

氏名	小谷 浩之
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 736 号
学位授与年月日	平成 21 年 3 月 24 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	弾性表面波アクチュエータの高性能化
論文審査委員	委員長 教授 水野 毅
	委員 教授 佐藤 勇一
	委員 教授 綿貫 啓一
	委員 准教授 高崎 正也

## 論文の内容の要旨

産業においてはメカトロニクス分野の発展やマイクロマシン分野、医療分野をはじめとする新たな技術分野の出現に伴い、圧電アクチュエータの需要及びその性能に関する要求も年々高まってきている。一方、弾性表面波の特長に着目したアクチュエータの研究が行われてきている。弾性表面波とは、固体表面にエネルギーを集中させて伝搬する弾性波の一種であり、エネルギー密度が高く、薄型のデバイスを構成でき、裏面での支持が可能といった利点を有している。そのため、弾性表面波を利用したデバイスは、主に通信分野で用いられており、すでに実用化されている。アクチュエータに応用する際も、同様の利点を持ちつつ構成できるため、モータや触覚提示デバイスである皮膚感覚ディスプレイに適用され、そのエネルギー密度の高さや薄型・シンプルな構造から実用化が期待されている。しかし、両アクチュエータは共に圧電材料を波の伝搬媒体としても用いるため、材料の性質上、サイズ・形状の制限が問題となる。また、モータに関しては、摩擦駆動面の摩擦や低速度駆動が困難であるといった問題が、皮膚感覚ディスプレイに関しては、コントローラ最適化のための諸特性が明らかとなっていないといった問題が存在する。そこで、本論文は、弾性表面波アクチュエータの中でも弾性表面波モータと弾性表面波皮膚感覚ディスプレイに着目し、使用材料に起因するサイズ・形状の問題や産業応用する上で問題となる課題を解決し、各アクチュエータの高性能化を行った。

各アクチュエータに使用する弾性表面波振動子においては、圧電材料に起因するサイズ・形状の問題が生じていた。産業への応用の際に、解決しなければならない問題であるため、新たな弾性表面波の励振・伝搬方法を提案し、その問題解決を検討した。サイズ・形状の制約を解消するために、圧電材料により振動を励振させ、間接的に非圧電材料に伝搬させる間接励振法を採用した。圧電材料には  $\text{LiNbO}_3$ 、非圧電材料にはガラス基板を用いて間接励振を行い、弾性波の励振・伝搬を実現した。各アクチュエータに応用するためには、薄型かつシンプルな構成が求められるため、励振方法の構成を検討し、励振されている弾性波についての検討を行った。また、各アクチュエータへの応用に適した励振方法を検討し、弾性表面波振動子の高性能化を図った。

弾性表面波モータにおいては、サイズ・形状の問題のほかに、低速度駆動及び耐摩擦化について検討し、モータの高性能化を行った。低速度駆動については、弾性表面波モータは摩擦駆動であるため不感帯が存在することから、入力電流の調整のみでは実現不可能な速度領域が存在する。産業へ応用する場合、減速機構を必

要とせず、ひとつのアクチュエータで広域にわたる速度を実現することは有益であるため、その低速度の実現を試みた。PWM を応用し、スライダの構成、搬送波の周波数を適切に選定し、閉ループ制御を施すことにより低速度を実現した。同様に摩擦駆動であるため、モータの摩擦駆動面には摩耗の問題が存在する。耐摩耗化は実用化に向けて必要不可欠な技術であり、解決するための技術を提案した。本研究では既存のスライダが多接点構造を有しており、それと同様の構造を有するセグメント構造ダイヤモンド状炭素膜の応用を検討した。モータの各摩擦駆動面（スライダ、ステータ振動子）のそれぞれに適用した場合を検討した結果、駆動を確認し、その有用性を示した。サイズ・形状の問題に関しては、間接励振法を弾性表面波モータに応用した。非圧電材料に石英ガラスを採用し、その駆動に成功した。これにより、サイズや形状の制約のないモータを実現することが可能となった。

弾性表面波皮膚感覚ディスプレイにおいては、所望の感覚を再現するためにはコントローラの最適化が必要となる。そのため、評価用の1自由度弾性表面波皮膚感覚ディスプレイを製作した。製作したディスプレイを用い、被験者数161人に対して皮膚感覚提示実験を行い、コントローラ設計のための制御パラメータの設計指針を得た。また、摩擦係数の変化を皮膚感覚提示原理としているが、指と振動子との間の詳細な摩擦係数の関係は明らかとなっていなかった。その関係を明らかにし、コントローラ設計のための設計指針を得た。また、コンピュータディスプレイやタッチパネルなどへの応用の際には、ディスプレイの大型化が要求されるため、提案した間接励振法を適用することにより、その解決を試みた。ガラス基板を用いた振動子により皮膚感覚が提示できることを確認した。また、透明であるというガラスの特徴を活かし、視覚デバイスとの融合を行った。また、ガラスにはサイズ・形状の制約がないため、間接励振を適用することにより大型化も可能となる。そこで、平面2自由度のなぞり動作に対応した皮膚感覚ディスプレイを製作し、皮膚感覚が提示されることを確認した。さらに、自由な形状の振動子を製作できることから、コンピュータマウスに応用し、振動出力を有する触覚マウスの製作を行った。コンピュータと連動させたアプリケーションにより、その効果を確認した。以上より、コントローラを最適化するための諸特性と高性能・高機能なインターフェースを実現の可能性を示すことができた。

## 論文の審査結果の要旨

本論文の審査委員会は2009年1月29日に論文発表会を開催した。その発表を含めて学位論文の審査を行った。研究の概要は以下のとおりである。

産業においてはメカトロニクス分野の発展やマイクロマシン分野、医療分野をはじめとする新たな技術分野の出現に伴い、圧電アクチュエータの需要及びその性能に関する要求も年々高まってきている。一方、弾性表面波の特長に着目したアクチュエータの研究が行われてきている。弾性表面波とは、固体表面にエネルギーを集中させて伝搬する弾性波の一種であり、エネルギー密度が高く、薄型のデバイスを構成でき、裏面での支持が可能といった利点を有している。そのため、弾性表面波を利用したデバイスは、主に通信分野で用いられており、すでに実用化されている。アクチュエータに応用する際も、同様の利点を持ちつつ構成できるため、モータや触覚提示デバイスである皮膚感覚ディスプレイに適用され、そのエネルギー密度の高さや薄型・シンプルな構造から実用化が期待されている。しかし、両アクチュエータは、共に圧電材料を波の伝搬媒体としても用いるため、材料の性質上、サイズ・形状が制限されている。また、モータには、摩擦駆動面の摩擦や低速度駆動が困難であるという問題があり、皮膚感覚ディスプレイには、コントローラ最適化のための諸特性が明らかでないという問題がある。本論文は、弾性表面波モータと弾性表面波皮膚感覚ディスプレイを対象として、材料に起因するサイズ・形状の問題や応用上での諸課題を解決し、各アクチュエータの高性能化を行っている。

本論文は、以下の6章からなる。

第1章は、序章であり、研究の背景、弾性表面波アクチュエータの概要、本研究の目的および構成について説明している。

第2章では、弾性表面波とそれを利用したデバイスについて述べている。

第3章では間接励振の提案およびそれを用いた弾性表面波振動子の高性能化について述べている。各アクチュエータに使用する弾性表面波振動子は、圧電材料であるためにサイズ・形状が制約されている。この問題を解決するため、新たな弾性表面波の励振・伝搬方法を提案している。具体的には、圧電材料により振動を励振させ、間接的に非圧電材料に伝搬させる間接励振法を適用している。圧電材料にはLiNbO<sub>3</sub>、非圧電材料にはガラス基板を用いて間接励振を行い、弾性波の励振・伝搬を実現している。アクチュエータに応用するためには、薄型かつシンプルな構成が求められるため、励振方法の構成を検討し、励振されている弾性波についての検討を行っている。その結果、弾性波の波長と非圧電材料の表面波音速から決定される周波数と圧電材料の電氣的な極大を示す周波数をできるだけ一致させることで、直接励振に匹敵する大きさの弾性波を励振・伝搬できることを実証している。また、各アクチュエータの応用に適した励振方法を検討し、高性能化を図っている。

第4章では弾性表面波モータの高性能化を行っている。また、サイズ・形状の問題のほかに、低速度駆動及び耐摩擦化について検討している。弾性表面波モータは、摩擦駆動であるため不感帯が存在し、入力電流の大きさの調整だけでは実現不可能な領域が低速度域に存在する。産業へ応用する場合、減速機構を用いることなく単一のアクチュエータで広域にわたる速度を実現することは有益であるので、低速度駆動の実現を

試みている。PWM を応用し、スライダの構成、搬送波の周波数を適切に選定し、閉ループ制御を施すことにより低速度を実現している。一方、摩擦駆動であるため、モータの摩擦駆動面には摩耗の問題が存在する。耐摩耗化は、実用化に向けて不可欠な技術である。本研究では、既存のスライダが多接点構造を有していることに着目し、同様の構造を有するセグメント構造ダイヤモンド状炭素膜の応用を検討している。モータの各摩擦駆動面（スライダ、ステータ振動子）のそれぞれに適用した結果、駆動の実現に成功し、その有用性を示している。サイズ・形状の問題に関しては、間接励振法を弾性表面波モータに応用している。非圧電材料に石英ガラスを採用し、その駆動に成功している。これにより、サイズや形状の制約のないモータを実現することを可能としている。

第5章では弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの高性能化を行っている。弾性表面波皮膚感覚ディスプレイにおいては、所望の感覚を再現するため、コントローラの最適化が必要である。このため、評価用の1自由度弾性表面波皮膚感覚ディスプレイを製作し、被験者数161人に対して皮膚感覚提示実験を行って、コントローラ設計のための制御パラメータの設計指針を得ている。また、摩擦係数の変化を皮膚感覚提示原理としているが、これまで指と振動子との間の詳細な摩擦係数の関係は明らかでなかった。本論文では、その関係を明らかにし、コントローラ設計のための設計指針を示している。また、コンピュータディスプレイやタッチパネルなどへの応用するときには、ディスプレイの大型化が必要となるため、提案した間接励振法を適用することにより、その解決を試みている。ガラス基板を用いた振動子により皮膚感覚が提示できることを摩擦係数の変化及びスライダ速度の変化を測定することによって確認している。また、透明であるというガラスの特徴を活かし、視覚デバイスとの融合を行っている。また、ガラスにはサイズ・形状の制約がないため、間接励振を適用することにより大型化も可能となる。そこで、平面2自由度のなぞり動作に対応した皮膚感覚ディスプレイを製作し、皮膚感覚が提示されることを確認している。さらに、自由な形状の振動子を製作できることから、振動出力を有する触覚マウスの製作を行い、コンピュータと連動させたアプリケーションによって、その効果を確認している。これらの研究により、コントローラを最適化するための諸特性と、高性能・高機能的なインターフェースを実現の可能性を示している。

第6章では、本研究で得られた結果をまとめ、今後の展望を述べている。

以上のように、本研究は弾性表面波アクチュエータの実用化に不可欠な有用な知見を数多く得ている。よって、本学位論文審査会は、本論文が博士（工学）の学位にふさわしいものであると判断する。なお、本論文に関しては、第一著者として、国際的学術雑誌である *Journal of System Design and Dynamics* に1編、学術雑誌3編の論文が採録されている。加えて、第二著者として、学術雑誌1編が掲載されている。さらに、フルペーパーによる査読のある国際会議会議録に第一著者の論文5編が掲載されていることを付記する。