターフェイスでは、操作空間の広さ、仮想物体の重量感の提示、操作者に対する装着時の圧迫感の軽減、操作者に対する安全性の確保な

どが要求される。

本論文では、これらの問題の解決を目指した多指ハプティックインターフェイスの設計コンセプトと開発した 3 指ハプティックインターフェイスの構成、制御法、および諸特性を示す。本インターフェイスは、アームおよび複数の指と手のひら (以下、それぞれハプティックフィンガー、ハプティックベースと呼ぶ) からなるハプティックハンドから構成し、アームを人間の手や腕に固定せず人間の手の動きに応じて空間運動させ、ハプティックフィンガーの先端にある指固定部を介して、人間の指先に力を提示できる。

2. 多指ハプティックインターフェイス

2.1 コンセプト

人間の指に対向して設置される対向型ハプティックインターフェイスの概念図を Fig. 1 に示す。ハプティックインターフェイスはアーム、複数のハプティックフィンガーとハプティックベースからなるハプティックハンド、およびそれらの制御装置から構成される。操作者の指先がハプティックインターフェイスの先端で保持され、操作者の腕の動きにアームが連動し、操作者の指の動きにハプティックフィンガーが連動する。アームは 6 自由度あり、ハプティックハンドの位置・姿勢を人間の手の位置・姿勢に追従させることができる。ハプティックフィンガーは 3 自由度あり、人間の指先に追従できる。人間の指の姿勢とハプティックフィンガーの姿勢を一致させるため、人間の指は 3 自由度の受動球関節を介してハプティックフィンガーに固定される。操作者の指先力はハプティックフィンガーの先端にある

原稿受付 2004 年 6 月 16 日

*岐阜大学工学部

*Faculty of Engineering, Gifu University

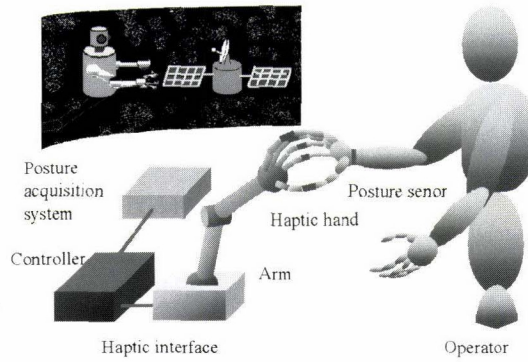


Fig. 1 Conceptual figure of multi-fingered haptic interface

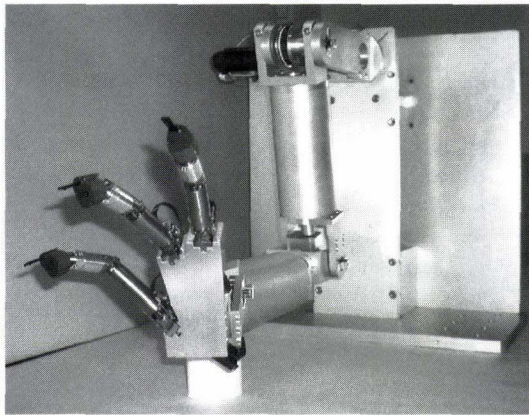


Fig. 2 Developed three-fingered haptic interface

6軸力覚センサ (NANO sensor, BL AUTOTEC. LTD. 製) により計測される。ただし、制御には3軸方向の力情報のみを利用する。このため、人間の指が仮想物体と干渉があるときに、各指ごとに力の提示が可能である。このような指先のみ拘束する構成のため、操作者の手に対する圧迫感はなく、かつ仮想物体の重量感も提示できる。Fig. 2に本設計コンセプトのもとに開発した3指ハプティックインターフェイスの概観を示す。

2.2 アーム

ハプティックハンドが空間内の任意の位置・姿勢をとることができるように、アームは6自由度機構とした。Fig. 3にアームの組立図を示す。基準座標系 (添字 ref で表す) およびハプティックベース座標系 (添字 base で表す) は図のように設定した。上腕と下腕の長さは0.3[m]でほぼ人間の腕の長さに等しい。肩部は屈曲・伸展と内転・外転の2自由度、肘部は屈曲・伸展の1自由度、手首部は屈曲・伸展、内転・外転および前腕の回内・回外の計3自由度あり、それらの可動範囲は、第1関節 $-180 \sim 180$ [deg]、第2関節 $0 \sim 180$ [deg]、第3関節 $-90 \sim 50$ [deg]、第4関節 $-180 \sim 180$ [deg]、第5関節 $-25 \sim 40$ [deg]、第6関節 $-90 \sim 90$ [deg] である。各関節は減速要素を介してサーボモータで駆動される。設計上、ハプティックベースの最大速度を約 1.0 [m/s]、最大操作力は約 15 [N] とした。これらの仕様は、人間が机に座り組立作業等を行うときにほぼ十分な操作空間、速度、および力を実現している。

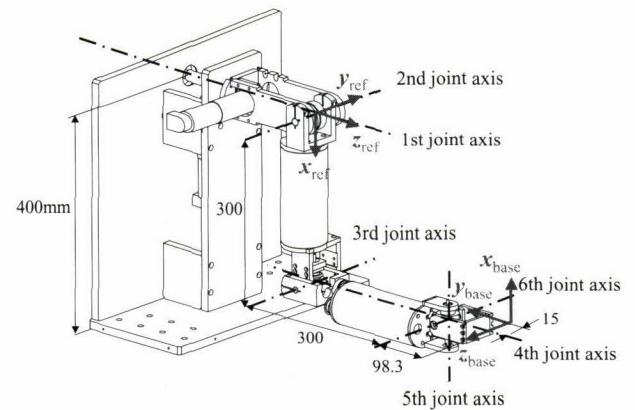


Fig. 3 Arm design

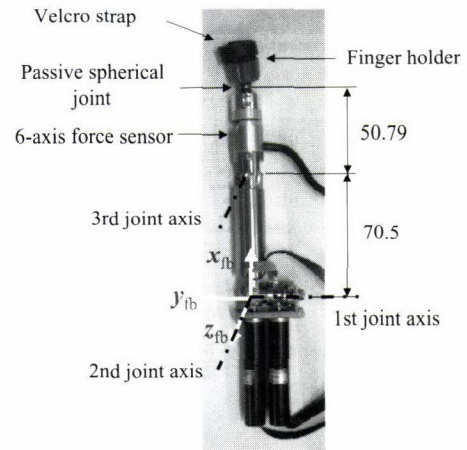


Fig. 4 Haptic finger

2.3 ハプティックハンド

ハプティックハンドは、3本のハプティックフィンガーとハプティックベースから構成される。3本としたのは、安定把持の必要最小の数であり、三次元仮想空間で多くの物体操作が可能なためである。試作したハプティックフィンガーをFig. 4に示す。指ベース座標系 (添字 fb で表す) は図のように設定した。ハプティックフィンガーは、第1リンクの根元に内転・外転の第1関節と屈曲・伸展の第2関節があり、両関節軸は直交している。中間部に屈曲・伸展の第3関節があり、合計3自由度である。我々のグループで開発した Gifu Hand III [17] の指の根元側3自由度と同じ構成とした。このため、人間の指に幾何学的に類似したハプティックフィンガーである。また、各関節の周波数応答特性は Gifu Hand III と同様に 7 [Hz] 以上あるので、人間の指の動きに十分追従できる。可動範囲は、第1関節 $-30 \sim 30$ [deg]、第2関節 $-20 \sim 90$ [deg]、第3関節 $-10 \sim 90$ [deg] である。

第2リンクには力覚センサと永久磁石の吸引力で着脱する受動球関節があり、その先に指ホルダーを配置している。人間の指は、指ホルダーに付いているベルクロストラップを巻き適度に締めることで、指の太さの変化に対応して指ホルダーに固定できるようになっている。受動球関節は、指ホルダーに固定した人間の指の姿勢とハプティックフィンガーの姿勢を調整し、か

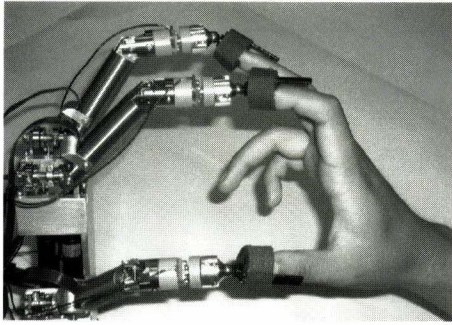


Fig. 5 Haptic hand connected with human hand

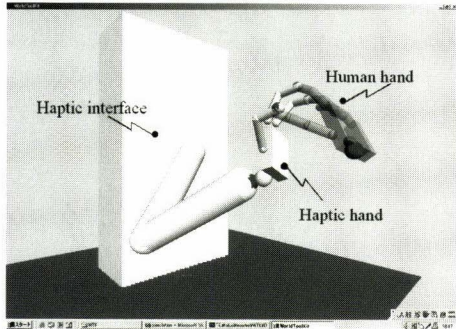


Fig. 6 Example of output of CG simulation system

つ約 5 [N] 以上の張力が作用すると外れる安全性の役割を持つ。ハプティックフィンガーの最大指先速度は 0.35 [m/s], 最大指先力は 3.7 [N] である。これらの特性は、0.3 [m/s] 程の人間の手の動きに追従が可能な速さである。Fig. 5 に、人間の拇指、示指、中指の 3 本の指と接続しているハプティックハンドを示す。各指はハプティックベースを基準に空間運動し、人間の指先との姿勢の調整が受動球関節で実現されている。

2.4 CG シミュレーションシステム

ハプティックインターフェイスの動作確認のため、人間の手の位置姿勢計測システム (OPTORAK, Northern Digital Co.) および指関節角度計測システム (CyberGlove, Immersion Co.) と連動する CG シミュレーションシステムを構築した。人間の手の姿勢計測のため、手の甲に 3 点の LED からなる受光部を取り付ける。CG シミュレーションシステムでは、手の動きに応じてハプティックインターフェイスが動作する。Fig. 6 は、CG シミュレーションシステムの出力の例である。

3. ハプティックインターフェイスの制御

ハプティックインターフェイスは、Fig. 7 に示すようにフィンガー制御部とアーム制御部があり、各制御部は協調制御のため共通メモリを介して情報を伝える。フィンガー制御部は力覚センサの信号により位置・力制御し、アーム制御部は位置制御を基本とする。各制御部のサンプリングサイクルは 2 [ms] である。

ハプティックインターフェイスは、アームとハプティックフィンガーが協調して運動する必要がある。そこで、アームは人間の手の位置・姿勢に対応してハプティックベースを位置姿勢制御することを基本とし、ハプティックフィンガーは位置制御ベー

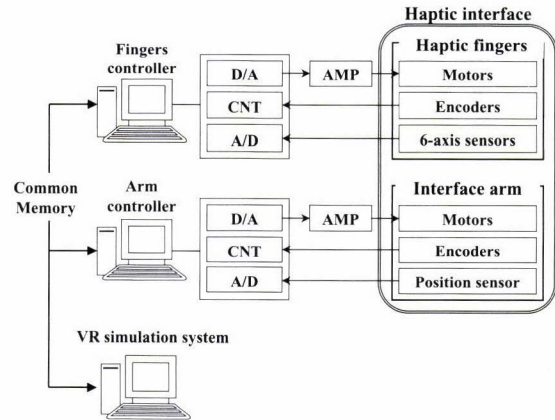


Fig. 7 Control system of the haptic interface

スの力制御またはトルク制御ベースの力制御により操作者の指先に力感覚を提示することとした。

3.1 ハプティックフィンガー制御

仮想空間での壁と手の干渉を表現するために、位置制御ベースの力制御とトルク制御ベースの力制御の二つの制御法を実験的に比較評価することにした。このとき、手先に提示する目標力は $F_d = K_p \delta + K_v \dot{\delta}$ で与える。ここで、 K_p 、 K_v は対象物の剛性と粘性係数、 δ は仮想物体と指の干渉変位である。

3.1.1 位置制御ベースの力制御

指先での力を F とし、力誤差を $F_e = F_d - F$ とする。位置制御ベースの力制御では、現在の指先位置 r と目標指先位置 r_d の関係を $r_d = \Delta r + r$ により与え、力誤差に対応する指先位置の微小変位を $\Delta r = K_d^{-1} F_e$ で与える。ここで、 K_d は制御ゲインである。この目標指先位置をもとに逆運動学より目標関節角度 q_d を求め、各関節毎の PD 制御を行う。本制御法により、硬い壁があるときの実験を行った。壁はバネ・ダンパモデルとし、剛性係数 2.5 [N/mm], 減衰係数 5.0×10^{-5} [Ns/mm] である。そのときの、仮想壁からの相対指先位置と指先力を Fig. 8 に示す。初めの区間は壁への移動、二つ目の区間は壁にほぼ一定の力で押し付ける状態、三つ目の区間は壁への押し付け力を増加したときである。目標力と実際の力の最大誤差は、自由空間において 0.87 [N] であった。

3.1.2 トルク制御ベースの力制御

トルク制御ベースの力制御では、カーテシアン空間での力誤差と力誤差積分の PI 制御則 $u = K_{fP} F_e + K_{fI} \int F_e dt$ に釣り合う関節空間での制御則として $\tau = J^T u$ とした。ここで、 J はハプティックフィンガーの運動学的ヤコビ行列である。位置制御ベースの力制御の実験と同様に、硬い壁があるときの実験結果を Fig. 9 に示す。Fig. 8 と同様に、壁への移動、壁にほぼ一定の力で押し付ける、壁への押し付け力を増加の三つの区間がある。目標力と実際の力の最大誤差は、自由空間において 0.34 [N] であった。前述の位置制御ベースの力制御と比較すると、壁に接触していない自由空間では、ほぼ同じ距離を大幅に短い時間で移動しているにもかかわらず、力誤差がより少ない結果となっている。また、壁にほぼ一定の力で押し付ける区間と壁への押し付け力を増加する区間では、Fig. 8 と比較して全

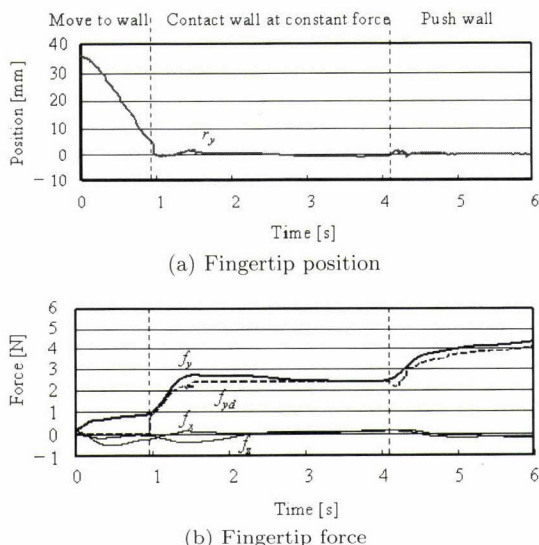


Fig. 8 Haptic finger responses at the impedance control

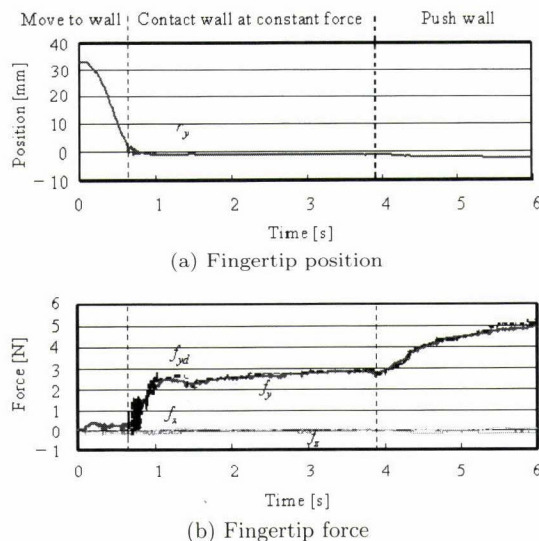


Fig. 9 Haptic finger responses at the force control

一般的に目標力が少し高めであるが力誤差はより少なく、実験的評価ではトルク制御ベースの力制御がより良い特性を示している。このため、以下ではトルク制御ベースの力制御を採用することとした。

3.2 アーム制御

本ハプティックインターフェイスは冗長機構であるため、3本の人間の指先がハプティックフィンガーと連結していても、ハプティックベースの位置・姿勢は適当な範囲において任意にとりうる。そこで、ハプティックベースを(1)人間の指先で作る平面に対して、人間の掌とハプティックベースを対称に配置する方法(以下、対称配置法と呼ぶ)、(2)ハプティックハンドの可操作性を最大とするように配置する方法(以下、可操作性最適化法と呼ぶ)の二つの方法を比較検討した。

人間の指先の動きに対して、3本のハプティックフィンガーが離れることのないようにアームを動かすことが必要である。こ

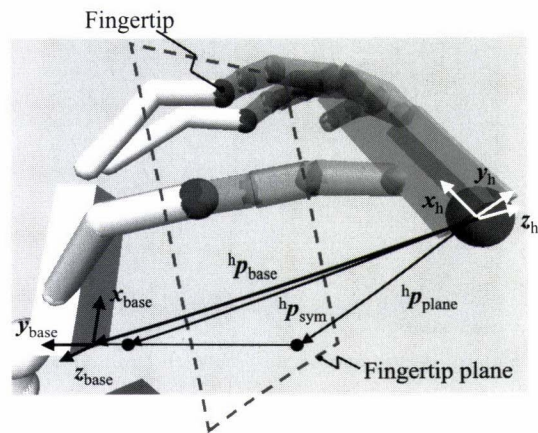


Fig. 10 Relation between human hand and haptic base

のため、アームの動きで対応可能な指先の空間が広いほど良いといえる。

3.2.1 対称配置法

操作者の手首の位置姿勢が計測できるとし、計測した操作者の手首位置姿勢と、アームとハプティックフィンガーとの関節角度から計算した指先位置を利用してハプティックベースの位置を計算する。本ハプティックインターフェイスはヒトの腕と手に類似した機構構成をしているため、3本の指先が作る平面(以下、指先平面と呼ぶ)に対し、操作者の手首位置姿勢と対称になるハプティックベースの位置姿勢に制御することで、操作者に追従した動きが可能であると考えられる。しかし、指先平面に対し全くの対称位置とした場合、ハプティックフィンガーおよびハプティックベースとヒトの指および手のひらのサイズ・機構の違いがあるため、ヒトとハプティックフィンガーの全長のサイズ比 γ に合わせて指先平面との間隔を変更する必要がある。そこで、Fig. 10 に示すように、ヒト手首座標の y_h 軸(手のひらの法線方向)と指先平面との交点の位置ベクトルを ${}^h p_{plane}$ 、手首位置の対称点の位置ベクトルを ${}^h p_{sym}$ とすると、ハプティックベース位置ベクトル ${}^h p_{base}$ は

$${}^h p_{base} = \gamma({}^h p_{sym} - {}^h p_{plane}) + {}^h p_{plane} \quad (1)$$

で与えた。ハプティックベースの姿勢は指先平面に対し、ヒト手首姿勢と対称とする。

3.2.2 可操作性最適化法

操作者の手首の位置姿勢が計測できないとき、操作者とハプティックインターフェイスが指先で直結されていることを利用し、その指先位置からハプティックハンドの可操作性を最大とするようにハプティックベースの位置・姿勢を設定する手法を提案する。

文献[19]のロボットハンドの可操作性の定義と同様に、ハプティックハンドの可操作性を表す評価関数を次式で与える。

$$PI = \sum_{i=1}^3 (\alpha_i W_i + \beta_i P_i) \quad (2)$$

ここで、 α_i と β_i は重み係数、 W_i はハプティックフィンガー i の可操作性指標を表し、次式で与える。

$$\begin{aligned}
 W_i &= \det |\mathbf{J}_i| \\
 &= l_{i1} l_{i2} \left| \sin q_{i3} \{ l_{i1} \cos q_{i2} + l_{i2} \cos(q_{i2} + q_{i3}) \} \right|
 \end{aligned} \tag{3}$$

ただし、 l_{ij} は第 i 指の第 j リンク長さ、 q_{ij} は第 i 指の第 j 関節を表し、 \mathbf{J}_i は第 i 指ベース座標系で表した第 i 指の運動学的ヤコビ行列であり、

$${}^{\text{fbi}} \dot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{J}_i(\mathbf{q}_i) \dot{\mathbf{q}}_i \tag{4}$$

の関係を満たす。ここで、 ${}^{\text{fbi}} \mathbf{r}_i$ は第 i 指ベース座標系から見た第 i 指先位置、 \mathbf{q}_i は第 i 指の関節角度である。 P_i は次式で定義されるペナルティ関数である。

$$P_i = - \sum_j [k_j \{ \exp(-l(q_{ij} - a_{ij})) + \exp(l(q_{ij} - b_{ij})) \}] \tag{5}$$

ただし、 k_j , l は適当な定数、 a_{ij} と b_{ij} は第 i 指の第 j 関節の可動限界を表す。この関数は、ハプティックフィンガーの各関節が可動範囲内となるようにするために加えている。式 (3) から分かるように、ハプティックフィンガーの第 1 関節は可操作性に関係なく、可動範囲内ならどのような値でもよい。第 2 関節を θ_2 , 第 3 関節を θ_3 とし、これらの角度が可動範囲内のときのハプティックフィンガーの可操作性指標 W を Fig. 11 に示す。 W が最大となるのは、 $\theta_2 = -20$ [deg], $\theta_3 = 68.3$ [deg] である。

上記の評価関数 PI は、ハプティックフィンガーの関節角度 $\mathbf{q}_{\text{fingers}} = [\mathbf{q}_1^T \dots \mathbf{q}_k^T]^T$ の関数として $PI = PI(\mathbf{q}_{\text{fingers}})$ と表される。ここで、第 i 指の関節角度 \mathbf{q}_i と基準座標から見たハプティックベースの位置 ${}^{\text{ref}} \mathbf{r}_{\text{base}}$ と第 i 指先位置 ${}^{\text{ref}} \mathbf{r}_i$ の関係は

$${}^{\text{fbi}} \mathbf{r}_i(\mathbf{q}_i) = {}^{\text{ref}} \mathbf{T}_{\text{fbi}} ({}^{\text{ref}} \mathbf{r}_{\text{base}})^{-1} {}^{\text{ref}} \mathbf{r}_i \tag{6}$$

と表される。 ${}^{\text{ref}} \mathbf{T}_{\text{fbi}} ({}^{\text{ref}} \mathbf{r}_{\text{base}})$ は基準座標から第 i 指ベース座標までの同次変換行列である。式 (6) より逆運動学問題を解き、 $\mathbf{q}_i ({}^{\text{ref}} \mathbf{r}_{\text{base}}, {}^{\text{ref}} \mathbf{r}_i)$ を求める。基準座標から見た指先位置を ${}^{\text{ref}} \mathbf{r}_{\text{fingers}} = [\mathbf{r}_1^T \dots \mathbf{r}_k^T]^T$ とすると、 PI を ${}^{\text{ref}} \mathbf{r}_{\text{base}}$ と ${}^{\text{ref}} \mathbf{r}_{\text{fingers}}$ の関数として、 $PI = PI({}^{\text{ref}} \mathbf{r}_{\text{base}}, {}^{\text{ref}} \mathbf{r}_{\text{fingers}})$ と表すことができる。したがって、評価関数 PI を最大とするハプティックフィンガーの関節角度 $\mathbf{q}_{\text{fingers}}$ を求めることは、 PI を最大とするハプティックベースの位置・姿勢を求めることと等価となる。なお、数値計算では評価関数 PI を最大とするハプティックフィンガーの関節角度 $\mathbf{q}_{\text{fingers}}$ は、最急降下法を用いてある収束条件を満たすまで繰り返し計算により求めることとした。

3.2.3 比較評価

CG シミュレーションシステムを利用して、二つの方法を比較評価した。Fig. 12 は CG シミュレーションの中で人間の手に追従するハプティックインターフェイスの動作の様子を示す。ただし、アームは可操作性最適化法で設定し、人間の手は直径 20 [cm] の円を描いている。

Fig. 13 に対称配置法と可操作性最適化法による評価関数 PI 値を示す。ただし、重み係数は $\alpha_i = 1.0$, $\beta_i = 3.4 \times 10^5$ とし

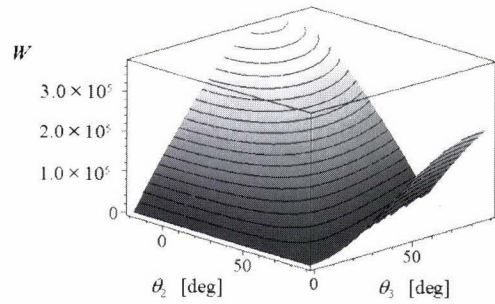


Fig. 11 Manipulability of haptic finger

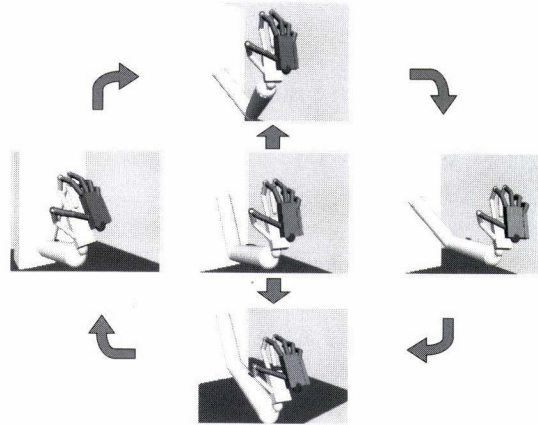


Fig. 12 Movement of haptic interface

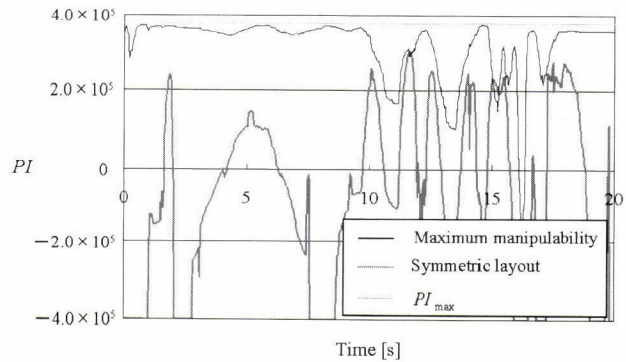


Fig. 13 Comparison of manipulability

た。また、可操作性最適化法における式 (5) のパラメータは、 $k_1 = 1.2$, $k_2 = 1.0$, $k_3 = 1.1$, $l = 4.5$ とした。この図より、対称配置法より可操作性最適化法の方がハプティックハンドの可操作性がほぼ高いことが確認できる。なお、対称配置法より可操作性最適化法の方が PI 値が低くなる点があるが、これはサンプリング周期内で可能な繰り返し計算回数に制限があるために生じる。対称配置法では PI 値がグラフ上で最小となる点があるが、それは人間とハプティックフィンガーの指先が一部離れたことを表す。このことは、人間の指先の空間に対して、対称配置法では対応できる空間が狭いことを意味する。以上の結果から、アームは可操作性最適化法により目標軌道を生成することとした。また、この方法では人間の手の位置・姿勢計測システムを必要としない利点がある。

4. 仮想空間での力覚提示実験

三次元仮想空間での力覚提示の実験として、初めにハプティックハンドのみによる物体形状認識における心理評価実験を行った。次に、アームとハンドの協調制御による自由空間での力覚提示および球状物体の把持実験を行った。

4.1 物体形状認識における心理評価実験

アームは使用せずハプティックハンドのみを使用し、物体形状認識における操作者の心理評価実験を行った。実験は、被験者に対し球および直方体の2形状の仮想オブジェクトを提示する。仮想オブジェクトはそれぞれバネモデルで表し、球は半径80 [mm]、剛性係数1.5 [N/mm]、直方体は高さ60 [mm]×横50 [mm]×奥行70 [mm]、剛性係数2.0 [N/mm]である。被験者はそれぞれの形状について30秒間操作し、本システムによる仮想オブジェクトの提示について次の6段階で評価する。評価の内訳は1(全く分からない)、2(分からない)、3(あまり分からない)、4(やや分かる)、5(分かる)、6(よく分かる)の6段階である。仮想オブジェクトを提示する順序は任意に与える。このとき、被験者には仮想オブジェクトの形状および指先位置が、CGシミュレーションにより視覚情報として与えられる。被験者は22~32歳の男性10名である。実験結果をFig. 14に示す。Fig. 14において、横軸は評価の点数を、縦軸は回答した人数を示す。結果から分かるように、5、6と回答した被験者の数が80%以上であり、良好な提示が行われているといえる。以上より、提案したシステムにより操作者に対し仮想オブジェクトの提示ができ、操作者はその形状を良好に認識できることが確認できた。なお、ほとんどの被験者からは指先の先端で力の操

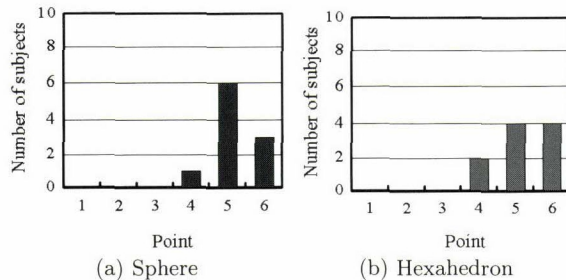


Fig. 14 Results of psychological experiment

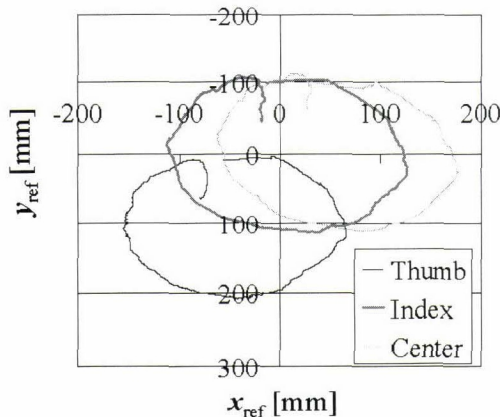


Fig. 15 Fingertip positions at free space

作をする感覚があるとのコメントがあり、指先の腹部で力进行操作する感覚となるように指ホルダーの形状の見直しにより、操作感・臨場感の向上を図ることが課題といえる。

4.2 自由空間での力覚提示

人間の指先を自由空間で動かすとき、アームとハプティックフィンガーは人間の指先に追従して動く。自由空間において、指先で直径20 [cm]の円を描く実験を行った。Fig. 15は、基準座標系 xy 平面における指先位置を示す。このとき、操作者の指先力をFig. 16に示す。指先力の平均値は0.18 [N]であった。この値が零であるのが理想的であるが、およそ良好な応答といえる。

4.3 球状物体の把持

空間内に固定された半径80 [mm]の球状物体を把持する実験を行った。物体はバネ・ダンパモデルで表し、剛性係数 4.4×10^{-1} [N/mm]、減衰係数 9.8×10^{-7} [Ns/mm]とする。Fig. 17は実験時の様子を示す。図中の左上の画面は操作者に

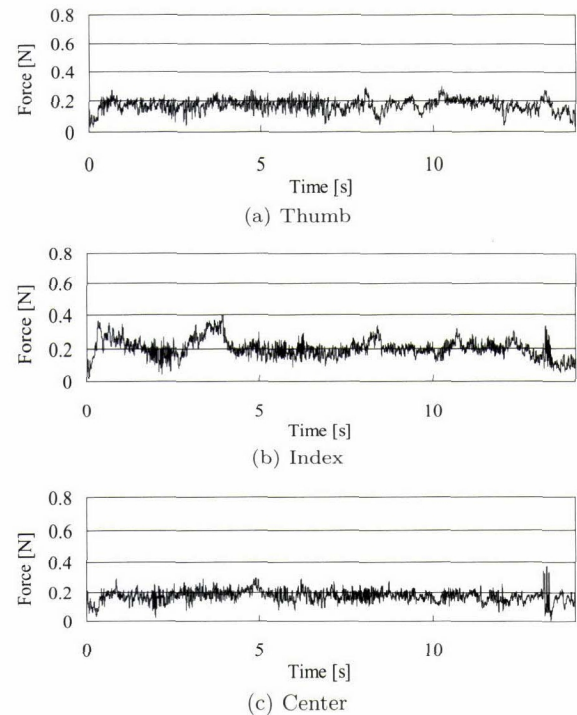


Fig. 16 Fingertip forces at free space

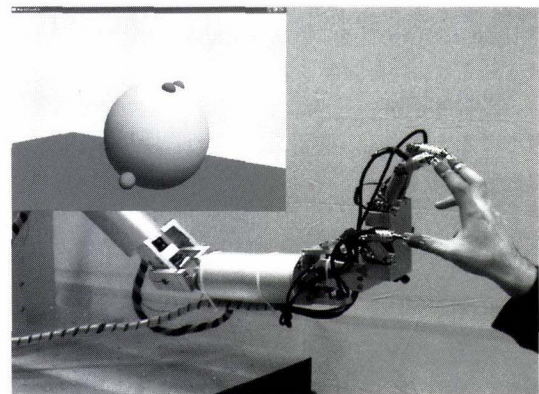


Fig. 17 Experiment system

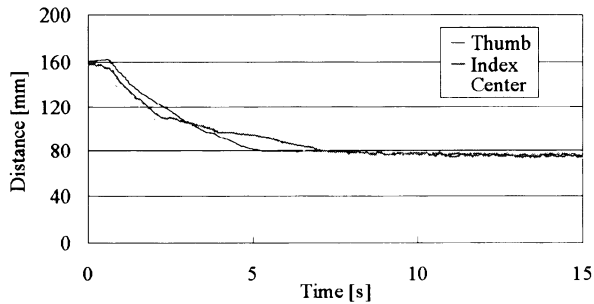


Fig. 18 Distances between fingertips and center of sphere

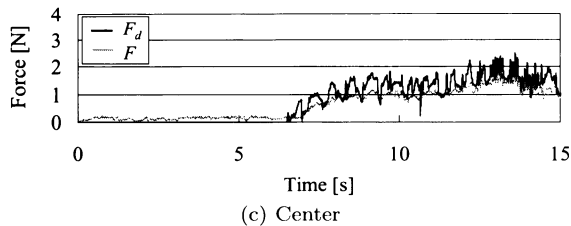
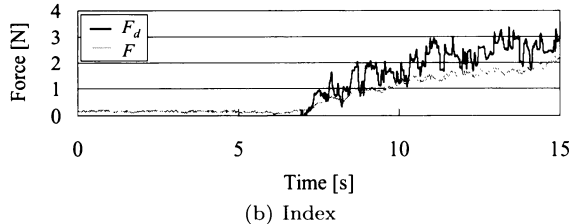
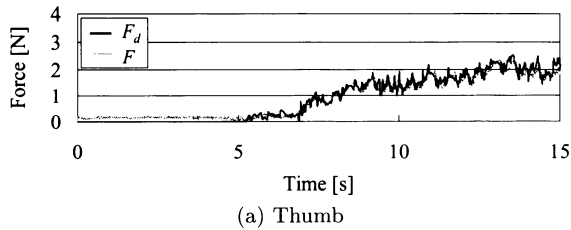


Fig. 19 Fingertip forces at grasping sphere

表示される仮想空間であり、小球で表した3点の指先位置と把持する球状物体が表示される。Fig. 18は、実験時の球状物体の中心から各指先までの距離を示す。この図より、指先が物体表面でとどまっていることが分かる。このとき、操作者の指先に提示される法線方向の目標力の大きさと実際の力の大きさをFig. 19に示す。多少の誤差は見られるが、目標に追従していることが分かる。

5. おわりに

本論文では、複数の指先に力覚を提示できる対向型多指ハプティックインターフェイスの研究開発について述べた。多指ハプティックインターフェイスでは、操作空間の広さ、仮想物体の重量感の提示、操作者に対する装着時の圧迫感の軽減、操作者に対する安全性の確保などが要求される。これらの条件を満たすよう、人間の手に対向して配置するハプティックハンドとアームから構成するコンセプトを提案した。ハプティックフィンガーの先端側に永久磁石で吸引保持する受動球関節が、人間

の手とハプティックハンドの姿勢を調整すると同時に、安全対策の役割を果たす。ハプティックフィンガーは関節空間での力制御、アームはハプティックハンドの可操作性が最大となるようにハプティックベースの位置姿勢を制御することで、3本の指先に仮想の力感覚を提示できることを確認した。今後、本ハプティックインターフェイスを利用することで、三次元仮想空間での物体操作、人間型ハンドロボットの遠隔操作等の様々な作業が可能になると期待できる。

なお、本ハプティックインターフェイスのアーム制御では、ハプティックハンドの可操作性を最大とするように動かすため、人間の少しの指先の動きに対してアームの各関節が大きく動く傾向がある。この問題の解決は、今後の課題である。

最後に、本研究の一部は(財)ソフピアジャパンの共同研究事業の一環で実施されたことを付記する。また、実験では田中祐治(現:新キャタピラー三菱(株))に協力いただいた。

参考文献

- [1] I. Ivanisevic and V.J. Lumelsky: "Configuration Space as a Means for Augmenting Human Performance in Teleoperation Tasks." IEEE Trans. on SMC, Part B, vol.30, no.3, pp.471-484, 2000.
- [2] R.V. Dubey, S.E. Everett, N. Pernaletto and K.A. Manocha: "Teleoperation Assistance Through Variable Velocity Mapping." IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.17, no.5, pp.761-766, 2001.
- [3] I. Elhajj, N. Xi, W.K. Fung, Y.H. Liu, W.J. Li, T. Kaga and T. Fukuda: "Haptic Information in Internet-Based Teleoperation." IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol.6, no.3, pp.295-304, 2001.
- [4] N. Ando, P. Korondi and H. Hashimoto: "Development of Micromanipulator and Haptic Interface for Networked Micromanipulation." IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol.6, no.4, pp.417-427, 2001.
- [5] C. Basdogan, C.H. Ho and M.A. Srinivasan: "Virtual Environments for Medical Training: Graphical and Haptic Simulation of Laparoscopic Common Bile Duct Exploration." IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol.6, no.3, pp.269-286, Sep. 2001.
- [6] A. Bardorfer, M. Muni, A. Zupan and A. Primožic: "Upper Limb Motion Analysis Using Haptic Interface." IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol.6, no.3, pp.253-260, 2001.
- [7] 高橋秀智, 舟橋宏明, 武田行生: "精密作業のための力覚提示デバイスの最適機構設計", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.5, no.2, pp.891-898, 2000.
- [8] M. Guthold, et al.: "Controlled Manipulation of Molecular Samples with the Nanomanipulator." IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol.5, no.2, pp.189-198, 2000.
- [9] http://www.sensable.com/products/phantom_ghost/phantom.asp
- [10] M. Sato, Y. Hirata and H. Kawarada: "Space Interface Device for Artificial Reality—SPIDAR—," Trans. IECE, vol.J74-D-II, no.7, pp.887-894, 1991.
- [11] M. Bergamasco, B. Allota, L. Bosio, et al.: "An Arm Exoskeleton System for Teleoperation and Virtual Environments Applications." Proc. of 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and automation, pp.1449-1454, 1994.
- [12] 中井章人, 國井康晴, 橋本秀紀: "7自由度人間装着型 Haptic Interface の開発", 日本ロボット学会誌, vol.17, no.8, pp.1126-1133, 1999.
- [13] 足立吉隆, 熊野宜弘, 他3名: "マクロ・マイクロ方式による多本指用力覚提示デバイスの開発", 日本ロボット学会誌, vol.20, no.7, pp.725-733, 2002.

- [14] H. Kawasaki and T. Hayashi: "Force Feedback Glove for Manipulation of Virtual Objects," *Jour. of Robotics and Mechatronics*, vol.5, no.1, pp.79-84, 1993.
- [15] T. Yoshikawa and A. Nagura: "Development and Control of Touch and Force Display Devices for Haptic Interface," *Proc. of 6th IFAC Symposium on Robot Control, SYROCO'00*, pp.427-432, 2000.
- [16] 横小路泰義, 村守宣彦, 吉川恒夫: "多指遭遇型ハプティックデバイスの設計", *日本バーチャルリアリティ学会第7回大会論文集*, pp.69-72, 2002.
- [17] T. Mouri, H. Kawasaki, K. Yoshikawa, J. Takai and S. Ito: "Anthropomorphic Robot Hand: Gifu Hand III," *Proc. of Int. Conf. ICCAS2002*, pp.1288-1293, 2002.
- [18] C. Mrad, H. Kawasaki, J. Takai, Y. Tanaka and T. Mouri: "Development of a Multi-Fingered Robotic Human Upper Limb as an Inverse Haptic Interface," *Proc. of IEEE SMC'02, CD-ROM*, 2002.
- [19] 川崎晴久, 毛利哲也, 阿部竜久, 伊藤聡: "多指多関節ハンドロボットのハンド可操作性に基づくバーチャル指示", *日本ロボット学会誌*, vol.21, no.2, pp.194-200, 2003.



川崎晴久 (Haruhisa Kawasaki)

1949年6月27日生。1974年名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了, 同年日本電信電話公社(現: NTT)入社, 1990年金沢工業大学教授。1994年8月より岐阜大学工学部教授, 現在に至る。ロボット制御, バーチャル・リアリティ応用ロボティクスなどの研究に従事。計測自動制御学会, 日本機械学会, 日本バーチャル・リアリティ学会, IEEEなどの会員。工学博士。
(日本ロボット学会正会員)



堀 匠 (Takumi Hori)

1981年1月9日生。2003年岐阜大学工学部機械システム工学科卒業, 同年岐阜大学大学院工学研究科機械システム工学専攻博士前期課程入学, 現在に至る。



毛利哲也 (Tetsuya Mouri)

1971年7月18日生。2000年名古屋工業大学大学院工学研究科博士後期課程修了, 同年岐阜大学バーチャルシステム・ラボラトリー非常勤研究員。2003年岐阜大学工学部教務補佐員, 現在に至る。日本機械学会, 計測自動制御学会の会員。工学博士。
(日本ロボット学会正会員)