

論文の内容の要旨

論文題目 弾性表面波のメカトロニクスへの応用に関する研究

氏名 高崎 正也

1. はじめに

弾性表面波(surface acoustic wave : SAW)は弾性体媒体表面に振動エネルギーを集中させて伝搬する音響振動であり、レイリー波(Rayleigh wave)、圧電すべり波(electro-acoustic wave あるいは BGS 波 (Bleustein-Gulyaev-Shimizu wave))、漏洩弾性表面(leaky surface acoustic wave)などのモードが知られている。レイリー波や圧電すべり波は通信の分野でフィルタや共振子として応用されている。レイリー波の進行波中において媒質表面の粒子は後方楕円運動しており、同定在波中では loop と node が分布する。本研究ではこれらのレイリー波の挙動を応用し、メカトロニクス分野の機能デバイスとしてセンサやアクチュエータへの応用を検討する。SAW 角速度センサの開発、SAW リニアモータの性能・機能の向上、SAW 皮膚感覚ディスプレイの開発を行ったので報告する。

レイリー波は圧電性媒体表面にくし形の電極(interdigital transducer : IDT)を形成し、その幾何形状で決定される周波数の交流電圧を印加する事で容易に励振でき、レイリー波を応用した機能デバイスを 2 次元的な構造とする事ができる。また、電極形成には集積回路 (IC) 製造技術を応用すれば工程は簡便である。振動エネルギーを集中させて伝搬するため、エネルギー密度が高く、薄型の機能デバイスを構成する事ができ、さらに媒体の裏面には振動が分布しないため、媒体を接着剤で貼り付けるといった支持方法も可能である。

2. SAW 角速度センサ

角速度センサには様々な種類があるが、高精度ではないが、製品に組み込むため小型 (時には薄型) かつ軽量であるという要求を満たすものが、振動型角速度センサである。一般的な振動型角速度センサは、四角柱または三角柱を振動 (1 次振動) させて回転にともなって働くコリオリ力 (2 次振動) を検出するものであり、3 次元的な構造を有する。レイリー波による媒質表面粒子の振動を 1 次振動として応用し、回転角速度に伴うコリオリ力によって 2 次的なレイリー波が励振されるようにすれば、角速度センサを 2 次元的な構造にすることができる。本研究において、2 次的なレイリー波が 1 次波と直交方向に励振される Cross 型と同一方向に位相が 90 度ずれて励振される Inline 型を提案した。センサの設計には等価回路モデルを応用し、検出感度が高まるように電極のサイズや間隔を最適化した。

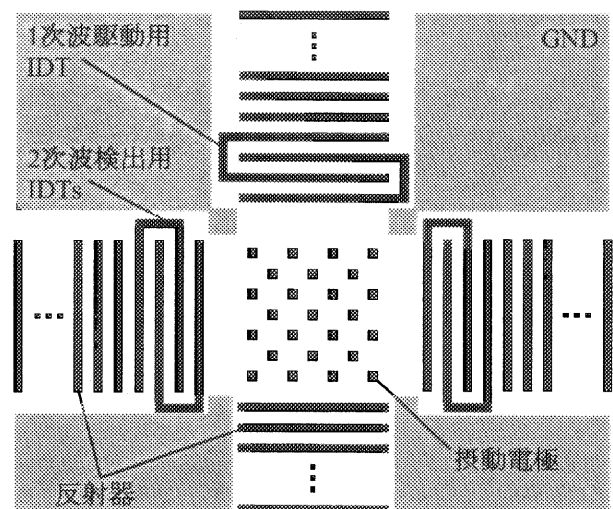


Fig. 1 Cross 型センサの電極配置

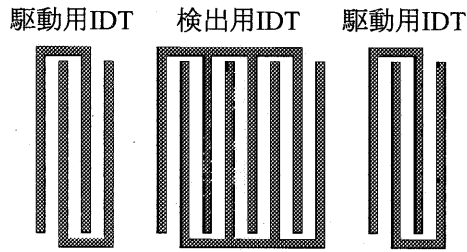


Fig. 2 Inline 型センサの基本電極配置

Cross 型の電極配置をFig. 1に示す。1 次波駆動用 IDT (GIDT) と 2 組の反射器により 1 次波を励振して摂動電極を鉛直方向に振動させる。回転角速度に伴うコリオリ力により、1 次波と直交方向に 2 次波が励振され検出用 IDT (SIDT) より検出される。反射器は検出効率を高めるために配置されている。試作したセンサに電圧を印加したところ、摂動電極での散乱により、2 次波方向への 1 次波の混入と 1 次定在波の乱れが見られ、原理に問題が残る形となった。

Inline 型の電極配置をFig. 2に示す。2 組の GIDT により SIDT 上に 1 次定在波を node が電極に重なるように励振する。コリオリ力によって 2 次波が励振され、1 次波の位相がずれ、ずれた分だけ電圧として検出されるというものである。検出感度を高めるために、2 次波の周波数を検出用 IDT の反共振周波数に設定している。試作したセンサに駆動電圧を印加して振動分布を調べたところ、1 次定在波の波長が SIDT の周期長より短くなっていった。

1 次定在波の波長と SIDT の周期長を一致させるために、Fig. 3に示すように GIDT と SIDT を一体にしたタイプを提案した。同図に示す部分を多数接続し周期構造とする事で電極内に定在波を励振でき感度向上も図れる。SIDT の反共振周波数で 1 次定在波を励振したところ、周期長より波長が短くなっていった。さらに、励振された定在波の振幅に偏りが見られ、センサ内で直列に接続されている GND 電極がもつ電気抵抗によるものとわかった。この電気抵抗による影響をなくすためには 3 次元的な配線が必要となるが、電極の線幅が 60 μm 程度と細いため容易ではない。

基本タイプの Inline 型に反射器を付加することを検討した。1 次波と 2 次波の境界条件が矛盾するため、反射器の配置は無理とされてきた。そこで、Fig. 4に示すように隙間を設けた反射器を SIDT の両側に配置した。1 次波は隙間を通して伝搬し SIDT 上に 2 次波を励振する。試作したセンサに電圧を印加して SIDT 上の振動分布を調べたところ、1 次定在波は一様になっていなかった。隙間開口幅が狭いため 1 次波の拡散しているものと思われる。また、隙間つき反射器の反射係数は 0.87 と低かった。

SAW 角速度センサの設計において、2 次波の検出を IDT の反共振点で行う用にしてはいたが、1 次定在波波長が SIDT の周期長より短くなる現象が見られた。両者を一致させるために 1 次波波長と SIDT の共振周波数を一致させる設計が有効であることがわかった。試作したセンサについて、ターンテーブルを用いて角速度の検出を試みたが、角速度信号は認められなかった。

3. SAW リニアモータ

レイリー波の進行波中では媒質表面の粒子が後方楕円運動しているため、Fig. 5に示すように振動子にスライダを押つけると摩擦力を介して楕円運動の水平成分がスライダに伝達される。シリコン製のスライダを用い、摩擦面にエッチングによって形成された突起 (直径数十 μm 、高さ 1 μm) が分布しており、レイリー波の 20 nm 程度の小さな振動振幅に対して安定な摩擦駆動を実現している。これまでに、Fig. 6に示す構成で駆動周波数を 9.6 MHz とし推力 3.5 N 定常速度 1.1 m/s が得られてい

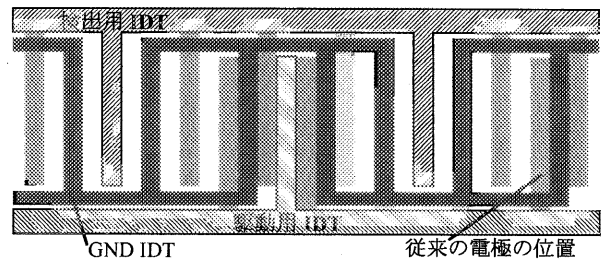


Fig. 3 一体タイプの電極配置

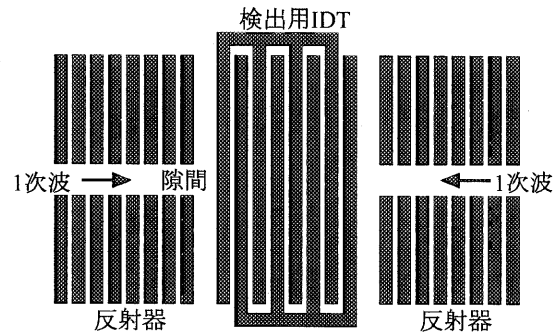


Fig. 4 反射器の配置

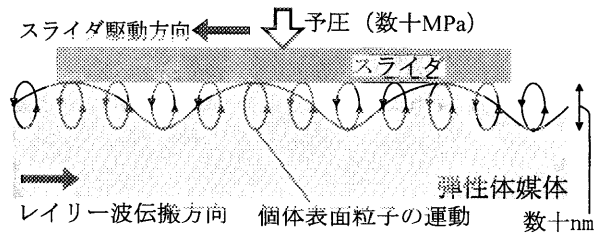


Fig. 5 SAW リニアモータの駆動原理

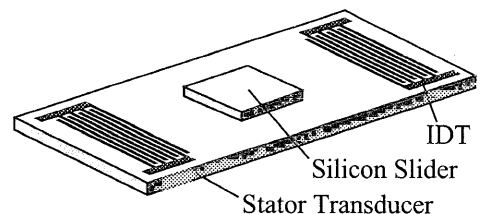


Fig. 6 SAW リニアモータの基本構成

る。本研究ではステータ振動子の小型化、高推力化、長ストローク化といった高性能高機能化を図った。

ステータ振動子に必要な幅と厚みは波長に依存しているため、駆動周波数を高くすることで振動子を小型化できる。駆動周波数を 50 MHz, 70 MHz, 100 MHz として製作した振動子の例を Fig. 7 に示す。50 MHz モータでは推力 0.036 N、定常速度 0.7 m/s を得た。また、70 MHz モータでは 0.023 N の推力と 0.6 m/s の定常速度を得た。駆動周波数を高めると振動振幅が波長に比例して小さくなる。一方、振動子表面には $Ra = 5 \text{ nm}$ 程度の粗さが存在し、駆動周波数を高めていくと振動振幅が粗さより小さくなる。100 MHz モータでは駆動が認められず、また、9.6 MHz モータで振動振幅を減少させていくと推力の著しい低下が見られた。

これまで、4 ミリ角のシリコンスライダを用いて 3.5 N 得られているが、スライダ表面の突起のサイズ・配置方法と推力の関係を調べることで同一のスライダサイズでもより大きな推力を取り出すことを検討した。接触面積が同一の場合、小さな突起が等間隔に配列しているスライダがより大きな推力を発揮する傾向にあることがわかった。この傾向に当てはまるスライダにより最大推力 6.4 N を得た。また、スライダ面積を増加させることも高推力化を図ることができるが、スライダの幅 (SAW 伝搬方向と直交方向) を広くすると有効であることがわかった。スライダ接触面では SAW が減衰しながら伝搬するためと思われる。

Fig. 6 に示す構成ではリニアアクチュエータとしてのストロークが制限されている。そこで、振動子よりも長いスライダを用意し、Fig. 8 に示すようにステータ振動子に研削加工を施して傾斜面を設けて IDT と吸音材を配置することで、長スライダと IDT・吸音材の接触をさせることができる。Fig. 9 に示す構成で 10 cm 程度のストロークを確保することができ、また、駆動に成功し駆動電圧 150 V_{0-p} において定常速度 160 mm/s、推力 23 N を得た。

4. SAW 皮膚感覚ディスプレイ

人が手で物体を触った時に覚える感覚は、筋肉や関節で受容する深部感覚と皮下の受容器細胞で受容される皮膚感覚に大別される。これまでのところ、力感覚を提示する装置の開発は進められているが皮膚感覚を提示する装置の実用化は見られていない。本研究では SAW の特徴を生かし、その機械振動を利用して皮膚感覚のうちの触覚を提示するデバイスの開発を試みた。その基本構成は Fig. 10 に示すように、振動子と鉄球を分布させたスライダからなり、SAW を用いて皮膚に stick-slip 振動を発生させる。

SAW の進行波を応用したタイプでは、SAW リニアモータの原理を応用し、スライダの上に置いた指皮膚表面にせん断力を発生させる。SAW 駆動信号に変調をかけることでせん断力を制御でき、ある適切な周波数 (数十~数百 Hz) で変調することで、皮膚表面に stick-slip 振動を再現することができる。薄型という SAW デバイスの特徴を生かし、製作したデ

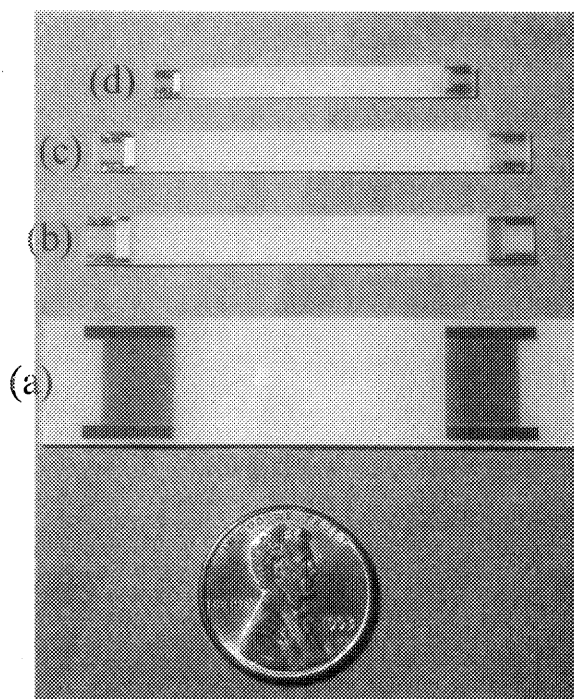


Fig. 7 小型ステータ振動子

(a) 9.6 MHz, (b) 50 MHz, (c) 70 MHz, (d) 100 MHz

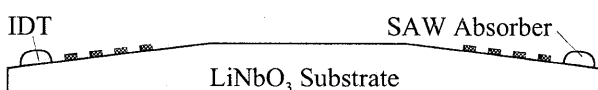


Fig. 8 加工を施したステータ振動子

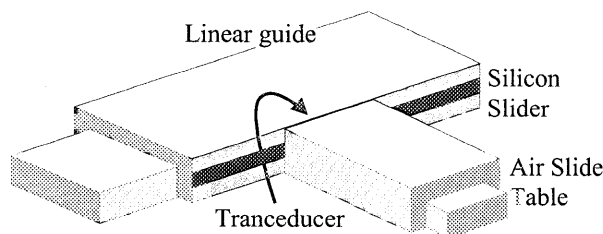


Fig. 9 長ストローク SAW リニアモータの構成

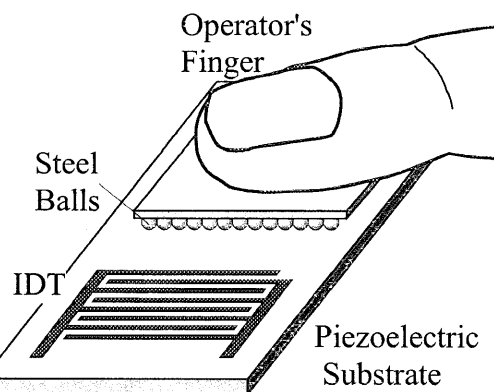


Fig. 10 SAW 皮膚感覚ディスプレイの基本構成

バイスをFig. 11に示すように PC マウスのボタンに取り付け、皮膚感覚提示実験を行ったところ、粗さの違いを表現することができた。

定在波を応用したタイプでは、定在波の振動により振動子と鉄球の間の摩擦係数が変化することを応用し、使用者が鉄球スライダ越しに振動子をなぞった際に stick-slip 振動を体験できるようにした。Fig. 12に示すディスプレイでは、コイルと磁石によりなぞり速度を検出して速度に応じた周波数の変調信号を生成している。これにより、鉄球越しになぞった振動子表面（表面粗さは $R_a = 5 \text{ nm}$ 程度）があたかも紙ヤスリであるかのように感じられた。

5. まとめ

これまで、主に通信分野で用いられてきた弾性表面波をメカトロニクスに応用し、SAW 角速度センサの開発、SAW リニアモータの性能・機能向上、SAW 皮膚感覚ディスプレイの開発に関する研究を行った。角速度センサにおいては角速度検出には至らなかったものの、設計に用いるモデルの改良の糸口が見え、SAW の角速度センサ応用の可能性を示唆することができた。リニアモータでは、振動子の小型化によりマイクロアクチュエータの可能性を示し、4 ミリ角スライダで発揮する推力をこれまでの約 1.8 倍にまで高め、ストロークをこれまでの 3 倍にすることができた。皮膚感覚ディスプレイでは、他に類を見ないほど薄型の装置を開発することができ、指で固体表面をなぞった際に感じるざらざら感を提示することができた。本研究を通して、SAW をメカトロニクスへ応用することが十分に可能であることが示された。

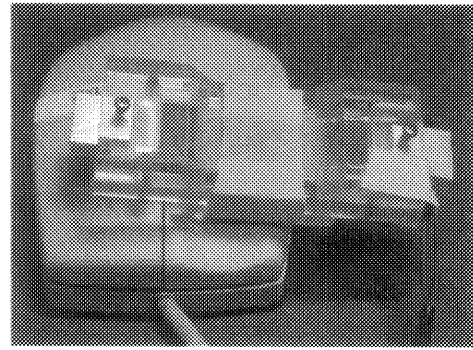


Fig. 11 皮膚感覚ディスプレイ付き PC マウス

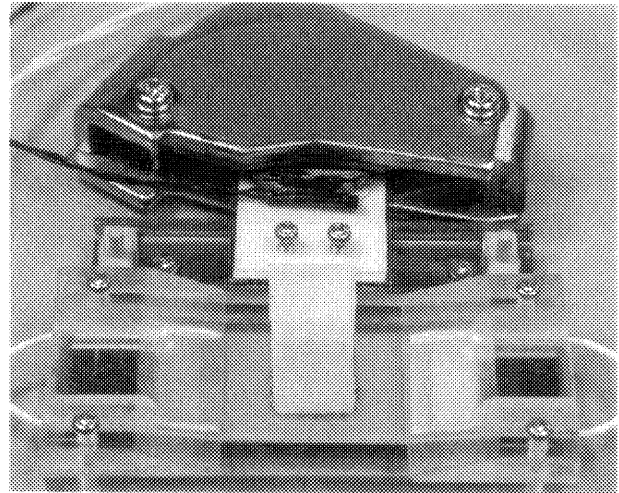


Fig. 12 定在波タイプ皮膚感覚ディスプレイ