



皮膚塗布型素材を用いたデジタルスキンインタフェースの検討

A Study of the Digital Skin Interface using Skin-applied Materials

谷地卓¹⁾, 南澤孝太¹⁾

Taku TANICHI, and Kouta MINAMIZAWA,

1) 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科 (〒 223-8526 神奈川県横浜市港北区 4-1-1, {tanichi,kouta}@kmd.keio.ac.jp)

概要: 本研究では, 現実空間からの触覚とデジタル空間からの触覚を同時に受け取れるインタラクションを想定し, 装着感を極限まで小さくすることでユーザの皮膚そのものと一体化するような触覚の入出力インタフェース「デジタルスキン」を提案する. デジタルスキンの実現に向けた基礎的検討として, 本稿では皮膚上に塗布する人工皮膚を用いてインタフェースの試作を行い, デジタルスキンを通じた現実空間とデジタル空間とが共存するインタラクションにおけるアプリケーションを検討した.

キーワード: ウェアラブルデバイス, 触覚インタフェース, デジタルスキン

1. はじめに

皮膚は人と物理世界との境界面に存在する入出力インタフェースであり, ここに情報を与える手段として触覚インタフェースの研究が行われている. 近年の触覚インタフェース研究においては, 柔軟素材や薄膜素材, 微小素材を用いることで身体装着時の違和感を低減し皮膚との一体感を高めるような手法が提案されている. HAPTIC PLASTeR[1] は, 軟性ゴム素材を用いることで柔らかさと薄さを併せもった, 指先に巻きつけて使用する触覚ディスプレイを提案し, Karunanayaka らや鶴重らは電磁石によって磁界を発生させ身体に取り付けた永久磁石に対して振動を与える触覚や力覚提示手法 [2, 3] を, McIntosh らは指先に永久磁石を取り付け, 電磁石をスマートウォッチ筐体の外周に配置しインタラクション可能な空間の拡張手法を提案している [4]. Xin らは衣服やアクセサリに組み込まれた電子機器である「ウェアラブルデバイス」に対して, 皮膚や爪の上に極小な電子機器を用いて構成されたものを「スキンインタフェース」と定義し, 装着の快適性の向上や, 身体認知との親和性の向上などが期待されると述べている [5]. スキンインタフェースの研究では皮膚上に電子回路を構築する手法が開発されており, 導電性ナノメッシュ構造を用いたもの [6], 金箔によって電極を作成したもの [7], 導電性インクを印刷したタトゥーを使用したもの [8] などが提案されている. SkinWire[9] はシリコン薄膜上に金属ワイヤを縫い付け, 皮膚上に貼り付けるウェアラブルデバイスである. このデバイスを使用した実証実験では, デバイスの装着感が小さく, 使用の快適性が高いと述べられており, ユーザからの「自然であった」や「装着していることを忘れた」などのフィードバックから, スキンインタフェースがユーザの身体認知に溶け込むことが示唆されている.

このように, 現実空間に視覚情報を重畳して提示する “see-

through” 型 HMD の開発において HMD 自体の「視覚的な透明性」が重要であるのと同様に, 触覚情報を重畳するインタフェースの開発においては, 装着した触覚デバイス自体の装着感や, 触覚デバイス越しに感じられる現実空間の触感の変化を最小限にとどめ, 現実空間の自然な触感を “through” できる「触覚的な透明性」を担保する必要がある. これによって, ユーザの本来の身体感覚を阻害せずに身体情報を計測し, デバイスの存在を意識せずに, 現実空間と, 重畳されたデジタル空間とのインタラクションをシームレスに行う感覚を提供できると考えられる.

今後, 人々の社会生活において, 現実空間に加えてデジタル空間のデジタルツインの活用を想定したとき, このような人の本来の身体感覚を阻害せず, 日常的に利用できるようインタフェースが必要になる. そこで本研究では, 人とデジタルツインとの境界面として機能し両者を相互に接続するインタフェースを「デジタルスキン」と呼び, 本稿ではプロトタイプとして皮膚塗布型素材を用いた装着感の小さいインタフェースを提案し, いくつかの応用例を通じてユーザの行動に与える影響について検討を行う.

2. 提案手法

2.1 インタフェースの設計方針

本研究ではデジタルスキンの試作として, 皮膚上に薄く広がり, ユーザとシステムの間での触覚的な情報の入出力を行うデジタルスキンインタフェースを提案する. このインタフェースの機能概要図を図 1 に示す. デジタルスキンインタフェースは次の 3 つの機能をもつ. 1 つ目は, デジタル空間からの情報を皮膚が知覚できる情報へ変換を行い提示を行う機能 (図 1 内①), 2 つ目は, 現実空間から皮膚へ与えられる情報をデジタル空間で使用できる情報に変換する機能 (図 1 内②), 3 つ目は, 2 つ目の機能によって計測されたデジタル情報を外部のシステムへ無線や有線接続す

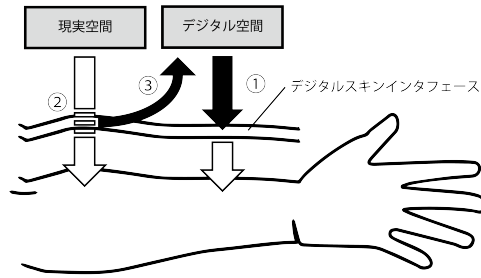


図 1: デジタルスキンインタフェースの機能概要図

ることで伝送する機能（図 1 内③）である。このようなインタフェースによって現実空間からの触覚情報を受け取ると同時にデジタル空間から提示される触覚情報を受け取るような触覚の拡張現実体験が実現できると考えられ、現実空間での活動を阻害せずデジタル空間を利用できるインタラクションへと拡張させることが期待できる。

2.2 極細繊維薄膜を使用した人工皮膚

デジタルスキンインタフェースを実装するために、スキンケア用品として発売されている¹極細繊維による薄膜を使用する（図 2）。この薄膜はエレクトロスピニング法で作成

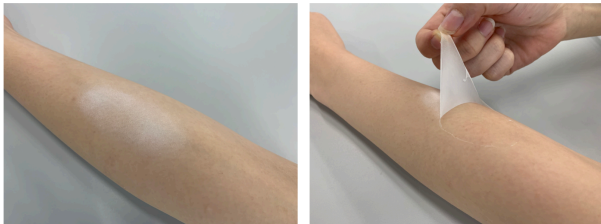


図 2: 使用した極細繊維薄膜。(左): 吹付け後に馴染ませた様子 (右): 取り外す際の様子

した厚さ $10 \mu\text{m}$ 程度の積層繊維であり、直接肌へ吹き付けることが可能である。吹き付け後には、化粧水を塗布し馴染ませることによって透明感が得られ、視覚的にも触覚的にも肌に馴染んだ状態にすることができる。さらにファンデーション等を上から塗布することで肌と同じ色に塗ることも容易である。この薄膜は皮膚上に極めて薄く重なるため、塗布部への外部からの触覚刺激に対してもほとんど影響を与えずに、素肌に近い触覚を得ることができる。皮膚上から取り外す際には日焼けした後の肌のように剥がすことができ、痛みなどは一切感じない。この薄膜を使用しそれぞれの機能に応じた加工を加えることで、デジタルスキンインタフェースの機能の実装を行う。

3. プロトタイプの実装

極細繊維薄膜を使用し、触覚提示機能、触覚計測機能、通信機能のプロトタイプを試作した。

¹エスト バイオミメシス ヴェール: <https://www.sofina.co.jp/est/products/biomimesisveil/>

3.1 触覚提示

触覚提示手法として、既存の手法 [2] などと同様に電磁石から磁力を発生させ、直接身体に接触した永久磁石を振動させることで振動触覚の提示を行う。

皮膚上に磁性物体を直接乗せ、その上から極細繊維を吹き付けることで薄膜で磁性物体を固定することを考える。当初、皮膚上の大面積に分散させて皮膚上に自然に馴染むような磁性物体として、磁性流体や砂鉄の利用を検討した。砂鉄を用いた様子を図 3 左に示す。ここでは砂鉄の黒色が目立っているが、薄膜の上にファンデーションを塗ることで自然な肌色の層の下に隠すことができる。しかしながら伝わる振動が微弱であったため、より強力な磁性物体として、ネオジム磁石 ($\phi 13\text{mm}$, 厚さ 2mm) を用い、極細繊維を塗布して手の甲に取り付けている様子を図 3 右に示す。こ



図 3: 触覚提示を行うデジタルスキンインタフェース。(左): 砂鉄を用いた試作 (右): 薄膜内に永久磁石を固定した試作

のインタフェースによって外部の電磁石から提示された磁力を皮膚感覚によって知覚可能な振動に変換し、ユーザへ触覚提示を行うことができることを確認した。

3.2 触覚の計測

デジタルスキンを通じて、皮膚への外部刺激を計測する方法として、導電性をもったデジタルスキンインタフェースを試作し、静電容量センサによる計測を試みた。皮膚上に静電容量センサを構成するためには、図 4 のように、まず皮膚上に絶縁層を構成し、その上に導電層を構成することによって、ユーザの身体自体の導電性を遮断する必要がある。そのため、極細繊維薄膜によって、導電層と絶縁層を実現する必要がある。

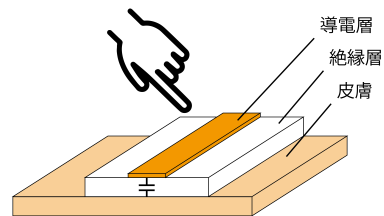


図 4: 皮膚上タッチセンサの構造

まず導電層については、市販の化粧水 7g に対して飽和食塩水 3g を混ぜ導電性をもたせた液体を薄膜へ浸透させ、これによって、皮膚上の導電層を通じて電流が流れ LED を光らせることを確認した（図 5 左）。次に絶縁層については、吹き付けを行った薄膜に対して抵抗値の高いワセリンを塗

布し、浸透させることによって実現することができた。この絶縁層と導電層の積層によって、前腕部にタッチセンサを実装した(図5右)。

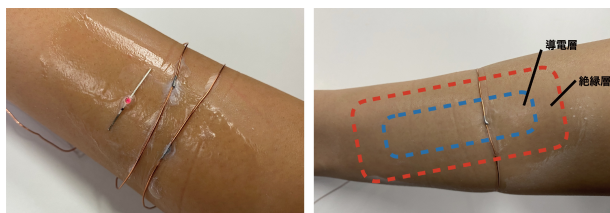


図5: 導電層の試作。(左): LEDへ配線を行い点灯させた様子(右): 絶縁層と導電層を積層したタッチセンサ

この皮膚上に実装した導電層上に、一部だけ皮膜を剥いたエナメル線(0.5mm)を巻きつけ、導電層とマイコンボードESP32に実装されたタッチセンサとの接続を行った。

3.3 通信機能

装着感の小さいデジタルスキンインタフェースを使用する際には、ケーブルによる配線や他のデバイスの装着などを必要とせず、デジタルスキンインタフェース単体で外部との通信が可能なのが好ましい。そこで、電源等の配線が必要なく、短距離通信が可能なRFID(Radio Frequency Identification)機能の埋め込みを検討する。RFIDとはID情報を埋め込んだタグと電磁波や電波によって近距離通信を行う技術であり、IDが埋め込まれたRFタグとリーダライタの間で通信が行われる。このRFタグはリーダライタから出力される電波を内蔵されたアンテナによって受け取り、エネルギーとして使用することで電池を内蔵せずに小さなチップとして実装される。今回は市販のRFIDシール(NFCタグMM-NFCT, サンワサプライ製)からRFID回路のみを取り外したものを皮膚上に乗せ、極細繊維の吹き付けを行い、皮膚上へと取り付けを行った。

4. アプリケーションの試作と検証

以上の試作デバイスを使用し、デジタルスキンインタフェースによるインタラクションのユースケースとして、情報システムとのインタラクションと、ネットワーク越しに他者との感覚共有を行うものの2つを検討した。

4.1 情報システムとのインタラクション

例えば自動改札機を通過する際に、デジタルスキンを装着していれば、ICカードやスマートウォッチを用いずに、身体そのものをかざすことができる。このとき情報システムから人へのレスポンスとして触覚フィードバックが提示されることで、物理的に接触していなくても、情報システムとのインタラクションを身体感覚的に感じ取ることができると考えられる。そこでデジタルスキンインタフェースを通じた情報システムとの近距離通信、および触覚によるフィードバックを行うシステムを試作し試用した。

このシステムではRFIDリーダ(NFC RFIDモジュールPN532)によって読み取られたRFIDタグのID情報をArduino Nanoを使用してコンピュータに入力する。コン

ピュータ内ではPythonによって作成されたサーバにてタグ情報の記録と触覚生成ソフトウェアへ命令の送信がOSC通信により行われる。このサーバでは3種類の触覚信号生成命令(0.4秒間の10Hz, 20Hz, 40Hzの正弦波)をもち、同一のIDが読み込まれた回数に従い異なる触覚生成の命令を送信する。送信された命令はMax/MSPで開発された触覚生成ソフトウェアで受け取られ、その内容に応じて触覚信号の生成し、オーディオ出力端子から出力される。出力された触覚信号はオーディオアンプ(SMSL SA-98A)によって増幅され、電磁石に入力されることで磁力へと変換され、皮膚上の永久磁石に振動を与える。ユーザはデジタルスキンインタフェースにより永久磁石とRFIDタグの取り付けを行い、壁に設置された筐体にかざすと、RFIDによる通信が行われ、触覚によって振動触覚のフィードバックを受け取ることでシステムを使用する。このシステムを体験している様子を図6に示す。



図6: デジタルスキンインタフェースを使用している様子

ユーザからは既存のインタラクションではデバイスとデバイスを反応させるような印象があったのに対し、本体験によるデジタルスキンインタフェースによるシステムとのインタラクションでは、自分自身が直接、情報システムに対して働きかけているような感覚があるというフィードバックが得られた。

4.2 触覚共有によるコミュニケーション

触覚提示技術の応用として、ネットワークを通じて触覚を共有する試み[10]が行われているが、2人のユーザの間で互いの身体で知覚する触覚を共有することができれば、離れたところにおいても互いの身体感覚を共有することができる。そこでデジタルスキンを用いて、皮膚への接触感覚を他のユーザに共有するシステムの試作を行った。このシステムではまず、それぞれのユーザの皮膚上に作成した導電層をESP32のタッチセンサの入力端子に配線し、皮膚上の接触の計測を行う。皮膚への接触が認識されるとコンピュータ上で実行されるサーバを経由し、Max/MSPで開発された触覚生成ソフトウェアに触覚生成信号を送信する。この信号を受け取った触覚生成ソフトウェアは接続されたオーディオ・インタフェース(Roland OCTA-CAPTURE)から触覚信号を出力し、オーディオアンプ(SMSL SA-98A)によって増幅を行う。電磁石にはφ5.2mm、長さ27mmの鉄心に太さ0.5mmのエナメル線を1層あたり30巻きし、こ

れを6層重ねたコイルを使用した。この電磁石を用いた場合に十分な強さの振動が得られなかったため、作成した筐体によって2つの電磁石を永久磁石に距離を近づけて装着した。デジタルスキンインタフェースおよび電磁石を装着している様子を図7に示す。現在のプロトタイプでは電磁石自体が大きく、それ自身の装着感が存在してしまうが、将来的には、スマートウォッチのような既存のデバイスの中に組み込まれ、さらにデジタルスキンを通じて、デバイス装着部位以外の広範囲の皮膚へ触覚情報を伝えることを想定している。

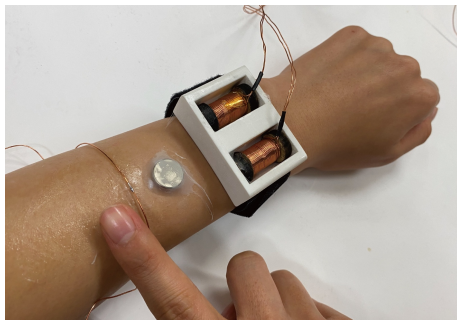


図7: 触覚共有を行うデジタルスキンと装着した電磁石

ユーザ2名の前腕にデジタルスキンインタフェースの触覚計測機能・触覚提示機能の実装を行い、システムの利用を行った。体験後のフィードバックとして、「自分の皮膚に触れているだけなのに相手に対しても同じように触覚が届くのが楽しい・不思議」という意見や「実際に触れられている気持ち」になるというような意見が得られた。

5. おわりに

本研究では、現実空間の触覚にデジタル空間から与えられるバーチャルな触覚をシームレスに重畳するインタラクションの実現を目指し、ユーザに与える装着感を最小限にとどめ触覚的な透明性を担保できるような触覚インタフェースとして、ユーザの皮膚に直接塗布することで皮膚と一体化するデジタルスキンを提案した。これを実現するプロトタイプとして、極細繊維薄膜を利用し、触覚の計測機能、振動触覚の提示機能、通信機能の実装を行い、プロトタイプを使用したユースケースの検討と開発を行なった。今後の展望として、装着感を極限まで下げることが、単純な快適さだけではなく、システムとのインタラクションにおける行為主体感を向上させる可能性など、人の身体的インタラクションへの認知的な影響について調査を行っていきたい。

参考文献

[1] Kurogi Tadatoshi, Yonehara Yuji, Peiris Roshan Lalintha, Fujiwara Takeshi, Minamizawa Kouta : HAPTIC PLASTeR: Soft, Thin, Light and Flexible Haptic Display Using DEA Composed of Sliding Ring Material for Daily Life, ACM SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies, 2019.

[2] Karunanayaka Kasun and Siriwardana Sanath and Edirisinghe Chamari and Nakatsu Ryohei and Gopalakrishnakone Ponnampalam : Magnetic Field Based Near Surface Haptic and Pointing Interface, Lecture Notes in Computer Science, Vol.8007, No.4, pp.601-609, 2013.

[3] 鶴重 誠, ロシャン ペイリス, 南澤 孝太 : 永久磁石の貼り付けによる振動触覚提示システムの検討, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 3A-04, 2019.

[4] Mcintosh Jess, Strohmeier Paul, Knibbe Jarrod, Boring Sebastian, Hornbæk Kasper : Magnetips: Combining fingertip tracking and haptic feedback for around-device interaction, Conference on Human Factors in Computing Systems, Chi, pp.1-12, 2019.

[5] Liu Xin, Vega Katia, Maes Pattie, Paradiso Joe A. : Wearability Factors for Skin Interfaces, Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference 2016, No.21, 2016.

[6] Miyamoto Akihito, Lee Sungwon, Cooray Nawalage Florence, Lee Sunghoon, Mori Mami, Matsuhisa Naoji, Jin Hanbit, Yoda Leona, Yokota Tomoyuki, Itoh Akira, Sekino Masaki, Kawasaki Hiroshi, Ebihara Tamotsu, Amagai Masayuki, Someya Takao : Inflammation-free, gas-permeable, lightweight, stretchable on-skin electronics with nanomeshes, Nature Nanotechnology, Vol.12, No.9, pp.907-913, 2017.

[7] Kao Hsin-Liu Cindy, Holz Christian, Roseway Asta, Calvo Andres, Schmandt Chris : DuoSkin: Rapidly Prototyping on-Skin User Interfaces Using Skin-Friendly Materials, Proceedings of the 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers, pp.16-23, 2016.

[8] Weigel Martin, Nittala Aditya Shekhar, Olwal Alex, Steimle Jürgen : SkinMarks: Enabling Interactions on Body Landmarks Using Conformal Skin Electronics, Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.3095-3105, 2017.

[9] Kao Hsin-Liu Cindy, Bedri Abdelkareem, Lyons Kent : SkinWire: Fabricating a Self-Contained On-Skin PCB for the Hand, Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol., Vol.2, No.3, 2018.

[10] 早川裕彦, 大脇理智, 石川琢也, 南澤孝太, 田中由浩, 駒崎掲, 鎌本優, 渡邊淳司 : 高実在感を伴う遠隔コミュニケーションのための双方向型視聴触覚メディア「公衆触覚伝話」の提案, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.25, No.4, pp.412-421, 2020.