側面設置型多指ハプティックインターフェイス

遠藤 孝浩*・川崎 晴久*・中川 志信**

山下 誠治***・土屋 陽太郎****・石 樽 康彦*****

Side-faced-type Multi-fingered Haptic Interface

Takahiro ENDO*, Haruhisa KAWASAKI*, Shinobu NAKAGAWA**,
Seiji YAMASHITA***, Yotaro TSUCHIYA**** and Yasuhiko ISHIGURE*****

This paper presents the design, control, and characteristics of a new type of haptic interface named side-faced-type multi-fingered haptic interface. The proposed side-faced-type multi-fingered haptic interface, consisting of a five-fingered haptic hand and an arm, can present three-directional forces at a user's five fingertips. By locating the interface on the side of the user's body, the interface allows the user to grasp a small virtual object using multiple fingers. Further, to realize the haptic display by the interface, a control system has been developed. Finally, several experiments have been carried out to investigate the validity of the developed interface. These results show the great potential of the side-faced-type multi-fingered haptic interface.

Key Words: haptic interface, multi-finger interaction, mechanical design, interface control

1. はじめに

遠隔地や仮想環境における人や物とのインタラクションには力覚の提示が重要^{1)~3)}であり、これを実現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、仮想環境での訓練システムなど、さまざまな応用が期待できる。このような力覚インタラクションにおいて、操作者の複数指へ力覚を提示できる、すなわち多点の力覚を提示できるハプティックインターフェイスは、力覚の提示箇所が1か所のハプティックインターフェイスに比べ、さまざまな応用の可能性をもつ。たとえば、多点の力覚インタラクションは、仮想物体の把持・操りなどの人間が日常生活で行なう動作を可能とし、また多種多様な力覚体験を与えることができ、その応用範囲は広い^{4)~6)}。

このような観点のもと、複数指先に力覚を提示できるさまざまな多指ハプティックインターフェイスが研究開発されてい

る。それらは大別すると、装着型^{7)~12)}と設置型^{4), 5), 13)~16)}に分類できる。装着型ハプティックインターフェイスは、装置を操作者に装着するインターフェイスである。代表的なものに、装置がハンド機構から構成され、それを操作者の手や腕に取り付けるハンド装着型^{7)~9)}、装置がハンド機構とアーム機構から構成され、アーム機構は装着しないものの、ハンド機構を操作者の手に装着するハンド装着・アーム非装着型^{10)~12)}などがある。一般に、これら装着型は大きな作業領域を有するが、装置を手や腕にしっかりと取り付けるため、操作者に圧迫感を与え、また操作者に力覚を提示する際、作用反作用の法則により、装置が装着されている箇所に反作用力が生じ、違和感を与える¹⁷⁾。なお装着型の多くは、操作者の指をワイヤで引くことで力覚を提示しており、提示できる力の方向はワイヤを引く1軸方向のみであり、3次元の力覚提示が困難である。一部ワイヤではなく、シリアルリンク機構を用い2本または3本指先へ3次元の力覚を提示できる装着型^{9), 11)}もあるが、機構が操作者に装着されているため、上述の問題点がある。また装着型は装置の重量により、長時間の使用が困難であるとの指摘もあり^{5), 18)}、5本指への3次元の力覚提示への拡張は、機構軽量化の観点から困難であろうと思われる。

一方、設置型ハプティックインターフェイスは、装置を地面などに設置するインターフェイスである。その多くは、装置が操作者の手と対向して設置される。代表的なものに、多指ハンド機構から構成される、狭い作業空間用の多指ハンド設置型^{13), 14)}、力覚の提示箇所が1か所のハプティックインターフェイスを複数並べた複数設置型^{15), 16)}、そしてハンド機構とアーム機構から構成される、作業領域が広いハンド・

* 岐阜大学工学部 岐阜市柳戸 1-1

** 大阪芸術大学デザイン学科 大阪府南河内郡河南町東山 469

*** イー・バレイ (株) 名古屋市昭和区福江 2-9-33

**** (株) テック技販 宇治市大久保町西ノ端 1-22

***** (株) 丸富精工 関市倉知字イクダ 3147-7

* Faculty of Engineering, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu

** Design department, Osaka University of Arts, 469 Higashiyama, Kanan-cho, Minamikawachi-gun, Osaka

*** e-valley Co., Ltd., 2-9-33 Fukue, Shiyowa-ku, Nagoya

**** Tec Maruhan Co., Ltd., 1-22 Nishinohata, Okubo-cho, Uji

***** Marutomi Seiko Co., Ltd., 3147-7 Aza Ikuda, Kurachi, Seki

(Received July 5, 2014)

(Revised January 28, 2015)

アーム設置型^{4),5)}がある。著者らも、5本指のハンドとアーム機構を用い、操作者の5指に3次元の力覚を提示可能な多指ハプティックインターフェイス HIRO III¹⁹⁾を研究開発している。HIRO IIIを含め、これら設置型多指ハプティックインターフェイスは、装着型のような圧迫感や違和感を与えることはなく、操作者の複数指先に3次元の力覚を提示できる。しかしながら、装置が操作者と対向して設置されているため、つまみ動作などの小さな物体の操作を行なうと、装置が干渉しその実現が困難となる。また同様の理由で、設置型多指ハプティックインターフェイスを2台用いて両腕操作をしても、装置が操作者に対向して設置されるため、左右の手を向い合せた姿勢で作業をすることができないなどの問題がある。

これらの問題を踏まえ、本稿では、操作者の5本指に3次元の力覚を提示しつつ、これまでのハプティックインターフェイスでは実現がきわめて困難であった、小さい物体の操作が可能なハプティックインターフェイスの実現を目的とする。特に、小さい仮想物体の操作が可能となるよう、操作者の手を包み込む形で装置を操作者の側面に設置する。このため、本インターフェイスを側面設置型多指ハプティックインターフェイスと呼ぶ。これにより、5指を用いて仮想環境での小物体の把持操作が可能となり、かつ両腕での作業も可能となる。しかしその一方で、操作者の手を包み込む形で装置を設置するため、操作者の手とハプティックインターフェイスが干渉しにくい機構構成とその制御法が課題となる。

本稿では、側面設置型多指ハプティックインターフェイスの設計コンセプト、機構構成、制御システムを提案し、実験によりその性能評価を行なう。なお、本稿の一部は文献20)および21)で発表しており、本稿では、新たに開発した制御システム、それを用いた側面設置型多指ハプティックインターフェイスによる力覚提示の実現、および実験を含んでいる。本稿の構成は以下のとおりである。次章では、設計コンセプト、機構構成について述べ、第3章では、制御システムを提案する。そして実験結果を第4章で示し、最後に結論を述べる。

2. 設計コンセプトおよび機構構成

2.1 設計コンセプト

側面設置型多指ハプティックインターフェイスの概念図をFig. 1に示す。ここでは、前章で述べた背景をもとに、以下に示す4項目を設計コンセプトとする。(1) 操作者の5本の指先に3次元の力覚を提示でき、さらに(2) 広い操作空間を実現できるよう、5本指のハプティックハンド（操作者の手と区別するための呼称）とアームから構成する。また、(3) 小さい物体の操作を実現するため、装置を操作者の手を包み込むような形で側面に設置する。なお、これまで HIRO III では1辺が4cmの立方体までしか把持できなかったため、ここでは同単位最小値の1辺が1cmの立方体を把持目的とする。さらに、(4) ハプティックインターフェイスを操作者の手に取り付ける際に、拘束感がないことが望まれる。そこで、

Fig. 1 Conceptual figure of a side-faced-type multi-fingered haptic interface

操作者とインターフェイスの接続が指先のみで行なわれ、それ以外では操作者との接触がないものとする。以下では、ハプティックハンドおよびアームについて詳細を述べる。

2.2 ハプティックハンド

設計したハプティックハンドをFig. 2 (a)に示す。設計コンセプト(1)を満たすため、ハプティックハンドは、5本のハプティック指（操作者の指と区別するための呼称）から構成する。またハプティック指をFig. 2 (b)に示す。各指は4関節3自由度とし、根元から指先に向かって、第1、第2、第3リンクがあり、根元部に内外転の第1関節と前後屈の第2関節がある。また、第1～第2、第2～第3リンク間に前後屈の第3、第4関節がある。第4関節は、Fig. 2 (c)に示す平面4関節リンク機構（同図では、各リンクに対応する箇所を点線で

(a) Haptic hand

(b) Haptic finger

(c) Link mechanism between 3rd joint and 4th joint

(d) Finger holder

(e) Connection

Fig. 2 Haptic hand and haptic finger

表わす) により, 第 3 関節に連動して駆動する. なお, 第 4 関節が第 3 関節と同じ角度に動くよう, リンク機構の長さなどを設定している. 指先に 3 次元の力覚を提示するには 3 関節 3 自由度で良いが, 操作者が指を曲げた際, その指に沿う姿勢をとり, 操作者とハプティック指との干渉を避けることができるよう 4 関節とした (Fig. 2 (e) 参照). さらに, 指先には 3 軸力覚センサを取り付け, 力情報を制御に利用する.

なお, 設計コンセプト (4) を満たすため, HIRO III と同様, 操作者は Fig. 2 (d) に示すシリコン製指ホルダを装着する仕様とした. このホルダには鋼球があり, ハプティック指先端に内蔵された永久磁石と磁力により, Fig. 2 (e) のように連結される. 接続部は 3 自由度の受動球関節となり, 操作者の指とハプティック指の姿勢を調整する機能があり, 異常時には操作者が指を強く引くことで着脱でき安全性が配慮されている. 以上により, 指先のための接続が可能となる.

一方, ハプティック指のリンク長および配置は, さまざまな操作者の手に対して, 操作者の手とハプティックハンドの干渉が生じないようにし, かつ小型化を考慮して設計した. これより, 機構が大がかりに見えず, 操作者に対する圧迫感を軽減でき, さらにハプティック指が操作者に干渉しない構造とする. このため 3D CAD の Inventor を用い, 操作者のハンドモデルとハプティックハンドモデルを構築し, 操作者が小物体を把持しても, 操作者とハプティックハンドが衝突しないハプティック指のリンク長および配置を決定した. なお操作者のハンドモデルは, 日本人の手のサイズの統計データ²²⁾を用いた. ただし各指のリンク長が不明のため, 手の X 線写真²³⁾からリンク長を計測し, 統計データ²²⁾を用いて計測データをスケリングし, 操作者のハンドモデルを構築した. 特に, 大部分 (95%) の日本人が使用できるよう, 操作者のハンドモデルは, 日本人の手の平均サイズ, 平均 $+2\sigma$ サイズ, 平均 -2σ サイズの 3 種類を用意した (σ は標準偏差を表わす).

まずリンク長は, メンテナンス性を考慮し全指とも同じ長さでユニット化した. また HIRO III と同様, 第 3 関節モータを第 1 リンクに内蔵するため $l_1 = 72 \text{ mm}$ と固定し (モータ内蔵のため, これ以上短くできないため), l_2, l_3 を 20 から 40 mm の範囲で検討した. ここに, $l_i, i = 1, 2, 3$ は第 i リン

Fig. 3 Collision detection with averaged human model and haptic hand model

Table 1 Specifications of haptic finger

Degrees of freedom		3 [DOF]
Maximum fingertip force/speed		over 3.9 [N]/255 [mm/s]
Operating angle of joints	1st	Thumb: $-36 \sim 36$ [deg] Other fingers: $-30 \sim 30$ [deg]
	2nd/3rd	$-40 \sim 90 / 0 \sim 90$ [deg]

ク長である. また, ハプティック指の配置は, なるべくハプティックハンドが小型になるよう, 人間モデルの近傍でさまざまな配置を検討した. そして, 操作者の 3 種類のハンドモデルとハプティックハンドモデルを用い, 操作者が拇指と示指, 拇指と中指, 拇指と薬指, そして拇指と小指で, 1 辺が 1 cm の立方体を把持しても, 操作者とハプティックハンドが衝突しないハプティック指のリンク長と配置を試行錯誤的に決定した. その結果, ハプティック指のリンク長は, Fig. 2 (b) に示すとおりとなった. 参考のため, Fig. 3 に, 操作者のハンドモデル (平均サイズ) とハプティックハンドモデルにおいて, 拇指と中指で 1 辺が 1 cm の立方体を把持した例を示す. これより, 操作者とハプティックハンドが干渉していないことがわかる. なお, ハプティック指の能動関節には DC モータ (Maxon 社製 DC モータ RE10) を用い, 各関節ともモータ付属のギアヘッドおよび歯車から構成される減速機構を介して駆動される. 開発したハプティック指の仕様を Table 1 に示す. 最大指先力および最大指先速度は, それぞれ 3.9 N, 255 mm/s 以上であり, HIRO III と同程度である.

2.3 アーム

設計コンセプト (2) を満たすため, アーム先端にハプティックハンドを接続する. ハプティックハンドが任意の位置・姿勢をとれるよう, アームは 6 自由度の機構とした. 設計したアームを Fig. 4 に示す. アーム肩部は内旋・外旋, 屈曲・伸

Fig. 4 Structure of arm

Table 2 Specifications of arm

Degrees of freedom		6 [DOF]
Maximum tip force/speed		over 12.7 [N]/38.3 [mm/s]
Operating angle of joints	1st/2nd	$-100 \sim 110 / -125 \sim 0$ [deg]
	3rd/4th	$0 \sim 145 / -90 \sim 90$ [deg]
	5th/6th	$-45 \sim 45 / -60 \sim 60$ [deg]

(a) Overall system

(b) Connection configuration

Fig. 5 Side-faced-type multi-fingered haptic interface

展に対応する第1, 第2関節の2自由度がある。また, 肘部は屈曲・伸展を行なう第3関節の1自由度, 手首部は屈曲・伸展, 内転・外転および回内・回外に対応する第4, 第5, 第6関節の3自由度があり, 合計6自由度となる。全関節はDCモータにより駆動される。DCモータとして, 第1~第3関節はMaxon社製DCモータRE30を用い, 第4~第6関節はMaxon社製DCモータRE-max17を用い, 各関節ともモータ付属のギアヘッドおよび歯車からなる減速機構を介して駆動される。特に, 電源を切った場合もアームの位置が保てるように, 第2, 第3関節はブレーキ付きモータを使用した。リンク長はHIRO II (HIRO IIIの前バージョンで, HIRO IIIはHIRO IIを小型化したもの)と同様, 上腕と下腕の長さは0.3mでほぼ人間の腕の長さに等しいよう設定することで, 机上作業を行なう際にほぼ十分な操作空間を実現している²⁴⁾。なお, 開発したアームの仕様をTable 2に示す。

2.4 側面設置型多指ハプティックインターフェイス

開発した側面設置型多指ハプティックインターフェイスをFig. 5に示す。Fig. 5 (b)が操作者とインターフェイスの接続の様子である。同図では, 操作者は自身の拇指と示指をあわせた状態でインターフェイスと接続しており, 設計コンセプト(3)を満たしていることがわかる。以上より, 設計した側面設置型多指ハプティックインターフェイスが設計コンセプト(1)~(4)を満たすことがわかる。なお機能上の問題はないが, ハプティックインターフェイスという人間と直接に接

続される装置では, 人間に不安感を与える印象は極力さける必要がある。そこで, インターフェイスの外観(カバー)は, 工業デザインの観点から, 操作者にとってやさしい感じを与えられるR曲面を多用し, 凹凸をなくし全体が丸みを帯びた形状にすることで優しいイメージを与えることとした。

3. 制御システム

3.1 省配線制御システム

側面設置型多指ハプティックインターフェイスによる力覚提示を実現するため, 制御システムを構築した。本インターフェイスのハンド部は, 15個のモータ・エンコーダ, 5台の3軸力覚センサをもち, アーム部は6個のモータ・エンコーダおよび原点出しセンサをもつ。このため, 省配線化を考慮しない場合, モータやセンサから制御装置(アンプや制御PCなど)までの配線数は200本を超え, それがインターフェイスの滑らかな運動の大きな妨げとなる。そのため, 省配線化を考慮した制御システムを構築した。

Fig. 6に, 開発した省配線制御システムを示す。本システムはハンド部とアーム部の制御システムからなり, 両システムとも, FPGA基板とモータアンプ基板から構成される。FPGA基板では, Xilinx社製Virtex-5を用い以下の機能を行なう: 1) エンコーダ値取得, 2) PWM出力, 3) モータブレーキ・原点出しセンサのDIO機能, および4) A/D変換器(FPGA基板に搭載され, 力センサが接続)の値読込。ここで, FPGA基板と制御PCはLANにより接続され, 制御PCからのコマンドによりFPGA基板は上記4つの動作を行なう。たとえば, 制御PCからPWMのデューティー比を受け取った場合, FPGA基板はモータへPWM出力を行なう。なお, モータアンプ基板は主にFPGA基板から送られてくるPWM信号の増幅およびエンコーダ信号のレベル変換を行なう。

Fig. 6 Control system

ハンド部制御システムは、ハプティックハンドの掌内部に収納される。一方、アーム部制御システムは、アーム根元に FPGA 基板が収納され、各モータアンプ基板（第 1～第 3 関節モータはそれぞれ 1 枚ずつ、第 4～6 関節モータは 1 枚）は各駆動モータ付近に搭載し、各モータアンプ基板および FPGA 基板は、調歩同期式シリアル通信で接続される。なお、モータ・センサの信号は、ハンド部またはアーム部省配線制御システムに接続され、省配線制御システムと制御 PC は LAN により接続される。これによりインターフェイスと制御 PC 間の配線を、212 本から 20 本（2 本の LAN ケーブル用配線 16 本、2 本の電源ケーブル用配線 4 本）に省配線化できる。なお、通信部のプロトコルには UDP/IP を用いている。FPGA 基板の動作はコマンド&レスポンス形式であり、制御 PC において再送処理が組み、TCP/IP と変わらない信頼性があると考えられる。また、第 4 章にていくつか実験を行なっているが、制御 PC から制御システムへコマンドを送り、制御システムから応答がくるまでの通信速度は 0.3 ms 以内であり、十分な制御周期を実現できる。

他方、後述する修正可操作性最適化制御で使用する、操作者の手とハプティックハンド間の距離を計測するセンサとして、Parallax 社製の超音波センサ PING（計測範囲 30～250 mm）を用いており、センサから制御 PC までは RS232C で接続する。超音波センサは、後述の Fig. 11 (b) のように、ハプティックハンド掌表面に 2 台設置している。これは、超音波センサが 1 台の場合、インターフェイスの操作中に操作者の手がセンサの測定範囲外に出てしまうことがあったため、センサを 2 台使用して測定可能な範囲を広げている。なお、各センサの超音波同士が干渉するため、両センサの超音波発射のタイミングを交互に切り替え、その干渉を回避している。

3.2 力覚センサ

上述した省配線制御システムの基本構成は、HIRO III の制御システム¹⁹⁾とほぼ同じである。大きな違いは、力覚センサ

およびその増幅器が挙げられる。HIRO III では、Fig. 7 (a) に示すひずみ式 3 軸力覚センサを開発し、使用した。本センサにはセンサ自体にアンプが内蔵されていないため、HIRO III ハンド部省配線制御システムには、FPGA 基板、モータアンプ基板に加え、力センサ信号増幅基板が別途必要であった。このため、力センサからハンド部制御システム間で、力センサ出力に外乱が入る恐れがあった。そこで、Fig. 7 (b) に示す新たな差動増幅機能付き力覚センサを開発した。ここで、増幅器は力覚センサ下部に内蔵した。力覚センサの基本構成は、HIRO III の力覚センサと同じであり、主な違いは力覚センサの出力が増幅されている点である。力覚センサの基本構成については文献 19) を参照されたい。アンプを内蔵したため、力覚センサはいくぶん長くなったが、力覚センサと制御システム間で生じる外乱に対してロバストとなった。実際、力覚センサに対して重り (0 g, 106.4 g, 210.8 g) を載せ、その際の平均絶対値力誤差を導出したところ、アンプなし 3 軸力覚センサでは誤差が 26.53 mN であったのに対し、アンプ内蔵型 3 軸力覚センサでは誤差が 12.86 mN であった。このように、アンプを内蔵することで高精度な力覚計測が可能となった。さらに、アンプを力覚センサに内蔵することで、力センサ信号増幅基板をハンド部制御システムから省略でき、よりコンパクトな制御システムが構築できた。なお、力覚センサの仕様を Table 3 に示す。

3.3 修正可操作性最適化制御

側面設置型多指ハプティックインターフェイスの制御法として、操作者とインターフェイスの干渉回避を考慮した修正可操作性最適化制御について述べる。本制御法は文献 20) で提案し、その有効性をシミュレーションによって検証したが、制御システムが構築されておらず、実現には至っていなかった。本制御法は、ハプティック指の力制御とアームの位置制御から構成される。なお本制御法は、HIRO III で用いた可操作性最適化制御（ハプティック指は力制御、アームは可操作性最適化法による位置制御）¹⁹⁾に、干渉回避を考慮した制御法である。すなわち、側面設置型多指ハプティックインターフェイスは操作者との配置が近い場合、干渉する恐れがある。そこで、可操作性最適化法の評価関数に操作者との干渉を回避するように新たな項を追加したものである。

ハプティック指の力制御は

$$\begin{aligned} \tau_F(t) = & K_1 J_F^T F_e(t) + K_2 J_F^T \int_0^t F_e(s) ds \\ & + J_F^T F_d - K_3 \dot{q}_F(t) \end{aligned} \quad (1)$$

で与えられる。ここに、 $\tau_F = \text{col}[\tau_1, \dots, \tau_5] \in \mathbb{R}^{15}$ はハプティック指の関節トルク、 J_F はヤコビアン、 $F = \text{col}[F_1, \dots, F_5] \in \mathbb{R}^{15}$ は指先力、 $F_d = \text{col}[F_{d1}, \dots, F_{d5}] \in \mathbb{R}^{15}$ は目標指先力、 $F_e = F_d - F$ は指先力誤差であり、 $q_F = \text{col}[q_1, \dots, q_5] \in \mathbb{R}^{15}$ はハプティック指の関節角度である。また、 K_i , $i = 1, 2, 3$, は正のフィードバックゲイン行列である。ここで、右辺第 1, 第 2 項は力誤差の PI 制御項、第 3 項は外力補償項、

(a) Previous developed force sensor with no amplifier (b) Newly developed force sensor with amplifier

Fig. 7 Three-axis force sensors

Table 3 Specifications of force sensors

items	Previously developed force sensor	Newly developed force sensor
Rated Output	5 [N]	5 [N]
Size	Φ14×H27 [mm]	Φ14×H34.5 [mm]
Weight	12.8 [g]	19.2 [g]

第4項はダンピング効果を付与するための項である．

一方，アームは以下に示す関節角度誤差のPID制御

$$\begin{aligned} \tau_A(t) = & K_1^A q_{Ae}(t) + K_2^A \int_0^t q_{Ae}(s) ds + K_3^A \dot{q}_{Ae}(t) \\ & + g_A(q_A) + J_A^T \left(\sum_{i=1}^5 F_{di} \right. \\ & \left. \sum_{i=1}^5 (p_i - p_{hb}) \times F_{di} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

で制御される．ただし， $q_{Ae} = q_{Ad} - q_A$ はアーム関節角度誤差， $q_A \in \mathbb{R}^6$ はアーム関節角度， $q_{Ad} \in \mathbb{R}^6$ はアーム目標関節角度， $\tau_A \in \mathbb{R}^6$ はアーム関節トルク， K_i^A ， $i = 1, 2, 3$ ，は正のフィードバックゲイン行列， $g_A(q_A)$ は重力補償項， J_A はヤコビアン， $p_i \in \mathbb{R}^3$ は第*i*ハプティック指の指先位置であり， $p_{hb} \in \mathbb{R}^3$ はアーム先端位置である．なお， q_{Ad} は以下の評価関数 PI を最大化するように定義する：

$$PI = \sum_{i=1}^5 (\alpha_i W_i + \beta_i P_i) + Q_A + C \quad (3)$$

ここに，

$$W_i = |\det J_{F_i}|, \quad Q_A = -\frac{1}{2} q_{Ae}^T \Gamma q_{Ae} \quad (4)$$

$$P_i = -\sum_{j=1}^3 \gamma_j [e^{-\mu(q_{ij} - a_{ij})} + e^{\mu(q_{ij} - b_{ij})}] \quad (5)$$

$$C = -\zeta [e^{-\eta(d-L_1)} + e^{\eta(d-L_2)}] \quad (6)$$

であり， α_i ， β_i は重み係数， W_i は第*i*ハプティック指の可操作度， J_{F_i} は第*i*ハプティック指のヤコビアン， P_i は第*i*ハプティック指の関節角度を可動範囲内とするためのペナルティ関数， γ_j ， μ は重み係数， a_{ij} および b_{ij} は，それぞれ第*i*ハプティック指の第*j*関節角度の下限と上限である．さらに， Q_A はアーム関節角度の急激で大きな変化を防ぐためのペナルティ関数， Γ は重み行列， C は操作者の手とハプティックハンド間の干渉を防ぐためのペナルティ関数， ζ ， η は重み係数， d は操作者とハプティックインターフェイスの手首間距離であり， L_1 および L_2 は，それぞれ手首間距離 d の許容する下限と上限である．目標関節角度 q_{Ad} は，評価関数 PI を最大化するように共役勾配法により導出される．

なお，評価関数 PI における係数は，すべて試行錯誤で決定している．具体的には，まず可操作度にかかる項 $\alpha_i W_i$ を基準として，各ペナルティ関数 P_i ， Q_A ， C が適度に作用するように，各ペナルティ関数に關係する係数を小さい値から徐々に大きい値に設定し，最適であろうと思われる値を試行錯誤で決定している．また，評価関数 PI における可操作度の評価は，すべての指の合算になっており，遊指（仮想物体に接していない指）の可操作度も付加している．ハプティックインターフェイスでは，仮想物体に触れている指には精度よく力覚を提示し，触れていない指には，その指を自在に操れるように，指先力をゼロに制御することが肝要であると考えら

れる．たとえば，拇指で仮想物体を押しつつ，中指は空中を自由に動かす状況があった場合でも，このように遊指の可操作度を付加することで対応が可能となる．このため，ここでは遊指の可操作度も付加している．なお，仮想物体に触れている指のみが重要で，触れていない指は無視するような状況では，遊指の可操作度をゼロに設定することで対応可能であると考えられる．

以上より，力覚提示はハプティック指により行なわれ，アームは評価関数 PI が最大となるように制御される．このため，操作者の少しの指の動きでアームの位置・姿勢が大きく変化することがなく，操作者に安心感を与え，かつ干渉回避をしながらハプティック指の操作性能が良い状態になるので，高精度な力覚提示が実現できる．ただし，Table 1 および Table 2 に示すとおり，ハプティック指とアームの応答性には違いがある（ハプティック指の最大指先速度は 255 mm/s，アーム先端の最大速度は 38.3 mm/s）．このため，たとえば 38.3 mm/s 以上の速度で高速にハプティックインターフェイスを動作させた場合，アームの動作がハプティック指先の力制御の精度に影響を与える可能性がある．

本章の実験では，RT-Preempt パッチを適用した Ubuntu 12.04 を OS とした PC（プロセッサ：インテル Core i7-3770K 3.50 GHz，メモリー：16 GB）を用いて制御を行なっている．制御則 (1) 式および (2) 式を実現する制御ループのサンプリング時間は 1 ms である．なお 3.1 節ですでに述べたが，操作者とハプティックインターフェイスの手首間距離 d の計測では，2 台の超音波センサを用いる．使用しているセンサの仕様上，各センサの超音波同士の干渉を回避するには，両センサの超音波発射のタイミングを 20 ms 程度待ちながら交互に切り替える必要がある．このため，2 つのセンサから値を取得する，計測のための周期は 40 ms となるが，これは制御ループとは別のスレッドで実行している．

4. 実験

4.1 実験 1：小物体の把持操作

側面設置型多指ハプティックインターフェイスで，小さな仮想物体の把持操作が可能であるか検証するための実験を行なった．なお，実験ではハンド部のみを用い（アームを固定し），Fig. 8 (b) に示す仮想環境に用意された 1 辺が 1 cm の立方体を把持操作する．仮想物体はマス・バネ・ダンパモデル（スティッフネス $K = 1.0$ kN/m，ダンピング係数 $D = 5.0$ Ns/m，質量 $m = 8$ g）¹⁹⁾を用いて実現した．すなわち，仮想物体（マス）の表面にバネ・ダンパのバーチャルカップリングを設置した．

実験手順を Fig. 9 に図示するが，手順は次のとおりである：(1) 拇指と示指で仮想物体を Y 軸方向に把持し，(2) X 軸方向へ仮想物体をもち上げる．そして，(3) Z 軸方向で仮想物体を左右に移動させ，最後に (4) 仮想物体を離す．ここで，座標は Fig. 8 (a) に示す座標系を用いている．

拇指の力応答（拇指のハプティック指先端にある力覚セン

Fig. 8 Experimental environment in the pinching case

Fig. 9 Experimental procedures

Fig. 10 Experimental results in experiment 1

サの応答), 拇指と示指の指先位置を, それぞれ Fig. 10 (a), (b) に示す. 両図において, 各実験手順の時間区間を点線で示している. Fig. 10 (a) では, 上から X 軸, Y 軸および Z 軸の力応答を表わし, 細線が計測値, 薄線が目標力である. なお, 横軸は時間, 縦軸は力を表わす. これらの図より, 3 軸指先力が目標力に追従していることが確認できる. なお定量的評価のため, 拇指および示指における平均絶対値力誤差を導出したところ, それぞれ 0.09 N, 0.11 N であり, 精度良い力覚提示が可能であることがわかった. 他方, Fig. 10 (b) では, 上から X 軸, Y 軸および Z 軸における拇指と示指の指先位置を表わし, 薄線が拇指の応答, 細線が示指の応答である. これらの図より, 実験手順 (仮想物体のつまみ, もち上げ, 移動, 離し動作) が行なわれたことが確認できる. 特に, 実験手順 (1), (2), (3) の際, Y 軸の拇指と示指の指先位置

の差が 1 cm 付近であることから, 仮想物体を把持できていることもわかる. 以上から, 側面設置型多指ハプティックインターフェイスを用いて, 目標とする 1 辺が 1 cm という小さな仮想物体の把持操作が可能であることが示された.

4.2 実験 2: 干渉回避

側面設置型多指ハプティックインターフェイスでは, 操作者の手を包み込む形で装置を操作者の側面に設置する. このため, 操作時に装置と操作者が干渉 (衝突) する危険性がある. ここでは, 修正可操作性最適化制御により, 装置と操作者の干渉回避が実現できるか, その制御法の有効性を検証する実験を行なう.

実験環境を Fig. 11 (a) に示す. なお, インターフェイスと操作者の手首間距離を計測する超音波センサは, Fig. 11 (b) に示すように, ハプティックハンド掌表面に 2 台設置し, 距離が短いほうの値を手首間距離 d として使用した. 実験では, 操作者が故意に自身の手をインターフェイスに近づけたり離す動作を行ない, 干渉回避の有効性を検討した. ここでは一例として, 操作者の手をインターフェイスへ近づけた場合の実験結果を Fig. 12 に示す.

Fig. 12 (a) は評価関数 PI , (b) は干渉回避用ペナルティ関数 C , (c) は手首間距離 d , (d) は操作者の拇指の 3 軸指先力の応答である. なお実験では, 手首間距離 d の下限 L_1 を 200 mm, 上限 L_2 を 270 mm に設定した. (b) および (c) より, 距離 d の値に応じてペナルティ関数 C の値が変化している. しかしながら, その絶対値は PI の値に比べて小さく, PI に影響を与えていない. これは, ペナルティ関数 C が働き始めると, アーム関節角度が変化し, 干渉を回避する方向に動くためである. さらに (c) より, 手首間距離 d は指定した範囲内にあり, 干渉を回避していることがわかる. ハプティッ

Fig. 11 Experimental environment in experiment 2

Fig. 12 Experimental results in the case of with C

Fig. 13 Experimental results in the case of without C

クインターフェイスは、干渉を回避しつつ、ハプティック指の可操作度を保ったままであるため、 PI の値に大きな変動がない。実際、(d) を見ると、拇指の指先力はほぼ一定である。また、5本の指先力の平均絶対値力誤差は 0.10 N で、干渉回避動作が行なわれていても、力覚提示への影響は小さいことがわかった。

なお参考のため、評価関数 PI において、ペナルティ関数 C をなくした ((3) 式において $C = 0$ とした) 場合の実験を上記と同様な手法で行なった。この場合の実験結果を Fig. 13 に示す。(a) が評価関数 PI , (b) が手首間距離 d の応答である。この場合、操作者とインターフェイス間の距離が明らかに下限を超えており、干渉を回避できないことがわかる。以上より、側面設置型多指ハプティックインターフェイスの干渉回避制御の有効性が確認できた。

5. おわりに

本稿では、人間の5本指に3次元の力覚を提示しつつ、既存のデバイスでは実現がきわめて困難な小物体の把持操りを可能とする、側面設置型多指ハプティックインターフェイスを提案した。5本のハプティック指をもつハンドとアームから機構を構成することで、操作者の5本指に3次元の力覚を提示でき、さらには広い操作空間をもつ。特に、操作者の手を包み込む形で装置を設置することで、小物体の把持を可能としたが、このため、操作者の手とハプティックインターフェイスが干渉しにくい機構構成とその制御法が課題であった。そこで、ハプティック指は4関節3自由度とし、操作者との干渉を低減する構成にするとともに、制御システムを開発し、操作者とインターフェイスの干渉を回避する干渉回避制御を実現し、実験によりその有効性の検証を行なった。

多指ハプティックインターフェイスを側面に設置することで、小物体の把持・操りばかりでなく、左右の手を向い合せた姿勢で両腕作業を行なうことも可能となる。このため、側面設置型多指ハプティックインターフェイスを2台用いた両腕作業の実現が、今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は、総務省 SCOPE 制度、JSPS 科研費 26249063, 26730104 の助成を受けたものである。また、実験に協力してくれた青山尚史君、永井亮馬君、松田貴宏君をはじめ、研究室メンバーに謝意を表す。

参考文献

1) K. Shimoga: A survey of perceptual feedback issues in dexterous telemanipulation: Part I, Proc. of IEEE Virtual

Reality Ann. Int. Symp., 263/270 (1993)
 2) V. Hayward, O.R. Astley, M. Cruz-Hernandez, D. Grant and G. Robles-De-La-Torre: Haptic interfaces and devices, Sensor Review, **24**-1, 16/29 (2004)
 3) S. Katsura, W. Yamanouchi and Y. Yokokura: Real-World Haptics, IEEE Ind. Electron. Mag., **6**-1, 25/31 (2012)
 4) F. Barbagli, K. Salisbury and R. Devengeno: Toward virtual manipulation: From one point of contact to four, Sensor Review, **24**-1, 51/59 (2004)
 5) A. Najdovski and S. Nahavandi: Extending Haptic Device Capability for 3D Virtual Grasping, Proc. of EuroHaptics 2008, 494/503 (2008)
 6) I. Galiana and M. Ferre (Eds.): *Multi-finger Haptic Interaction*, Springer-Verlag (2013)
 7) H. Kawasaki and T. Hayashi: Force Feedback Glove for Manipulation of Virtual Objects, J. Robot. Mechatron., **5**-1, 79/84 (1993)
 8) Z. Ma and P. Ben-Tzvi: RML Glove-An Exoskeleton Glove Mechanism With Haptics Feedback, IEEE/ASME Trans. Mechatronics, **20**-2, 641/652 (2015)
 9) A. Frisoli, F. Simoncini, M. Bergamasco and F. Salsedo: Kinematic Design of a Two Contact Points Haptic Interface for the Thumb and Index Fingers of the Hand, ASME J. Mech. Des., **129**-5, 520/529 (2007)
 10) CyberGlove Systems, CyberForce [Online], Available at <http://www.cyberglovesystems.com/products/cyberforce/overview>
 11) 足立, 熊野, 池本, 服部, 鈴木: 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, **20**-7, 725/733 (2002)
 12) S. Tachi, N. Kawakami, H. Nii, K. Watanabe and K. Minamizawa: TELESARPHONE: Mutual Teleexistence Master-Slave Communication System Based on Retroreflective Projection Technology, SICE J. Control, Measurement, and System Integration, **1**-5, 335/344 (2008)
 13) J. López, J. Breñosa, I. Galiana, M. Ferre, A. Giménez and J. Barrio: Mechanical Design Optimization for Multi-Finger Haptic Devices Applied to Virtual Grasping Manipulation, J. of Mechanical Engineering, **58**-7-8, 431/443 (2012)
 14) R. Leaschke, E. Kurihara, J. Doshier and B. Hannaford: High Fidelity Multi Finger Haptic Display, Proc. of World Haptics Conf. (WHC '05), 606/608 (2005)
 15) 吉川, 山口, 野口, 川井: 2本指操作のための6自由度指先装着型力覚提示装置の開発, 日本ロボット学会誌, **20**-8, 893/899 (2002)
 16) A. Coutee, S. McDermott and B. Bras: A Haptic Assembly and Disassembly Simulation Environment and Associated Computational Load Optimization Techniques, ASME J. Comput. and Inf. Sci. Eng., **1**-2, 113/122 (2001)
 17) 梶本裕之: 触覚・力覚ディスプレイ, 知能と情報, **19**-4, 326/332 (2007)
 18) A. Saddik: The Potential of Haptics Technologies, IEEE Instrumentation & Measurement, **10**-1, 10/17 (2007)
 19) T. Endo, H. Kawasaki, T. Mouri, Y. Ishigure, H. Shimomura, M. Matsumura and K. Koketsu: Five-Fingered Haptic Interface Robot: HIRO III, IEEE Trans. Haptics, **4**-1, 14/27 (2011)
 20) H. Aoyama, H. Kawasaki, T. Endo and S. Nakagawa: Design and Simulation of a Side-Faced-Type Multi-Fingered Haptic Interface, Proc. of 37th Ann. Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2011), 3162/3167 (2011)
 21) T. Endo, H. Aoyama, S. Nakagawa and H. Kawasaki: Haptic Display by a Side-Faced-Type Multi-Fingered Haptic

Interface, Proc. of 10th IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO2012), 367/372 (2012)

- 22) 生命工学工業技術研究所編：設計のための人体寸法データ集，日本出版サービス (1996)
- 23) 河野 敦：骨関節 X 線解剖ハンドブック，中外医学社 (1998)
- 24) H. Kawasaki and T. Mouri: Design and Control of Five-Fingered Haptic Interface Opposite to Human Hand, IEEE Trans. Robot., **23**-5, 909/918 (2007)

石 樽 康 彦

2014 年岐阜大学大学院工学研究科博士後期課程修了。1999 年 (株) 丸富精工入社，リハビリ支援システム，多指ハプティックインターフェイス，枝打ちロボットの開発に従事。現在に至る。日本ロボット学会，日本機械学会，日本森林学会などの会員。博士 (工学)。

[著 者 紹 介]

遠 藤 孝 浩 (正会員)

2006 年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士後期課程修了。同年，岐阜大学工学部助手，2007 年助教に配置換えとなり現在に至る。ハプティックインターフェイスの研究開発，柔軟機械系の制御などに関する研究に従事。IEEE，日本機械学会，日本ロボット学会などの会員。博士 (工学)。

川 崎 晴 久 (正会員)

1974 年名古屋大学大学院修士課程修了，同年日本電信電話公社 (現 NTT) 研究員，90 年金沢工業大学教授，94 年岐阜大学工学部教授，現在に至る。2006 年文部科学大臣表彰ほか受賞。日本ロボット学会，日本機械学会，日本バーチャルリアリティ学会のフェロー，IEEE などの会員 (工学博士)。

中 川 志 信

1990 年武蔵野美術大学基礎デザイン学科卒業。同年，松下電器産業デザイン部入社。2007 年より大阪芸術大学デザイン学科プロダクトデザインコース准教授，現在教授。ロボティクスデザインの研究に従事。日本人間工学会，日本ロボット学会などの会員。日本グッドデザイン賞など多数受賞。

山 下 誠 治

1987 年東京理科大学理学部応用物理学科卒。同年就職してからは半導体研究，電子回路設計を担当。2000 年イー・バレイ (株) 入社，現在に至る。2010 年より岐阜大学川崎毛利研究室とのロボットの共同研究に参加，ロボットの制御回路を担当。

土 屋 陽太郎

1994 年中部大学工学部工業物理学科卒業。同年，計測関連会社入社。96 年 (株) テック技販入社。現在に至る。