指先装着型触覚ディスプレイによる仮想物体の特徴提示と操作支援*

池 井 寧^{*1}, 毛利之重^{*2}, 福田収一^{*1}Feature Representation and Manipulation Aid for a 3 D Virtual Object
by a Finger-Mounted Tactile DisplayYasushi IKEI^{*3}, Yukishige MOURI and Shuichi FUKUDA^{*3} Tokyo Metropolitan Institute of Technology, 6-6, Asahigaoka, Hino-shi Tokyo, 191-0065 Japan

The authors have developed a tactile display that is attached to the user's fingertip. The display presents the touch status between the user's finger and a virtual spatial object by a vibratory stimulus. The display is equipped with ten vibrating pins, which are contacted to the surface of an index fingertip or a thumb. By changing the pattern of vibration, the display presents the geometrical features of an object surface such as a vertex, an edge, and a plane. An experiment was performed to confirm the user's discrimination between the patterns. A pick-and-place model task in a virtual space was also performed to reveal the effort of the tactile presentation during virtual object manipulation. The results showed that the tactile presentation improved the task completion time and the positional accuracy of the manipulated object.

Key Words: Human Interface, Human Engineering, Tactile Display, 3-Dimensional Object's feature, Virtual Reality

1. 緒 言

機械の設計あるいは評価の環境において, 3次元仮想空間の技術が次第に導入されつつある. 設計対象のCADデータに基づいた3次元モデルを仮想空間に提示し, 形状・色彩や操作感などが評価できれば, 開発期間や試作コストの低減が可能となる. しかしながら, 現在の一般的な提示環境では, CRTディスプレイだけが用いられ, 操作性評価にとって重要な要因となる触覚を含んだ観点からの評価を行うことが出来ない. 従って, 触覚に対する情報提示を伴った仮想空間の提示法の開発が期待されている.

触覚を提示する人工現実感(Virtual Reality)技術では, 現在さまざまな形態に基づいた設計が提案されつつある⁽¹⁾⁻⁽³⁾. これらの触覚ディスプレイは, 主として物体の重量や反力の感覚を提示する力覚ディスプレイと, 物体表面への接触感や表面の形状・材質感を提示する狭義の触覚ディスプレイに分類することができる. 前者は, ユーザの指先への加重や, 指先の拘束状態を実現出来るが, 対象表面に接触した指先の面内の接触

状態を表現するには, 後者のディスプレイが必要である⁽⁴⁾⁻⁽⁵⁾.

本研究では, 仮想空間内のオブジェクト操作において, 後者の触覚ディスプレイを利用することにより, 対象の触覚的知覚を可能とし, オブジェクト操作を支援する方法を検討する. 触覚ディスプレイとしては, 空間オブジェクトとの接触感覚を指先に提示できる軽量小型の指先装着型を新たに開発した⁽⁶⁾⁻⁽⁷⁾. このディスプレイは, 振動刺激により, 空間オブジェクトの表面に対する接触と, 表面状態の差異を表現することが可能である. 以下では, まず本ディスプレイの構造について述べた後, 接触を表現するための振動パターンの識別実験に基づいて, その表現力を評価する. さらに, 空間オブジェクトの操作における触覚提示の効果に関して, オブジェクトのピックアンドブレースのモデル作業実験の結果を示す.

2. 指先装着型触覚ディスプレイ

指先装着型触覚ディスプレイの写真を図1に示す. 図中の上部, 右側寄りに, 10本の振動ピンの配列(ディスプレイ窓部)があり, ユーザはここに示指または拇指を当てて, 装着用ストラップでディスプレイを固定する. 振動ピンは, 3mmのピッチで, 縦5行×

* 原稿受付 1999年1月14日.

^{*1} 正員, 東京都立科学技術大学 (〒191-0065 日野市旭が丘6-6).^{*2} (株)アイネス (〒224-8507 横浜市都筑区牛久保3-9-2).

E-mail: ikei@tmit.ac.jp

横2列に配置されている。主要部分の構造を、図2に示す。構造部分は、光造形装置による光硬化樹脂で作成されており、サイズは $56.0 \times 23.5 \times 23.6$ mmである。光造形装置を利用することにより、アクチュエータの支持構造部分を小型・軽量に構成することが可能となった。全体の質量は、接続ケーブルを除いて、約30 gである。

振動ピンも、構造と同材質の光硬化樹脂製であり、先端は一辺の長さが 0.5 mmの正方形となっている。このピンの先端が、上面板の 1.5×1.5 mmの開口部と同一高さとなるように配置されている。10本の振動ピンは、バイモルフ型 piezoアクチュエータ（メガセラ社製）により、個別に駆動されている。このアクチュエータは、 16.0×5.0 mmの薄板状で、厚さは約0.6 mmである。ステンレスの薄板の両面に圧電セラミックスが接着されており、100 Vの矩形波を印加して加振する。

Fig. 1 A finger-mounted tactile display

Fig. 2 Structure of a finger-mounted tactile display

振動制御は、PC (Intel 486, 66MHz) によるデジタル出力で行う。このデジタル出力で与えられる矩形波のデューティ比を変化することにより、振動振幅を制御することができる。表1は、振動ピンの代表的な振幅を表している。表中の入力レベルは、デューティ比の系列である。振幅値は、無負荷状態の振動ピン先端の軌道をレーザ変位計で計測して得た結果のpeak-to-peak値である。この先端軌道は、凡そ正弦波状となっている。

Table 1 Pin amplitudes for input levels

Input Level	1	2	3	4	5
Amplitude [μ m]	8	15	23	29	35

3. 指先装着型触覚ディスプレイによる接触パターン表示

3.1 指先の接触状態の表示法 本ディスプレイは、対象物の表面の形状特徴や肌理などの状態を表示することを目的に開発されたディスプレイである。指先で感じ取ることのできる物体表面の状態とは、実際には極めて多様な物理特性を含んでいるが、その中でも、最も基本的で知覚が容易な要素は、対象表面の幾何的形状である。対象の幾何的形状の特徴を指先で識別できれば、対象物をマニピュレーションする際に、その状態をより正確に把握することが容易となり、仮想空間における作業能率の向上が期待できる。

対象物体の幾何的形状の中で、識別できれば有用と考えられる基本的な要素としては、対象の頂点、稜線、面などの表面状態がある。本研究では、これらの表面状態を近似的に伝達するため、触覚ディスプレイの表示パターンを表2のように割り当てた。これらは、指先における対象との接触状態に基づいて決めたものだが、これがそのまま、対象の実際の触感に近いとするには不十分であり、より厳密には規約であると解釈される。具体的には、頂点の表示に振動点を1点、稜線の表示に2点または5点、面の表示に6点を割り当てる。稜線については、指先との交差方向を表すように4通りを割り当てている。また、対象を把持した状態で、その対象が別のオブジェクトに衝突したことを表すために、ピン全部を振動させるパターン7を設定した。これは、空間オブジェクトのピックアップ・プレースや組み立て作業のような状況を表現する際に重要である。

Contact Status	Surface Feature	Pattern Number	Vibration Pattern	Contact Status	Surface Feature	Pattern Number	Vibration Pattern
Without Contact		0		Contacting	Edge	2
Contacting	Vertex	1				3
	Plane	6				4
Colliding		7				5

Vibrating
 Stopped

(4) 上記の各部に割り当てられた振動パターンを、表2に基づいて提示する。稜線の場合は、指先軸線と稜

Fig. 3 Inner segmentation of an object

本ディスプレイは、これを単独で装着した場合、仮想物体からの反力によって手指の運動が制限・拘束される効果については表示し得ない。したがって、空間オブジェクトが衝突後も動かないとすると、指はオブジェクトの中に入り込む状態となる。もちろん、オブジェクトを運動させて干渉を避ける設定も可能であるが、本稿では、後述の把持判定がなされるまで、オブジェクトは空間に固定される設定を仮定する。

表3は、被験者Aの親指に提示を行った場合の正答率を示している。この場合、十分に良好な識別率が達成されていることがわかる。他のデータの場合、似通った配置について混同が起こる場合も見られたが、それらは4人の被験者について、異なる組み合わせで起こっていた。全体的に被験者間での差は大きなものでなく、それらを平均すると図4で示されるような正答率となった。ランダムな回答であった場合の正答率(Chance rate)は、この場合17%である。実験に先立つ試行の確認時間は短時間であり、従って、この刺激に対する習熟の程度は、かなり低いものと考えられることから、この平均83%の正答率は十分に高いと判断して良いと思われる。

1 このでの習熟者と初心者との差は、振動による刺激提示を、机上型の触覚ディスプレイで、より長く経験したか否かの差である。机上型の触覚ディスプレイは、50本の振動ピンが5 x 10のマトリクス状に並んだ表示面を持ち、机上での2次元運動が入力となって仮想面上の触覚的フィードバックを提示する装置⁶⁾である。

Table 3 Correct answer ratios of Subject A at his thumb

Displayed pattern No.	Answered pattern No.					
	1	2	3	4	5	6
1	100%	0%	0%	0%	0%	0%
2	0%	80%	0%	0%	0%	20%
3	0%	0%	100%	0%	0%	0%
4	0%	0%	20%	80%	0%	0%
5	0%	0%	0%	0%	100%	0%
6	0%	10%	0%	0%	0%	90%

Fig. 4 Correct answer ratios averaged among subjects

4. 空間オブジェクトの操作支援

4.1 触覚ディスプレイによる操作支援実験 上で述べた触覚提示を、仮想物体の操作に適用した場合の効果について、実験的検討を行った。本実験で対象とした作業は、板状空間オブジェクトのピックアンドブレース作業である。このモデル作業を、触覚提示の有る場合と無い場合について行い、作業の実行時間と位置決め精度について調べた。

実験環境は次の通りである。ユーザは、Head Mounted Display (EyeGen3: Virtual Research Inc.)を装着し、運動視差および両眼視差の存在する立体視条件で作業環境を観察する。ユーザの手とほぼ同一のサイズの仮想ハンドは、図5に示すように、人差し指だけが根元から回転する近似形態を有する。3次元位置センサ (3SPACE FASTRAK, Polhemus Inc.)は、示指の指先と、手の甲、および頭部に設置され、それぞれ仮想ハンドの示指の回転角と、親指を含む基部の位置姿勢を与える。同センサの公称精度は、0.8mm、0.15°であり、全データの更新レートは、約10 Hzである。触覚ディスプレイは、ユーザの拇指および示指の指腹面に装着した。

触覚ディスプレイの表示は、前章で述べたように、

仮想ハンドの拇指先端指腹部と示指先端指腹部（物を指先で摘まむ際に、対象に接触する部分）に設置された合計2つの衝突検出点が、空間オブジェクトと干渉する態様に応じて行われる。この干渉形態は、表2に示した7種類に分類され、それぞれに対応する表示が行われる。領域区分の寸法は前述の通り、表面からそれぞれ10mmである。本モデル作業では、拇指と示指でオブジェクトを把持するが、この把持の判定は、2つの衝突検出点が同時に対象物体に接触した時点把持成立とした。把持後も、把持の際の衝突検出点（把持する指先）の位置に応じた触覚提示が継続する。

実験空間の概要を図6に示す。作業対象の空間オブジェクトは、100 x 50 x 30 mmの緑色直方体であり、100 x 30 mmの面の1つが赤色で表示されている。この空間オブジェクトを、奥行き方向に並行に設置された目標平面上（図6における#1～#4と書かれた平面）に設置するのが、モデル作業である。空間オブジェクトの初期提示位置は、実験空間の中央から各軸方向に±10cmの範囲でランダムな位置とした。また、初期姿勢角は、目標設置位置における姿勢角から±10度の範囲でランダムな姿勢角とした。

目標平面は、一辺300 mmの正方形形状であり、実験空間の中央から、上下左右、それぞれ200 mmの位置を中心として、奥行き方向に平行に、鉛直または水平に設置されている。目標平面は、4等分割されて交互に2色に描画され、中央位置が視認できる。視点位置は作業中に移動できるが、初期の眼球間中央位置は、実験空間中央から手前に35cmの位置である。ユーザは、中央に浮かぶ直方体の空間オブジェクトを、拇指と示指で把持して、提示された目標平面の中央に設置する。この際、赤色面を対象平面に当て、図7のように、長手方向を視線と垂直になるように設置する。設置は、

Fig. 5 The model of user's hand (A virtual hand)

Fig. 6 Spatial construction of an experimental space for a pick-and-place task

Fig. 7 A view of an experimental space observed by a subject in the case of the first target plane

把持された空間オブジェクトを開放することで行う。オブジェクトの開放は、示指を展開する運動により、ハンド基部（拇指側）に固定された空間オブジェクトから示指先端を分離した時点とする。その開放時点から、空間オブジェクトは、空間中に静止する。

実際の実験時には、4つの目標平面の内、1度に1つの平面だけが提示される。図7は、下方の目標平面#1が提示された場合で、直方体を設置している時の被験者の単眼の視野画像である。仮想ハンドも把持オブジェクトも、目標平面には拘束されないで、面と衝突（交差）した位置にも自由に侵入・設置できる。把持オブジェクトが、目標面に接触すると、触覚ディスプレイの表示は、パターン7となり、面への接触が触覚的に提示される。（パターン7の提示は、接触の状態を表すパターン1～6の提示が一定時間、定期的に行われた後に発生するので、明確に知覚可能なトリガを与える。）触覚提示を行わないモードでは、被験者は、

把持の際、および設置の際に、視覚的観測だけに基づいて作業を行った。

実験手順は次の通りである。空間オブジェクトを設置する目標平面は、#1、#2、#3、#4の順に変えて提示した。これらは、被験者が設置が終わると自動的に連続して提示される。この4回を1単位とすると、繰り返して10単位を連続して行い、40回の設置作業で1セッションとする。各被験者は、触覚提示なしで1セッション、触覚提示付きで1セッション、再び触覚提示なしで1セッション、最後に触覚提示付きで1セッションの設置実験を行った。被験者には、「速く、正確に設置する」ことを求めた。各セッションの切り替え時には、20分程度の休憩を与えた。また、実験前に、モデル作業に習熟してもらうため、触覚提示なしと触覚提示付きの作業を5単位ずつ行ってもらった。被験者は4名（A、B、C、D）であり、各被験者の習熟度については、被験者Bの練度が若干高いことを除けば、他の被験者については大きな差異はない。

4.2 実験結果 被験者として実験を行った著者らの主観的な評価は次のようである。HMDによる立体視で、対象の空間オブジェクトと目標平面は、立体的に視認できるが、設置直前の目標面のごく近傍では、目標面と空間オブジェクトの距離や接触状態を視覚で正確に観測することは困難であった。また、空間オブジェクトの把持においては、指先を奥行き方向に制御することになることと、示指がオブジェクトの裏側となることのため、視覚だけの判断は難しい課題であった。触覚提示によって、これらの判断は、著しく容易になったという印象が得られた。また、本実験では、把持位置による触覚提示の相違が表現されているが、把持する場所が、オブジェクトの中央から偏った時に、触覚的に確認することが可能であった。

4つの対象平面と繰り返しについて、計測データを平均した結果として、把持に要した時間を図8、把持後の設置に要した時間を図9、そして両者を合わせた作業完遂時間を図10に示す。これらの結果より、触覚提示を与えた場合の方が、実行時間がすべて短くなっていることが認められる。個人差の存在は、明らかであるので、作業への習熟が進んでいる被験者Bの完遂時間について見る。触覚提示が無い時は、平均6.6秒、触覚提示が有る時は、平均6.0秒であり、約1割短縮されている。分散も約半分となっている。分散分析による両者の比較では、 $F(1, 157)=16.9$, $P<0.01$ で、

Fig. 8 Mean elapsed times before the subject grasped a spatial object

Fig. 9 Mean elapsed times between the grasp of an object and the release on a target plane

Fig. 10 Mean elapsed times for the completion of a task

触覚提示の有無による完遂時間の平均値の差は、高度に有意である。

また、図 11 と図 12 は、被験者 A の位置決め時間（把持後、設置までの時間）と位置決め誤差を、それぞれ横軸縦軸にとった散布図である。位置決め誤差は、把持した空間オブジェクトの赤色面の 4 頂点の中で、設置目標平面の裏側向き法線方向に最も突出した点と対象面との距離を表している。触覚提示を与えた図 11 では、誤差の平均は、ほぼゼロであるのに対して、触覚提示のない図 12 では、 -5.13 mm となり、目標平面に埋没した位置に設置されていることが分かる。また、触覚提示が与えられた場合の方が、ばらつきが

Fig. 11 Fixing times and position errors under the tactualy feedback condition for Subject A

Fig. 12 Fixing times and position errors under no tactual feedback condition for Subject A

Table 4 The number of failures in the task

Subject	A	B	C	D
WITH tactile feedback	0	0	3	4
WITHOUT tactile feedback	3	1	12	7

小さいこともわかる。

更に、表 4 に本モデル作業における失敗回数を示す。作業における失敗とは、把持の際に 2 本の指で掴むことが短時間に出来ずに、極端に時間がかかってしまったり、設置途中で誤って開放してしまった場合である。習熟者 A, B, 非習熟者 C, D 共に、触覚提示を与えると、作業の失敗回数が低減している。この結果からも、触覚提示が有効であることが分かる。

5. 結 言

著者らが開発している指先装着型触覚ディスプレイに関して、その構成と基本的表示機能、および応用における評価実験の結果を述べた。

本ディスプレイは、小型化のために表示ピン数が10本に制限されているが、空間オブジェクトの基本的な表面形状に応じて、異なる触覚情報を提示することが可能であることが示された。さらに本ディスプレイを用いて、仮想空間のオブジェクト操作に関するモデル作業であるピックアンドブレースの実験を行った結果、触覚提示による作業時間の短縮、および作業精度の向上が実現されることが示された。実空間におけるオブジェクト操作では、視覚情報と触覚情報を併用して行なうため、仮想空間においても触覚情報の提示を行うことによって、操作の容易性が向上したと考えられる。被験者の主観的な評価としては、作業時間の短縮の割合以上に、作業の容易性が改善したと感じられる効果があり、触覚提示が操作の支援手段として有効であることが分かった。

3次元仮想空間を利用する際のインタフェースとしては、現実空間との類似性を反映する一方で、新しいインタラクションの形態を導入することが望ましい。本ディスプレイの提示方式は、空間オブジェクトに対するインタラクションにおいて、一部の情報だけを体性感覚にフィードバックするものである。以上の議論において本手法の有効性を確認することが出来たが、このような方法以外にも、触覚情報の提示形態に選択肢を求めることは可能であり、今後、より多くの環境設定や対象作業の中で評価していく必要があるであろう。そうした評価に加えて、今後の課題としては、更に小型で表示ピン数の多い触覚ディスプレイの設計が含まれる。

文 献

- (1) G. C. Burdea, Force and Touch Feedback for Virtual Reality, (1996), John Wiley & Sons.
- (2) K. B. Shimoga, A Survey of Perceptual Feedback Issues in Dexterous Telemanipulation: Part I. Finger Force Feedback, Proc. VRAIS '93, IEEE, (1993), 263.
- (3) K. B. Shimoga, A Survey of Perceptual Feedback Issues in Dexterous Telemanipulation: Part II. Finger Touch Feedback, Proc. VRAIS '93, IEEE, (1993), 271.
- (4) Yasushi Ikei, Shuichi Fukuda, Tactile Display

Presenting A Surface Texture Sensation, Transactions of Information Processing Society of Japan, 37-3, (1996), 345.

(5) Yasushi Ikei, Kazufumi Wakamatsu, Shuichi Fukuda, Texture Presentation by Vibratory Tactile Display: Image based presentation of a tactile texture, Proc. VRAIS '97, IEEE, (1997-3), 199.

(6) 池井 寧, 毛利之重, 福田収一, 触覚ディスプレイによる3次元表面の提示法, 日本機械学会第5回設計工学システム部門講演会論文集, (1995-7), 139.

(7) 池井 寧, 毛利之重, 福田収一, 仮想空間における対象操作と触覚提示に関する研究, 情報処理学会第52回全国大会論文集, 2, (1996-3), 297.