

ワイヤによる皮膚感覚刺激を用いた 指先装着型接触感提示デバイス

青木 孝文^{*1} 三武 裕玄^{*1} 長谷川 晶一^{*2} 佐藤 誠^{*1}

Wearable Haptic Device to Present Contact Sensation

Based on Cutaneous Sensation Using Thin Wires

Takafumi Aoki^{*1}, Hironori Mitake^{*1}, Shoichi Hasegawa^{*2} and Makoto Sato^{*1}

Abstract --- In this paper, we propose a novel wearable haptic device to present contact sensations. Our goal is realization of a small ultra lightweight haptic device that enables mixed reality applications where people can move freely and two or more persons can simultaneously use. At first we clarify specification of a device weight and best way to present force to cutaneous sensation on the finger tip with an actuator. Then we propose a novel device which employs cutaneous sensation stimulation method utilizing wires that enables presentation of strong contact sensations by weak force. Therefore, we can make a small lightweight device (1.4g) by a small actuator. Moreover, since a response of an actuator also improves, quality force sense presentation is achieved. And the device can overlay the sense of force without barring ordinary manipulation of real objects or other users. Finally we present effectiveness of the device through experimental results.

Keywords: Haptic Device, Wearable Device, Contact Sensation, Wire Driven Haptic Device, Cutaneous Sensation, Mixed Reality

1 はじめに

近年、計算機の高性能化による情報世界の表現の向上によって実世界とVR世界をシームレスに融合させる複合現実感技術(MR)が注目されている。特に、カメラとディスプレイのついたモバイルデバイス(ゲーム機、携帯電話、デジタルカメラ)やモバイルプロジェクタなどの情報提示技術の普及、発展によって、こうしたモバイルデバイスやウェアラブルデバイスを使ったMR環境の実現が期待されている。

これらの環境を想定したMR研究では、これまで実世界の映像とCG映像を重畳させる方法などの視覚提示に関する研究は大きく着目されてきたが、CGの映像に触れる、押す、掴むといった力覚提示に関する研究はあまり着目されてこなかった。しかし、複合現実感世界において物体の存在感を考えるならば、提示された物体に触ることができる、物体を作業する際にその反力が提示されることは重要な要素であると言える。

本研究の対象とするMR環境は、従来の限られた場所での利用や1人での利用ではなく、実世界での移動を伴う活動や複数人での共同作業といった場面を想定する(図1)。このような場面はモバイルデバイスを使う強みである。力覚インタラクションがこのような環境で可能

になれば、実世界のどこでもVR世界の物体を現実世界の物体と同様に扱うことができるため、設計、教育、訓練、エンタテインメントなどのアプリケーションの利用範囲を拡大できる。

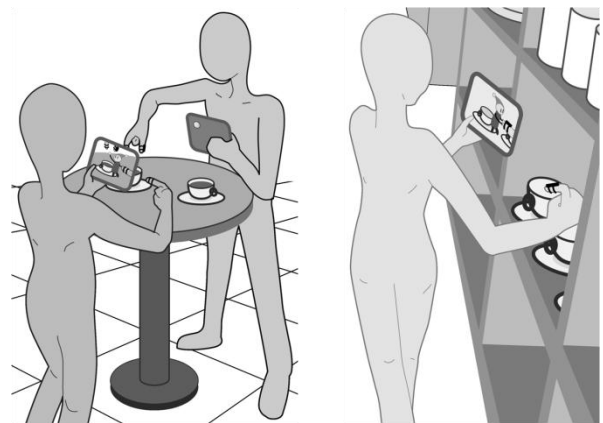


図1 複合現実感環境での力覚インタラクション

Fig.1 Haptic Interaction in Mixed Reality Environment

本研究の対象である利用環境を考えた場合、既存の力覚デバイスでは様々な問題点を含んでいる。力覚デバイスには大きく分けて接地型と非接地型の2種類が存在する(図2)。

*1 東京工業大学

*2 電気通信大学

*1 Tokyo institute of technology

*2 The University of Electro-Communications

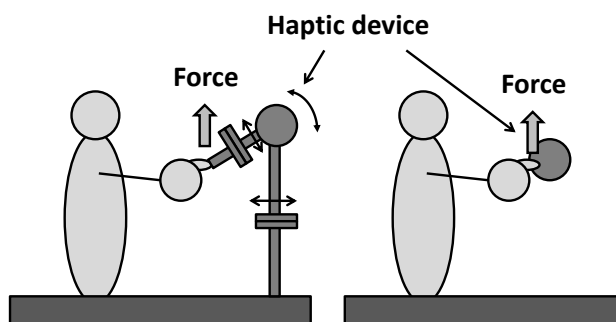


図2 (左)接地型力覚デバイス (右)非接地型力覚デバイス
Fig.2 (Left) Grounded Haptic Device (Right) Ungrounded Haptic Device

接地型ではデバイスが壁や床、机などの環境に設置や固定された状態でユーザに反力を提示する。そのため正確で大きな反力を提示することができる。このタイプのデバイスとしては SPIDAR[1]や PHANTOM[2]などが挙げられる。しかし、実世界で体験者が移動する場合、装置を利用する空間を限定することはできない。そのため接地型力覚デバイスでは、利用が想定されるすべての空間にデバイスを配置する必要があり大きなコストがかかってしまう。また、複数人での利用や把持などの細かい指先での作業を考えた場合、ワイヤやリンクの干渉が起きてしまうことから適当ではない。

一方、非接地型ではデバイスを外部(壁や地面)に固定しない状態でユーザに反力を提示する。このタイプのデバイスとしては角運動量の時間的な変化および偏心回転子を利用した中村ら[3]の研究が挙げられる。また特に指先に装着するタイプとして稲葉ら[4]、南澤ら[5]の研究が挙げられる。これらの手法の場合、デバイスを固定する必要がないことから、利用する場所を選ぶことなくどこでも使用することができる。また、デバイス自体を小型化できれば、機構の干渉を防げるため、複数人での共同作業や複数指を使った把持などの動作が可能になる。

しかしながら、こうした装着型力覚デバイスは、装着の手間やデバイスの重量に関して問題点を抱えている。デバイスの重量が大きい場合、作業を行う際に利用者に疲労感や違和感を与えてしまう。例えば、組み立て作業の評価といったものを正確に行うことができない。また、デバイスの装着や脱着には手間と時間がかかるため、作業中に何度も取り外しを行うことは想定しづらい。そのため、長時間のデバイスの利用を想定する必要があり、疲労度を少なくするためにデバイスを軽量にする必要がある。そして、MR 空間ではバーチャル物体だけでなく実物体の操作も必要となるため、デバイスをつけたままでも実物体を掴むといった、通常の動作ができる必要がある。このように装着型デバイスでは装着していることが気になってしまうという問題点があった。

そこで本研究では、こうした装着型力覚デバイスの問題点を解決するためにデバイスの重量や形状に着目し、提示する感覚を接触感(ものに触れた瞬間およびものに触れている感覚)に限定することでMR 環境に最適な装着型力覚デバイスの実現を目標とする。

本研究の応用先としては、装着し続けていても苦にならないことを利用した長時間の体験が必要な場面での利用が挙げられる。例えば、博物館の入り口で装置を装着し、さまざまな展示を体験したうえで出口にて外すといった利用形態や工場での組み立て作業の作業評価が考えられる。また、装着していることを忘れられることから、エンタテインメントやアートの作品といった表現の場面にも使えると考えられる。

本論文では、第2章で指先装着型力覚デバイスの先行研究を紹介し、それらの問題点を挙げた上で、本研究に必要とされるデバイスの要求仕様をまとめる。第3章では、基礎実験により指先装着型力覚デバイスの重量に関して必要な条件を求める。第4章でワイヤによる皮膚感覚刺激による指先装着型力覚デバイスの提案を行う。第5章以降で提案デバイスの有効性について被験者実験を行い確認する。

2 指先装着型力覚デバイス

触覚の基本要素には触圧覚、振動覚、温度覚、痛覚の4つがあるといわれている[12]。触圧覚はものに触れた際に生じる触覚と、圧迫を受けたときに生じる圧覚を併せた感覚である。本研究で提示したい接触感は触圧覚の一部である。接触感が提示できれば、物体に触れた際のリアクションや、いつ触れたのかというタイミングを体験者に伝えることが可能になり、CGによる映像提示と組み合わせることで有用なアプリケーションが構築できる。本研究ではMR 環境でのバーチャル物体の存在感を強調するため、この接触感提示に着目する。

接触感提示を行うには指先に力を加え、圧迫させる必要がある。しかし、非接地型である指先装着型は体験者に大きな反力を提示することが接地型に比べ困難である。そのため、非接地型による触圧覚提示の表現には、振動モータを用いた振動覚刺激が代替手法としてこれまで提案されてきた。しかし、触圧覚の一部である接触感と振動覚は明らかに異なる感覚であることから、従来手法では体験者に違和感を与えてしまう問題点があった。そのため、本研究では振動覚を伴わない接触感提示を行う必要がある。そこで皮膚感覚に着目し、擬似的な反力提示手法に着目する。本章では皮膚感覚刺激による指先装着型デバイスについて先行研究を紹介し、その問題点をまとめる。

稲葉ら[4]は指先を圧迫させることで擬似的な反力を提示できることを示している。この手法では、自己受容感覚を刺激することなく皮膚感覚のみに提示をすること

で、小型な力覚提示装置を実現している。南澤ら[5]は固有受容感覚を刺激せずに、皮膚感覚の刺激だけで重力質量および慣性質量の提示が可能であることを示している。さらに物体把持時の指先の垂直力およびせん断力を再現するデバイスを実現している。しかし、本研究の対象とするMR空間での利用を考えた場合、ベルトによって指先に力を伝達するこれらの方式では指先腹部がベルトによって覆われてしまうため、実物体に自然に触れることができない。また、装置の重量に関しては軽量化を課題としながらも、その影響の評価は行われていない。さらに、これらのデバイスでは力覚提示に重要なアクチュエータの応答性に関して、数十 msec の遅延があり実用化に向けて課題を残している。

Robert ら[6]は形状記憶合金を用いた指先への触覚刺激を行っている。この手法では、形状記憶合金ワイヤを伸縮することで振動を作りだし触覚フィードバックを行っている。しかし、被験者にどのような感覚が提示されているのか明らかにされていない。感覚提示に振動を用いるため、接触感提示の際に違和感を持たせてしまう問題点がある。形状記憶合金が伸縮に時間がかかることから、指の素早い動作、例えばタッピングのような動作には対応しない。また、発熱によるやけどの懸念もある。

このような指先装着型デバイスの問題点を考えた場合、本研究で求められる装着していることが気にならないという要求を満たすには、表1に挙げる三つの項目が要求仕様として考えられる。

表1 装着型力覚デバイスの要求仕様

Table 1 Required Specifications of Wearable Haptic Device

区分	求められること
物理的透明性	軽量であること
時間的透明性	応答性がよいこと
空間的透明性	指先腹部に障害物がすくないこと

物理的透明性に関しては、アクチュエータを指先に付けることからアクチュエータの重さの増大はモーメントの増大をまねき、体験者に疲労感を与えてしまう。そのためデバイスが軽量であることが求められる。

時間的透明性に関しては、体験者の指の位置に合わせて即座に反力を提示する必要がある。そのため応答性に優れている必要がある。

空間的透明性に関しては、デバイスを装着したまま実物体などを操作する必要があるため、指先腹部に障害物がすくないことが求められる。

本研究ではこの三点を満たす指先装着型デバイスの実現を目指す。

3 デバイスの重量の主観評価

本研究で提案するデバイスは指先装着型である。そのためデバイスの重量が大きくなれば、指の付け根、手首に負担がかかり、体験者に疲労感や違和感が生じる。そこで、被験者実験を通しデバイスの重量について評価を行った。なお、指先を高速に動かせば大きな加速度が生じてわずかな重さであっても大きな慣性が生まれ、違和感となる。そのため、今回は日常的にものを触るといった動作の中で評価を行った。

実験は被験者の利き手の人差し指の指先に 0.1g から 4.8g の 6 種類の重りをつけ、180mm x 125mm x 45mm の物体の表面を指先でなぞる動作をしてもらい、操作における重さの影響を評価した(図 3)。各重りと指の接着部分の面積は全て同じである。評価はリッカート法により行い、「重さが非常に気になる(1)」、「気になる」、「どちらともいえない」、「気にならない」、「全く気にならない(5)」の 5 段階で回答してもらった。なお、本実験では差が 0.5 未満であれば、両者には大きな差はないと見なし、重量による差がないと考える。

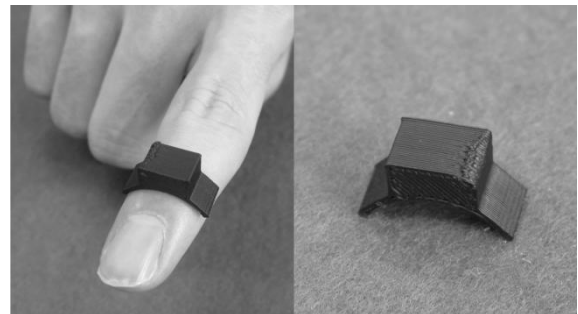


図3 デバイスの重量による作業性への影響の実験装置 (左)重りをつけたところ (右)重り

Fig.3 The Experimental device to evaluate effects in workability cause by weight of device (Left) The weights when equipped to the finger (Right) The Weight

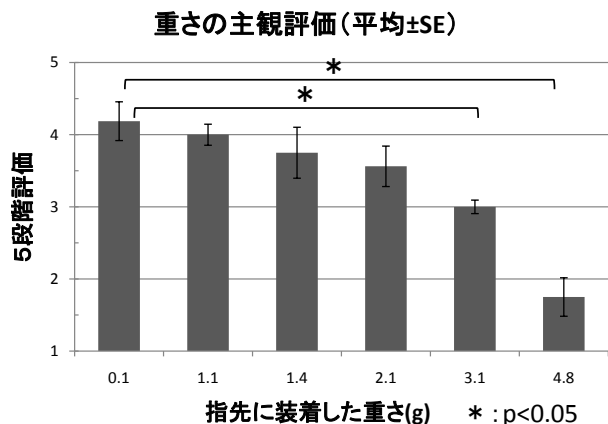


図4 デバイスの重量による作業性への主観的評価 Fig.4 Subjective evaluation of the weight of device

被験者には始めに0.1gと10gの重りを指先に装着し、重量による操作感の変化を十分に理解してもらった。その上で、目隠しをした状態で0.1g, 1.1g, 1.4g, 2.1g, 3.1g, 4.8gの6種類の重りをそれぞれランダムな順番で装着し、回答してもらった。これを4セット行い、計24回の回答からそれぞれの平均をとることで各重量の評価とした。

20代の男性4名と女性1名の被験者に対し実験を行い図4の結果を得た。その結果、0.1gと3.1g, 0.1gと4.8gの間に5%の有意差を確認できた。また、5%の有意差の確認できなかった1.4gと2.1gに関して、1.4gの平均値は信頼区間95%で0.1gの平均値の(-0.34,0.35)の区間に、2.1gの平均値は信頼区間95%で0.1gの平均値の(-1.05,0.20)の区間にあることがわかった。このことから重量1.4gと0.1gの主観的評価実験における平均値には大きな差が無いと言える。よってデバイスの重量は少なくとも2.1g以内におさめることが必要であり、1.4g以下であれば十分であるといえる。第1章と第2章で紹介した中村ら[3](Gyroclubefingertip:10g)、稲葉ら[4](18g)、南澤ら[5](45g)のデバイスの重量はいずれもこの要件を満たしていない。

4 ワイヤによる皮膚感覚刺激による指先装着型接触感提示デバイスの提案

本研究に必要となる接触感提示デバイスの要件は、重量が少なくとも2.1g以内であること、応答性が良いこと、指先腹部に障害物がすくなくないことの三つである。そこでこれらの条件を満たすワイヤによる皮膚感覚刺激を用いた指先装着型接触感提示デバイスを提案する。本章では始めにアクチュエータの議論を行い、次に皮膚表面への力の伝達方法について議論を行う。そして最後に提案するデバイスの概要について述べる。

本研究では小型軽量でかつ接触感提示に必要な力を提示できるアクチュエータが必要となる。接触感提示には圧覚を出すために皮膚を変位させる必要がある。そのため圧電アクチュエータなど変位が微小なアクチュエータでは条件を満たさない。形状記憶合金は応答性の観点から条件を満たさない。超音波モータは応答性に優れ高トルクであるが、本研究で要求するような指先に載るほどの小型化は難しい。振動モータは回転を利用することで強い刺激を軽いアクチュエータから発生させている。そのため軽く作ることができるが、応答性が悪く、連続的な刺激を出すことは難しい。ボイスコイルモータは往復運動であるため十分な力を出すためにはアクチュエータが重くなり条件を満たさない。このようにアクチュエータの提示できる力と大きさは重量に関してトレードオフがある。そのため本研究ではこれらの問題を解決するためにデバイスのエンドエフェクタの形状に着目

する。

佐藤ら[7]は剣山状の接触面によって指先に動的にひずみを発生させることで、アクチュエータが提示した力よりも強い力を体験者に感覚させることに成功している。そこで本研究ではワイヤによって指先表面に対しひずみを発生させることで、アクチュエータから提示された力より強い力を体験者に感じさせる方法を提案する。これにより弱い力で強い接触感を提示することが可能になる。なお、この刺激方法を採用するメリットは2つ挙げられる。一つめは接触感を出すのに強い力を必要としないため、アクチュエータを小型軽量にすることができること。二つめは強い力を必要としないため、アクチュエータが瞬時に接触感提示に必要な力を提示できることである。これによって力覚提示の応答性を上げることができる。

図5に提案するデバイスの概略を示す。本デバイスは体験者に対し指先背面にアクチュエータを固定し、そこからワイヤを牽引することで手の指腹部の皮膚感覚を圧迫し接触感を提示する。指先腹部に存在するのはワイヤのみであるため、通常のものをつまむといった動作を制限することはない。本デバイスの構成はアクチュエータとワイヤと指先への固定具だけであり、軽量のアクチュエータを利用することでデバイスを軽量にすることが可能である。

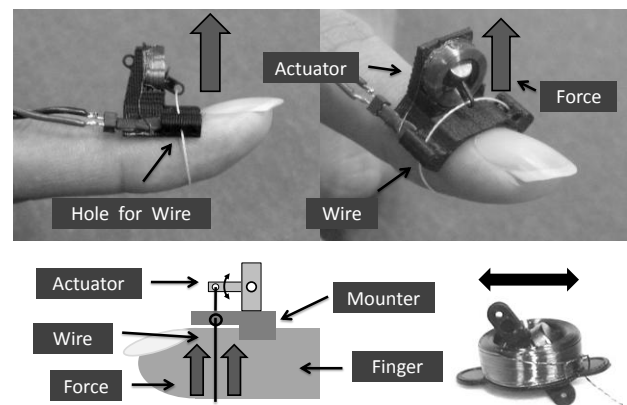


図5 (下)提案デバイスの構成 (上)試作デバイス
Fig.5 (Bottom) Structure of the prototype device
(Top) Implemented prototype device

次章では、ワイヤによる圧覚閾値への影響を評価する。そして第6章では実際に試作デバイスをつくり接触感が提示できること、そして重量や応答性などの基本特性を評価する。その後、被験者実験によって本デバイスによる接触感提示の有効性について評価を行う。

5 ワイヤによる圧覚閾値への影響

本手法ではワイヤによって指先腹部の皮膚に対し刺激を行う。この際、アクチュエータからの力が同じでも、

指先腹部に大きなひずみが発生する機構にすることで、より強い力が指にかかったと体験者に感じさせる。本章では、ワイヤ式とベルト式によって指先腹部に圧力を加え、それぞれ圧覚閾値を調べることで、ワイヤ式の有効性を示す。

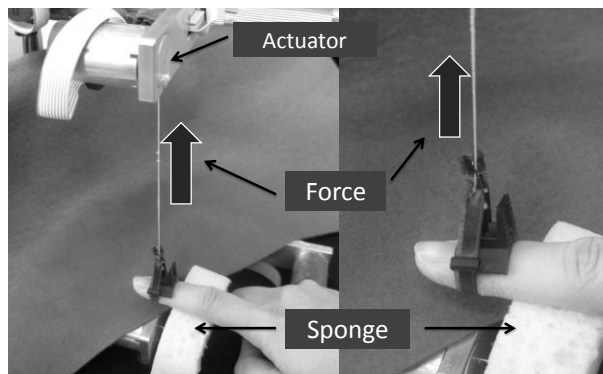


図6 圧覚閾値の調査のための実験環境

Fig.6 Experimental setup for pressure sense threshold

本実験は極限法に基づいて行われた。実験装置を図6に示す。まず、被験者の利き手の人差し指に対し、指先の鉛直方向にワイヤもしくはベルトを設置する。ワイヤは高密度ポリエチレン ϕ 0.3mm (SUNLINE 社 CASTAWAY Max16.5kg) のものを用いた。ベルトは5mm のものを用いた。ワイヤおよびベルトはそれぞれDC モータに接続され、電流制御回路によって一定の張力をかける。提示する刺激は4s 周期であり、0s から1s では一定に増加、1s から2s では一定の張力、2s から3s では一定に減少、3s から4s では張力をかけない。指はパッシブタッチにするために、やわらかいスポンジによって指先の皮膚以外は固定し、関節などが動かないようにした。被験者は目隠した状態で4s 周期の刺激を3 回体験したのち、刺激された1s から2s の時の張力に対し「押されている」、「押されていない」、「わからない」の三択で回答させた。20 代前半の男性4 名(利き右手が3 名、左1 名)の被験者に対し張力を増減させることで実験を行った。その結果、表2 のような結果が得られた。

表2 ワイヤとベルトにおける圧覚閾値の変化

Table 2 Difference of pressure sense threshold between wire and belt.

	上昇系列平均 閾値 [mN]	下降系列平均 閾値[mN]
ワイヤ	37.1	25.8
ベルト	137.4	116.8

この結果より、ワイヤ式によってベルト式に対し弱い力で圧覚を出すことができることが確認された。そして約 40mN の力で指先の皮膚を刺激すれば圧覚が提示できることがわかった。

6 試作デバイスの重量と応答性

提案手法に基づいて試作したデバイス(図5)の基本特性について説明する。本デバイスはアクチュエータに浅草技研製超小型電磁石サーボ AA-PT01 を使用した。このアクチュエータは、中心部をピンで固定された可動軸に永久磁石がついており、そのまわりに巻かれているコイルに電流を流すことで可動軸を上下に動かすことができる(図5 上)。指へのアタッチメントは3D プリント Dimension 768 によって製作したABS 樹脂製の固定具を用いた。固定具には両サイドに穴が空いており、その2 点をワイヤが通る。体験者への刺激はこのワイヤをアクチュエータが引っ張ることで力を伝達する。アクチュエータは電流を流すことで指先鉛直方向(図5 の矢印)に力を加えることができる。また、アクチュエータの可動軸はこの原理によってワイヤのついた先端部を大きく動かすことが可能であり、指先を圧迫させるのに十分な距離を動かすことができる。装置の重量は全体で 1.4g (配線含まず)であり、大きさは13.4mm x 21.5mm x 16mm である。重量1.4g は第3 章で求めたデバイスの十分条件である重量1.4g 以下を満たしており、体験者は装着した試作デバイスの重量が気にならないと言える。また、このデバイスの重量は既存の装着型デバイスでは実現されていないため、本デバイスが初めての重量の気にならない装着型接触感提示デバイスである。

接触感を出すには前章での結果より、約 40mN 以上の力を提示する必要がある。そこで、試作デバイスにおける応答性をワイヤにロードセル(共和電業 LTS-100GA)を取り付けることで測定した。その結果 1.2msec 以内に 40mN を提示できることを確認した。また最大 420mN (2.2msec 以内)の張力を提示することができることが確認された。これらのことから本デバイスによって接触感の提示が可能であることが示された。

また、力覚提示において反応時間の遅延は、提示する物体の硬さや作業性に影響を与えてしまう。その結果、力覚提示の品質を下げってしまう。小森ら[8]によれば、力覚提示における反力の応答時間は 30msec 以内に抑えるべきであると報告している。また大西ら[9]によれば反応時間に僅か 5msec の遅延がある場合でも、弾性力は小さく知覚されると報告している。本デバイスは 1.2msec と十分に高速に接触感を提示できるため、反応時間による品質低下の問題は生じない。

最後に人差し指にデバイスを装着し、指を使って積み木を動かすという作業を行った。その結果、違和感なく上手に操作をすることができた。このことから本デバイスは装着したままでも実物体の操作を阻害することが無いと言える。

これまでの実験結果により、提案手法に基づいて製作した試作デバイスが第2 章で挙げた三つの装着型力

覚デバイスの要求仕様を満たしていることが確認された。

7 試作デバイスによる接触感の評価

本デバイスによって提示される接触感が、実物体に触れた場合の接触感にどれだけ近いかを評価するために主観的評価実験を行った。また、実際にデバイスを使用してバーチャルな壁を表現できるのか評価実験を行った。

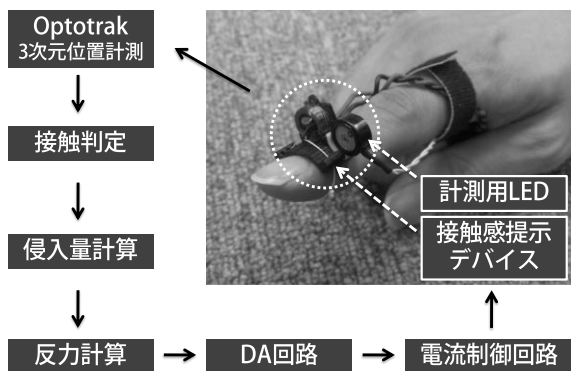


図7 システム図

Fig.7 System Overview

主観的評価実験はリッカート法に基づき 5 段階評価にて行なわれた。被験者は本デバイスを指先に装着しバーチャルな壁を触るタスクを行う。被験者の指の位置は NDI 社製 Optotrak Certus にて三次元計測を行った。計測速度は 1kHz、三次元位置精度は 0.15mm、分解能は 0.01mm である。システム図を図 7 に示す。Optotrak によって得られた指先位置より、バーチャル壁との接触判定を行う。接触している場合はその侵入量を計算し、提示すべき反力を求める。求めた値が DA コンバータ経由で電流制御回路に送られ、デバイスが実際に力を提示する。提示する力は侵入量に比例して大きくなる。被験者には目にはアイマスクをし、耳にはピンクノイズをヘッドホンから聞かせることで視覚、聴覚を遮断した。被験者は現実世界の壁、提案手法、単純な振動刺激の 3 パターンをそれぞれ 20 秒間体験し、三つの評価項目に対して 5 段階評価で回答を行った。評価項目は以下にあげる。

- Q1: 物に当たった感じがしますか
- Q2: 接触時に振動を感じますか
- Q3: 複数回触ることで壁を感じがますか

回答方法は「感じない(1)」、「あまり感じない」、「どちらでもない」、「やや感じる」、「感じる(5)」の 5 段階である。

6 名の 20 代男性および女性の被験者による実験の結果を図 8 に示す。この結果から何れの質問事項に対しても提案手法が振動刺激より実際の接触感の感覚に

近いということがいえる。特に被験者からは振動刺激ではわかりづらい壁に触れた瞬間の感覚が提案手法を通して感じる事ができたとの報告があった。この結果より、提案デバイスで振動という違和感のある刺激方法ではなく、圧覚によって実物体に近い壁を表現することができる事が示された。

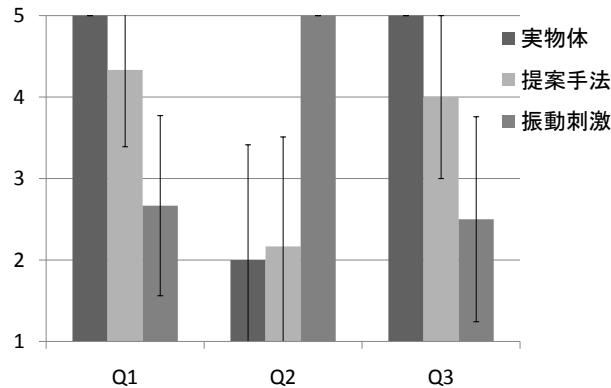


図8 主観評価実験結果

Fig.8 Subjective evaluation experimental result

次に、体験者が提案デバイスによってバーチャルな壁を認識できるかどうか評価実験を行った。実験環境は先の実験と同様である。被験者は利き手をのばした状態で手を左右に動かし、200-300mm 離れたところにあるバーチャル壁を探索する。そして壁に触れたと思ったら手を止めて戻すというタスクを行った。手の速度に関しては、体験者に日常の動作を意識しながら手を動かしてもらった。5 回壁に触るというタスクを 1 セットにし、各被験者 4 セットずつ実験をした。先の 2 セットは練習であり、評価には後半 2 セットを用いた。実験は 4 名の 20 代男性の被験者によって行われた。

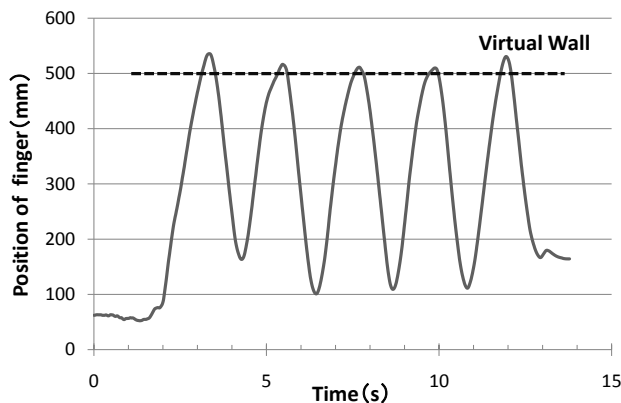


図9 バーチャル壁に触る際の指先の軌跡

Fig.9 Trajectory of a fingertip when touching on the virtual wall

図 9 に被験者がバーチャル壁を提示した際の指の軌跡を示す。図の中で壁のある位置は $y=500$ (図の中の

点線)であり、指が壁の領域に入ると反力が提示される。グラフからは被験者は壁を感じると手をとめて壁から遠ざかる動作が実現していることがわかる。また、壁に触れる直前の指先の速さは約 300-400mm/sec であり、このことから手を移動させながらも十分に壁の位置を知覚させることが可能である。

次に、各被験者について、指先の壁への侵入量や侵入時間の項目に関して調査した。4名の20代男性の被験者による実験の結果を表3に示す。表3には、各試行において指が壁に侵入した際の最大侵入距離、侵入している間の平均侵入距離、そして侵入している間の時間を、後半2セットの10試行で平均したものを載せている。

表3 パーチャル壁への指先侵入量(10試行平均)

Table 3 The amount of penetration of the fingertip into the virtual wall (10 trial means)

被験者	A	B	C	D
最大侵入距離(mm)	18.61	35.00	14.16	35.45
平均侵入距離(mm)	11.06	21.99	8.91	22.85
平均侵入時間(msec)	231.8	351.3	296.8	382.2

表3の結果から、どの被験者においてもパーチャル壁の存在している場所で指を止めることができていることが確認できる。特に最大侵入量では数十 mm 以内におさめることに成功している。

これらの結果から、本デバイスが振動ではなく圧覚によって接触感を提示できること。そして、実際にパーチャルな物体を提示できることが確認された。

8 考察

力覚デバイスの研究はこれまでも多く行われてきた。新しいアクチュエータや新しい原理を発見することで新たな力覚デバイスを提案してきた研究に対し、本研究の特徴は実際に MR 空間での装着型デバイスを利用する状況を考えた上でデバイスを構成した点にある。こうした環境では装着型デバイスは長時間の利用が想定されるため、デバイスの装着感を向上させることは、新たな感覚が提示できる以上に操作性において重要な意味を持つと考える。本研究では装着していることが気にならないようにするために、要求仕様として軽量であること、応答性が良いこと、指先腹部に障害物がすくないことの三つ挙げた。これまで、デバイスの軽量化は求められながらも重量に関しては注意が払われてこなかった。本研究はまず重量という点に焦点をあて、その上で力覚提示として何ができるのかそしてどのようにそれを実現す

るのかを模索した。

本デバイスの特徴は極めて軽量(1.4g)でありながら、応答性に優れ、強い接触感を提示できることにある。把持などの複数本の指を使った作業を行おうとした場合、複数のデバイスをつける必要があるが、仮に両手 10 本指すべてに本デバイスを装着したとしても 14g に抑えることができる。このことから多指でのインタラクションを実現する際に非常に有用なデバイスであると考えられる。また、デバイスを装着しながら実物体の操作も可能であるため、MR アプリケーションにおいてバーチャル物体の存在感を強調することや操作性向上に貢献できると考えられる。

その一方で、配線の軽量化やバッテリー、壊れにくい構造の追求は今後の課題としてあげられる。また、いくら軽量でも何かが装着しているという感覚は残っているため、その装着感を減らすための、デバイスと指の接触形状に関する研究が今後必要になると考えられる。また、本デバイスはワイヤに触れている指先部分とその周辺にしか刺激を行わないため、ベルト式に比べると提示範囲が限定的である。しかしながらワイヤを複数本使用することで刺激範囲を広げ、より面に近い接触感提示も可能である[13]。今後の方針として刺激範囲および接触形状の両方を考えたデバイスの検討を行いたい。

9 まとめと今後の展望

本研究では、モバイルデバイスでの複合現実感環境に力覚フィードバックを付加するために、装着型力覚提示デバイスに着目を行った。そして既存のデバイスの問題点であるデバイスを装着し続けることが苦になることを解決するために、軽量であること、応答性が良いこと、指先腹部に障害物がすくないことの三つをデバイスの要求仕様に挙げた。本研究の中で、求められるデバイスの重量の条件を被験者実験によって明らかにし、三つの要求仕様を満たす、ワイヤによる皮膚感覚刺激を用いた指先装着型接触感提示デバイスを実現した。また、被験者実験を通して、ワイヤによる応力ひずみによって圧覚閾値が低下すること、試作デバイスが実際に接触感を提示できること、そしてバーチャル物体を提示できることが確認された。

今後、映像提示と組み合わせることで、接触感がよりいかにせるアプリケーションの開発を行っていきたいと考えている。筆者らは[10][11]のような、力覚インタラクションを使ったエンタテインメントを提案しているが、本研究によって、直接手で CG のキャラクタに触れることができるといった新たなインタラクションの形を実現することができる。また、小型軽量であることに着目して、複数本の指に本デバイスをつけることで、把持や握るといった細かな作業を可能にしていきたい。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科研費補助金(特別研究員奨励費 19-10679)によって行われた。

参考文献

- [1] 佐藤誠, 平田幸広, 河原田弘: 空間インタフェース装置 SPIDAR の提案; 電子情報通信学会論文誌, Vol.J74-D-2, No.7, pp.887-894, 1991
- [2] T. H. Massie and J. K. Salisbury: The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects; in Proc. 3rd Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 295-300, 1994
- [3] 中村則雄, 福井幸男: 携帯型感覚情報通信における可触化技術の開発動向～非ベース型触力覚インタフェース' GyroCube'について～; バイオメカニズム学会誌, Vol.31, No.2, pp.90-94, 2007
- [4] 稲葉豪, 藤田欣也: 指先圧迫による擬似反力提示装置の提案と試作; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.12, No.1, pp.95-102, 2007
- [5] 南澤孝太, 深町聡一郎, 梶本裕之, 川上直樹, 舘暲: バーチャルな物体の質量および内部ダイナミクスを提示する装着型触力覚ディスプレイ; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.13, No.1, pp.15-23, 2008
- [6] R. Scheibe, M. Moehring, B. Froehlich: Tactile Feedback at the Finger Tips for Improved Direct Interaction in Immersive Environments; IEEE Symposium on 3D User Interfaces 2007, 2007
- [7] 佐藤淑美, 橋本悠希, 梶本裕之: ポータブルデバイスのための擬似的な力覚の提示手法; 第9回システムインテグレーション部門講演会(SI2008), pp.975-976, 2008
- [8] 小森優: 医用アプリケーションにおける生体弾性情報の伝送; Medical Imaging Technology, vol.18 no.6, pp.783-788, 2000
- [9] 大西仁, 山崎聡, 望月要, 中村直人, 結城暁曠: 力覚ディスプレイにおける遅延が弾性知覚に与える影響 心理物理学的測定; 電子情報通信学会技術報告, Vol.105 No.17, pp.5-10, 2005.
- [10] 青木孝文, 三武裕玄, 浅野一行, 栗山貴嗣, 遠山喬, 長谷川晶一, 佐藤誠: 実世界で存在感を持つバーチャルクリーチャの実現 Kobito -Virtual Brownies-; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.11 No.2, pp.313-322, 2006
- [11] 三武裕玄, 青木孝文, 浅野一行, 遠山喬, 長谷川晶一, 佐藤誠: キャラクタとの物理的なインタラクションのための剛体モデルと多次元キーフレームの連動による動作生成法; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.12 No.3, pp.437-446, 2007
- [12] 内川恵二: 講座 感覚・知覚の科学3 聴覚・触覚・前庭感覚, 朝倉書店, 2008.1
- [13] 青木孝文, 三武裕玄, 長谷川晶一, 佐藤誠: ワイヤによる皮膚感覚刺激を用いた指先装着型接触感提示装置の検討; ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, No.09-4, pp.2A2-K02(1)-(3), 2009

(2009年6月4日)

[著者紹介]

青木 孝文 (学生会員)



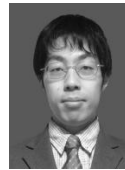
2005年 東京工業大学 理学部 情報科学科卒業, 2007年同大学大学院知能システム科学専攻修士修了, 同年 日本学術振興会特別研究員(DC1), 現在 同大学大学院 同専攻 博士後期課程在学中. バーチャルクリーチャ, 力覚インタフェース, 複合現実感, エンタテインメントコンピューティングの研究に従事. 2006年, 2007年日本バーチャルリアリティ学会論文賞受賞

三武 裕玄 (学生会員)



2006年 東京工業大学 工学部 情報工学科卒業. 2008年同大学大学院知能システム科学専攻修士修了, 同年 日本学術振興会特別研究員(DC1), 現在 同大学大学院 総合理工学研究科 知能システム科学専攻 博士後期課程 在学中. バーチャルヒューマンの動作生成に関する研究に従事. 2006年, 2007年日本バーチャルリアリティ学会論文賞受賞

長谷川 晶一 (正会員)



1997年東京工業大学工学部電気電子工学科卒業, 1999年同大学大学院知能システム科学専攻修士修了, 同年ソニー株式会社入社, 2000年東京工業大学精密工学研究所助手, 2007年電気通信大学知能機械工学科准教授, 現在に至る. バーチャルリアリティ, 力覚インタフェース, ヒューマンインタフェースの研究に従事. 工学博士.

佐藤 誠 (正会員)



1973年東京工業大学工学部電子物理工学科卒業, 1978年同大学院博士課程修了, 同年, 同大学工学部助手, 現在, 同大学精密工学研究所教授, 現在に至る. パターン認識, 画像処理, ヒューマンインタフェースの研究に従事. 工学博士.