418 弾性表面波を用いた摩擦制御とその評価

Friction control using surface acoustic wave and its evaluation

○正 小谷 浩之 (埼玉大, 日本学術振興会特別研究員 DC) 正 高崎 正也 (埼玉大) 正 水野 毅 (埼玉大)

Hiroyuki KOTANI, Saitama University, Shimo-Okubo 255, Sakura-ku, Saitama, JSPS Research Fellow

Masaya TAKASAKI, Saitama University

Takeshi MIZUNO, Saitama University

This paper introduces reproduction of the sensation, which is a sense of roughness, friction, or variegated texture of an object's surface, using surface acoustic wave (SAW). The principle and control of the SAW tactile display are also described. In the principle, a pulse modulated driving voltage excites temporal distribution of standing SAW. The distribution generates friction shift on the surface of a stator transducer substrate during operators' rubbing motion. To control the indicated tactile sensation, the switching is controlled according to the rubbing motion. Although the SAW on the stator surface (SAW substrate surface) can change the friction force between its surface and the slider, a relationship between the friction force and vibration amplitude is unclear. This paper reports fabrication of an experimental apparatus to measure the friction and the relationship.

Key Words : virtual reality, human interface, surface acoustic wave, friction control, tactile display

バーチャルリアリティやロボットなどの遠隔操作等の分野において体性感覚のひとつである触覚の再現・提示の重要性が注目されている。触覚は力覚と皮膚感覚に大別され、この皮膚感覚はざらざら感、材質感、摩擦等の触感を受容する感覚であり、特に指先で鋭く知覚できることが知られている。力覚に関してはすでに製品化されているものも存在する。一方、皮膚感覚に関しても様々な研究が行われているが、製品化の例は見られない。そこで視覚に対するブラウン管や液晶ディスプレイ、聴覚に対するスピーカやヘッドフォンのように皮膚感覚を提示するデバイスを開発することが、本研究の基本コンセプトとなり、このようなデバイスを皮膚感覚ディスプレイと呼ぶ。これまでに弾性表面波 (surface acoustic wave: SAW) を利用した皮膚感覚ディスプレイが提案されており、スライダ越しに左右になぞることで、特に「ざらざら」、「つるつる」といった粗さを提示することができる。

弾性表面波皮膚感覚ディスプレイは弾性表面波基板とスライダから構成される。スライダはアルミニウム箔などある硬さを持ったものを用いる。Fig.A1 に示すように、弾性表面波が励振されるとその振動の速さ (数 MHz 以上) によりスライダとステータ振動子との接触面では接触と非接触を繰り返すため、なぞり動作時における摩擦力は減少する。この摩擦力の変化を利用して粗さを提示する。弾性表面波の ON/OFF を交互に繰り返すことによって、振動となり皮膚内部へ伝播していき、機械受容器細胞を刺激する。そのためディスプレイ使用者のなぞり動作に応じて弾性表面波の ON/OFF の周期を制御することにより擬似的な stick-slip 振動を生成し、ある固体表面をなぞったときの感覚を提示することができる。しかしながらステータ振動子表面の振動振幅と摩擦力の関係は明らかになっていない。より現実的な感覚を提示するためには、この関係を明らかにし、コントローラを

最適化する必要がある。本稿ではスライダとステータ振動子間の摩擦力を測定するための実験装置を製作し、Fig.A2 のように摩擦力が変化することを実験的に示した。また振動振幅と弾性表面波による摩擦力の減少率の関係を調べた。

Fig.A1 Friction shift by switching SAW.

Fig.A2 Friction shift by SAW and its control.

1. 緒 言

近年、バーチャルリアリティ、ロボットなどの遠隔操作やコンピュータインターフェース等の分野で体性感覚のひとつである皮膚感覚の再現・提示の重要性が注目されている。この皮膚感覚とはざらざら感、材質感、摩擦等といった触感を受容する感覚である。弾性体である皮膚内部に弾性変形が生じ、皮膚内部の受容器細胞は変形や振動などの物理量を検出して発火し、それにより感覚が得られると考えられている。そのため、ある粗さを持った固体表面をなぞったときの粗さ感覚を提示するには、なぞり動作に応じた振動を皮膚に与えることが有効である。これまでに様々な皮膚感覚を提示するデバイスの開発が進められている。その中でも弾性表面波（surface acoustic wave : SAW）を用いた2種類のディスプレイが提案されており、一方は、ディスプレイ使用者自らが弾性表面波基板上をなぞることにより皮膚感覚を提示するアクティブタイプ⁽¹⁾⁽²⁾であり、もう一方はディスプレイの基板上に使用者が指を置き、感覚を模擬した振動により皮膚感覚を提示するパッシブタイプ⁽³⁾である。

アクティブタイプ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイは弾性表面波をバースト駆動させることにより、スライダとステータ振動子間の摩擦を変化させている。この摩擦係数の変化が振動となり、皮膚感覚としてディスプレイ使用者に提示される。またディスプレイ使用者のなぞり動作に応じて弾性表面波のON/OFFの周波数を変化させることによって、より現実的な感覚を提示できることが報告されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかしながら、摩擦力と振動振幅の関係は明らかになっていない。より自然な粗さ感覚を提示するためには、その関係を詳細に調べ、コントローラの最適化を行う必要がある。

本稿ではスライダとステータ振動子間の摩擦力を測定するために実験装置を製作し、弾性表面波によって摩擦力が変化することを実験的に示した。また摩擦力と振動振幅の関係を調査した。

2. アクティブタイプ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ

2.1 駆動原理

アクティブタイプ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの基本構成を Fig. 1 に示す。ステータ振動子表面にくし型電極（interdigital transducer : IDT）が形成されており、各 IDT に同時に電圧を印加することにより、ステータ振動子中央に弾性表面波の定在波が励振・伝播される。ディスプレイ使用者はスライダ越しにステータ振動子をなぞることにより、皮膚感覚を体感することができる。Fig. 2 に試作したアクティブタイプ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイを示す。

スライダは鉄球の分布とそれを支持するゴムフィルムやアルミニウム箔などある硬さを持ったものが用いられており、本稿ではアルミニウム箔を用いた。Fig.A1 に示すように、弾性表面波の定在波を励振するとその振動の速さ（数 MHz 以上）によりスライダとステータ振動子との接触面では接触

Fig. 1 Basic structure of an active type SAW tactile display.

Fig. 2 Photograph of the active type SAW tactile display.

Fig. 3 Control pulse and SAW driving voltage bursting SAW.

と非接触を繰り返すため、同図右下に示すようなぞり動作時における摩擦力は減少する。この摩擦力の変化を利用して皮膚感覚を提示する。弾性表面波が ON の状態と OFF の状態を交互に繰り返すことにより、皮膚は周期的相対運動を行い振動となって皮膚内部へ伝播していき、機械受容器細胞を刺激する。そのためディスプレイ使用者のなぞり動作に応じて弾性表面波の ON/OFF の周期を制御することにより、擬似的な stick-slip 振動を生成し、ある固体表面をなぞったときの感覚を提示することができる。弾性表面波 ON/OFF は Fig. 3 のようにコントロールパルスによって制御される。

2.2 制御システム

Fig. 4 にアクティブタイプ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの制御システムを示す。皮膚感覚ディスプレイからのエン

Fig. 4 Control system of the active type SAW tactile display.

コードの出力は図中の破線で示される制御回路に入力される。制御回路はマイコン (SH2/7045F) に実装した。制御回路では、入力されたエンコーダの信号をカウントすることによりスライダ位置を検出し、信号の変化の時間間隔によりスライダ速度 v_m を算出している。コントローラ内に蓄えられた粗さ情報 k_r により出力される振動の周波数 f は以下の式で与えられる。

$$f = \frac{v_m}{k_r}$$

同様にコントローラ内に蓄えられているデューティー比 d となる矩形波が生成され出力される。また、コントローラには k_r 及び d の情報が蓄えられており、スライダ位置により使用するセットを決定する。これによりディスプレイのなぞる位置に応じて異なる感覚を同時に提示することが可能となる。またコントローラはホストコンピュータに接続されており、随時パラメータを書き換えることが可能である。

コントローラから出力された矩形波はシンセサイザに入力され、H レベルのときに弾性表面波駆動信号を出力する (Fig. 3)。このバースト信号はアンプで増幅され弾性表面波基板に印加される。

3. 摩擦力の測定

ステータ振動子表面に弾性表面波を励振・伝播させることによりステータ振動子とスライダ間の摩擦を変化させることができる。弾性表面波皮膚感覚ディスプレイは摩擦力の変化を利用して「ざらざら」「つるつる」といった粗さを提示することが可能となる。しかし摩擦力と弾性表面波の振動振幅との関係は明らかになっていない。皮膚感覚ディスプレイの制御パラメータの最適化を行うためにその関係が必要となるため、摩擦力測定装置を製作し、関係の取得を試みた。

3.1 弾性表面波振動子

弾性表面波振動子には LiNbO₃ 128° Y-cut X-prop ウエハを用いた。製作した振動子を Fig. 5 に示す。レイリー波の定在

Fig. 5 Fabricated SAW transducer.

Fig. 6 Frequency characteristics of the fabricated SAW transducer.

波を励振するためには、2つの IDT をステータ振動子表面に配置し、各 IDT から放射される進行波の組み合わせにより定在波を形成する。開放型電極指として構成される反射器は効率的にレイリー波の定在波を形成させるために各 IDT の背後に配置される。電極はそれぞれ 10 対の電極指からなる IDT と 120 本の開放型電極指からなる反射器により構成される。反射器を有した弾性表面波基板のサイズは 22 x 98 x 1 mm である。Fig. 6 にステータ振動子のアドミタンスの周波数応答を示す。共振周波数 (駆動周波数) は 15.036 MHz、Q 値は 1583 であった。

3.2 摩擦力測定装置

摩擦力測定装置の構成図を Fig. 7 に示す。z 軸ステージにより予圧が与えられ、2 分力計によって摩擦力 (x 軸方向の力) と予圧 (z 軸方向の力) を測定することができる。弾性表面波振動子はリニアステージに固定されており、x 軸方向に案内される。スライダはアルミニウム箔とシリコンゴムフィルム (厚さ: 1 mm) によって構成され、2 分力計の先端に設けられている。ゴムフィルムは指の皮膚に相当し、センサの先端は指の骨格を模擬している。

3.3 摩擦力測定

弾性表面波の ON/OFF によるステータ振動子とスライダ間の摩擦の変化を測定した。弾性表面波の ON/OFF の制御信

Fig. 7 Measurement system for friction between the stator transducer surface and the slider.

号と摩擦力の変化を Fig.A2 に示す。ステータ振動子を一定駆動させているときの摩擦力（ x 方向の力）となっている。また予圧による違いも併せて測定した。ここでステータ振動子はリニアステージに固定されている。リニアステージの駆動速度は 20 mm/s 一定とした。IDT への入力電流を $1.0 A_{0-p}$ とし、その際の基板表面の振動振幅は 21 nm であった。また測定において、測定条件が等しくなるようにステータ振動子表面の同じ位置を測定した。Fig.A2 よりステータ振動子が移動中に弾性表面波が励振・伝播されると摩擦力が減少することがわかる。摩擦力が変化した（弾性表面波が励振・伝播された）直後の振動は 2 分力計の低剛性に起因するものと考えられる。

弾性表面波皮膚感覚ディスプレイにおいて、ディスプレイ使用中に使用者の指による予圧はおおよそ 1 N 程度であり、なぞり動作を行う速度は 10 から 20 mm/s 程度である。リニアステージの駆動速度を 10, 20 mm/s 一定としたときの予圧と摩擦力の減少率の関係を Fig. 8, Fig. 9 に示す。また振動振幅による違いも併せて示す。ここで摩擦力の減少率とは弾性表面波が ON のときと OFF のときの摩擦力の比とした。同図より摩擦力の減少率は振動振幅が大きくなるにつれ増加することがわかる。一方、その比は予圧が増加するにつれわずかに減少していった。また結果より、摩擦力の減少率はリニアステージの駆動速度に依存しないことがわかった。

弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの摩擦制御するためには、本実験のように実際の使用状況に合わせて振動振幅と摩擦力の減少率との関係を明らかにし、データベースとして情報を蓄えることが重要である。今後、得られた情報よりデータベースを作成し、皮膚感覚ディスプレイのコントローラの設計および制御パラメータの設定に利用できると考えられる。

4. 結 言

弾性表面波の ON/OFF を行った際の、ステータ振動子表面とスライダ間の摩擦力の変化を測定した。リニアステージを一定駆動させたとき、弾性表面波の励振・伝播によって摩擦力が減少することを実験的に確認した。摩擦力の減少率は振動振幅が大きくなるにつれ増加することがわかった。一方、

Fig. 8 Relationship between preload and rate of reduced friction (linear stage velocity = 10 mm/s).

Fig. 9 Relationship between preload and rate of reduced friction (linear stage velocity = 20 mm/s).

摩擦力の減少率は予圧が増加するにつれてわずかに減少する傾向が見られた。

謝 辞

本研究の一部は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）「産業技術研究助成事業」の助成を受けて行われた。

文 献

- (1) M. Takasaki, T. Nara, S. Tachi and T. Higuchi, A tactile display using surface acoustic wave, Proceedings of the 2000 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, (2000) pp.364-367.
- (2) T. Nara, M. Takasaki, T. Maeda, T. Higuchi, S. Ando, S. Tachi, Surface acoustic wave tactile display, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.21, (2001) pp.56-63.
- (3) 高崎 正也, 奈良 高明, 樋口 俊郎, 水野 毅, 弾性表面波の進行波を用いた皮膚感覚ディスプレイ, 日本機械学会論文集 (C 編), 72 巻 724 号, (2006), pp.3886-3891.
- (4) M. Takasaki, T. Nara and T. Mizuno, Control parameters for an active type SAW tactile display, Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2004) pp.4044-4049.
- (5) 高崎 正也, 小谷 浩之, 遠藤 大, 奈良 高明, 水野 毅, アクティブ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ, 計測自動制御学会論文誌, Vol.42, No.4, (2006), pp.327-333.