

Augmented Realityのための爪装着型触覚ディスプレイの研究

安藤英由樹^{†,††a)} 渡邊 淳司^{††} 稲見 昌彦^{†††}

杉本 麻樹^{†,††*} 前田 太郎^{†,††}

A Study of the Nail-Mounted Tactile Display for Augmented Reality System

Hideyuki ANDO^{†,††a)}, Junji WATANABE^{††}, Masahiko INAMI^{†††},
Maki SUGIMOTO^{†,††*}, and Taro MAEDA^{†,††}

あらまし これまで、指先に皮膚触覚情報を提示する手法についての研究が数多く成されている。しかし、これらの研究においては、指の腹側から触覚提示を行う方式が採用されているため、実環境からの触覚情報にバーチャルな触覚情報を重畳することは困難である。そこで、指の腹側ではなく、爪の側から振動を加えることによって、指のなぞり動作時に実環境へバーチャルな凹凸感を重畳可能な触覚提示デバイスを提案する。本デバイスは、指先で物体をなぞるときに指先に振動が加わると、振動ではなく凹凸といった知覚が生じることを利用している。本論文においては、そのなぞり動作時に指腹部で起きている圧力変化について調べ、その知覚が生じるメカニズムについて考察した。そして、心理物理実験によって任意のバーチャルな凸状幅を提示するための振動タイミングを特定した。

キーワード 触覚提示装置, Augmented Reality, 爪装着型触覚提示装置, アクティブタッチ

1. ま え が き

バーチャルリアリティの研究分野においては物体を触ったときに指先に生じる凸凹感などの皮膚触覚を人工的に再現する研究が行われている。一般に皮膚触覚提示手法は、その刺激周波数帯等が異なるため力覚提示手法 [1] とは区別されて考えられている。これまでに提案されている皮膚触覚提示手法として、横ずれ時のせん断応力を静電アクチュエータを用いて再現し、

凸凹感を提示する手法 [2] や上下するピン [3] によって接触面の形状を変形させる手法などの物理的情報を忠実に再現する手法や、弾性表面波 [4]、電気刺激 [5]、超音波刺激 [6] によって神経や触覚受容器を直接刺激する手法などが挙げられる。また、人間は静止している物体の表面形状を触覚で感じ取ろうとすると、多くの場合、なぞり動作のように能動的に指を動かし、動きに伴う指先への刺激から表面形状を推測している [7]。このなぞり動作時において指先に発生する振動を、上下に振動する棒 [8] やピン [9] や高分子ゲルアクチュエータ [10] 等を用いて再現する触覚提示手法の研究も行われている。

これらの皮膚触覚提示手法はバーチャル空間の中だけではなく、実環境の中に人工的な感覚を重畳する Augmented Reality (以下 AR) [11] の分野においても利用されている。AR においては実環境からの情報に加えてバーチャルな情報を付加するため、実環境からの感覚を損なわないことが AR を実現する上では必須である [12] ~ [14]。しかし、従来の触覚提示のいずれもが指の腹側に対して刺激を加える方式であるため、図 1 左のように、実環境と指腹との間にデバイスを挟むことになり、実環境からの触覚を阻害することにな

[†] 日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所, 厚木市

NTT Communication Science Laboratories, NTT Corporation, 3-1 Morinosato Wakamiya, Atsugi-shi, 243-0198 Japan

^{††} 科学技術振興機構, 川口市

Japan Science and Technology Agency, Kawaguchi Center Building, 4-1-8 Honcho, Kawaguchi-shi, 332-0012 Japan

^{†††} 東京大学大学院情報理工学系研究科, 東京都

Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

^{††††} 電気通信大学知能機械工学科, 調布市

Mechanical Engineering and Intelligent Systems, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, 182-8285 Japan

* 現在, 電気通信大学大学院電気通信学系研究科

a) E-mail: hide@avg.brl.ntt.co.jp

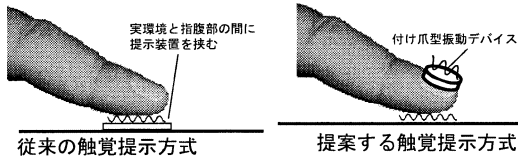


図 1 これまでの触覚提示方式と提案する触覚提示方式
Fig. 1 Proposed method to give tactile sensation.

る。梶本ら [14] は触覚の AR の研究として極薄の電極を指腹に覆い、電気刺激を与えることによって実環境からの触覚と人工的な触覚を同時に得られる手法を提案しているが、この手法においても指腹側にデバイスが存在するため実環境からの触覚情報が損なわれてしまう。

そこで本論文では図 1 右のように、爪上から適切に振動刺激を与えることで凹凸感を錯覚させ、実環境からの触覚を損なうことなくバーチャルな凹凸感を重量可能な手法を提案する。

以下 2. では爪上から凹凸感を生成する原理について述べ、3., 4. においてこの原理を検証する。5. では本手法によって知覚される凹凸覚の特徴に関して、心理物理実験を行った。6. ではこれらの実験結果に基づいて、爪装着型触覚ディスプレイを効果的に AR システムへ適用する手法について提案する。

2. 提案する凹凸覚提示原理

本手法では物体のなぞり動作時に爪上から振動刺激を加えることによって、指腹部に適切なインパルス刺激を生成することで、凹凸のエッジ知覚を再現する。

人間は静止している物体の表面形状を感じ取ろうとすると、多くの場合なぞり動作を行い、指先の動きとそれに伴う指先に生じる刺激の関係から表面形状を推測している [7]。特に凹凸覚の知覚においては、凹凸のエッジによって生じる指の表面と垂直な振動のインパルス成分が重要であることが知られている [8]。そのため凹凸覚の提示においては、なぞり動作に応じて適切なインパルス成分をもつ刺激を提示することが重要である。

本研究で提案する手法では、実環境からの触覚情報を障害しないために、爪上からインパルス刺激を与える。爪上に振動を与えると、図 1 右のようにその駆動力によって間接的に指腹部と接触面に応力が発生する。このとき、触覚受容器は主に指腹部に偏在している [15] ため、爪側よりも物体と接している指腹部にお

いて強く振動感覚が生ずると期待される。したがって、なぞり動作時に、指の表面と垂直な振動のインパルス成分を爪上から与えてもバーチャルな凹凸覚の触覚を重量できると考えられる。

次章では爪上からの振動刺激によって指腹部にインパルス成分が生成されることを確認する実験を行う。

3. 爪状からの振動刺激による指腹部へのインパルス刺激

本章では実環境において基本的なテクスチャである凹凸面のなぞり動作を行っている際に指腹で起きている圧力変化（インパルス成分等）をとらえ、爪上からの振動刺激によって、実環境に類似した刺激を指腹部に生成する手法について実験を行う。実験では、凹凸面のある実環境と爪上からの振動刺激によるバーチャル環境の二つの環境をそれぞれをなぞるときの、指腹部の局所的な一点の力学的応力を計測し、両者の圧力変化について比較する。

3.1 実験 A：実環境でエッジをなぞるときの指腹部の圧力変化

実環境における圧力変化を観察する実験として、凹凸のある実環境を 1 次元方向へ指でなぞったときの移動量と指腹面の圧力を計測する（図 2 A）。実際の凹凸のある物体を指でなぞるとき、指腹側の環境と接する面において振動を観察するために指腹側にフィルム型の圧力分布センサ（ニッタ製 I-SCAN10 × 10、このセンサは 0.52[mm] × 0.52[mm] の計測点が 10 × 10 の格子状に 1.27[mm] ピッチ間隔で配置された圧力分布センサである）を貼った。このセンサは、標準ではすべての点の走査に 10[ms] 程度の計測時間を必要とした。本実験ではアクチュエータの振動周波数が十分観測可能なように改造を施し、1[ms] 以下で計測可能にした。そして、移動距離を非接触に計測するためにレーザ距離計（キーエンス製 LK-500）を用いて原点からの移動距離と圧力の関係について計測を行った。このセンサの中心がなぞり時の接触面の中心に一致するように指腹に固定し、この点の圧力を 0.01[N/cm²] の精度で計測した（図 3 の圧力センサ部参照）。圧力センサの計測点の計測範囲は 0.52[mm] × 0.52[mm] の正方面となっている。またレーザ距離計は約 0.05[mm] の精度の分解能で、原点から圧力分布センサの計測点までの距離を計測した。これらの情報は PC によって 1k[Hz] でサンプリングした。このとき、凹凸の実環境は厚さ 0.25[mm] のケント紙を 10[mm] おきに梯

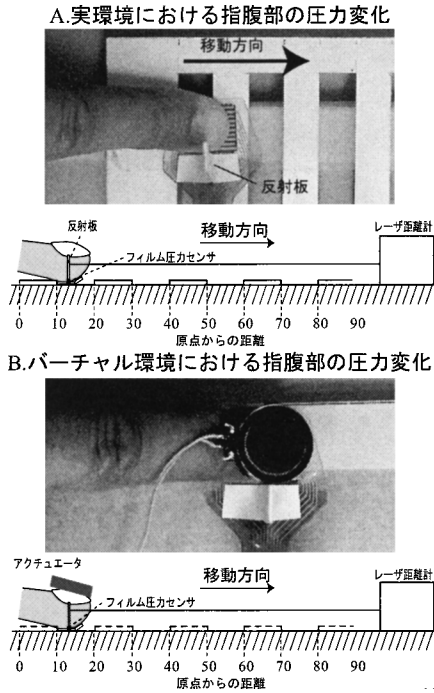


図 2 実験システムの構成
Fig. 2 Composition of experiment system.

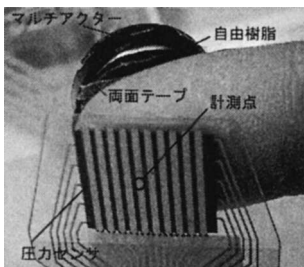


図 3 実験装置の装着
Fig. 3 Installation of experiment device.

子状に切り抜きアクリル板上に貼り付けたものを使用した。

この実験環境下で原点から約 100[mm] までのなぞり動作時における，原点からの距離と指腹側の圧力を計測した．指の移動速度は約 70[mm/s] として，指腹部接地面全体に対して定常的に約 0.50[N] と約 1.00[N] の荷重で押しつけながらなぞった．移動速度，荷重はあらかじめ想定値になるように被験者に練習させておいた．

3.2 実験 B：爪上からの振動刺激による指腹部の圧力変化

バーチャル環境の実現において，爪上に装着するためには小型・軽量が必須となる．小型の振動装置は振動モータが一般的だが指の表面と垂直な方向のみの振動とインパルス成分的な高速応答特性を考慮するとスピーカーの voice coil のように 1 方向のみの往復運動が可能な構造が望ましい．そこで本研究では振動デバイスとしてマルチアクター（NEC トーキン製 Type33）を用いた．この振動デバイスは mass と voice coil により構成されており，振動の共振周波数は約 132[Hz] である．この周波数近傍以外では極端に振動出力が小さくなるため駆動周波数は共振周波数に固定される．この振動デバイスは，インパルス状の振動（振動の包絡線がインパルス型のバースト波形）を生成した場合一定の振幅に落ち着くまでに約 20[ms] 必要とした．この実験においてアクチュエータは定格出力の約 90[%] で駆動した，その装着の様子を図 2 B，図 3 に示す．この振動デバイスは爪の型取りをした形状アダプタを介して爪上に十分な強度で固定されている．等価的なエッジを前実験と同じ位置に設定し，距離計からの距離情報を用いてバーチャルなエッジを横切るときにデバイスが出力できる最小幅のインパルスとして 20[ms] 間振動させた．この条件下で，滑らかなアクリル板上でなぞり動作を行い，原点からの距離と指腹側に発生する力を計測した．この実験も前実験と同様に，指の移動速度は約 70[mm/s]，指腹部接地面全体に対して定常的に約 0.50[N] と約 1.20[N] の荷重となるよう訓練させた後に行った．

3.3 圧力変化計測実験の結果

実験 A において圧力分布センサの中心の 1 点の荷重を圧力に換算した結果を図 4 に示す．図 4 からエッジにさしかかるとインパルス状の力が発生していることが見てとれる．これは凹面から凸面に進入するときも，凸面から凹面に進入するときも同様に観察されている．

このインパルス状の力は指腹に合わせて変形するフィルム状センサの接触面中心の 1 点の微小計測領域内を凹凸が変化するエッジ部（図 4 の (a)10[ms]，(b)20[ms] に見られるような）を通過するとき最も大きな圧力値が検出されていることが分かる．これは指腹部の 1 点（センサの計測領域）がエッジ部にかかるためインパルス状の力を受けていると考えられる．

実験 B において圧力分布センサの中心の 1 点の荷重

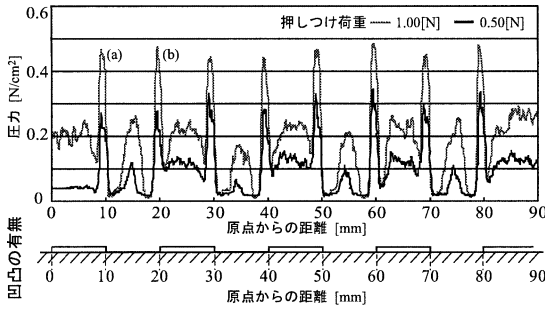


図 4 実環境下での指への力特性 (実験 A)
Fig. 4 Force characteristic to finger under real environment.

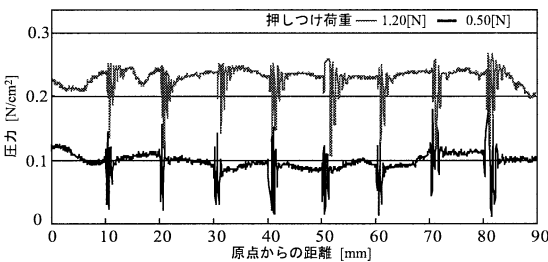


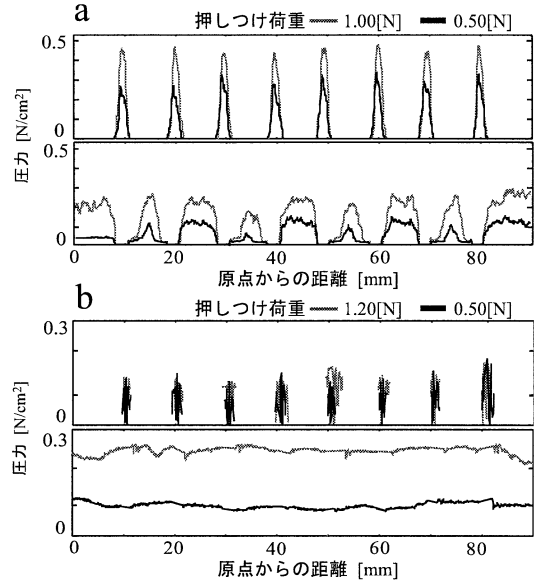
図 5 パーチャル環境下での指への力特性 (実験 B)
Fig. 5 Force characteristic to finger undervirtual environment.

を圧力に換算した結果を図 5 に示す。図 5 から等価的なエッジ部を通過する瞬間において高速な振動 (パースト波形) が発生していることが分かる。

以上の実環境 (実験 A) とパーチャル環境 (実験 B) の力特性を明示的に比較するためにエッジ部インパルス成分とそれ以外の成分に分離を行った。図 4 のエッジ部のインパルス成分を図 6 a 上, それ以外の成分を図 6 a 下に示す。同様に図 5 の力を分離した図を図 6 b に示す。図 6 a 上と図 6 b 上を比較すると同じ位置に同じ時間タイミングでパースト波形の (インパルス刺激と等価的と考えられる) 力が再現されていることが分かる。また, 図 6 a 上から定期的に押しつける荷重に比例してエッジ部のインパルス状の力も増大することが見てとれる。一方で図 6 b 上から定期的に押しつける荷重に対して, エッジ部のインパルス状の力はほとんど変化しない特徴が確認できる。図 6 a 下からは凹凸の段差 (厚み) による圧力変動が現れているが図 6 b 下は滑らかな面のためこのような圧力変動は現れていないことが見てとれる。

3.4 圧力変化計測実験の考察

実環境ではエッジ部においてインパルス状の力が発



a上. 図4エッジ部のインパルス成分
a下. 図4エッジ部のインパルス以外の成分
b上. 図5エッジ部のインパルス成分
b下. 図5エッジ部のインパルス以外の成分

図 6 エッジ部の力の成分の分離
Fig. 6 Element separation of edge part force.

生し, パーチャル環境においては爪上からの振動刺激によって指腹部に高速な振動 (パースト波形) が提示された。このパースト波形の振動幅は約 20[ms] と短いため, 文献 [7], [15] の知見から, 急激な立上りの成分の知覚が強く振動覚としての知覚はあまり感じられないと考えられ, インパルス的な立上りの刺激に類似した知覚が起きると期待される。

また, 実環境では定期的に押しつけられる圧力が増すとエッジ部のインパルス状の圧力の振幅も増大する (図 6 a 上)。しかし, パーチャル環境では定期的に押しつけられる力に対して, この形状はほとんど変化しない (図 6 b 上)。この差異は, 実環境では押しつけ力に比例してインパルス状の力も増大するのに対して, パーチャル環境では押しつけ力に無関係で振動子の振幅のみに変化するためであると考えられる。

4. 爪側振動刺激による触覚の提示

本手法に基づいて制作されたデバイス (図 7) の実演展示を行った [16]。展示において, アクリル板の下に敷かれた白黒で印刷された紙の白と黒の境界を爪先に設置された反射型フォトリフレクタで感知し, こ

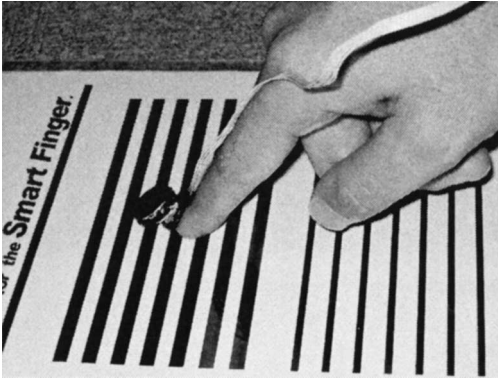


図 7 爪装着型触覚ディスプレイ
Fig. 7 Nail-mounted tactile display.

の境界を通過したときに爪上に 20[ms] の間の振動を発生する前実験と同様の振動デバイスを装着し、図 7 に示すしま状の上をしまに垂直となる方向へ上端から下端までなぞらせた。体験者には、(a) 振動とを感じる、(b) なぞっている面に何らかの凹凸（平らでないテクスチャ）があると感じる、(c) 何も感じない（分からない）」の 3 択の質問を行ったところ、(a) や (c) の回答は 300 人以上の体験者のうち 5[%] 未満であった。

また振動発生のトリガとして白と黒の境界ではなく紫外線を用いた不可視なしまの環境下（紙上に紫外線照射によって励起発光する塗料を図 7 と同じしま状に散布し透明アクリル板下に敷いて使用、被験者には白紙に見える）においても感覚に変化はなかったことから、被験者は書いてある線をエッジとして「視覚的に解釈」したのではないと考えられる。

この体験者の回答結果から、指の動きと連動して振動刺激を与えると 20[ms] の短時間のバースト的な振動は振動覚としては知覚されずに凹凸覚のような触覚に錯覚するということが確認された。また、体験者が記述したコメントには刺激は指腹と環境の接触面全体が受けているにもかかわらず接触面の幅よりも狭い凹凸幅についても幅の違いが認識できるという記述もあった。

しかし、体験者は凹凸があるようには感じられるが、なぞっている最中に接触している面が凹なのか凸なのかは判断できないと記述もあった。3. の実験においても実環境においては凸面への進入なのか、凹面への進入なのか弁別が可能であったのに対して、バーチャル環境下では弁別不能であった。これは、インパルス成分以外の定常的な圧力値（図 6a 下, b 下）が、実環

境では高さの違いを圧力値として得ることができるが、等価的环境下ではこの違いがないため凹凸の判断がつかないと考えられる。また、鋭いエッジではなく鈍いエッジの凹凸覚が得られたという記述が多数見受けられた。

以上より、本手法によって凹凸覚が提示できることは確認できた。そこで次章においては、実際にある大きさの凹凸を提示するにあたって、どのような振動刺激を加えればよいかを調べる。

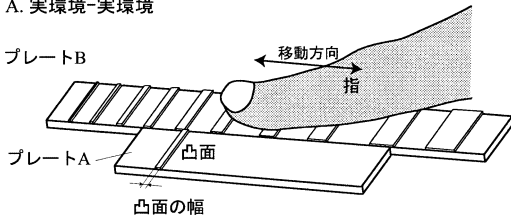
5. 爪側振動刺激によって知覚される凹凸覚の特徴

前章では、なぞり動作を行っているときに爪側に振動刺激を入れることによってバーチャルな凹凸面を提示できることを述べた。また、体験者の感想として、実環境とは異なったエッジ感覚が提示された。そこで、本章では実環境とバーチャル環境では凹凸覚にどのような特徴をもつ差異を有するか調べるために知覚される凸幅を計測する心理物理実験を行った。

5.1 知覚される凸幅の計測

実験では実環境とバーチャル環境において凸幅を変化させたとき、知覚特性にどのような差があるのかを比較する心理物理実験を行う。実環境として、図 8 上に示す高さ 0.25[mm] の凸面をもつプレート A(20 × 80 [mm]) を幅 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10[mm] の 10 枚を使用した。実環境における人間の凸面の幅の知覚特性を調べるために、比較対象となる上記すべて (1 ~ 10[mm]) の幅の凸面すべてをもつプレート B(20 × 160) を準備し、各プレート A 上の凸面と同じの幅に相当するプレート B 上の凸面がどれであるか被験者に答えさせた。このとき、視覚情報によって幅が知覚できないように被験者はすりガラス状のぼかしフィルタ越しになぞり動作を行う。これにより凸面の幅は目視することはできないが大まかな手先の位置は確認することができる。また、10 枚のプレート A は各 1 回ずつランダムかつ同一に選択し、10 枚すべてを回答させる作業を 1 セットとした。このとき幅の数値は被験者には知らされない。これを 3 セット、計 30 試行を 5[名] の被験者に対して行った。また、使用した指は右手の人差し指（表 1 に人差し指の第 1 関節の長さを記す）を用いてなぞらせた。なぞる場合において、指がプレートを押しつける力はあらかじめ約 1.00[N] になるように訓練させた。また、なぞる速度は自由とし、約 30[s] の間自由に触れさせその後に

A. 実環境-実環境



B. 実環境-バーチャル環境

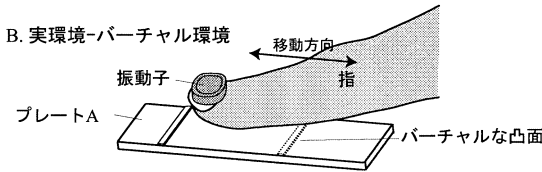


図 8 凸幅の知覚実験

Fig. 8 Perception experiment of convex width.

回答させた。

次にプレート A の凸面のない下部 (図 8 下) に二つの等価的なエッジを提示する。この提示手法は距離計からの距離情報を用いて等価的なエッジを横切るとき、物理的に等価なタイミングとなるように振動 (進入時と退出時に 20[ms] 間の振動) させた。振動デバイスは前実験と同様の手法により爪上に十分な強度で固定されている。この条件下で、プレート A の凸面と同等の幅と知覚されるように等価的なエッジの間の幅を調整させた。調整は + と - に明記された二つのスイッチによってなされ、各々スイッチを 1 回押すたびにエッジの間の幅は 0.5[mm] 変化する。このときの幅の値は被験者には知らされない。なぞる速度は自由とし、約 30[s] の間自由に触れ、調整し最終的な幅を計測値とした。指がプレートを押す力はあらかじめ約 1.00[N] になるように訓練してから行った。また上記実験と同様に被験者はフィルタ越しになぞり動作を行う。このとき 10 枚のプレート A は各 1 回ずつランダムに選択し、10 枚すべてを調整させる作業を 1 セットとした。この実験を 3 セット計 30 試行を同じ被験者に対して行った。

5.2 知覚実験の結果

この実験の結果としてプレート A 上の凸面の幅と知覚された凸面の幅について被験者 5[名] の平均値と標準偏差を図 9 に示す。また、知覚された凸面の幅について各被験者と平均値について、直線回帰分析を行い、切片と傾きを求めた結果を表 1 に示す。

実環境とバーチャル環境の比較した結果 (図 9) より、実環境の凸面の幅に対して傾きは等しいが切片が異なる直線となった。これより、定常的な偏差を有す

表 1 直線回帰分析結果

Table 1 Result of straight line regression analysis.

被験者 (年齢-性別) 第 1 関節長 [mm]	実環境		バーチャル環境	
	切片 [mm]	傾き	切片 [mm]	傾き
A(26-男-25)	0.29	0.94	3.29	1.09
B(27-男-26)	0.31	0.94	4.11	0.92
C(30-男-30)	1.44	0.80	3.71	0.85
D(26-女-25)	0.62	0.91	4.32	0.79
E(28-男-26)	0.31	0.94	3.58	1.05
平均	0.60	0.91	3.80	0.94

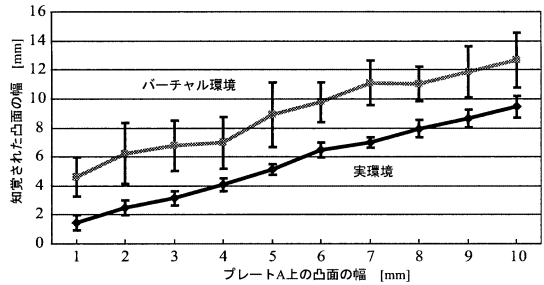


図 9 実環境とバーチャル環境の空間分解能

Fig. 9 Spatial resolution of real and virtual environment.

る特徴が確認できる。この偏差は直線回帰分析 (表 1) の切片からも確認できる。したがって、バーチャル環境では実環境に比べて約 3.8[mm] 短く知覚される特徴を有する。またこの特徴は、(表 1) の傾きがほぼ 1 であることから凸面の幅に依存しないことが分かる。

また、図 9 から、実環境と実環境の比較の場合、標準偏差約 1[mm] であり、実環境とバーチャル環境の比較の場合、標準偏差は約 3[mm] であった。これらは、すべての被験者に同じ傾向が見られた。

この実験より確認された実環境とバーチャル環境の差について特徴をまとめる。

(1) 実環境-実環境, 実環境-バーチャル環境における凸面の幅を比較すると、同じ傾きをもつ直線に近似できるが、実環境-バーチャル環境においては定常的に平均 3.8mm 長く知覚される

(2) 実環境と実環境で凸面の幅を比較した場合の標準偏差は約 1[mm]、実環境とバーチャル環境で凸面の幅を比較した場合の標準偏差は約 3[mm]

5.3 知覚実験の考察

特徴 (1) のバーチャル環境では凸幅が定常的に長く知覚された現象は、接触面積すべてに対して振動が加えられていることが要因であると考えられる。実験では接触面の中央点が等価的な凸面に進入したときにインパルス状の刺激が与えられ、同様に凸面から進出し

たときに再びインパルス状の刺激が指に入力される。しかし接触部は点ではなく広がりをもつため、進入時には等価的な凸面より前に進出時には後に刺激が与えられたと知覚が起こる。このことによって凸面の幅が短く知覚されたと推測される(図10)。しかし、短く知覚される偏差はほぼ一定であるのでバーチャル環境での凸面の幅を定常偏差分(約3.8[mm])だけ広くすれば実環境の凸面の幅と等価に知覚させることが可能になると考えられる。

特徴(2)の標準偏差について議論する。人間が凸幅を知覚する場合、指腹部に分布する多数の触覚受容器からの情報が統合される。実環境における標準偏差の約1[mm]という結果は、受容器は指先の場合1[cm²]当り均等に100[個]程度[15]、つまり約1[mm]間隔に分布していることから妥当な値であると考えられる。一方で、バーチャル環境では標準偏差は約3[mm]であった。この実験においては指腹部と環境との接地部分の形状は直径約8[mm]の円形であった。爪上からの刺激を与えた場合には接地部分のすべての触覚受容器が刺激を受けるため接地幅以下は知覚できないはずである。それにもかかわらず標準偏差は約3[mm]であったことから、この結果は、なぞり動作によって空間的なテクスチャの情報を時間的な情報に置き換えて空間分解能を向上させている可能性を示唆すると考えられる。

この実験においても4.と同様に被験者はバーチャル環境では実環境に比べてエッジの感覚(鋭さ)は低下すると報告した。このエッジ覚の低下が、標準偏差を大きくした要因と考えられる。実環境におけるエッジの感覚はインパルス状の力だけではなく接触面積の変化や凹凸による接触面内の圧力分布の変化が起きており、本装置ではこの現象を再現できないことがエッジ覚の低下や標準偏差を大きくした原因であると考えられる。そこで、エッジの感覚を向上させるための改善点について、以下の3点について考察する。

- (1) デバイスの時間特性の向上
- (2) 複数の受容器の刺激
- (3) 圧力に応じた提示の変化

今回のデバイスにおいて振動周波数は約130 Hzであったため振動刺激によって皮膚下に存在する感覚受容器のうち周波数的に発火し得る受容器はFA-II(Pacinian)とSA-I(Merkel)であると考えられる。(1)FA-IIは接触面積に対して空間加重性をもっていることから、本手法においては刺激される面積が広い

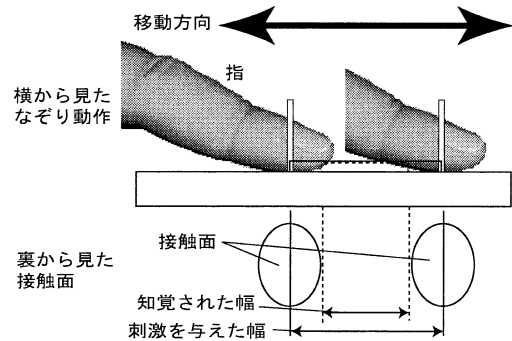


図10 凸幅の知覚ずれ
Fig. 10 Perception gap of convex width.

ためこの受容器が支配的に働いていると考えられる。このFA-II受容器は現在の振動周波数より高い応答特性をもつことから現在よりも高い周波数かつ高出力なアクチュエータを用い、時間特性を向上させることで、エッジ覚の向上が期待される。(2)一方、指が静止している条件下において、微細なエッジ検出に重要な役割を果たしているSA-I[19]は空間周波数的な微分フィルター特性をもっているため、本手法のように接触面積すべてに振動刺激が加わった場合には発火しにくく、このためエッジ感(鋭さ)が低下したと考えられる。したがって、鋭いエッジ感を提示するために複数の振動子によって接触面に弾性表面波[4]を生成する手法などで圧力の空間分布を生成することによってエッジ覚の向上が期待される。(3)文献[8]では圧力に応じた提示の変化が重要であると述べている、3.の図6a上においては実環境が押しつけ力に対してインパルス刺激の振幅の変化が確認されるが、図6b上では変化がないことから、本手法では圧力に応じた提示の変化という情報は欠落している。この情報を付加するためには圧力に応じて振動デバイスの振幅を制御すればよいと考えられ、爪上から指腹部にかかる力を計測する方法[17],[18]を利用すれば可能であると考えられる。

6. Augmented Reality への応用

本手法を Augmented Reality に応用する場合に必要な要素はなぞり動作時において1)提示したい位置の検出,2)指の動きの検出,3)振動刺激,この三つを爪側から行うことである。本手法はなぞり動作によって触覚を得るため、点字のように指腹部全体を押しつけて情報を読み取るといった用途には適さない。しか

し、付け爪のように動作の妨げになりにくく、また電源や制御回路を含めても腕時計程度のサイズに納めることが可能であるため空間に縛られることがない。このため、腕全体の動きを伴うような広範囲に渡って触覚の提示が可能である。例えば、ポスターに描かれた絵の輪郭に触覚を付加したり、プラズマディスプレイといった大画面モニタに対して、触覚によるインタラクティブ性をもたすこと等が考えられる。また、タッチパネルにクリック感を付加することによって操作性の向上をねらった研究 [22] と同様な用途にも本デバイスは適用可能であると考えられる。

また、VR における形状提示システム [20], [21] に本手法を組み合わせることで形状表面に触覚を付加し臨場感の向上が期待できると考えられる。

7. む す び

本論文では爪側から振動を与えることで指腹側に何もつける必要なく実環境に触覚を重畳する新たな触覚デバイスを提案した。このデバイスを用いてなぞり動作を行ったとき、指腹側で起きている振動(力の変化)を計測し、実環境をなぞる場合と比較した。また、バーチャル環境と実環境の凸幅を比較する実験によりどの程度の表現能力を有するのか明らかにした。更に、Augmented Reality のシステムに効果的に用いるための小型のセンサ群と組み合わせた爪装着型触覚ディスプレイについて述べた。

謝辞 この研究は科学技術振興事業団(現在、科学技術振興機構)戦略的創造研究推進事業「協調と制御」領域の一環として行われた。

文 献

- [1] T.H. Massie and J.K. Salisbury, "The PHANTOM haptic interface: A device for probing virtual objects," Proc. ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp.295-301, Chicago, IL, Nov. 1994.
- [2] 山本晃生, 高崎正也, 樋口俊郎, "薄型静電アクチュエータを用いた触覚インタフェース," SICE SI2000 講演論文集, pp.59-60, 2000.
- [3] H. Iwata, H. Yano, F. Nakaizumi, and R. Kawamura, "Project FEELEX: Adding haptic surface to graphics," Proc. SIGGRAPH2001, pp.469-475, 2001.
- [4] 奈良高明, 高崎正也, 前田太郎, 樋口俊郎, 舘 暲, "弾性表面波(SAW)を用いた触覚ディスプレイ," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.5, pp.303-306, 2000.
- [5] 梶本裕之, 川上直樹, 前田太郎, 舘 暲, "皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ," 信学論(D-II), vol.J84-D-II, no.1, pp.120-128, Jan. 2001.
- [6] T. Iwamoto, T. Maeda, and H. Shinoda, "Focused ultrasound for tactile feeling display," Proc. 2001 International Conf. on Artificial Reality and Telexistence, pp.121-126, 2001.
- [7] 岩村吉晃, タッチ, 医学書院, 2001.
- [8] 田中健司, 諸橋隆治, 前田太郎, 柳田康幸, 舘 暲, "インパルス成分を有する振動刺激によるインタラクティブ触覚ディスプレイ," 計測自動制御学会論文集, vol.33, no.7, pp.680-686, 1997.
- [9] 池井 寧, 小林 東, 福田収一, "3次元空間における触覚テクスチャの提示," 日本バーチャルリアリティ学会第3回大会論文集, pp.287-290, 1998.
- [10] 昆陽雅司, 赤澤和伸, 田所 諭, 高森 年, "触運動に応じた触感を呈示するICPF触覚ディスプレイの研究," SICEシステムインテグレーション部門学術講演会, SI2002, vol.2, pp.407-408, 2002.
- [11] R.T. Azuma, "A survey of augmented reality," Presence, vol.6, no.4, pp.355-385, 1997.
- [12] M.M. Minsky, M. Ouh-young, O.W. Steele, F.P. Brooks, Jr., and M. Behensky, "Feeling and seeing: Issues in force display," Comput. Graph., Proc. Siggraph Symposium on 3D Real-Time Interactive Graphics, pp.235-241, 1990.
- [13] 野嶋琢也, 関口大陸, 稲見昌彦, 舘 暲, "力覚提示を利用した実時間実環境作業支援システムの提案," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.7, no.2, pp.193-200, 2002.
- [14] 梶本裕之, 稲見昌彦, 川上直樹, 舘 暲, "電気触覚を用いた皮膚感覚のオーグメンティッドリアリティ," 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.
- [15] 大山 正, 今井省吾, 和気典二(編), 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房, 1994.
- [16] H. Ando, T. Miki, M. Inami, and T. Meda, "SmartFinger: Nail-mounted tactile display," ACM SIGGRAPH 2002 Conference Abstracts and Applications, p.78, Emerging Technologies, 2002.
- [17] S. Mascaro, K.-W. Chang, and H. Asada, "Photoplethysmograph nail sensors for measuring finger forces without haptic obstruction," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.2, pp.962-967, 1999.
- [18] 安藤英由樹, 渡邊淳司, 杉本麻樹, 前田太郎, "独立成分分析による爪装着型センサの接触力と屈曲の分離," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.8, no.4, pp.379-388, 2003.
- [19] A. Iggo, "The structure and function of a slowly adapting touch corpuscle in hairy skin," J. Physiol, vol.200, no.3, pp.763-796, 1969.
- [20] 星野 洋, 平田亮吉, 前田太郎, 舘 暲, "仮想触空間における物体形状の実時間提示法," 日本ロボット学会誌, vol.15, no.6, pp.868-877, 1997.
- [21] 横小路泰義, 佐藤祐司, 木倉崇晴, 吉川恒夫, "多指遭遇型ハプティックデバイスの設計と動作計画," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 2004/11 Vol. J87-D-II No. 11

ルリアリティ学会第 8 回大会論文集, pp.37-40, 2003.

- [22] 福本雅朗, 杉村利明, “タッチパネルにクリック感を付加できる ActiveClick,” 情報処理学会シンポジウムシリーズ, vol.2001, no.5, pp.25-26, 2001.

(平成 15 年 11 月 28 日受付, 16 年 5 月 25 日再受付)



安藤英由樹 (正員)

平 9 愛知工大・電子卒。平 11 同大学院電気電子工学修士課程了。平 11 同大学院工学研究科電気材料工学博士課程。平 12 理化学研究所 BMC JRA 配属。平 13 科学技術振興事業団「協調と制御」領域グループメンバーとして東京大学大学院情報学環研究員を経て、現在 NTT コミュニケーション科学基礎研究所リサーチ・アソシエイトにて、生体工学, VR, ウェアラブルなどの研究に従事。



渡邊 淳司

平 14 東京大学大学院工学系研究科了。現在、同大学院情報理工学系研究科博士課程。眼球運動を利用したディスプレイ及び眼球運動中の視覚特性の研究を行う。日本バーチャルリアリティ学会論文賞受賞(平 13), 学術奨励賞受賞(平 14)。



稲見 昌彦

平 6 東工大・生命理工・生物工学卒。平 8 同大学院生命理工学研究科バイオテクノロジー専攻修士課程了。平 11 東京大学工学系研究科先端学際工学専攻博士課程了。博士(工学)。同大学国際・産学共同研究センターリサーチ・アソシエイト, 同大学院情報理工学系研究科助手を経て, 平 15 電気通信大学知能機械工学科講師となり現在に至る。ロボット, バーチャルリアリティ等インタラクティブ技術に関する研究に従事。情報処理学会山下記念研究賞(平 10), 同学会論文賞(平 11), 日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞(平 12), IEEE Virtual Reality Best Paper Prize 受賞(平 15)。IEEE Computer Society, ヒューマンインタフェース学会, 日本バーチャルリアリティ学会, 日本ロボット学会等各会員。



杉本 麻樹

平 12 千葉工業大・工・電子卒, 平 14 同大学院・情報工・博士前期課程了。東京大学大学院情報学環研究補佐員, NTT コミュニケーション科学基礎研究所客員研究員, 科学技術振興事業団「協調と制御」領域グループメンバーを経て, 現在, 電気通信大学大学院電気通信学研究所研究科在籍。日本バーチャルリアリティ学会会員。



前田 太郎 (正員)

昭 62 東大・工・計数卒。工博。昭 62 通産省工業技術院機械技術研究所。平 4 東大先端科学技術研究センター助手, 平 6 同大学院・工助手, 平 9 同大学院・工講師, 平 12 同大学院情報学環講師。平 14 NTT コミュニケーション科学基礎研究所主幹研究員。人間の知覚特性・神経回路のモデル化, テレグジスタンスの研究に従事。計測自動制御学会論文賞, 学術奨励賞, 日本ロボット学会技術賞受賞。