

電気触覚ディスプレイを用いた円筒形マスタハンドの設計

○梶本 裕之（電気通信大学／科学技術振興機構 さきがけ）

Design of Cylindrical Master Hand using Electrocutaneous Display

○Hiroyuki KAJIMOTO (The University of Electro-Communications, JST PRESTO)

Abstract: Precise manual work is frequently required in remote and virtual environment, such as tele-surgeries and VR training systems. Tactile feedback to the whole hand is one of the key elements to achieve this goal, but most haptic I/O systems for hand could present haptic sensation only to the tip of the fingers, due to the size limitation of the tactile display. We propose to use electrocutaneous display to construct the whole hand tactile feedback system. The electrocutaneous display can be made very thin while dense tactile presentation is possible

1. 序論

遠隔医療やロボットレスキュー等、遠隔操作環境において繊細な手先作業が必要な場面は数多い。これを可能とするには、手掌部に適切な触刺激をフィードバックする必要があると考えられる。

現在こうした作業に用いられるハプティックインタフェースの多くは、手術用具などの把持する道具の挙動を再現することで触覚を提示している。こうした道具把持型のハプティックインタフェースは遠隔操作における現実的な解であるが、あらかじめ使用する道具がわかっている場合にしか対応できず、装置も専用のものとならざるを得ない。

これに対して手掌部用入出力装置、いわゆるマスタハンドは、個々の指に対する入出力を実現するため理想的にはあらゆる状況に対応できると考えられる。マスタハンドに必要な機能は次の3点にまとめられる。

1. (姿勢計測) 手掌部の姿勢を計測できること。
2. (力覚提示) 手掌部各所に力覚が提示されること。多くの場合皮膚感覚も付随的に提示される。
3. (皮膚感覚分布提示) 手掌部各所に皮膚感覚が分布的に提示されること。

1.1. 先行研究

グローブ型の手掌部形状計測装置、いわゆるデータグローブは、1. (姿勢計測) のみ実現したものである。

またモーションキャプチャ技術の発展に伴い、現在ではグローブを装着すること無く手掌部の姿勢を計測できるシステムが数多く存在する。しかしこれらは入力装置として用いることはできるが、触覚的手がかりがないため単独では実作業に適さない。

CyberTouch [1]は触覚的手がかりを与えるためにデータグローブに振動モータを取り付けた例であるが、これは皮膚感覚提示が目的というよりは2. (力覚提示) を擬似的、簡便に行うものである。接触のタイミングを伝えることが可能となるが、指が空中で止まらない事自体は変わらないため作業性の向上は限定的であると考えられる。

2. (力覚提示) を実現するマスタハンドはこれまでに数多く提案されてきた。CyberGrasp [2]は5本の指先全てに反力を提示することができる。Rutgars Master [3]は機構を掌側に配置することで小型化を図っている。HIRO [4]はロボットハンドをユーザの手に対向させる形で実現したマスタハンドである。中河原ら[5]は装置の装着感を減じた遭遇型マスタハンドを提案し、さらに佐藤ら[6]は同じ遭遇型マスタハンドに電気触覚ディスプレイを取り付けることで3. (皮膚感覚分布提示) も可能としている。

しかしこうした試みのほとんどは指の末節のみを対象としており、手掌部全体を用いる多くの実作業への適用は難しかった。手掌部全体への触覚提示という観

点から、ベルトの締付を利用して指の中節に触覚を提示する試み[7]や、収束超音波を用いて掌への触覚提示を行う試み[8]も行われている。しかしこれらの手法はマスタハンドとしての応用よりも情報伝達に主眼をおいたものであった。

1.2. 円筒型マスタハンド

マスタハンドにおいて手掌部全体への触覚提示が難しい理由は、指の姿勢変化に追従しながら各関節に適切な力を返す機構が極めて複雑で、ほとんど実現不可能であるためである。

この問題に対して、指の姿勢変化を制限することで解決をはかったマスタハンドとして Sato らの MeisterGRIP[9]が挙げられる。円筒形状の分布型の光学式触覚センサを作成し、円筒を握る各指の力分布を計測、それに応じたロボットハンドの制御を行なっている。

MeisterGRIP の例は、1. (姿勢計測) と 2. (力覚提示) という関係を、力計測と (視覚的な) 姿勢提示という関係に置き換えたものといえる。ユーザが受け取る情報に着目すると、自己の姿勢を視覚的に提示し、自己の出す力を円筒に対する押し付け力の反作用によって受動的に提示している形態であるといえる。

本研究はこの簡略化手法に注目し、さらに 3. (皮膚感覚) を付与することを考える。MeisterGRIP では力覚提示は受動的であり、皮膚感覚提示は行われていないため、例えば飛来したボールに接触する瞬間のように指が受動的に動かされる状況を提示することは難しかった。分布型の皮膚感覚提示を行うことで、外界との接触位置および外力を皮膚感覚によって擬似的に提示することが可能と考えられる。

1.3. 電気触覚ディスプレイ

円筒形状の分布型触覚提示装置を実現するにあたっては、触覚呈示素子を配置し、しかもユーザからの入力に対応するため力分布計測も行う必要がある。機械的な振動触覚提示などを使うことも考えられるが、ここでは現在入手可能な技術として電気触覚ディスプレイに着目した。

電気触覚ディスプレイは、電極部を刺激回路と切り離すことにより薄型軽量化が可能であり、電極部の材質によっては変形も可能である[10][11][12]。このため円筒表面を触覚ディスプレイとする場合に適しており、さらに電極部背後にフィルム状力センサを配置することで力分布計測も可能であると考えられる。

以上の考察から、本研究では手で握り込めるサイズの円筒の表面に電極を多数設けた円筒形マスタハンド (Fig. 1) を提案する。

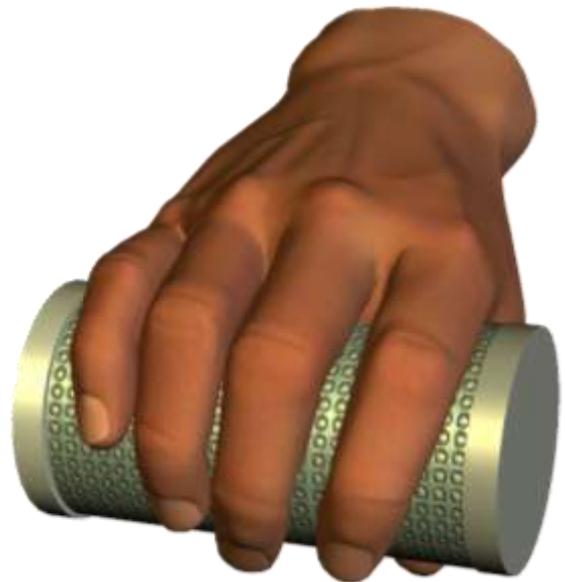


Fig. 1 Image of cylindrical master hand using electrocutaneous display.

2. システム構成

手掌部の空間解像度は、指末節先端の最も受容器密度の高い領域で 1.5mm ないし 2mm 程度、他の指部位で 3mm 程度、掌部で 8mm 程度とされている[13]。円筒を把持するという状況から、指先の末端部が円筒表面に接することは少ないと考えられる。一方で掌と指で提示解像度を変えると、円筒の握り方に強い制約が生じ、さらに手指の大きさの個人差に影響される可能性がある。このため電極間隔としては指の標準的な空間解像度である 3mm に統一することとした。

円筒形状を設計するにあたって最も大きな技術上の制約は刺激電極への配線である。ここでは従来から筆者らが開発している電気刺激装置を踏襲し、シフトレ

ジスタを内蔵した多チャンネル高耐圧スイッチング IC (SuperTex 社製 HV507) を用いる[12]。この IC は単独で 64ch の電極の制御が可能であり、さらに複数の IC をシリアル接続することが可能であるため配線数の問題が解決できる。

作成した 64 電極のユニットを Fig. 2 に示す。このユニットはフレキシブルプリント基板を用いており、IC 部分と電極部分を離しているため電極部分を曲げることができる。

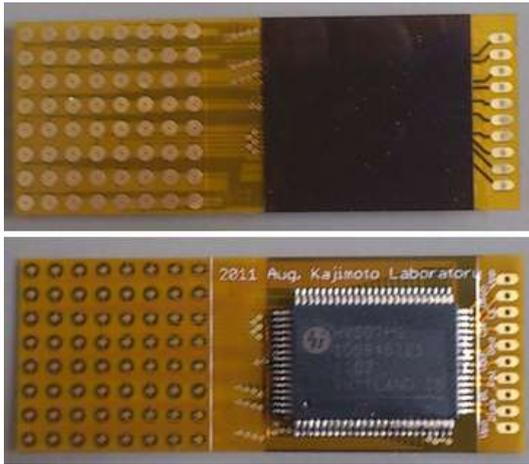


Fig. 2 Flexible electrode unit with 64 electrodes and 1 driver IC.

刺激ユニットを 8 個並べ、刺激電極部分同士を接続すると円筒形状を構成することができる (Fig. 3)。周長は $3\text{mm} \times 8 \text{個} \times 8 \text{ユニット} = 192\text{mm}$ であり、直径は 61.1mm である。日常的に握ることの多い飲料缶と比較すると、缶コーヒーの直径 53mm 、缶ビールの直径 66mm の中間の値である[14]。強いパワーグリップには大きすぎるものの、自然な手の形に近い手持ち感覚を実現できると期待される。さらにこの円筒形状を 3 個積み重ねると、高さは $3\text{mm} \times 8 \text{個} \times 4 \text{ユニット} = 96\text{mm}$ となる。日本人の手幅長は平均で 77mm 、男性の 95 パーセントイルで 88.5mm であるので、十分に握りこんだ手全体を刺激できると考えられる[15]。なお国内で一般に販売されている飲料缶の最も低背のものは 91.6mm である[14]。



Fig. 3 Cylindrical shape by connecting flexible electrode units.

2.1. 駆動実験

実際に試作したユニットを必要個数接続した際に駆動することを確認した。最終的な円筒形状では周方向に 8 ユニット、高さ方向に 3 ユニット、合計 24 ユニット (電極数 1536 点) が駆動される。ここでは同数を横 6、縦 4 の平面状に配置した (Fig. 4)。実験の結果、正常な駆動を確認できた。

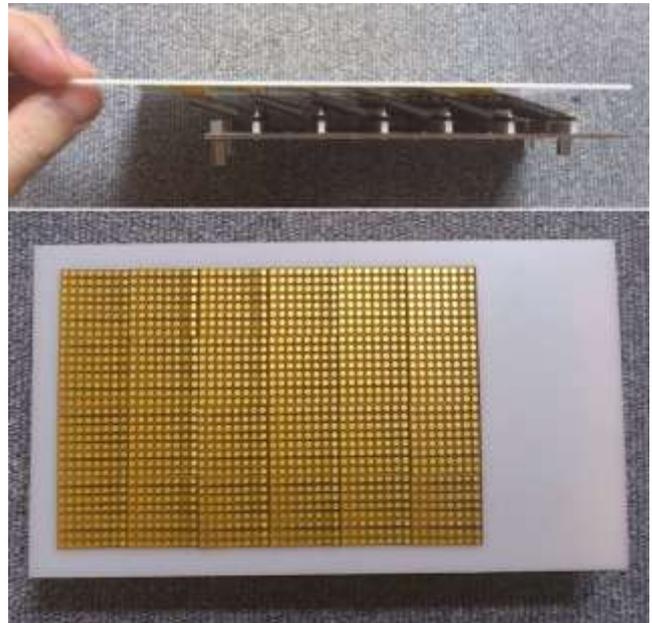


Fig. 4 Test environment with 24 units containing 1532 electrodes

なお本刺激装置では、同時に刺激される電極は 1 点のみであり、高速な走査によって全面の刺激を行っている。1 点の刺激に最大 $100\mu\text{s}$ 程度かかるため全点の刺激には 150ms 程度かかることになる。これでは 8Hz

程度のリフレッシュレートとなるため、実際には刺激する領域を制限するなど、刺激周波数を高く保つ工夫が必要である。

3. 結論

本稿では指先のみならず手掌部全体の触覚フィードバックを実現するマスタハンドについて考察した。指先の力によって制御することを前提とした円筒型マスタハンドを採用し、電気触覚ディスプレイによる皮膚感覚提示で外力を表現する手法を提案した。さらに構成要素である電気触覚ディスプレイ部を作成し、駆動を確認した。

本稿の段階では触覚センシングは行なっていないが、フィルム状の分布型触覚センサを電極基板の下に敷くことは容易である。今後は実際に触覚センサーディスプレイを複合した円筒型触覚インタフェースを作成し、マスタハンドとしての性能を評価する。

参考文献

- [1] CyberTouch
<http://www.cyberglovesystems.com/products/cyberglove-III/overview>
- [2] CyberGrasp
<http://www.cyberglovesystems.com/products/cyberggrasp/overview>
- [3] Bouzit M., Burdea G., Pepescu G., Boian R., “The Rutgers Master II – New Design Force-Feedback Glove,” Proc. IEEE/ASME Trans. On Mechatronics, vol.7, no.2, pp.256-263, 2002.
- [4] Endo T., Kawasaki H., Mouri T., Ishigure Y., Shimomura H., Matsumura M., Koketsu K.: Five-Fingered Haptic Interface Robot: HIRO III, IEEE Trans. Haptics, vol.4, no.1, pp.14-27, 2011.
- [5] Nakagawara S., Kajimoto H., Kawabuchi I., Kawakami N., Tachi S.: An encounter-type multi-fingered master hand using circuitous joints, Proc. ICRA2005, pp.2667-2672, 2005.
- [6] 佐藤, 舘: 指型 GelForce と電気触覚ディスプレイを用いた分布触覚情報伝達システム, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.12, No.2, pp.55-62, 2010.
- [7] Minamizawa K., Tojo K., Kajimoto H., Kawakami N. and Tachi S.: Haptic Interface for Middle Phalanx Using Dual Motors, Proc. EuroHaptics2006, pp. 235-240, 2006.
- [8] 星: 非接触触覚ディスプレイによる手掌部への情報提示, バーチャルリアリティ学会大会, 34C-7, 2011.
- [9] Sato, K., Komeiji S., Kawakami N., Tachi S.: Development of Grip-Type Master Hand “MeisterGRIP”, Proc. ICRA 2009, pp. 3283-3288, 2009.
- [10] Collins C. C., “Tactile Television: Mechanical Electrical Image Projection,” IEEE Trans. Man-Machine System, MMS-11, pp.65-71, 1970.
- [11] Tachi S., Tanie K., Komiyama K., Abe M., “Electrocuteaneous Communication in a Guide Dog Robot (MELDOG),” IEEE Trans. Biomedical Engineering, BME-32, no.7, pp.461-469, 1985.
- [12] Kajimoto H.: Electro-tactile Display with Real-time Impedance Feedback using Pulse Width Modulation, IEEE Trans. on Haptics (in print)
- [13] Johansson, R. S. & Vallbo, A. B.: Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand, Trends in Neuroscience, vol.6, pp.27-32, 1983.
- [14] 昭和アルミニウム缶製品一覧
<http://www.showacan.co.jp/products/index.html>
- [15] AIST 人体寸法データベース 91-92
<http://riodb.ibase.aist.go.jp/dhbodydb/91-92/>

4. 円筒型マスタハンド

手掌部全体への触覚提示という目標に対して忠実であろうとする場合、まず考えられるのはフィルム状基板で出来た電気触覚ディスプレイを指関節ごとに巻きつけるという手法である。しかし実際にこの手法を試したところ、関節の曲げによる肉の移動をフィルム状基板が著しく阻害し、その結果ほとんど指を曲げることができなくなることが分かった (Fig. 5)。この問題は電極基板に伸縮性がない限り解決できない。また多数ある指関節ごとにフィルム状基板を装着する手間も現実的ではないと考えられる。さらにこの構成では力覚を返すことはできないので、別途力覚提示用のマスタハンドが必要となってしまう。



Fig. 5 Wrap-type electrocutaneous display hinders bending of the finger.

そこで指の自由な運動に追従する装着型の構成を諦め、円筒型の触覚ディスプレイを把持する構成を採用する。円筒形状の把持型マスタハンドを用いることで次のような利点が生まれる。

- 触覚提示部は動くことがなく、機械的な駆動部を必要としない。
- 電極基板に伸縮性がなくても、屈曲性さえあれば円筒形状の表面に貼ることは可能である。

把持型であるために指を自由に動かすことができないという欠点は存在するが、逆に自由に動かせる場合には別途必要であった「指に反力を返すマスタハンド」が必要ないという利点も生じている。将来的に例えば視覚による錯覚等により指の姿勢を誤認させることが考えられる。

円筒状のハンドルをマスタハンドの代替とした先行研究に、佐藤らの *MeissterGrip* が挙げられる。た

これを可能とするためには、操作者の手指の姿勢計測だけでなく、適切な触刺激をフィードバックするハプティックインタフェースが必要であると考えられる。

現在こうした作業に用いられているハプティックインタフェースの多くは、例えば手術用の器具など、特定の道具の把持部を用いて触覚を提示している。手掌部全体への触覚提示を考えること無く、道具の振る舞いを再現することで、その道具を把持する手掌部に自然な触覚が提示される。こうした道具の振る舞いを再現するタイプのハプ

ティックインタフェースは遠隔操作環境における現実的な解であるが、あらかじめ使用する道具がわかっている環境にしか対応できず、また装置も専用のものとならざるを得ない。

これに対して、

いわば PC のポインティングデバイスとしてマウスなどの位置入力デバイスを用いる代わりにポインティングスティックなどの力入力デバイスを用いるのと同じ事をマスタハンドでも行った例といえる。