

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

## 主論文の要旨

An Investigation of the Velvet Hand Illusion Using  
Computational Mechanics and Psychophysics

論文題目 (計算力学と心理物理学によるベルベット・ハンド・イリュージョ  
ンの調査研究)

氏名 CHAMI Abdullah

## 論文内容の要旨

ロボットが人間の住環境や極限環境下で作業を遂行するためには、人間の五感に相当する種々のセンサを備える必要がある。近年内外から注目されているヒューマノイド・ロボットを例にとると、実用化に向けて特に環境と人間への接触によって生じる問題を解決することが急務とされている。また、遠隔操作型のロボットの場合にも、スレーブとして作業を遂行するロボットの作業現場や作業の様子を臨場感もって操作者に伝達することが必要とされている。このように、近年のロボット工学において触覚センサと触覚ディスプレイへの要求レベルが高まっている。しかしながら、非接触を前提とする視覚や聴覚と異なり、触覚センサや触覚ディスプレイでは物体やヒトへの接触を前提としているために、非接触型のセンサやディスプレイに比べて工学的実現の困難さが際立っている。

本研究では、触覚センサや触覚ディスプレイの研究においてブレイクスルーを期すために、触覚の錯覚現象の一つであるベルベット・ハンド・イリュージョン (VHI) を調査して、その機構を解明することによって新しい触覚センサや触覚ディスプレイを開発する上での重要なヒントを得ることを最終目標としている。このためまず、本触覚の錯覚として本研究で取り上げる VHI から説明する。すなわち、VHI とは両手で金網を挟み両手をこすり合わせると本来存在しないベルベット生地のような布あるいは柔らかい紙のようなものを感じる現象である。片手で金網を触ってもこのような感覚は生じない。実際にそこに存在しないものを感じるということは、脳が騙されているということである。脳機能を含めた触覚センシングの機構が解明されれば、本研究の成果は新しい触覚センサの設計思想に繋がると期待される。また、触覚ディスプレイについては、それが物体ハンドリングの仮想現実感によく用いられることから、本研究の成果をより直接的に利用できる。すなわち、仮想現実感では脳を騙してそこに物体があるかのように感じさせることができれば成功であり、VHI の生成機構解明によって操作者に任意の物体を疑似体験させることが可能となると期待される。

VHI の生成機構を解明するために、本研究では二つの方法論を採用する。まず、一

つは心理物理実験法であり、もう一方は計算力学である。前者は、どのような条件のもとで VHI が発生するのか調査するためのものである。感じているか感じていないかは個人的体験であり、一般に外から推し量ることは困難である。そこで、本研究では刺激の物理量と心的変化を関連付けるための実験手法として前者を採用する。また、触覚は皮膚に加えられる力学的刺激により機械受容器が応答することによって生じるために、後者の計算力学は皮膚の変形解析を実施することによって機械受容単位の応答を推測する上で有効に利用される。このため、微小電極を刺入することによって機械受容器の応答を調査するという微小神経電図法に代わって、計算力学を採用する。

本論文は、5章から構成される。まず1章では、前述の本研究の背景と目的を述べている。まず、生物にヒントを得て研究を進める生物模倣の考え方を活用するために、ロボット以外の人工物の設計にこの考え方を利用した研究開発例について広くサーベイする。その後、本研究に深く関連する触覚に関して生物模倣の考え方を活用した例について紹介する。その中で、本研究と関連する人間の皮膚・触覚を調査して触覚センサを研究開発した事例について解説する。さらに、人間の触覚機能に基づいて開発された種々の触覚ディスプレイの研究開発事例についても解説する。最後に、新しい触覚センサと触覚ディスプレイを開発することを目指して、人間の触覚認識機構を解明に直接関連する VHI の発生機構について調査研究を進めることを目的としていることを述べる。

続く第2章では、VHI に関連する錯覚現象を広く理解するために、視覚と触覚の錯覚現象について文献調査した結果をまとめる。その中で、本研究と関連する触覚の錯覚現象に比べて視覚の錯覚現象の方が報告事例の数が圧倒的に多いことを述べたのちに、代表的な視覚の錯覚現象として Müller-Lyer illusion, Barber pole illusion, Ouchi illusion を取り上げ、現在までに考えられている機構の仮説について紹介する。次に、視覚と触覚の錯覚の間で類似性を議論して、前上述の視覚の錯覚として取り上げた Müller-Lyer illusion, Barber pole illusion, Ouchi illusion が触覚系にも生じることを示す。最後に、触覚系でのみ観察されている Fish bone tactile illusion と VHI について解説する。

第3章では、VHI の生じる条件を明らかにするために、Thurstone の一対比較法を用いた一連の心理物理実験について解説する。VHI は金網だけでなく張力を加えた二本の鋼線によっても生じることができる。二本の鋼線をアクリルのフレームに張り、被験者がそれを両手で挟み両手を合わせた状態でスライド運動させ、そのとき発生するベルベット生地感触の強さを評価させた。実験条件としては、1)手の方を動かす(能動触)、2)試料の方をストローク 60mm、速度 120mm/s の往復運動で動かす(受動触)の二条件を採用した。二本の鋼線が、35, 40, 45, 50, 55mm とした5つの試料を用意して生じるベルベット生地感触の強さを評価した。その結果、能動触と受動触を比較すると、受動触の方が鋼線の間隔変化に対するベルベット生地感触の変化が顕著に大きい(約9倍)ことがわかった。この結果は、鋼線の移動速度の制御によってベルベット生地感触を任意に制御できることを意味しており、触覚ディスプレイにおいてアクチュエータにより VHI を自由に演出できる可能性を示している。また、ストローク 60mm、速度 120mm/s の条件では、二本の鋼線距離 35mm~55mm の範囲で鋼線距離に比例してベルベット生地感触が強くなり 55mm で最大値を示すことがわかった。以上の結果から、「圧迫刺激を受けている状態で鋼線の通過を感じる時に VHI が生じる」という従来知見に加えて、生じる条件をより定量的に定める仮説を提案した。すなわち、鋼線間距離と鋼線移動距離(往復運動のストローク)をそれぞれ  $D$  と  $r$  とすると 1)  $r/D \ll 1$  のとき圧迫刺激のみを受ける領域でも VHI が誘発される、2)  $r/D \approx 1$  のとき最大の VHI が生じる、3)  $r/D \gg 1$  のとき線の移動刺激が強く VHI が阻害される。

第4章では、VHI の生じるメカニズムを明らかにするために、計算力学として有限要素法を

用いて VHI が生じているときの触覚受容器に作用している機械刺激を計算・評価する。指を表皮、真皮、皮下組織の三層構造として、それぞれのヤング率をそれぞれ 0.136 MPa、0.08 MPa および 0.034MPa とし、ポアソン比はすべての層について一様に 0.48 とした。微小変形を仮定して、三層構造の材料はすべて線形弾性体とした。鋼線は直径 0.8mm の剛体要素として、平面ひずみ問題として接触変形解析を実施した。なお、過去の研究では表皮の真皮側に形成された畝状の乳頭部が応力集中を生じ、これにより触覚受容器に作用する刺激を増幅していることが明らかにされている。このため、本研究の有限要素の形状モデルでも乳頭部の内部構造を可能な限り忠実に形成した。解析の条件として、1) 二本の指を腹合わせにした状態で、腹合わせした面に鋼線を通過させる (VHI 発生条件)、および 2) 片方の指の表面に鋼線を通過させる (一本指条件)、といった二条件でシミュレーションを実施した。触覚の受容単位の内、遅順応機械受容単位 I 型 (SAI) は圧迫刺激を受け取ること、および SAI が獲得する刺激の強さは Mises 応力で評価できることが過去の文献で明らかにされているために、触覚受容器が存在する位置の Mises 応力を計算した。その結果、Mises 応力は鋼線が指に接触する瞬間と指から離れる瞬間に顕著に大きくなることがわかった。VHI 発生条件と一本指条件を比較すると、一本指条件の方が 2 倍大きい値を示していた。このことは、鋼線が通過する刺激は VHI のトリガーとして作用するが、あまりに大きいと VHI を生成する上で阻害要因となってしまうことがわかった。

最後の第 5 章では結論を述べる。本研究で得られた結論を以下に要約する。

- ・ 能動触と受動触と比較すると、受動触の方が鋼線間隔に変化に対する生成される VHI の強さの変化が大きいことがわかった。これは、今後触覚ディスプレイで VHI を生じさせる場合に制御可能であることを示している。
- ・ 本研究で実施した実験の範囲では、鋼線間隔が広いほど強い VHI 感が生じることがわかった。この結果と前項の結果から、VHI が生じる条件を従来の研究より明確に示すことができた。
- ・ VHI における SAI の反応を調べるために、人間の指を有限要素でモデル化して、鋼線との接触変形解析を実施した。その結果、鋼線が通過するときの刺激が小さいほど VHI が発生しやすいことから、SAI は VHI 発生に関して重要な役割を果たしていることがわかった。
- ・ VHI を生成・制御できる触覚ディスプレイを開発するための基礎データを得るために、鋼線に作用させるための力のパターンを垂直力とせん断力について求めることができた。

今後、本研究をさらに進めるために次の課題がある。すなわち、VHI の発生について、能動触と受動触、および鋼線間距離が及ぼす影響について調べたのみであり、まだ十分明らかにできたとはいえない。今後、鋼線の直径、鋼線の移動速度、鋼線の移動距離などのパラメータについて検討する必要がある。また、本研究の解析は、線形解析に留まっているとともに指の指紋も無視している。さらに掌で触った場合の解析も行っていない。今後、手全体のモデル化も含めて有限要素モデルをより実物の手に近づける必要がある。最後に、本研究の成果に基づいて触覚ディスプレイや触覚センサを設計製作して、本研究で得られた知見を活用することにより本研究の最終目標を実現したい。

