

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

## 主論文の要旨

論文題目

A Study of Velvet Hand Illusion's Relevance for Next Generation Tactile Displays

氏名

(次世代触覚ディスプレイのためのベルベットハンドイリュージョンの研究)

RAJAEI Nader

## 論文内容の要旨

近年仮想現実感(Virtual Reality; VR)が我々の日常生活に直接あるいは間接的に取り入れられ少なからず影響を受けている。表示がリアルでなくても人に環境のリアルな感覚を与えるのがVR技術であり、VRに関係する感覚は、視覚、聴覚、嗅覚、触覚など五感すべてである。このようなVR技術は、様々な分野、たとえば軍事、教育、医療、健康、娯楽、ファッション、ビジネス、スポーツおよび工業などに応用が期待されている。触覚の呈示技術は仮想環境を通じてリアルな「触った感」を表示できるために、工業、とくにロボット・メカトロニクス関連では、極めて重要視されている。

力覚を含む広義の意味での触覚呈示装置のことを一般にハプティック・デバイスとよび、VR空間での触覚体験を人の手に表示させるための重要なデバイスである。そのため、種々の原理・設計のハプティック・デバイスが種々提案されている。触覚ディスプレイは、ハプティック・デバイスの一要素であり、VR空間に表示された物体の形状だけでなく表面テクスチャや質感を呈示するためのマンマシン・インタフェースである。この触覚ディスプレイを開発するために種々の試みがなされており、現在では物体表面をなぞったときに生じる圧力分布の変化が呈示できるレベルのものが実用化されている。しかしながら、人が物体を触った時に感じる触覚とかなりかけ離れた刺激しか生成できないために、理想的な触覚ディスプレイからはまだほど遠い。

一方、脳を欺いて本物を触ったかのように感じさせてしまえばVRが実現できるという考えから、錯覚現象を触覚のVRに応用する試みには多大な期待が寄せられている。これにより、種々の表面特性、たとえば凹凸形状、材質感、表面テクスチャなどが呈示できるようになることが期待されている。種々の錯覚現象の中でも触覚のVRに応用できると期待されているものとして、本研究ではとくにベルベットハンドイリュージョン(Velvet Hand Illusion; VHI)に着目している。VHIとは、両手の掌で金網を挟み、両手の相対位置関係はそのままに金網の上を滑らせると、存在しないすべすべで柔らかいベルベット生地のような感触を生じる錯覚現象である。

その後の研究で、金網だけでなく二本のぴんと張った鋼線でも VHI が発生し、ベルベット感はその二本の鋼線の間で発生することなどが明らかにされた。さらに、筆者の研究グループでは、被験者自身が手を動かす能動触と自動ステージになどにより鋼線の方を動かす受動触で VHI の発生強度を調べた。その結果、後者の方がよりベルベット感がはっきりしていることなどを明らかにした。本研究では、VHI のメカニズムを解明することを最終目標としている。この目標達成のために 2 つのアプローチによる研究を進める。まず第一に、心理物理学によるアプローチであり、これにより VHI の発生にどのような物理パラメータが影響するのか調査する。第二のアプローチは生理心理学的なアプローチであり、ここでは錯覚が生じているときの脳の賦活状態を調べるためにブレインマシンインタフェース(BMI)を利用して研究を進める。

本論文は、6 章から構成され、第 1 章では研究の背景と目的など研究のあらましが述べられている。まず、本研究では革新的触覚ディスプレイを開発するために、脳を欺く錯覚を利用することを述べ、これまでに内外で研究されてきた触覚の錯覚現象についてサーベイする。その中で、活用する錯覚現象として VHI が有利であることを議論して、その発生メカニズムを解明することを目的とすることを述べる。さらにその実現手段として心理物理学と生理心理学を用いることを述べる。

続く 2 章では、本研究に関係する知識の整理を行っている。まず、ヒトの触覚について心理物理学・生理心理学で得られた知見についてまとめる。ヒトの触覚の受容器（機械受容器とよぶ）には、4 つのタイプがあることを述べ、ヒトの手に分布している 4 種類の機械受容器の分布密度や反応特性などについてまとめる。また、機械受容器で獲得された信号がどのように脳まで伝達され、どのように処理されるのかについてもまとめる。

3 章では、VHI 発生に最も関連の深いパラメータ、すなわち鋼線間距離  $D$ 、鋼線の移動ストローク  $r$  および移動速度  $V$  について VHI 発生とそれらのパラメータの関係について調査する。この調査は、心理物理実験法に基づいて行われ、心理物理実験法として Thurstone の対比較法を用いた。実験の結果、 $r/D$  をパラメータとして整理すると、鋼線間距離よりストロークが十分小さい  $r/D \ll 1$  でも、あるいは十分大きい  $r/D \gg 1$  といった条件でも VHI の強さは低下することがわかった。最も VHI が強くなる条件は、 $r/D \approx 1$  であった。

4 章では、これまでの研究で得られた知見、および各機械受容器の周波数特性が異なることを利用して、VHI の発生について特定の機械受容器が関与しているのか、あるいは複数の機械受容器の組み合わせが関係しているのかなどを調査する。 $r/D \approx 1$  の条件で、移動速度  $V$  を種々変化させ、最も VHI を強く感じる移動速度  $V$  を求めた。その結果、 $V = 80 \text{ mm/s}$  で VHI が最も強くなることがわかった。そのとき鋼線が皮膚表面を通過することによって生じる皮膚の微小振動は  $50\text{Hz}$  であると見積られた。この周波数は、速順応機械受容単位 II 型(FA II)に刺激を与えるのに十分でないことから、FA II は VHI 生成に大きな寄与をしていないことが示された。さらに、これまでよく知られた知見として、圧覚が作用している状態で鋼線が手の上で移動するときに VHI が発生していることがある。これは、遅順応機械受容単位 I 型(SA I)と速順応機械受容単位 I 型(FA I)がともに活動して、遅順応機械受容単位 II 型(SA II)が活動していないときに VHI が発生することを示している。以上の検討から、VHI は複数の機械受容器の反応の組み合わせで生じていることがわかった。

5 章では、4 章の結論から VHI が機械受容器レベルで生じる現象ではなく、脳の中で生じていることが明らかにされたので、機能的核磁気共鳴イメージング(fMRI)を用いて、VHI 時の脳の賦活状態を観察する。本物のベルベット生地では、次のような認識過程が考えられる。プロセス 1：手に触れた物体を物体として知覚する。プロセス 2：知覚した物体の材

質を知る。プロセス3：ベルベット生地のすべすべした快適さを感じる。これらのプロセス1～3にはそれぞれ賦活する領野があり、プロセス1と2に対して中心後回(postcentral gyrus)、頭頂弁蓋(parietal operculum)および後部頭頂葉(posterior parietal lobule)が賦活する。プロセス3に対しては、大脳辺縁系(limbic system)が賦活する。5人の被験者によるパイロット試験の結果、中心後回の第1次感覚野(primary somatosensory of postcentral gyrus)と運動野下頭頂小葉(parietal inferior lobule)に賦活が観察されたが、大脳辺縁系には賦活領域が認められなかった。したがって、VHIではベルベット生地を触ったときのような快適さを感じていないと推察した。

最後に6章では、本研究で得られた成果が要約されている。その結果、VHIを自在に制御する触覚ディスプレイの基本設計に言及している。すなわち、4章で述べたようにVHIを生じさせるには皮膚を引張りSAIIを反応させるようにする必要はない。したがって、特殊なアクチュエータを必要とせず、そのためピエゾアクチュエータのアレイなど従来のアクチュエータで十分対応できることなどが述べられている。パターンが皮膚表面を運動する様子をどのように表現するかなど今後の課題についても述べている。