

学 位 論 文 題 名

感覚フィードバック型ハンドの生体情報工学的研究

学位論文内容の要旨

重度身障者や寝たきりの患者を介助したり、宇宙・海底・鉱山などの危険な環境下で作業を行うためのロボットの社会的な必要性は、ますます増大していく傾向にある。しかし、ロボット自身の感覚で検出した情報をもとにロボット自身が判断して行動する、いわゆる自律型ロボットを実現することは容易ではない。ところで、次世代の情報通信技術やロボット制御技術として、テレグジスタンス（Tele - Existence）や人工現実感（Artificial Reality, Virtual Reality）が注目され始めている。これは架空の世界や遠隔地の様子を手にとるように操作者に感じさせる技術である。このような人工現実感やテレグジスタンスの技術は、人間の判断のもとでロボットが行動するシステムであり、上記の社会的要請に応じる上での重要な技術になるものと期待されている。

これらの研究は、視聴覚の分野では盛んに行われている。しかし、あたかも自分の手指や腕で遠くの機器を操作しているかのように感じさせる触覚のテレグジスタンスの研究は極めて少ない。そこで、本研究では、ヒト手指・腕の触感覚や力感覚に関する人工現実感の機能を備えたシステムである「感覚フィードバック型ハンド」の実現の可能性を、心理・生理学に基づく基礎研究と電子情報工学などに基づく応用研究を並行させて行う生体情報工学的観点から追求した。まず、ヒトの手指で物体に触れたり、把握したときに生じる「圧覚」「ずれ覚」「材質感」および「力覚」を心理物理的手法で調べ、その基礎的知見に基づき、感覚フィードバック型ハンドのためのデバイスを試作した。具体的には、ずれ情報を検出できる人工触覚、圧覚や材質感をヒトの指腹面に呈示する触覚ディスプレイ、反力を腕に呈示するフォースディスプレイなどの開発を試み、さらにその有効性を種々の評価実験を通じて検討した。

本論文は、全IV部・全9章から構成されている。第I部（第1・2章）は本研究の背景、第II部（第3・4章）はヒト手指の触知覚特性に関する基礎研究、第III部（第5・6・7・8章）では感覚フィードバック型ハンドの構築に欠かせないデバイス開発に関する応用研究、第IV部（第9章）では本研究の結論を取り扱っている。以下に、本論文の概要を示す。

第1章では、序論として本研究の背景と触覚情報に基づくテレプレゼンスについて概観し、感覚フィードバック型ハンドの社会的必要性を述べた。

第2章では、生体情報工学の立場を明らかにするために、まず、生体の触覚機能に関する生理学・心理学分野での従来の知見を示した。工学的側面からは、感覚フィードバック型ハンドに関連した種々のセンサと従来の汎用型ロボットハンドを紹介した。さらに、触覚情報をヒトにフィードバックする問題に関しては、義手や機能的電気刺激などの福祉工学や計算機工学分野の人工現実感技術における例を挙げて概観した。また、感覚フィードバック型ハンドという新たなマン・マシン系を設計するにあたって着目すべき触覚機能の研究対象を明確にした。

第3章では、把持感覚に関するヒト手指触覚の知覚特性を心理物理的手法を用いて多角的に分析し、把持感覚呈示のための触覚ディスプレイや人工触覚の設計に関する留意点を明確にすることを試みた。まず、実際の把持状態を模擬した「圧覚」の場合には、機械刺激強度と感覚量の関係は Weber - Fechner の精神物理法則にほぼ従うこと (Stevens の冪法則との対応では冪指数は1.06) を見だし、感覚量が機械刺激の変化速度に大きく依存することを定量的に示した。次に、把持動作において基本的かつ重要な「ずれ覚」の刺激閾を皮膚接触面の移動状態(変位速度・方向・回転)と表面状態(粗さ・粘性・温度)に分類して調べた。その結果、ずれ覚の刺激閾は、直線移動の場合に $20\mu\text{m}$ 程度、回転の場合に 10^{-2}deg 程度であることがわかり、その閾値は速度・方向に対して依存することも定量的に明らかになった。さらに、把持物体の表面温度が 32°C (指先の皮膚温) である場合にヒトはずれを最も敏感に知覚することなども見いだした。他方、このような把持感覚特性の得られた原因を神経生理学との対応づけから推論した。

第4章では、感性情報とも言うべき材質感に関するヒト手指の触知覚特性を心理物理的側面から検討した。まず、能動的・自発的な認知の仕方である動的触知覚に伴って惹起する材質感に含まれる「ざらざら」感と「ぬるぬる」感について調べた。その結果、表面粗さが約 $30\mu\text{m}$ 以上の二次元凹凸パターンで「ざらざら」感を、表面付着物質の粘度が約 17dPas で最も「ぬるぬる」感を指先に知覚するという基礎的知見を得た。次に、手指を動かさずにものに触れる静的触知覚における材質認識能力を調べ、それと皮膚表面の温度変化の関係を検証した。さらに、ここで明らかにされた材質感知覚の性質を踏まえ、材質感触覚ディスプレイに要求される仕様とその設計開発上の工学技術的課題について考察した。

第5章では、物体把持にとって大切な触覚情報であり、既存の触覚センサでは検出不可能であった接触表面の「ずれ」情報をヒト手指の触覚のようにベクトル量で捉えられる人工触覚(応力ベクトルセンサ)の開発を試みた。試作器の方向識別誤差は約 0.27deg であることを性能評価実

験で確認し、ヒト触覚の方向弁別能力に比べても十分に高い精度を有することを示した。ただし、この試作器はヒトの指腹面に比べると大型で柔軟性に欠けていたため抜本的改良を加えた。その結果、ヒト指腹面ほどの柔らかさを持ち、かつ小型なセンサを実現することができた。ここで開発した人工触覚は、ロボット関連機器だけでなく義手や褥瘡防止センサなどの福祉機器にも応用することが可能である。

第6章では、人工触覚などで得られた触覚情報をヒト手指に違和感なく惹起させるための触覚ディスプレイ方式を、2種類の触覚モダリティに関して提案した。ここで対象としたモダリティとは、把持感覚のなかで最も基礎的な感覚である「圧覚」と静的知覚に基づく「材質感」である。まず、圧覚呈示デバイスとして空気圧駆動式の圧覚ディスプレイの開発を試みた。試作した圧覚ディスプレイを被験者の指先に装着して得た感覚特性と第3章で得た圧覚特性との比較・検討から、ここで提案した圧覚呈示方式の妥当性を実証した。次に、材質感の呈示を目的とする触覚ディスプレイを試作した。これは、第4章で取り上げた材質感認識特性と皮膚表面の温度変化量 ΔT との関係から着想を得た材質感呈示方式である。具体的には、ペルチェ効果を利用した温度冷却素子の表面温度をPID動作で制御して、指先へ温度変化刺激(ΔT)を呈示して疑似的材質感を惹起させる呈示方式である。また、絶対判断実験を用いた数理心理学的な2変量情報分析法に基づいて試作装置の評価を行った結果、実際の静的触覚で生じる材質感にかなり近い感覚を生じさせ得ることが確認できた。即ち、材質感の情報を呈示するには、皮膚表面に時間的溫度変化を与えることが有力な手法であることを実証した。ここで試作した圧覚および材質感の触覚ディスプレイは、いずれも駆動形態が簡易でありながら十分な呈示能力を備えており、実用性の高い方式である。

第7章では、人工感覚を有効に利用して外界情報を得るための効果器として試作した汎用型ロボットハンドとそれをヒト手指の動作に同調させて遠隔操作するために必要となる小型関節角度センサについて述べた。試作したロボットハンドは、ヒトのように指先でものを摘みながら作業を行ったり、「コップ握り」のような安定した把持動作ができる人工指であることを示した。このハンドの構造的な特徴は、ハンド自体に全てのアクチュエータを内蔵し、コンパクト化を達成したことが挙げられる。ロボットハンドの教示装置として新たに開発した関節角度センサは、チップコイルを用いて十分に小型・軽量化(約0.1 g)されたものである。また、性能評価実験から、出力特性にはヒステリシスがなく、高速に関節角度を検出できることを実証した。さらに、この関節角度センサを手袋に取り付けたコイルセンサグローブを用いてロボットハンドのための遠隔操作システムを構築し、感覚フィードバック型ハンドの駆動系として実用性のあることを確

認した。

第8章では、ヒトの手指・肘関節に対して、疑似力覚としての拘束感を発生させる装置のために新しく開発した水素吸蔵合金アクチュエータとそれを用いて手指・肘関節に拘束感を与える装置機構について述べた。また、このアクチュエータは、ヒトへ装着する上で適した構造と特性を有していることを確認した。

第9章では、本研究の成果を総括し、感覚フィードバック型ハンドに関する生体情報工学的研究の波及分野を探った。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	伊 福 部	達
副 査	教 授	山 本	克 之
副 査	教 授	下 澤	楯 夫
副 査	教 授	枡 内	香 次

近年、重度身障者の失われた生体機能を代行したり、危険な環境下で人間の行う作業を代行するロボット技術の社会的要請が高まってきている。そのため、遠隔臨場感制御を目的としたテイレグジスタンスシステムや人工現実感のためのヒューマンインタフェースの活発な研究開発が期待されている。しかし、その研究の多くは、視聴覚の分野では盛んに行われているにもかかわらず、その他の感覚の分野に関しては未開拓である。

本論文は、生体情報工学的観点からヒトの手指の触覚情報処理特性を心理物理実験を用いて調べ、その結果に基づき、人工触覚で検出した情報をヒトの手指に伝達・呈示する感覚フィードバック型ハンドの研究について述べたものである。主な結果は以下の点に要約される。

第1章では、序論として本研究の背景と触覚情報に基づくテイレグジスタンスについて述べている。

第2章では、感覚フィードバック型ハンドを開発するにあたって基礎となる従来の知見を生理学・心理学および工学の分野にわたって概観している。

第3章では、ヒトの手指が物体を把持したときに生じる感覚の心理物理特性を調べ、把持感覚を惹起させる触覚ディスプレイや把持情報を検出する人工触覚の設計のための基礎資料を得てい

る。まず、物体把持のときに生じる「圧覚」に関する心理物理特性を求めたところ、指腹面を押つけたときの刺激強度と感覚量の関係は Weber - Fechner の法則に従うことを見だし、また、感覚量が押しつけ強度の変化速度に大きく依存することを定量的に明らかにしている。次に、物体を指腹上で色々な速度や方向で移動させたり回転させたりしたときに生じる「ずれ覚」について、物体表面の粗さ、粘度、温度などをパラメータとして、その心理物理特性を求めている。その結果、ずれ覚の刺激閾は、直線移動の場合に $20\mu\text{m}$ 程度、回転の場合に 10^{-2}deg 程度であることが分かり、その閾値が接触物体の移動速度や移動方向にどのように依存するかを明らかにしている。さらに、把持物体の表面温度が 32°C である場合にずれ覚の閾値が最も小さくなることを見だししている。以上の知見に基づいて、感覚フィードバック型ハンドのための把持感覚ディスプレイの設定基準について考察している。

第4章では、ヒトの手指が物体表面に触れたときに生じる「材質感」に関する心理物理特性を調べている。まず、物体表面に触れている指腹面を自由に動かして材質を識別させる実験を行い、「ざらざら」や「ぬるぬる」と知覚されるときに物体表面の状態を調べている。その結果、表面粗さが約 $30\mu\text{m}$ 以上の2次元凹凸パターンで「ざらざら」した感覚が生じ、表面に付着している物質の粘度が約 17dPas で最も「ぬるぬる」した感覚が生じるという基礎的知見を得ている。次に、物体に触れてから手指を動かさない状態でどの程度の材質識別能力があるかを調べている。その結果、物体に触れた直後からの皮膚表面の温度変化が材質識別の重要な手がかりとしていることを明らかにし、感覚フィードバック型ハンドの材質感ディスプレイの一つとして温度の情報を利用した方法を提案している。

第5章では、物体を把持する上で欠かせない、皮膚と接触表面の「ずれ」情報を検出する人工触覚について述べている。試作した人工触覚はヒト手指の触覚のようにずれの大きさだけでなくその方向も検出できるものであり、既存のものには無い機能を備えている。この人工触覚の方向識別誤差は約 0.27deg であったことから、ヒト触覚のずれの方向弁別能力に比べても十分に高い精度を有し、感覚フィードバック型ハンドの人工触覚として有用であることを確認している。

第6章では、人工触覚で得られた情報をヒト手指の触覚にフィードバックさせる触覚ディスプレイ方式を考案し、その有効性を試作器を用いて調べている。まず、圧覚に関しては空気圧駆動式ディスプレイを提案し、第3章で求めたヒト手指の圧覚特性と類似する特性が得られるような呈示方法を実現している。次に、第4章で得られた知見に基づき、ペルチェ素子を利用して温度の違いを指腹面に呈示する材質感ディスプレイを試作している。また、情報理論の観点から、実際に物体に触れたときの材質識別能力と温度の違いで疑似的な材質感を与えたときの識別能力を

比較した結果、両者は同程度の伝達情報量を持つことを確認している。

第7章では、人工触覚を取り付けるための多関節ハンドとそれをヒト手指の動作に同調させて遠隔操作するために必要となる手指関節角度センサについて述べている。試作したロボットハンドは2指6関節の人工指であり、手指関節角度センサはチップコイルを利用したもので、十分に小型で軽量（約0.1 g）である。このセンサの出力特性には、ヒステリシスがなく、高速に関節角度を検出できることを確かめている。また、この関節角度センサを取り付けたグローブを用いて、ヒトの手指の動きと同様の動きをするロボットハンドシステムを構築し、このシステムが感覚フィードバック型ハンドの駆動系として実用性のあることを確認している。

第8章では、感覚フィードバック型ハンドを動かすためのアクチュエータとヒトの手指や肘関節に力覚情報を呈示するフォースディスプレイについて述べている。ここでは、温度変化により水素を吸収したり排出する合金に着目し、6 gの合金量で10 kgの物体を上下させることのできる小型のアクチュエータを試作している。また、このアクチュエータは柔らかな構造を有しているため、ヒトへの装着に適しており、力情報を呈示するフォースディスプレイとしても有用であることを述べている。

第9章では、本研究の成果を総括し、感覚フィードバック型ハンドに関する生体情報工学的研究の波及分野を探っている。

以上のように本論文は、心理物理実験からヒト手指の触知覚特性に関する新知見を得、それに基づいて感覚フィードバック型ハンドを開発し、その有効性を実験的に確認したものである。これらの成果から、本研究はヒューマンインタフェースに関連した生体工学とロボット工学の進歩に寄与するところが多い。よって、著者は博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。