

氏名	多門 良
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第1060号
学位授与年月日	平成29年3月22日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	超音波振動を用いた皮膚感覚インターフェースに関する研究
論文審査委員	委員長 教授 高崎 正也 委員 教授 水野 毅 委員 教授 綿貫 啓一 委員 准教授 辻 俊明

論文の内容の要旨

これまでに、超音波の一種である弾性表面波（Surface acoustic wave: SAW）の定在波を用いた皮膚感覚ディスプレイが提案されている。さらに、これを用いたペンタブレット型のインターフェースが製作され、使用者に「書き味」の提示が可能である。弾性表面波皮膚感覚ディスプレイと市販の液晶ペンタブレットと組み合わせることで、皮膚感覚と視覚との統合も実現されている。

弾性表面波皮膚感覚ディスプレイでは、圧電基板表面にIDT（interdigital transducer）が2組形成されており、両IDTに交流電圧を印加することで基板表面に形成される弾性表面波の定在波を用いる。指でなぞるタイプの皮膚感覚ディスプレイでは指でアルミフィルムからなるスライダ越しにディスプレイをなぞり、ペンタブレット型では指の代わりにペンを用いる。基板表面をなぞった際に、指もしくはペンと振動子との間には摩擦力が生じるが、なぞり動作中に基板表面に弾性表面波の定在波が励振・伝播されると摩擦力は減少する。なぞり動作に応じて弾性表面波のON/OFFを制御することにより、摩擦が変化し振動が生じる。この振動を使用者は皮膚感覚として知覚する。

しかしながら、一定速度でのなぞり動作では弾性表面波のON/OFF切り替え周波数が単一となり、生成される振動の周波数が単一となる。使用者からは「提示される感覚が不自然である」との感想が得られたため、インターフェースとして実用化する上でより自然な感覚の提示が必要であると考えられる。そこで、生成される振動の周波数スペクトルに着目し、弾性表面波のON/OFF切り替え周波数の不自然なピークをなくすために擬似乱数列を参照した。これにより生成される振動の周波数にゆらぎが生じ、実際にデモンストレーションを行ったところ従来の制御方法に比べて自然であるという回答を得た。このことから、皮膚感覚ディスプレイにおいて自然な粗さ感覚を提示するためには、生成される振動の周波数にゆらぎを持たせることが有効であるといえる。

一方、これまで弾性表面波の励振には正弦波交流電圧をIDTに印加していたが、このときの交流電圧の周波数はIDTの構造から決定される共振周波数であり、MHz帯の高周波であるため、励振には高価な高周波発振器・高周波増幅器が必要であった。多数の振動子を使用するシステムでは個々の振動子に対し発振器・増幅器が必要となるため、システム全体が非常に高価となり、非現実的であった。そこで、新たにIDTの周期構造に着目し、パルス波を用いた弾性表面波の励振を提案した。この方法ではIDTにパルスを印加し

た際の電圧の急峻な立ち上がり・立ち下がりを利用することで、IDTの交差指数と等しい波数の弾性表面波を励振することができる。パルス波の立ち上がりと立ち下がりとを適切なタイミングで繰り返すことで弾性表面波の連続波の励振が可能であるため、仮に20対のIDTからなる共振周波数9.60MHzの振動子を使用する場合、一回の立ち上がりで弾性表面波は20波励振され、246kHzのパルス波により連続波となる。信号源としてTTLレベルのマイクロコンピュータの出力を使用でき、信号増幅には簡易なFETスイッチング増幅回路を使用できるため、より安価な弾性表面波の励振システムとすることができる。等価回路によるシミュレーションを行い、提案した手法により弾性表面波の励振が可能であることを確認した。4つのFETからなるフルブリッジ構成のスイッチング増幅回路を製作し、弾性表面波の励振実験を行ったところ、皮膚感覚提示に十分な振幅の弾性表面波の励振を確認した。提案した方法を弾性表面波皮膚感覚ディスプレイに実装し、皮膚感覚の提示が可能であることを確認した。安価かつ簡易な弾性表面波皮膚感覚ディスプレイを構成可能であるため、振動子を多数配置するような大面積の皮膚感覚ディスプレイの構成が現実的になったといえる。

また、皮膚感覚ディスプレイの応用として、力覚提示デバイスとの融合を行った。力覚提示により、皮膚感覚ディスプレイを補うことが可能なことを確認した。加えて、皮膚感覚提示による視覚障害者補助についても検討を行った。視覚障害者と聞くと全盲者を思い浮かべる人が多いが、残存視力のある弱視者が大半を占めており、また怪我や疾病等により後天的に視力を失う人も多い。視覚障害者に対し製作した皮膚感覚ディスプレイを用いてデモンストレーションを行い、視覚障害者に対する皮膚感覚提示の有効性を確認した。

論文の審査結果の要旨

本論文は、超音波振動を用いた皮膚感覚インターフェースとして弾性表面波皮膚感覚ディスプレイを対象とし、インターフェースとしての完成度の向上を目指したものである。人間の感覚のうち皮膚感覚を提示するデバイスが様々な研究グループによって行われているが、先行研究において超音波の一種である弾性表面波を用いて摩擦を変化させることで粗さ感覚を提示する弾性表面波皮膚感覚ディスプレイが提案・開発されている。しかしながら、この弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの体験者からは粗さの感覚が不自然であるとの意見が得られていた。これを解決するため、本論文ではディスプレイによる摩擦変化によって生じる振動の周波数へゆらぎを与える手法が提案され、有効性が検証されている。また、近年普及が進んでいる大面積のタッチパネル等への適用が先行研究において検討されており、非圧電材料へ弾性表面波の励振を行う間接励振という手法が提案されている。この方法ではこれまで振動子の大面積化の妨げとなっていた基板材料を一般的な非圧電材料（ガラス等）とし、基板表面に振動子を複数貼り付けることで大面積化が可能と考えられていたが、実際には個々の振動子の駆動に高価な高周波発振器及び高周波増幅器を用いる必要があることから実現は困難であった。本論文ではこの解決策として新たな弾性表面波の励振方法が提案され、有効性が検証されている。

第1章では、人の皮膚感覚を提示することの意義、皮膚感覚ディスプレイが有する課題等の研究背景が述べられており、インターフェースとしての完成度の向上をはかることを研究の目的として述べている。

第2章では、弾性表面波について述べている。一般的な弾性表面波の励振原理及び反射原理が述べられ、振動子の製作方法が説明されている。更に、弾性表面波の応用例、応用デバイスについて述べられている。以下の章を述べるための、基礎的技術事項である。

第3章では、新たな弾性表面波の励振方法としてパルス波を用いた方法が説明されている。まず、従来の弾性表面波の励振方法での問題点が述べられ、パルス波を用いた励振方法の原理について説明がされている。実際に励振可能かどうか等価回路を用いてシミュレーションがなされ、励振に必要な装置の説明がなされている。実際に励振された波について検証がなされ、波形の評価や励振効率の評価がなされている。

第4章では、弾性表面波皮膚感覚ディスプレイについて述べている。はじめに人間の持つ皮膚感覚について説明され、近年の触覚ディスプレイの動向について述べている。近年のタッチパネル様のインターフェース及びペンを用いるインターフェースについて述べている。弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの皮膚感覚提示原理について説明し、ペンタブレット型皮膚感覚ディスプレイについて述べている。従来の皮膚感覚ディスプレイにおいて提示される粗さ感覚が不自然であるという使用者からの感想に対し、なぞり速度に応じて弾性表面波をON/OFF切替するという制御方法について言及している。提示される感覚の向上を目指した新たな制御方法としてON/OFF切替信号の周波数にゆらぎを含ませる方法を提案し、皮膚感覚ディスプレイに実装し従来の方法と生成される振動の比較を行っている。また実験により提案した方法の有効性を検証している。これらに加えて第3章にて言及している皮膚感覚ディスプレイの大面積化について、パルス波を用いた弾性表面波の励振方法の皮膚感覚ディスプレイへの実装が行われている。直接励振および間接励振の構成において皮膚感覚の提示が確認されており、これらを用いたデモンストレーション装置の製作が行われている。間接励振を用いた構成では従来と比べてより大面積の皮膚感覚ディスプレイとなっており、将来の大面積皮膚感覚ディスプレイの実現について言及している。

第5章では、皮膚感覚ディスプレイの応用について述べている。皮膚感覚ディスプレイと市販の力覚ディスプレイとの組み合わせにより、ディスプレイ使用時の動作範囲の制限について試みがなされている。また、視

覚障害者向けデバイスの分析が行われており、視覚情報を補完する触覚コンピュータインターフェースの重要性が述べられている。実際に皮膚感覚ディスプレイを実際に全盲者に体験してもらい、得られた意見から、今後の視覚障害者向けのコンピュータ操作補助デバイスの方向性について検討がなされている。

第6章では、本研究のまとめと結言が述べられている。皮膚感覚ディスプレイ技術を用いた今後の展望についても述べられている。

本論文で述べられている研究成果のうち、

- ・パルス波を用いた弾性表面波の励振
- ・弾性表面波皮膚感覚ディスプレイにより提示される感覚の向上

に関しては学術論文としてまとめられている。前者は、International Journal of Automation and Technologyに1編掲載されている。後者は、計測自動制御学会（SICE）JCMSIにおいて1編掲載されており、共著論文が1編掲載されている。その他、本論文に関する国際会議の口頭発表が3件ある。

以上を鑑み、審査委員会は博士（工学）の学位に十分に値すると判断した。