

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

主論文の要旨

論文題目 Virtual Reality Generated by Pressure and Slippage Tactile Display
(圧覚と滑り覚同時呈示による触覚バーチャルリアリティ)

氏名 周 逸如

論文内容の要旨

近年、通信・テロロボティクスの研究分野では、バーチャルリアリティ (VR) とテレインテラクションの研究が盛んである。これらの研究成果として、メカニズムがいくつか考案され感覚呈示ディスプレイとして発売されている。例えば、視覚・聴覚のディスプレイについては、ヘッドマウントディスプレイと 5.1 チャンネルのサラウンドサウンドシステムなどが市販されている。触覚ディスプレイについても、PHANTOM のような力覚ディスプレイが市販されているが、真の意味での触覚ディスプレイについては研究段階に留まっている。すなわち、 piezoelectric アクチュエータにより生成した弾性表面波を呈示するディスプレイ、油空圧アクチュエータ、ICPF アクチュエータ、電気モーターおよび電気クラッチなどを用いた触覚ディスプレイが開発されているが、いずれも研究段階の域を超えていない。

一方、ヒトの触覚器官の機械受容性単位に関する研究を調査すると、垂直振動を検知する機械受容単位として速順応単位 I および II 型 (FA I, FA II)、分布圧覚を感知する遅順応 I 型 (SA I) および滑り方向振動を感知する遅順応 II 型 (SA II) が存在することが明らかにされている。このため、理想的な触覚ディスプレイの実現には、単純に圧力分布を触覚として呈示するだけでは不十分であり、すべての触覚のユニットに対して同時に複数の刺激を生成機構が必要である。しかし、前述の研究段階にある触覚ディスプレイでは、いずれもこのような触覚刺激を複数生成することが考慮されていなかった。三十年あまりの研究期間を経ても触覚ディスプレイが未だに研究の域を出ない原因の一つとしてこの複数の触覚刺激生成に対する検討不足が挙げられる。

以上の当該分野の動向に鑑みて、本研究の目的として以下の四つを掲げることとする。すなわち、第一目的として、現実的な触感の呈示できるために、分布圧覚だけでなく、滑り覚も呈示できるマウス搭載された新型触覚ディスプレイを開発する。第二目的として、触覚マウスの駆動装置を設計・製作して、分布圧覚・滑り覚呈示システムを開発する。また、第三目的として、エッジ追跡精度とエッジ方向認識精度の実験によって、最適な圧覚・滑り覚の組合せ呈示方法を決定する。さらに、第四の目的として、心理物理実験で、開発したディスプレイを用いて、組合せ呈示の場合に仮想物体形状の正答率が向上することを確認する。

初めに、新型触覚ディスプレイを開発する準備として、ヒトの触覚認識機構に関する研究について文献調査を行った。その結果、前述のようにFAIとSA IIが互い異なる方向の刺激を受け入れる特性があることがわかった。このため、新型触覚ディスプレイの開発では、圧覚だけでなく滑り覚も生成する機構を付与するように設計した。製作では、圧覚分布を生成する機構としてKGS社で開発した点字ドットセルを使用した。この点字ドットセルはPZTパイモルフアクチュエータのアレイで構成され、アクチュエータのニッケル層に電圧を印加すると、アクチュエータは電圧方向に変形し、先端の点字ドットを持上げる。入力電圧200Vを加えた場合、アレイ先端の点字ドットは約1mmの上下運動し、そのとき生じる力は約0.06Nである。圧覚呈示装置は点字ドット間の距離は2.5mm、6行4列のセルを使用した。滑り覚呈示機構として、xおよびy方向の直線運動が可能な二軸リニアモータで構成された富士ゼロックス社製の触覚マウスを使用した。この原理は、基本的にはボイスコイルモータに類似しており、永久磁石の字状コイルが設置されたx軸方向のスライダの上には、同じく8の字状コイルが設置されたスライダが乗っており、これらのスライダの下には永久磁石が設置される構成を採っている。2つのコイルの電流の大きさと方向を調整することによりy方向のスライダの推力を二次元で制御する。推力の最大値はxとy方向ともに約0.7Nである。新触覚ディスプレイでは、y方向スライダの中心に圧覚呈示装置を設置して、分布圧覚と滑り覚の同時呈示する装置を構成する。

開発した新型触覚ディスプレイを評価するために、仮想円、三角形、正方形のエッジ追跡精度の実験を行った。実験では、被験者は触覚ディスプレイを用いて、視覚情報に支配しない環境で行った。平均年齢男性4人の実験結果から、圧覚のみ呈示する場合、ディスプレイは仮想エッジ上を指が触れているか否かを判断し難いことが判明した。特に、正方形と三角形のエッジ変化する角について、トレースがエッジから離れたことが多かった。それは、ディスプレイが継続的にエッジに載らないとき、分布圧覚装置が変化しないであるから。一方、圧覚と滑り覚同時呈示する場合、カーソルの速度に比例して、滑り力が発生し、さらにエッジを越える時、カーソル移動方向に逆方向に力を呈示したため、仮想エッジに対する認識時間について、圧覚と滑り覚の同時呈示の方が約15~30秒認識時間が短縮できた。エッジ追跡の精度について調査したところ、正方形と三角形経路については、同時呈示の効果は明確でない。しかしながら、円形経路の場合については、同時呈示の効果は約6割向上することがわかった。

次に、VRと現実感覚を比較するため、実機による一連の調整法によるエッジ方向認識精度の調査を行い、圧覚と滑り覚同時呈示の妥当性を検討した。バーチャルリアリティで生成されるリアル感と現実の感触を比較可能とするために、任意方向のエッジを現実生成できるエッジ呈示装置をxy直交ステージ（位置決め分解能：5 μ m）と2つの電動回転ステージ（角度分解能：0.008 $^{\circ}$ ）で構成して開発した。2つの電動回転ステージには高さ400 μ m段差が形成されたアルミニウム試験片が設置された。この装置を用いた実験では、被験者は目隠しし、比較刺激を標準刺激に一致するように、ジョイスティック型コントローラを操作してエッジ方向を調整し、一致と感じたところでステージの動作を中止する。この時得られた左右のエッジ方向の差が現実エッジにおける調整精度すなわち閾値である。この結果得られた閾値は後述のVRの実験で得られた閾値と比較されて、本触覚マウスの有効性を示す資料として活用された。

次に、仮想エッジの呈示実験を行い上述の現実エッジの呈示実験で得られた閾値との比較を行った。ヒトの指がエッジをなぞるとき、エッジの角が指表面をひっかいたり、エッジの方向に倣って指が滑る現象が発生する。これを触覚ディスプレイで表現するために、1)圧覚とエッ

ジに垂直方向の滑り覚, 2) 圧覚とエッジに平行な滑り覚, 3) 圧覚のみの 3 種類の触覚を呈示する実験を行った。その結果, 仮想エッジ方向の呈示については, 3 種類の触覚はどちらも現実エッジに近い調整精度が得られた。さらに, 調整値の最終値の標準偏差から弁別閾を同定し, どの条件が操作者により正しくエッジ方向の変化を伝達できるか検討した。その結果, 仮想呈示の中では, 圧覚と平行方向の滑り覚同時呈示の条件が最も小さい弁別閾を示したことから, この条件が最も高い精度で操作者にエッジ方向を伝達できることが判明した。

最後に, 圧覚と滑り覚の同時呈示により, 仮想物体の呈示性能がどの程度向上しているか検討するため, 仮想物体形状認識に対する心理物理実験を行った。この実験では, 円形, 三角形, 正方形, 五角形に対して, 図形毎に 10 回を呈示し, 被験者が目視できない状況下で各 40 回/分の実験を男性 5 人の被験者に対して行った。圧覚のみ呈示と圧覚・平行方向の滑り覚同時呈示の実験を実施した。その結果, 呈示方法に依存せず五角形の正答率が最も低かった。また, 2 つの呈示方法について, 三角形と正方形の正答率の差は 1~2% に対して, 同時呈示する場合, 五角形については 6%, 円形については 15% 向上し, とくにこれらの図形に対して同時呈示の効果が顕著であった。

さらに判断の誤差を調べるために, 各図形の回答率を分析した結果, 三角形の場合, 圧覚のみと同時呈示は両方とも約 8 割と高い正答率が得られた。四角形・五角形の場合回答率の分布は, 類似しているため差異がみとめられなかった。しかし円形については差異が顕著であり, 同時呈示では円形を三角形と取り間違えて回答した回答数が 0 回であり, 同時呈示の場合には図形を大きく取り違えることはない。以上の結果から, 圧覚と滑り覚の同時呈示の場合には, 五角形と円形について圧覚のみ呈示より形状認識の正解率が高かった。圧覚のみ呈示の場合, 図形の上にカーソルと触覚ピンは全数押し出されているので被験者は指が図形の上にあるのか外にあるのか判断し難い。このような事情により, 圧覚のみの呈示では被験者は呈示された図形の判断を誤る可能性があると考えられる。

本研究では, 触覚のパーチャルリアリティの向上を目的として, ピエゾアクチュエータとリニアモータを組み合わせ, 圧覚と滑り覚を同時に呈示できる触覚ディスプレイを開発した。圧覚のみの呈示と圧覚と滑り覚の同時呈示がエッジ追跡精度に与える影響を調べたところ, 円形経路に対して同時呈示がとくに有効であることがわかった。また, エッジ方向の調整実験を行ったところ, 触覚ディスプレイによる仮想エッジの呈示では実物のエッジ呈示に近い精度でエッジ調整ができることがわかった。さらに, 図形認識実験に対して正答率を調査したところ, 圧覚と滑り覚同時呈示の方が五角形と円形に対して特に高い正答率が得られることが判明した。

以上の議論から, 圧覚と滑り覚の同時呈示は, 凹凸図形表示に有効であることがわかった。この同時呈示は, 凹凸感や摩擦係数の呈示に有効であると思われるために, テクスチャの呈示と材料のデモンストレーションのような高いレベル認識に対しては特に効果的期待される。したがって, 今後はこれらの高度な触覚呈示に取り組んで行く所存である。