

# 電気式皮膚感覚と力覚の統合による形状感覚提示

佐藤 克成<sup>\*1</sup> 梶本 裕之<sup>\*2</sup> 川上 直樹<sup>\*1</sup> 館 瞳<sup>\*1</sup>

## Presentation of Shape Sensation by Electrotactile-Kinesthetic Integration

Katsunari Sato, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami and Susumu Tachi

**Abstract —** The haptic interface that presents shape sensations of an object is desired to operate virtual or remote objects smoothly. To present shape sensations, we propose integration of electrotactile and kinesthetic sensations. It will be realized mounting an electrotactile display on a conventional kinesthetic display. The electrotactile display can make us perceive exact shape sensations of an object clearly. On the other hand, the kinesthetic display presents global shape sensations of an object. Therefore, we assume that electrotactile–kinesthetic integration makes us perceive intuitive shape sensations of objects. We have evaluated the efficiency by shape recognition experiments. The result inclined that the efficiency of shape recognition was improved by integration. Further, it is suggested that presentation of shape sensation by kinesthetic display can be simplified.

**Keywords:** Haptic interface, Electrotactile display, Kinesthetic display, Shape recognition

### 1. はじめに

バーチャルリアリティやテレイグジスタンス技術は、バーチャル環境内や遠隔地の物体との臨場感の高いインタラクションを可能にする。これらの技術においては、触覚のフィードバックを付加することで、物体を扱う作業が容易になる。触覚は、その情報が機械受容器により取得される皮膚感覚と、固有受容器により取得される力覚とに大別される。これら2種類のうち力覚を提示するデバイス（力覚提示装置）として、これまで CyberGrasp (Immersion Tec.) や PHANTOM (SensAble Tec.) などが開発されてきた [1]。これらは物体接触時の反力を再現し、視覚や聴覚だけを提示した場合よりも作業効率を向上させることができるものである。

近年ではより高い操作性を実現するために、直感的な形状感覚を提示する触覚インターフェースへの要求が高まっている。例えば、CADを使った作業で複雑な形状の機械部品を扱う場合、指先で形状を感じることで円滑な操作が可能になると考えられる。力覚提示装置では、触れた物体の大きさや勾配など、大まかな形状を知覚させることができる。しかし、接触面の圧力分布は提示できないため、物体表面の数mm大の凹凸やエッジなど、詳細な形状の感覚を提示することは非常に困難である [2]。

詳細な形状感覚は、エッジ感や部分的な圧覚などの皮膚感覚によって知覚される。そのため、形状感覚を提示するには、力覚提示装置に皮膚感覚の提示装置を搭載する必要がある。力覚提示装置に皮膚感覚提示装置を搭載した研究は、これまでにもいくつか存在する [3][4][5][6]。しかし、形状感覚を提示する触覚インターフェースを実現するためには、いくつかの問題点がある。まず、皮

膚感覚提示装置として、手のどの位置にどの程度の広さで触れたか、という明確な接触感覚を提示しなければならない。また、力覚提示装置はその操作性も重要となるため、皮膚感覚提示装置の大きさが問題になる。大型なシステムは作業の妨げになる恐れがある。さらに、皮膚感覚提示装置の重量も問題になる。皮膚感覚提示装置を支えるための余分なトルク出力が必要になると、力覚提示装置の力の提示精度が低下する可能性がある。

これらの問題を解決するために、著者らは電気式の皮膚感覚提示装置（以下、電気刺激装置）を用いることを考えた。著者らの開発した電気刺激装置 [7] は、局所的に強い皮膚感覚を与え、詳細な形状感覚を提示できる。さらに、小型で軽量であるため、操作性やトルクの問題が生じない。これを力覚提示装置に搭載することで、力覚提示装置が本来持つ操作性を保ったまま、直感的な形状感覚を提示できると考えられる。

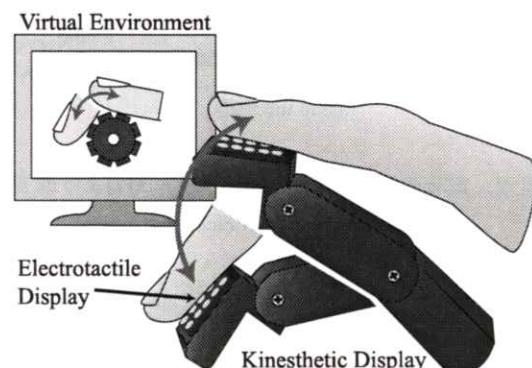


図 1. 電気刺激と力覚を統合して提示する触覚インターフェースの実装例

Fig. 1 An example of the haptic interface that integrates and presents both electrotactile and kinesthetic sensations.

\*<sup>1</sup>東京大学大学院 情報理工学系研究科

\*<sup>2</sup>電気通信大学 人間コミュニケーション学科

本論文では、形状感覚を直感的に提示できる触覚インターフェースを実現するために、電気式の皮膚感覚（以下、電気刺激）と力覚の統合提示を提案する（図 1）。2 章では、電気刺激と力覚、さらにそれらの統合による形状感覚提示を説明する。3 章では、触覚提示による形状知覚の効果を実験により検証し、4 章で考察を行う。

## 2. 電気刺激と力覚の統合

電気刺激装置の皮膚感覚提示部は電極ピンマトリクスから構成される。それぞれの電極から皮膚内部に電流を流し、受容器につながる神経を直接刺激することで皮膚感覚を提示する（図 2）。各受容器につながる神経を選択的に刺激することができ、任意の周波数で圧覚と振動覚を提示できる。その空間分解能は電極間隔に依存するが、2.5 mm 間隔で配置した場合、4 mm 幅の線分に対し 0.5 mm の違いを認識しうることが示されている [7]。明確なエッジ感を提示できるため、SmartTouch [8] や Forehead Retina System [9] などのアプリケーションに使用されている。

このような特性から、電気刺激では、皮膚感覚を用いることで、エッジ感や部分的な接触感覚など、詳細で局所的な形状感覚を提示できる。しかし、自己受容感覚を用いない状態での電気刺激による接触感提示のみでは、触れている物体表面がどの位置に存在するのか、どの程度の範囲に広がっているのかを正確に知ることが困難である。そのため、平面と曲率半径の小さい曲面の違いなど、広い範囲で変化する形状の提示には不向きであると考えられる。

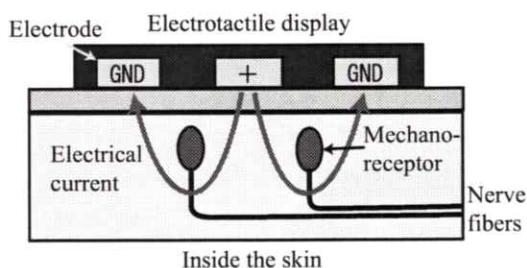


図 2. 電気刺激による皮膚感覚提示 ([7]より改変)

Fig. 2 Presentation of electro stimulus

一方、力覚提示装置は、物体の表面に触れたときに生じる反力、力覚を提示することで主に物体の硬さを知覚させる。その結果、操作者は物体表面を安定して触ることやなぞることが可能になる。そのため、自己受容感覚により物体の形状や大きさを知覚できる。

すなわち力覚提示では、電気刺激では提示できない大まかな物体形状を提示できる。また、能動的になぞることで、時間はかかるものの、エッジと曲面の区別をつけ

ることも可能になる。しかし、能動性を用いない場合には、皮膚感覚を用いることができないため、通常皮膚感覚で感じられる程度の接触面内の形状の違いを提示することは困難である。

以上のように、電気刺激と力覚では提示に適した形状特徴の範囲が存在する。これら 2 つを統合して提示すると、力覚により大まかな形状を確認すると同時に、電気刺激で詳細な形状特徴を感じられる。これらにより、さまざまな物体形状を直感的に知覚できるようになると考えられる。例えば、バーチャル世界の歯車に触れた場合、力覚提示により反力を受けて表面をなぞると、円柱に触れている感覚が得られる。同時に、電気刺激によって歯の凹凸部分を感じることができる。これらの感覚を統合して、歯車の形状を触覚により知覚できる（図 3）。

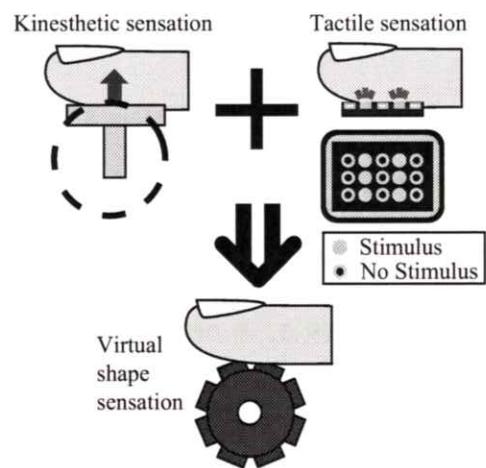


図 3. 電気刺激と力覚の統合による形状知覚

Fig. 3 Shape recognition by electrotactile-kinesthetic integration

また、統合提示によって、力覚による形状提示を簡略化できる可能性がある。すなわち、力覚による一種類の形状提示に対して、電気刺激の提示方法を変えることできまざまな形状感覚を提示することができる。例えば、力覚で曲面を提示しても、電気刺激によってエッジに知覚させることができるとなる。力覚提示には 1 kHz 以上の更新レートが求められるため、物体形状が複雑になればなるほど形状感覚の提示が困難になる。しかし、電気刺激を統合することで、力覚による自己受容感覚への形状感覚提示の精度が不十分でも、皮膚感覚と合わせて形状感覚を正確に提示できるようになる。

## 3. 実験

電気刺激は詳細な形状感覚を皮膚感覚により提示し、力覚は大まかな形状を自己受容感覚により提示する。これらを統合することにより、皮膚感覚における細かな形

状感覚と自己受容間隔における大まかな形状感覚を合わせた、さまざまな形状感覚の直感的な提示が可能になると考えられる。この仮説を検証するために形状識別の実験を行った。

### 3.1 実験環境

被験者は20代の健康な大学院生5人とした。実験を円滑に進めるために、各被験者には事前に実験内容の説明を行った。

実験環境の全体像を図4に示す。被験者には目隠しをし、視覚情報を遮断した。また、聞き手の人差し指に、電気刺激装置の電極板を搭載したプラスチック製の指サック（図5、右）を装着させた。被験者には、この状態で実際の物体に能動的に触れさせ、その形状を答えさせた。指サックをしているため、被験者は力覚と電気刺激だけを感じる。指サックは位置計測装置の先端に取り付けた。位置計測装置としては、6軸リンク機構の装置であるADL-1（Shooting Star, Inc.）を用いた。さらに、リンクの接続部にジグを取り付けることで、その運動方向を地面に対して水平な2次元平面（図4のXY平面）に限定した。

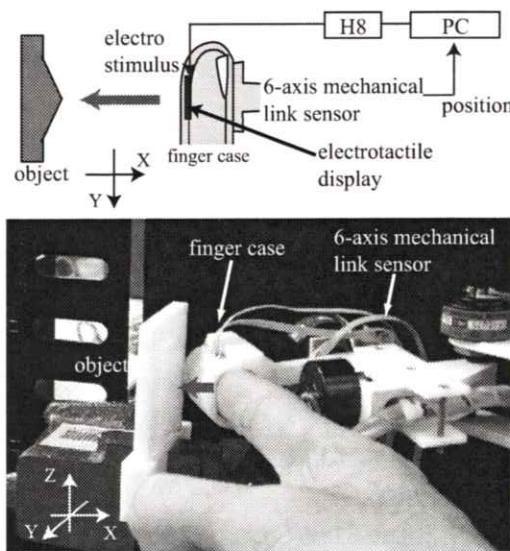


図4. 実験環境（上）上面図、（下）概観  
Fig. 4 An experimental environment (Above) top figure, (Below) overview.

実験で用いた電気刺激装置の電極板は、 $3 \times 5$  のピンマトリクス電極から構成される（図5、左）。電極ピンの半径は1.25 mm、中心間距離は2.5 mmである。刺激の周波数は60 Hz、パルス幅は40 nsである。刺激の制御はマイコンチップH8を用いて行った。マイコンチップとの通信レートは60 Hzである。電気刺激は、それぞれの電極ピンによる刺激を時間的に走査していくことで行われる。ある瞬間に1つの電極を陽極、それ以外をグランドに

設定する。そして、陽極となる電極を500  $\mu$ sごとに変化させていくことで面状の刺激を実現する。刺激の強さ（電流値）は、刺激をはつきりと感じざるに痛みを感じない強度（1.25~2.75 mA）に、被験者ごとに設定させた。

本実験環境では、力覚は実際に物体を触らせることで提示した。電気刺激は、計測された指先位置に基づき、指先と物体の接触位置に対応した電極ピンによりON/OFFの二値で刺激を行った。具体的には、それぞれの電極を囲む1辺2.5 mmの正方形領域が、物体内部に侵入したと判断された場合に、その領域の中心にある電極で刺激が行われる。例えば、指先中央で曲面に触れたときは、中央の3列分の領域が曲面に侵入したと判断され、それらに対応したピンから刺激が与えられる（図6）。同様に、エッジに触れたときはエッジとの接触した正方形領域に対応する電極から、平面に触れたときは平面と接触した正方形領域に対応する電極から刺激が与えられる。そのため、エッジが電極と電極の中間に存在する場合は、より近い位置の電極で刺激が行われる。位置計測は、0.1 mmの分解能で行った。なお、今回は物体との接触圧を電気刺激によって再現することは行っていない。

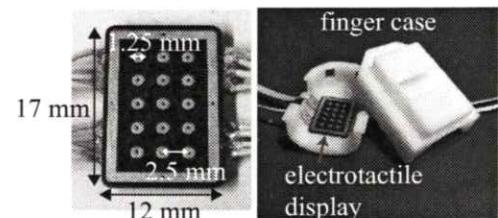


図5. (左) 実験に用いた電気刺激装置電極板、(右) 電極板入り指サック  
Fig. 5 (Left) Electrodes for electrotactile display, (Right) Finger case.

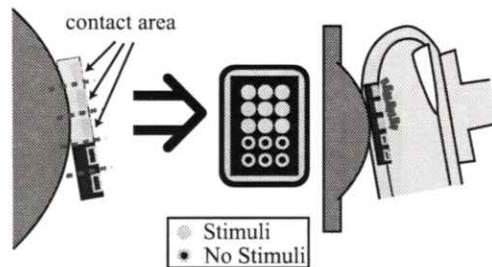


図6. 接触面に応じた電気刺激  
Fig. 6 An electro stimulus corresponding to touch field.

### 3.2 実験1—統合による形状知覚

電気刺激、力覚、そしてそれらを統合した提示を行った場合で、形状特徴の識別実験を行った。その正答率および回答時間を比較し、統合によって直感的な形状提示を行っているかを検証した。

### 3.2.1 実験内容

本実験系では、被験者の指先移動は2次元平面状に限定した。そのため、形状特徴のうち線の曲率半径に着目した場合、物体形状としては曲率0と曲率 $\infty$ 、それらの中間という特徴的な3種類が考えられる。そこで、平面（曲率 $0 \text{ mm}^{-1}$ ）と曲面（曲率 $0.05 \text{ mm}^{-1}$ ）、エッジ（曲率 $\infty \text{ mm}^{-1}$ ）を用いて識別実験を行った（図7）。物体のサイズは指先の大きさと同程度とした。

提示する触覚と形状知覚の関係を調べるために、実験は電気刺激だけを提示する場合、力覚だけを提示する場合、さらにそれらを統合して提示する場合の3通りで行った。電気刺激だけを提示する場合は、被験者には実際に物体を触れさせずに、物体が提示される場所の周辺で触れているような動作を行わせた。また、物体を触る際に指を動かすか否かは、形状識別の結果に影響を及ぼす[10]。そのため、それぞれの触覚の提示条件に対し、物体の触り方は押しとなぞりの2通りとした（図8）。すなわち実験条件を

- S-1. 電気刺激だけを提示して押す
- S-2. 力覚だけを提示して押す
- S-3. 統合提示して押す
- S-4. 電気刺激だけを提示してなぞる
- S-5. 力覚だけを提示してなぞる
- S-6. 統合提示してなぞる

の6通りとした。

実験1セットあたり、それぞれの条件下で3種類の物体をランダムに5回ずつ提示した。実験はそれぞれの被験者が3セットずつ行った。回答結果のほかに、物体に触れてから回答にかかった時間を計測した。実験後の主観的評価も合わせて調査した。

また、実験動作の練習として、各被験者には1セット目の開始前にそれぞれの条件下で物体に触れて回答する、という動作を5回ずつ行わせた。

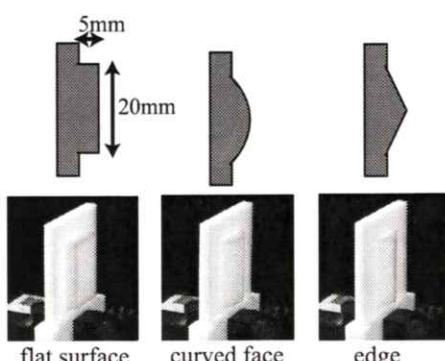


図7. 提示する物体形状 (上) 尺寸図 (下) 写真  
Fig. 7 Shapes of objects that participants touched  
(Above) Dimensions, (Below) pictures.

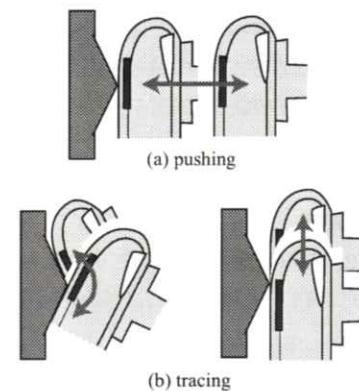


図8. 物体の触り方 (a) 押し, (b) なぞり

Fig. 8 Two modes of touching object.

### 3.2.2 結果

それぞれの条件での正答率を図9に、平均識別時間を図10に示す。横軸の数字は上で述べた実験条件の番号に対応する。各プロットは、それぞれの条件における5人の被験者A~Eの結果を、棒グラフは被験者間の平均を、エラーバーは標準偏差を示す。

統合提示した場合は、力覚だけを提示した場合よりも正答率が高く、分散分析による検定において有意差が見られる ( $F(1, 19) = 43.9, p < .05$ )。一方で、統合提示の場合と電気刺激だけを提示した場合では有意差は見られない ( $F(1, 19) = 2.2, p < .05$ )。また、触覚提示が同様の場合、押よりもなでたほうが正答率は高く ( $F(1, 29) = 31.2, p < .05$ )、識別時間は長い ( $F(1, 29) = 9.4, p < .05$ )。

### 3.3 実験2—電気刺激による形状提示

電気刺激を統合することで、力覚による形状提示を簡略化できる可能性がある。これを検証するために、大まかな形状が似た物体を触れた場合に、実際と異なる形状の電気刺激を与えて識別実験を行った。

#### 3.3.1 方法

被験者が触れる物体として、実験1で用いた曲面とエッジを用いた。これらの表面をなでるように触れさせた（図8, b）。物体を触るとときの触覚提示の条件としては、

- S-1. 曲面の電気刺激を受けて曲面に触る
- S-2. エッジの電気刺激を受けて曲面に触る
- S-3. 曲面の電気刺激を受けてエッジに触る
- S-4. エッジの電気刺激を受けてエッジに触る

の4通りとした。これらをランダムに1セットあたり5回ずつ提示した。被験者には触れた物体が曲面かエッジかを答えさせた。回答時間は10秒以内とした。各被験者が2セットずつ実験を行った。各被験者に対して、実験動作の練習として、それぞれの実験環境で物体に触れて回答する、という動作を実験前に5回ずつ行わせた。

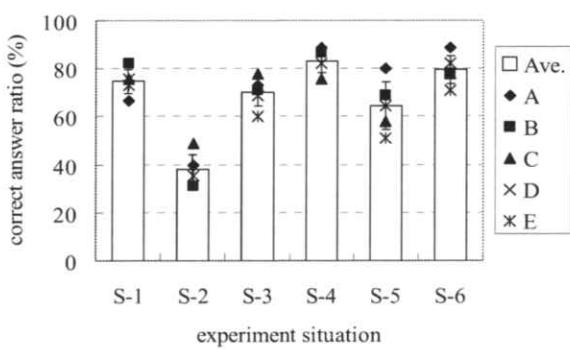


図 9. 実験 1 : 各条件における正答率

Fig. 9 Exp. 1: Correct answer ratio by pushing.

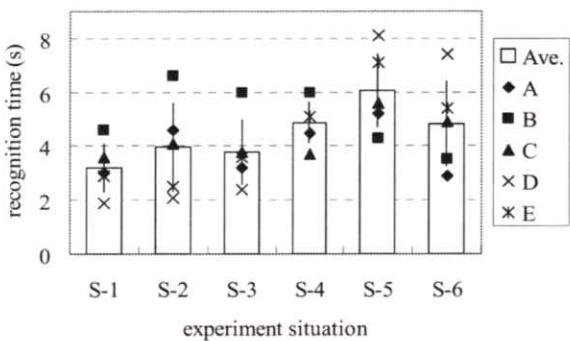


図 10. 実験 1 : 各条件における平均識別時間

Fig. 10 Exp1: Average recognition time by pushing.

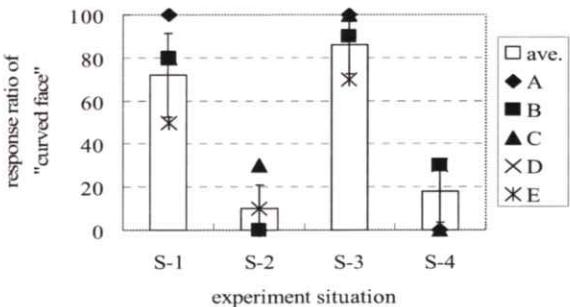


図 11. 実験 2 :「曲面」と答えた割合

Fig. 11 Exp. 2: response ratio of "curved face".

### 3.3.2 結果

実験結果を図 11 に示す。縦軸は、それぞれの条件における、「曲面」と回答した割合を示す。横軸の数字は上で述べた触覚提示の条件の数字と一致する。A～Eの各プロットはそれぞれの被験者ごとの平均値を、棒グラフは被験者全体の平均値を、エラーバーは標準偏差を表す。

S-1 と S-3 では「曲面」、S-2 と S-4 では「エッジ」と答える割合が高い。分散分析による検定を行うと、触覚提示の条件に関して有意差が見られるが ( $F(1, 19) = 75.4, p < .05$ )、触れる物体による有意差は見られない ( $F(1, 19) = 2.2, p < .05$ )。

### 4. 考察

実験 1においては、力覚だけの場合よりも電気刺激を統合した場合のほうが、識別の正答率は高くなっている。これから、電気刺激を力覚提示装置に統合することで、形状識別の正答率は向上する傾向を確認できた。また、実験後の被験者の意見として、「統合提示の場合は自然な触感を感じられた」というものがあった。このことからも、電気刺激と力覚提示を統合して提示することで、直感的な形状提示を行えたと考えられる。

一方で、電気刺激だけを提示した場合では、統合提示に比べた正答率に有意差は見られない。すなわち、電気式皮膚感覚による形状提示が統合提示と同様に有効であったと考えられる。しかし、「電気刺激だけの場合は物体に触っている感じがせず、記号的な感覚から形状を判断した」という被験者の意見があった。そのため、統合提示の場合も電気刺激による皮膚感覚を基に物体形状を答えた可能性が考えられる。また、本実験では形状特徴が3種類と少なく、電気刺激だけでも識別が容易に行えた、ということも考えられる。これに関しては、曲率半径を変えるなどして形状特徴の種類を増やした実験を行い、再考察する必要がある。

指を押し当てた場合の結果を見ると、力覚だけの場合は正答率が40%以下である。これは、力覚提示による形状知覚は、物体表面をなぞらなければ不可能なためである。しかし、電気刺激を統合することで正答率は30ポイントほど上昇している。すなわち、電気刺激と力覚の統合は、物体をつかむときのような、能動性を用いた場合の形状知覚において特に有効であると考えられる。

物体を押した場合となぞった場合を比べると、同様の触覚提示を行った場合では、なぞったほうが正答率が高い。これは、指を動かしたほうが触覚の精度が良くなるという、『アクティブタッチ』[10]の知見に一致する結果である。一方で、識別時間に関しては、なぞった場合に全体的に長くなっている。被験者からは、「押した場合は形状がわからなく直感で答えることが多かったが、なぞった場合は形状がわかった」という意見があった。そのためなぞった場合は、形状を正確に判断するために識別時間が長くかかったと考えられる。

実験 1 の結果より、物体をなぞった場合は力覚だけでも 60%以上の正答率となっている。これから、力覚提示だけでも形状識別が可能になることが伺える。しかし、実験 2 の結果より、触れた物体の形状と電気刺激により提示される形状が異なる場合、被験者は電気刺激を基に回答する傾向にあった。これは、電気刺激を統合することによって、力覚による厳密な形状提示の必要がなくなる可能性を支持する結果である。また、形状識別における電気刺激の有効性を示している。

## 5. おわりに

本稿では、形状感覚を提示できる触覚インターフェースを実現するために、電気刺激と力覚の統合提示を提案した。電気刺激は皮膚感覚を通じて詳細な形状感覚を、力覚は自己受容感覚を通じて大まかな形状感覚を提示する。これら2つの触覚を統合して提示することにより、さまざまな物体形状の直感的な提示が可能になると考えられる。この仮説を形状の識別実験により確認した。

電気刺激装置は小型・軽量であるため、力覚との統合の際に実装上の利点も存在する。力覚提示装置に搭載した際に、その操作性を損なうことがない。また、力覚提示装置に余分なトルク出力が必要ないため、力覚提示の妨げにならない。さらに、さまざまな力覚提示装置の指先接触部へ容易に搭載できる。

これらの実装上の利点に加え、電気刺激を力覚提示装置に搭載することで、それぞれのデバイスに利点が生じると考えられる。まず本稿で示したとおり、電気刺激を統合することで、力覚による厳密な形状提示の必要がなくなると考えられる。また、黒木ら[11]の知見から、力覚提示装置によって振動を起こすことで、電気刺激装置が出力する電流値を減少できると考えられる。今後は、これらの電気刺激と力覚の統合提示の付加的な効果を検討していく。

## 参考文献

- [1] Burdea, G C.: Haptic Feedback for Virtual Reality; Virtual Reality and Prototyping Workshop (1999)
- [2] Sjöström, C.: Using haptics in computer interfaces for blindpeople; In CHI '01 extended abstracts on Human factors in computing systems, pp. 245-246 (2001).
- [3] Fritschl, M., Ernst, M.O., Buss, M.: Integration of Kinesthetic and Tactile Display - A Modular Design Concept; In Proceedings of the EuroHaptics, pp. 607-612 (2006).
- [4] Ikeno, Y., Shiratori, M.: TextureExplorer: a tactile and force display for virtual textures; In Proceedings of Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 327-334 (2002).
- [5] Kim, Y., Oakley, I., Ryu, J.: Combining Point Force Haptic and Pneumatic Tactile Displays; In Proceedings of the EuroHaptics, pp. 309-316 (2006).
- [6] Wagner, C.R., Perrin, D.P., Feller, R.L., Howe, R.D., Clatz, O., Delingette, H., Ayache, N.: Integrating Tactile and Force Feedback with Finite Element Models; In IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1-10 (2005).
- [7] 梶本裕之, 稲見昌彦, 川上直樹, 館暉: 電気触覚を用いた皮膚感覚のオーグメンティドリアリティ; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 3, pp. 339-348 (2003).
- [8] Kajimoto, H., Kawakami, N., Maeda, T., Tachi, S.: Electro-Tactile Display with Tactile Primary Color Approach; In Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (2004).
- [9] Kajimoto, H., Kanno, Y., Tachi, S.: Forehead Electro-tactile Display for Vision Substitution; In Proceedings of the EuroHaptics, pp. 75-79 (2006).
- [10] Jones, L. A., Lennerman, S. J.: HUMAN HAND FUNCTION; Oxford University Press (2006).
- [11] 黒木忍, 梶本裕之, 川上直樹, 館暉: 経皮電気刺激及び機械刺激を併せた触覚提示の提案; 日本バーチャルリアリティ学会第11回大会論文集, pp. 390-393, (2006).

(2007年1月31日受付, 6月6日再受付)

## 著者紹介

### 佐藤 克成

2006年東北大学工学部電子・応物・情報学科卒業。同年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程入学。現在に至る。



### 梶本 裕之 (正会員)

1998年東京大学工学部計数工学科卒業。2001年同大学院修士課程修了。同大助手を経て、現在電気通信大学人間コミュニケーション学科助教授。博士(情報理工学)。触覚ディスプレイ、触覚センサ、人工現実感システムなどの研究に従事。日本インターフェース学会会員。

### 川上 直樹

1996年東京工大・理工・電気電子修士課程修了。1999年東大・工・先端学際工学博士課程修了。工学博士。同年同大学院・工・計数工助手。2002年同大学院・情報理工・システム情報学講師。現在に至る。バーチャルリアリティの研究に従事。

### 館 晖 (正会員)

1968年東京大学・工・計数工卒。1973年同大学院博士課程修了。1975年通産省工技院機械技術研究員、マサチューセッツ工科大学客員研究員を経て1989年東京大学先端科学技術センター助教授、1992年同センター教授。1994年同大学院情報理工・システム情報教授。テレイグジスタンス、人工現実感の研究に従事。IEEE/EMBS学会賞、通産大臣賞、国際計測連合(IMECO)など受賞。IMEKOロボティクス会議議長、SICEフェロー、日本バーチャルリアリティ学界初代会長。

