

視覚と体性感覚による変位と力の協調的知覚特性を利用したマウス型多指ハプティックデバイスの開発

Development of a Mouse-Shaped Haptic Device
Utilizing Cooperative Sensory Properties of Visual and Somatic Senses

上田祐介¹⁾, 前野隆司²⁾
Yusuke UEDA and Takashi MAENO

1) 慶應義塾大学大学院 理工学研究科
(〒223-8522 神奈川県横浜市港北区 3-14-1, yusuke@u04.itscom.net)
2) 慶應義塾大学 機械工学科
(〒223-8522 神奈川県横浜市港北区 3-14-1, maeno@mech.keio.ac.jp)

Abstract: Human recognizes external information by integrating several sensations. The visual sense has a primacy over somatic sense. We believe that the movable range of the haptic device does not necessarily have to be completely satisfied that of humans because we believe visual sense can compensate displacement for the difference between the displacements of them. In this paper, a mouse-shaped haptic device utilizing these human characteristics is proposed. To evaluate its efficiency, we carried out three implementations utilizing virtual reality system.

Key Words: Haptic Interface, Teleoperation, Virtual Environment

1. はじめに

近年、操作者の動作計測を行うとともに体性感覚に変位や力への提示を行うハプティックデバイスの研究が盛んに行われている。より正確で高臨場感を伴う作業が可能となるため、ハプティックデバイスは、バーチャルリアリティ(以下 VR)システムやマスタ・スレーブシステムへの適用が期待されている。VR システムにおいては、医療シミュレーションや各種のトレーニングへの入力デバイスとして期待される。一方、マスタ・スレーブシステムにおいては、人間にとって困難な微細作業や、原子炉内や宇宙空間といった極限環境における作業のマスタデバイスとして期待される。また、より複雑で環境への適応性の高い作業を実行可能にするために、多指入力デバイスが注目され、開発されている。これらのデバイスは、接地型と携帯型の大きく2つに分類することができる。

接地型は主に1点を計測するものが多く、ペンやボールなどの道具を媒介にする^{[1][2]}。そして、壁の反力や物体の重さなどを提示することが可能である。また、操作者はデバイスの自重を補償する必要がない。しかし、接地してあるため、多指入力を実現すると可動域が著しく小さくなるという問題点を有する。

一方、携帯型は主にエグゾスケルトン型のように操作者の手に沿う形状を有している^{[3]-[5]}。そのため、直感的に操

作することが可能となり、構造上多指入力への適用が容易である。そして、接地型よりも広い作業空間を有する。しかし、手に装着するため、デバイスの自重を感じてしまう上に、多自由度の力覚提示が困難である。また、壁反力や重さを提示することが不可能であり、デバイスを固定する際の拘束具によって自然な動作が妨げられるという問題点を有する。

このように、2種類のデバイスにはそれぞれ問題点があるため、本研究では以下に挙げる特徴を有する新たなデバイスの開発を行う。

- (1) 簡単な構造
- (2) 操作性の良さ
- (3) 自然な装着感

なお、本研究では、新しいデバイスの設計にあたり、解剖学的知見および神経生理学的知見に注目した。すなわち、ヒトが変位を知覚する際の協調・競合特性を陽に利用することによって、上述した特徴を有するデバイスを開発した。本稿では、デバイスの設計、製作およびVRシステムを用いた評価について述べる。

2. 設計・製作

2.1 基本設計

1章で述べたとおり、本研究ではハプティックデバイス

を設計する際にヒトの変位と力の協調的知覚特性を利用した。まず、解剖学的知見に着目した。ヒトには図1に示すように解剖学的機能肢位が存在する^[6]。解剖学的機能肢位とは、最小の関節可動域での把握が可能で、有用な運動の回復が比較的容易な肢位である。機能肢位での使用を考慮し、マウス型で接地する形状をとることとする。また、ヒトの指関節は支靭帯によって連動することが知られている。特に母指を除いた4指では、DIP関節とPIP関節との関係を、(1)式のように近似することができる^[7]。母指では、MP関節とIP関節との関係は、(2)式によって近似できる^[8]。2関節の連動を利用することによって、1指あたりのデバイスの自由度を4から3に減少し、構造の簡略化を行った。

$$q_{DIP} = 0.46 \cdot q_{PIP} + 0.083 \cdot q_{PIP}^2 \quad (1)$$

$$q_{MP} = 1.13 \cdot q_{PIP} + 0.29 \cdot q_{IP}^2 \quad (2)$$

次に、神経生理学的知見に注目した。ヒトは各感覚器官から得られる情報を統合することで外界の情報を得ている。その中でも、視覚は8割弱を占めるといわれており、体性感覚に対して優位性を示すことが知られている。SrinivassanらはVRシステムを用いて視覚と体性感覚の間に矛盾を生じさせる実験を行った^[8]。その結果、被験者ら

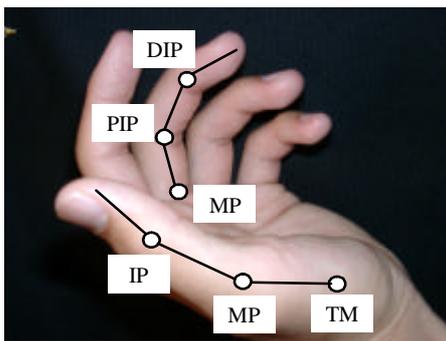


図1 The functional position and the names of joints

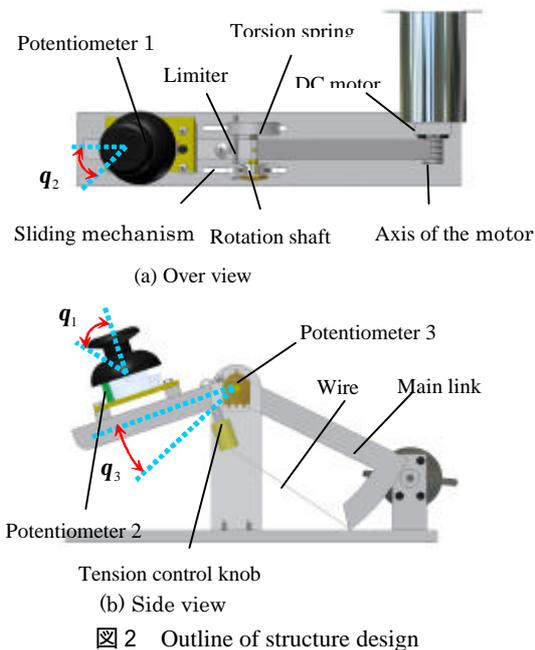


図2 Outline of structure design

は、仮想物体の剛性を視覚情報による変位によって判断していた。このことは、変位知覚における視覚の優位性を示している。すなわち、変位知覚に強く関わる視覚によって変位を提示し、体性感覚に対しては正確な力提示を行うこととした。体性感覚に正確な変位を提示しないということは、デバイスの可動域を指の可動域よりも狭くできるということである。このことは、デバイスの小型化のために有効である。本デバイスでは、この知見を利用し、デバイス構造の簡略化を行った。

こうした設計方針に基づいて、基本設計を行った。まず、安定した把持・操り動作を実現するために本デバイスの指本数は4とした^[9]。次に、1指あたりの自由度は、(1)、(2)式を利用して近似することにより、4から3に減じた。

図2に1指モデルの構造を示す。また、力覚提示の自由度は1で、把持・操りに最も重要である指腹部に対して垂直な反力を提示できるようにした。また、メインリンク部はカウンターウエイトを有するため、デバイスの重さは補償される。

2.2 詳細設計

駆動機構には、小型かつ構造が簡単でバックドライバビリティを有し、バックラッシュのないコンパクトワイヤ機構を適用した。デバイスの先端に生じる力 $F_{feedback}$ は、DC

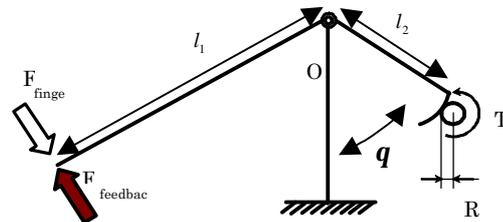


図3 Model of displaying force feedback

表1 Dimensions of each finger

	l_1 [mm]	l_2 [mm]	θ [deg]
Index finger	40.2	75.3	62
Middle finger	49.8	49.0	64
Ring finger	42.1	38.1	34
Thumb	64.5	87.8	86

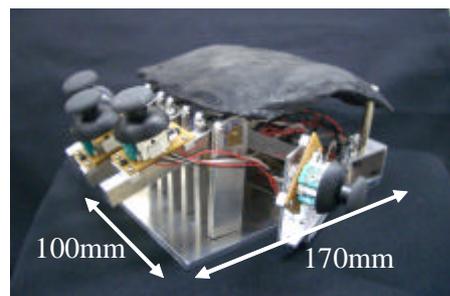


図4 Developed haptic device

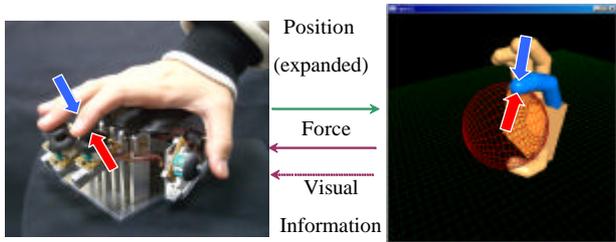


図5 VR system of using the developed device

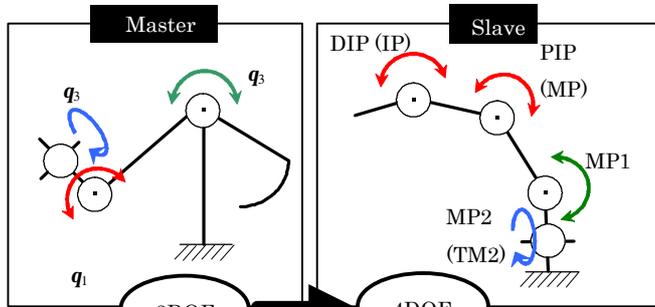


図6 Transformation of angular position

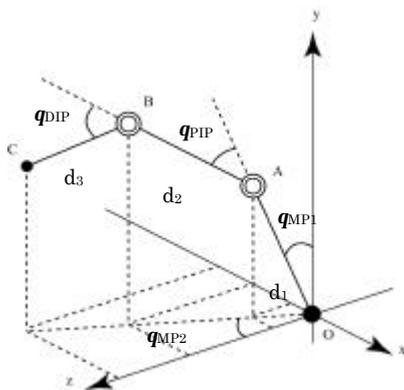


図7 One finger model of the virtual hand

モータによって発生するトルク T とモータ軸の半径 R およびメインリンクの長さ l_1, l_2 によって

$$F_{feedback} = T \cdot \frac{l_2}{R} \cdot \frac{1}{l_1} \quad (3)$$

のように表される。また、4指それぞれのパラメータ l_1, l_2 および支柱とリンクとの角度 θ を表1に示す。製作したデバイスを図4に示す。母指を除いた3指は同一平面上に設置し、母指の軸のみ90度ずらして設置した。また、手掌部が触れる部分にカバーを取り付けることで、疲労感を軽減し、機能肢位に近い状態での作業を実現する。

3. 評価実験

3.1 VRシステムの構築

製作したデバイスの評価を行うためにVRシステムを構築した。VRシステムは、図5に示すように製作したデバイスと仮想ハンド、仮想物体によって構成される。仮想ハンドの構造は、複雑な作業や直感的な操作を実現するためにヒトの手を模倣した。5指を有し、各指はヒトと同様に4DOFを有する。小指は環指と連動させ、各指の自由度は(1),(2)式によって近似することで満足する。図6は関節角度の変換を示している。本デバイスでは、マスタとスレ

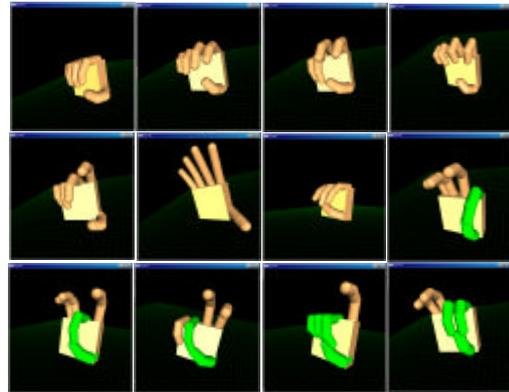


図8 Posture control of virtual hand

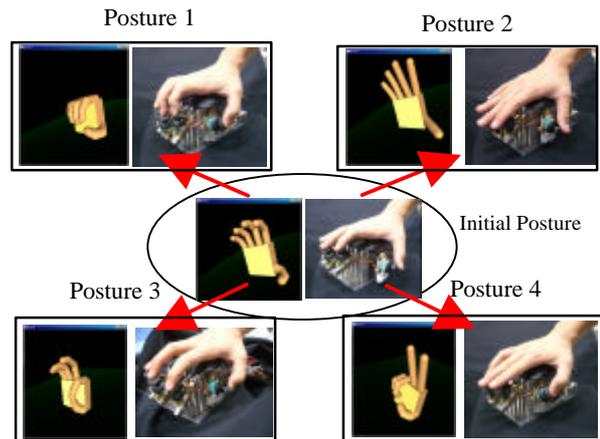


図9 Target postures

ーブの指先位置を合わせるのではなく、各関節角度を定数倍することによって仮想ハンドの関節角度指令値としている。 θ_3 はMP1(母指ではTM1)に伝達され、 θ_2 はMP2に伝達される。 θ_1 はPIPとDIPに伝達される。仮想ハンドの指先位置は(4)-(6)式にあるように運動学を解くことによって求めることができる。ただし、 d_1, d_2, d_3 は仮想ハンドのリンク長であり、図6に示す。

$$x = (d_1 \cos(q_1) + d_2 \cos(q_1 + q_2) + d_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3)) \cdot \sin(q_4) \quad (4)$$

$$y = (d_1 \cos(q_1) + d_2 \cos(q_1 + q_2) + d_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3)) \cdot \cos(q_4) \quad (5)$$

$$z = d_1 \sin(q_1) + d_2 \sin(q_1 + q_2) + d_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3) \quad (6)$$

3.2 姿勢制御実験

製作したデバイスでは、変位を拡大し、関節角度を連動させることによって仮想ハンドを動かしている。そこで、まず製作したデバイスによってどの程度の姿勢を制御できるかを調べる実験を行った。実際にデバイス进行操作し、仮想ハンドが所望の姿勢をとることができるか、様々な姿勢を制御した。その結果の中から把持・操りに関連する12の姿勢を抜粋し、図8に示す。この結果から、操作を実現できることが定性的に評価できた。

3.3 習熟に関する実験

次に、デバイスの操作性を評価するために、習熟に関する実験を行った。ハプティックデバイスは、操作者とVR空間とのインターフェースとなるため、操作性の良さが重要である。このため、習熟に関する実験を行い、デバイスの

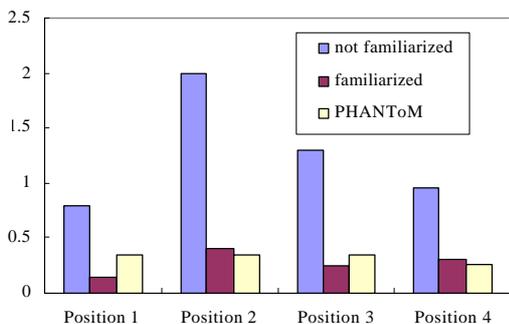


図 10 Result of familiarization test

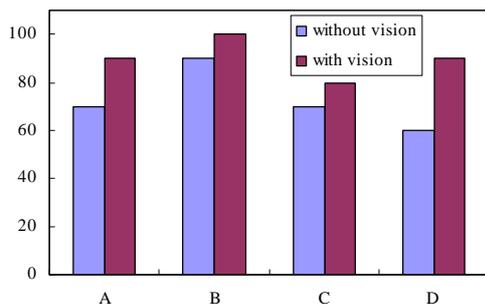


図 11 Result of stiffness distinction test

操作性を評価した。図 9 に示す 4 姿勢を目標姿勢とし、初期姿勢からそれぞれの姿勢に到達するまでの時間を測定することによって、デバイスにどの程度習熟しているかの評価を行った。姿勢決めを繰り返した後に、姿勢決めに要する時間が定常になった状態を習熟と定義した。その結果、習熟のために要した回数はほぼ 5 回程度であったため、すべての試行において 5 回の姿勢決めを行った。また、比較対照として、6 自由度を有するハプティックデバイスである PHANToM を利用した。PHANToM は 1 指に対して力覚提示を行う理想的なデバイスと考えられるので、PHANToM の結果を、製作したデバイスでの結果と比較することによって、客観的な指標を得ることができる。習熟前後の姿勢決めに要する時間を比較した実験結果を図 10 に示す。図 10 より、短期間の習熟によって PHANToM とほぼ同等の操作が実現できたことがわかる。

3.4 剛性判別実験

反力提示に関する実験として剛性判別実験を行った。仮想的な弾性体を構築し、剛性を変えた場合に操作者が知覚するかどうかを調べた。本実験では 4 人の被験者に対し、5 つの異なる剛性を有する仮想物体の判別をしてもらった。視覚がある場合とない場合で比較を行い、反力提示の正確性と視覚の重要性を確認した。実験結果を図 9 に示す。視覚がない場合は正答率 72.5% だったものが、視覚を伴うことで 90% にまで上昇した。この結果より、剛性を判別する上で視覚が重要であることを確認した。また、視覚を伴うことにより、本デバイスによって正確な反力提示が可能であることが示された。

4. 今後の課題

本研究ではマウス型多指ハプティックデバイスの開発を行った。評価実験によって、本デバイスで用いた設計方針の有効性が示せたので、今後は手指の動作だけでなく、手全体の動作を計測可能なデバイスへと発展させる予定である。また、今後は多指ロボットハンドとのマスタ・スレーブシステムへの応用などを考えている。

5. 結論

本稿では、マウス型多指ハプティックデバイスの設計および製作と仮想ハンドを用いた評価実験について述べた。変位を知覚する際の視覚の優位性を設計に適用することによって、簡単な機構ながらも操作性が高く、複雑な動作が可能なデバイスを開発した。その有効性について、VR システムを用いた 3 つの実験によって示した。

参考文献

- [1] <http://www.sensable.com/>
- [2] Makoto Sato, Yukihiro Hirata, Hiroshi Kawarada, Proposition of interspace interface SPIDAR, Collected Papers of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Vol. J74 -D-II, No.7, pp887-894, (1991)
- [3] 川崎晴久, 対向型多指触覚インタフェースの研究開発, 第 20 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1E36 (2002)
- [4] <http://www.immersion.com/>
- [5] <http://www.caip.rutgers.edu/~bouzit/lrp/glove.html>
- [6] I. A. Kapanji, 嶋田智明: 関節の生理学-I. 上肢- 医歯薬出版株式会社, 東京, pp.210-257, (1986)
- [7] M.Bouzid, G.Popescu, G.Burda and R.Boian: The Rutgers Master - IIND Force-Feedback Glove, IEEE VR2002 Haptics Symposium, Preprint, 2002J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68-73.
- [8] Somsak Walairaght, Keita Yamada, Shoichi Hasegawa: Two-Handed Multi-Fingers Virtual Object Manipulation Environment with Haptic Cues, The IEICE Transactions on information and systems, Vol. J84-D-II, No. 6, pp. 1140-1148, (2001)
- [9] M.A.Srinivasan, G.L.Beauregard, D.L.Brock, The Impact of Visual Information on the Haptic Perception of Stiffness in Virtual Environments, Proceedings of the ASME Dynamics Systems and Control Division, Vol. 58, pp. 555-559 (1996)
- [10] 大道武生, 樋口優, 大西献: 極限作業ロボットマニピュレータの設計法に関する研究(その 1) 繊細感覚多本指マニピュレータの設計法, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.4, pp.508-517, (1998)