

論 文 の 要 約

論文題目 The Human Recognition Mechanism of Thin Foil: an FEM and Psychophysical Investigation
(FEM と心理物理学を用いたヒトの薄膜認識機構の調査)

氏 名 MAT JUSOH Mohammad Azzeim Bin

ヒトが有する高い触覚センシングの能力の解明に、ヒトの触覚に関する研究の関心が集まっている。ヒトの触覚認識の機構をロボットの触覚センシングに組み入れることが可能となれば、ロボット工学の飛躍的進展が期待される。指先で布やフィルムなど薄膜をつまみ、その厚さを確かめつつ作業を遂行することは、ヒトには普通の作業であるが、ロボットにとっては困難な作業の一つである。それを可能とする器用なメカニカルハンドは、家事や介護などの日常作業をヒトに代わって遂行できるので、多くの人々にとって有効である。そのようなハンドロボットを開発するための有効なアプローチの一つとして、本研究では、特にヒトが持つ薄膜の厚さ判別能力に焦点をあててヒトの触覚認識機構を調査する。本研究を通じて、知能ロボットの触覚センシングの能力向上を目指す。さらに、仮想現実感におけるハプティック・デバイスのようなマン・マシンインターフェースの性能向上を実現するために、明らかにした触覚認識機構を役立てる。

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。ロボット工学における困難な作業として柔軟物体のハンドリングがあり、それが解決されることによって、家庭で日常行われている作業がロボットによって代行されるようになることが議論されている。そのために、ヒトの触覚認識の仕組みを解明してアルゴリズムとしてロボットに適用することが有効であることが述べられている。次に、それを実現する上で行われるヒトの触覚の調査には、心理物理学と有限要素解析 (FEA) が有効であることが述べられ、柔軟物体の中でもシート状物体の厚さ認識に焦点をあてるとしている。さらに、過去の文献調査から、4種類ある機械受容単位 (触覚受容単位) の中から表面の凹凸パターン知覚に役立つ遅順応 I 型単位 (SA-I) が厚さ判定に寄与していることが予想されることが述べられている。したがって本研究では、薄膜の厚さ判定の認識機構を明らかにするために、心理物理学と FEA を用いて SA-I を調査することが目的であることが述べられている。

続く第2章では、本研究に関係するヒトの触覚認識についての知識が整理されてい

る。はじめに、ヒトの感覚情報処理について一般的な解説を行った後に、本研究のテーマである触覚について、文献を挙げて詳細な解説を行っている。その中でも、SA-I に伝搬する信号レベルは、皮膚の真皮内に発生する Mises の相当応力で評価が可能であったとした実験結果に着目し、第 4 章ではその結果を活用することが述べられている。続いて、本研究に最も関連する 2 つの研究について解説している。すなわち、John らは、200 μm から 500 μm の板の厚さの判別を 75 μm の弁別閾で判別できることを示した。続いて宮岡・大岡は、より薄い範囲での調査を実施して、8 から 50 μm の範囲でも薄膜の厚さの判別が可能となることを示し、その弁別閾の大きさが静的な刺激によって決定されることから、この範囲では SA-I によって厚さを判定しているとした。さらに、厚さと弁別閾の関係から、70 μm 以下と 350 μm 以上では、別々のシステムにより厚さを判定しているという仮説を立てた。しかし、広い範囲での調査が行われていないために、この仮説が成立しているかはまだ不明確である。そこで、次の章ではこの仮説を検証することを述べている。

第 3 章では、第 2 章の結果を踏まえて、厚さ認識機構を解明するために、薄膜を金属の箔と薄板（以後まとめて箔とよぶ）として著者らが実施した心理物理学実験についてまとめている。特に、前章の議論では、70 μm ～350 μm の範囲で厚さの判定に関与するシステムが交代していると予測していたことに着目して、探索範囲を 20 μm ～150 μm に拡大することとした。また、厚さの判定に関与するシステムとして、触覚のシステムの他に指の関節覚などの深部感覚のシステムが候補として考えられるために、薄膜の厚さの判定の際に行うつまむ動作について厳密な統制を行うこととした。2 つのシステムが交代する箇所では弁別精度が著しく低下する厚さ領域があると予測したが、恒常法の手続に従って行った実験結果ではそのような弁別精度の低下領域は認められなかった。しかしながら、当初 70 μm ～350 μm の範囲にあると予測される弁別精度の低下領域が 150 μm ～350 μm に縮小できた。また、ヤング率が大きく異なる 2 種類の材料（ステンレス鋼と銅）の箔を右手と左手で同時につまんで厚さ判定を行い、ステンレス箔の厚さと等価に感じる銅箔の厚さについて調査したところ、Cu/SUS（等価に感じる銅箔とステンレス箔の厚さの比）の平均が 50 μm ～150 μm の範囲で約 1.8 であることがわかった。先行研究の 30 μm ～50 μm の範囲で約 1.5 であるという結果と比較すると、厚さが増加すると Cu/SUS 比がやや増加することがわかった。

第 4 章では、箔の厚さ判定時に機械受容単位に伝搬する信号を評価するために実施した FEA についてまとめる。第 3 章で実施した心理物理学実験に合わせて、親指、人差し指、箔の三者の 3D の FE モデルを構築した。一連の数値実験に先立ち、計算誤差が 4%以下となるようにメッシュサイズを調整した。数値実験では、第 2 章で述べたように、SA-I の活性度は Mises の相当応力に比例するという結果に基づき、本 3D-FE モデルで SUS 箔と銅箔を把持した時に真皮内で発生する相当応力を評価することとした。真皮内で発生する相当応力は、箔のつまみ方に依存するために、垂直につまむ、つまんだ時親指と人差し指をスライドする、つまんだときひねるなど、荷重条件を種々変更して調査を行った。一連の数値実験の結果、前述の SUS/Cu 比が厚さの変更に対して一定となるためには、親指と人差し指のスライド運動によるせん断力の外力が必要であることが示された。また、数値実験により求められた SUS/Cu 比は、箔に対して 45° 方向に外力を加える場合が最も大きくなり、200 μm の厚さで約 1.6 となった。このように相当応力の調査により心理物理学実験の結果が説明可能であり、その結果は 200 μm の厚さまでは SA-I により厚さを判定していることを示している。

第 5 章では、第 3 章と 4 章の結果を踏まえて、三軸触覚センサ搭載ロボットハンドにより厚さ判定を行うためのアルゴリズムについて研究した成果をまとめた。供試ハンドは、3 関節の指を 2 本有しており、2 本の指の一方を親指、もう一方を人差し指に見立てて実験を行った。指先

には三軸力の分布を計測できる三軸触覚センサが装着されていた。このロボットハンドが紙幣をつまむことによって生じる圧力分布は紙幣の変形によって変化することを考慮すると、紙幣の枚数が大きいほどたわみにくくなるため、分布の偏りが枚数とともに大きくなることが予想される。このことを考慮して、第一の判定パラメータとして垂直力の分布における偏りを選定した。また、指をスライド運動すると、紙幣が二枚以上の場合と一枚の場合では発生するせん断力が異なる。そこで、第二の判定パラメータとしてスライド運動中に発生する最大せん断応力を選定した。実験の結果、第一の判定パラメータは紙幣の枚数の増加に伴って値が増加する傾向は認められたものの、その変化は計測誤差と同程度であった。一方、第二の判定パラメータでは、枚数一枚と複数枚の間に1.3倍ほどの差があるために十分使用できることがわかった。このように、検出原理は異なるが、ロボットハンドにおいてもせん断方向の外力が重要となることがわかった。

最後に6章では、本研究で得られた成果が要約され、本研究で得られた成果として次の二点を挙げている。すなわち、第一に、薄膜の判定は厚さの大きさによって寄与するシステムが交代するという仮説（仮説1）において、検出精度が大きく低下する領域が当初70 μm ~350 μm にあるとされていたのに対して、本研究でその範囲を150 μm ~350 μm に縮小できたという点を挙げている。第二に、一連のFEAにより箔の厚さが200 μm 以下では、SA-Iが厚さ判定に大きな役割を果たしているとする仮説（仮説2）をより強固に支持する結果が得られたという点を挙げている。最後に、関連する心理物理実験と数値実験を今後も継続することで仮説1と2を検証していくとともに、ロボットに適用するための新しいアルゴリズムの構築についても研究を進めたいと述べて結んでいる。