弾性表面波の進行波を用いた皮膚感覚ディスプレイ*

高崎 正也^{*1,*2}, 奈良 高明^{*3}
樋口 俊郎^{*4}, 水野 毅^{*5}

A Tactile Display Using Progressive Surface Acoustic Wave

Masaya TAKASAKI^{*6}, Takaaki NARA,
Toshiro HIGUCHI and Takeshi MIZUNO^{*6} Department of Mechanical Engineering, Saitama University,
255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan,
JST, PRESTO, Interaction and Intelligence

A tactile display using progressive surface acoustic wave (SAW) was proposed. A progressive SAW tactile display module was fabricated on trial. The display provides alternative shear forces to an operator's fingertip as stimuli. The forces propagate into the fingertip skin as vibration and are perceived as tactile sensation. To indicate roughness sensation, the display was controlled so that the vibration according to operator's action could be generated. The vibration was measured to indicate validity of the display and its controller. For demonstration, the module was installed on a PC mouse button. Using the mouse, operators could enjoy roughness sensation as if they would rub on a rough solid surface. We also discussed tactile display application for a computer interface. Another controller was built to express screen darkness. While dragging over the screen, the display could provide different roughness according to the darkness under the mouse pointer.

Key Words: Human Interface, Tactile Display, Ultrasonic Motor, Surface Acoustic Wave

1. 緒 言

近年,さまざまな作業にコンピュータを用いるようになり,コンピュータに情報を入力したり,コンピュータから情報を得たりする機会が多くなっている。最近では Graphical User Interface (GUI) ベースのオペレーションシステムが主流となっており,コンピュータから提示される情報は視覚と聴覚によって認識している。ここで,触覚による情報の提示も行くと,ユーザが享受できる情報量は増大し,作業効率を向上することができると考えられる。また,遠隔地の環境や人工的に創り出した環境の提示をより現実感のあるものにできるため,皮膚感覚の提示は遠隔操作や Virtual Reality (VR) などの分野においても注目されている。

触覚,つまり人間が持つ感覚のうち,何かに触っている感覚,何かを持っている・つかんでいる感覚,何

かをなぞっている感覚といった機械的刺激を感じる感覚は,二つの種類に大別される。一方は,人間の筋肉・腱・関節囊などの深部に存在する深部受容器(proprioceptor)によって受容される「運動感覚」(または「深部感覚」,「力感覚」)であり,物理形状,弾力,抵抗力,重量等を認識する。他方は,皮下組織中の機械受容器細胞(mechanoreceptor)によって受容される「皮膚感覚」であり,固体表面のざらざら感,材質感,摩擦等を認識する感覚である。皮膚感覚には,触覚,圧覚,温度感覚,痛覚などが含まれるが,本研究では触覚のみに注目している。ここでいう「触覚」は狭義であり,前段のものと区別される。

運動感覚の提示は広く研究が行われており,製品化の例も見られる⁽¹⁾。一方,触覚に着目した皮膚感覚ディスプレイの開発においては,さまざまなアクチュエータを用いたデバイスに関する研究⁽²⁾⁻⁽⁶⁾が報告されているが,これらのアクチュエータにはある程度の体積を必要とするため,実用化レベルのデバイスの開発には至っていない。著者らは皮膚感覚を提示するための手法として,弾性表面波(SAW: surface acoustic wave)の応用に着目した。弾性表面波振動子は一般に薄く構成でき(1 mm 以下),振動分布が振動子の片面表面にのみ分布しているため,裏面を固定に利用する

* 原稿受付 2006年1月26日。

^{*1} 正員, 埼玉大学工学部(☎ 338-8570) さいたま市桜区下大久保 255)。^{*2} 正員, 科学技術振興機構さきかけ(☎ 332-0012 川口市本町 4-1-8)。^{*3} 東京大学大学院情報理工学系研究科(☎ 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)。^{*4} 正員, 東京大学大学院工学系研究科。^{*5} 正員, 埼玉大学工学部。

E-mail: masaya@mech.saitama-u.ac.jp

ことが容易である。また、駆動周波数が一般に数 MHz 以上と高いため、メカトロニクスに応用した場合、応答の速いデバイスを得ることができる。これまでに、弾性表面波の定在波を利用した皮膚感覚ディスプレイを提案しており、試作した装置で粗さ感覚を提示することに成功している⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

本研究では、弾性表面波の進行波を用いた皮膚感覚ディスプレイを提案する。ディスプレイを製作し、出力される振動の評価を行った。また、ディスプレイをコンピュータマウスに搭載し、コンピュータインタフェースとした。このマウスを用いた情報の提示についても検討を行った。

2. 原 理

2.1 弾性表面波 図1に示すように、圧電性媒体の表面に配置されたくし形電極(IDT: interdigital transducer)に交流電圧を印加すると、弾性表面波が励振され、図中矢印の向きに伝搬する。本研究では圧電性媒体として LiNbO_3 128° Y-cut 基板を用いており、IDT はアルミニウムの蒸着膜で構成されている。印加する交流の周波数は IDT の電極ピッチに依存し、本研究で用いている IDT では 200 μm 間隔であり、駆動周波数は 9.6 MHz である。

弾性表面波の一種であるレイリー波の進行波の場合、弾性体媒体表面では図2に示すようにだ円軌道を描きながら振動している。振動エネルギーの 99% が表面から 2 波長以内に分布しており、弾性体媒体の裏

面には振動は分布しない。ゆえに、振動子裏面を接着剤で貼り付けるといった固定方法も可能である。

だ円軌道を描きながら振動している表面に、弾性体媒体と同程度以上の剛性を持った固体を接触させると、だ円軌道上側の運動が摩擦力を介して固体に伝達されるため、図中矢印の向きに駆動力を得る。適切な予圧を与えて接触させることで、レイリー波の伝搬方向と逆向きの推力を得ることができる。この推力を利用して、人の指皮膚表面に機械的刺激を与えて皮膚感覚ディスプレイを実現するため、ディスプレイ使用者は自ら指を動かす必要はない。また、この推力のアクチュエータへの応用に関しては、すでに弾性表面波リニアモータとして報告されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

2.2 皮膚感覚ディスプレイ

指である粗さを持った固体表面をなぞると、微視的には皮膚の表面が固体表面の突起との衝突を繰返し、なぞり速度と突起間隔に応じた周波数の振動が生じ、その振動が皮下組織内の受容器細胞で知覚され、皮膚感覚として認識されていると考えられる。マイスナー小体、パチニ小体などの受容器が皮下組織に分布しており、それぞれ速度、加速度を検出していることが知られている。ある固体表面をなぞったときの感覚を提示するには、なぞり動作に応じた振動を発生して皮膚に与えることが有効であると考えられる。

図3に弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの基本構成を示す。2組の IDT を備えた圧電材料基板表面に、ある程度剛性を持った物体として、鋼球を多数分布させたパッド(ゴム膜に鋼球を接着させたもの)を配置する。パッドは皮膚感覚ディスプレイ使用者の指と同程度の大きさであり、使用者はこの上に指を乗せる。このとき、進行波が励振されている状態では、前述のとおりのパッドに接している皮膚は鋼球越しにせん断力を受ける。図4に示すように、2組の IDT より交互にレイリー波の進行波を放射することで、パッドに発生するせん断力を交番力とすることができる。また、レイリー波の駆動交流電圧を搬送波と考え、搬送波を On/

Fig. 1 Excitation of Rayleigh wave

Fig. 2 Particles motion on the surface in the progressive Rayleigh wave and a steel ball driven by the wave

Fig. 3 Basic structure of the SAW tactile display

Offすることで交番力の励振を制御でき、指皮膚が受ける交番力を時間領域で調整することができる。指で固体表面をなぞった際に、指皮膚表面で生じる振動と同じ周波数のせん断力を分布させることで、ある粗さを持った固体表面をなぞったときの感覚を擬似的に表現することができる。

図5に、製作した皮膚感覚ディスプレイユニットを示す。LiNbO₃基板表面に2組のIDTが形成され、中央に鋼球とゴム膜から成るパッドが配されている。レイリー波の進行波を励振するためには、基板端での反射を抑制する必要があるため、IDT背後には吸音材とそれに結合されたヒートシンクが設置されている。使用時にはIDTは樹脂製のカバーで保護される。ユニットは他の機器に装着することが可能である。

Fig. 4 Excitation of two phases of modulated Rayleigh wave

Fig. 5 A passive type SAW tactile display unit (the LiNbO₃ substrate with the IDT, the steel balls pad and the SAW absorbers with the heat sink)

Fig. 6 Measurement of steel ball vibration

3. 振 動 特 性

皮膚感覚ディスプレイユニットの、パッド部の鋼球に発生する振動を計測した。図4に示すように2組のIDTに駆動電圧を印加した状態で、図6に示すようにレーザドップラー振動速度計でゴム膜下の鋼球の振動速度を計測した。目的とする周波数を50~400 Hzに

Fig. 7 Steel ball vibration velocity at 50 Hz

Fig. 8 Steel ball vibration velocity at 100 Hz

Fig. 9 Steel ball vibration velocity at 200 Hz

Fig. 10 Steel ball vibration velocity at 400 Hz

Fig. 11 Steel ball vibration velocity at 200 Hz (Duty ratio: 1/16)

Fig. 12 Steel ball vibration velocity at 200 Hz (Duty ratio: 3/16)

設定して、計測した結果を図7～10に示す。図中の矩形波は、図4に示す2組のIDTに印加される駆動電圧のOn/Offを示している。矩形波の周波数を調整することで、鋼球に発生する振動の周波数が制御されていることがわかる。また、周波数を200 Hzとし、矩形波のデューティー比を変更した結果を図11および図12に示す。弾性表面波駆動電圧が印加されている時間の長さ、つまりデューティー比を調整することで、鋼球に発生させる振動の強弱が制御されていることがわかる。鋼球の振動によるせん断力の交番力が、パッドのゴム膜を介して指皮膚に伝搬して、皮膚感覚として受容される。実際に指をのせて使用する際には、鋼球と振動子の接触圧力が大きくなるため、より大きなせん断力が得られると考えられる。

4. デモンストレーション

4・1 皮膚感覚ディスプレイマウス 製作した皮膚感覚ディスプレイユニットを、図13に示すようにコンピュータ用マウスの左ボタンに取付けた。ユーザはユニット越しにクリック・ドラッグなどの操作が可能である。よって、マウスを動かすことでそれをなぞり動作とし、動作に合わせてパッドに発生する振動を制御することによって、固体表面をなぞったときの感覚を擬似的に表現することができる。

4・2 粗さ感覚の提示 コンピュータ画面には、図14に示すように粗さの異なる表面を表現するイラ

Fig. 13 A tactile display unit installed on a mouse button

Fig. 14 The view of the computer screen for demonstration of the SAW tactile display mouse

Fig. 15 The mouse pointer for the demonstration

ストが描画されている。図15に示すマウスポインタでイラスト上をなぞると、その動作に基づき皮膚感覚ディスプレイが制御される。その結果、コンピュータ画面を直接指でなぞることを擬似的に体験することができる。

制御には図16に示す制御系を用いた。ある粗さを持った固体表面を、指でなぞったときの感覚で擬似的に表現するには、なぞり速度と表面粗さによって決定される周波数の振動を、指皮膚表面に与えることが有効である。粗さ感覚を提示するために、以下のような手順で制御を行った。マウスの速度 v_m を検出し、粗さ情報 k_r (大きいとより粗い面を表す。単位は m) で除算して変調周波数を決定する。決定された周波数情

報は8ビット整数としてPICマイコン(Microchip社, PIC 16F84A)に入力され, 係数 k_c が乗算されて変調周波数が決定される。この係数は, 画面解像度やPICマイコンの制御周期などの影響を補正するための定数である。決定された周波数において, 位相が180度異なる二組のパルス波が生成され, 2CHシンセサイザ(NF WF1946)に入力されて, 2CHの弾性表面波駆動信号に対してOn/Offの制御を行う。弾性表面波駆動信号は高周波アンプで増幅され, マウス上の弾性表面波皮膚感覚ディスプレイに印加される。弾性表面波皮膚感覚ディスプレイユニット上のパッドは, 弾性表面波伝搬方向に周波数 $f = k_c v_m / k_r$ で振動し, 前述の原理により固体表面をなぞっているような感覚が得られる。

弾性表面波皮膚感覚ディスプレイへの入力電力100W, デューティー比 $d=1/8$ (一定)において, 実際に使用してみたところ, なめらかな表面とある粗さを持った表面を区別することができた。また, 上記の提示実験用画面の3種のイラストに対して, k_r が上から順に200, 100, 50 μm 程度となるように設定したとこ

ろ, それらの粗さを識別することができた。

4.3 情報提示の検討 コンピュータ画面上的の情報を, 皮膚感覚を通して提示することを検討した。図17に提示実験に用いたコンピュータ画面を示す。使用者は右側画面を皮膚感覚ディスプレイマウスでなぞり, マウスの使用方法と提示される二つの感覚の違いを知る。上段のイラストは下段のものに比べて, より「粗い」ことを示している。そして, 図18に示すようにより粗い面が黒色, そうでない面が灰色であると定義し, 使用者にはこの定義に従った情報が提示される。図17左側のエリアには, 図19に示す図柄のうち一つが乱数により割り当てられるが, マウス使用者には見えない。マウス使用者は同エリアを皮膚感覚ディスプレイでなぞり, どの図柄が割り当てられているか皮膚感覚から判断するという実験を行った。なぞり速度が一定のとき, 指に与える振動の周波数が低いと粗く感じ, 周波数も同じ場合には, 振幅の大きな振動を与えるとより粗く感じる傾向がある⁽¹¹⁾。粗さ感覚を積極的に利用する観点から, 「粗い」ほうの感覚を提示する際には, 他方に比べてデューティー比を大きくして振幅の大きな振動を与え, より明確な違いを表現するようにした。

この実験には, 図20に示す制御系を用いた。割り

Fig. 16 A tactile display control system for the screen drawn in Fig. 17

Fig. 17 The view of computer screen for demonstration of information indication

Fig. 18 Tactile expression of gray scale

Fig. 19 Images expressed by the demonstration

Fig. 20 A tactile display control system for the screen drawn in Fig. 17

当てられている図柄におけるマウスポインタの位置での色の明度 s_r (黒と灰, それぞれ 1 と 2 に設定) と, ディスプレイから出力すべき振動の強さに関するパラメータ d (黒と灰, それぞれ 1/4 と 1/8 に設定) を決定する。ディスプレイから出力される振動の周波数は, $f = k_c s_r v_m / k_r$ により決定される。ここで, k_c は画面の解像度を補正する係数である。また, k_r を $100 \mu\text{m}$ とした。パラメータ f と d がマイコンに供給され, 周波数 f , デューティ比 d の二相のパルス波が生成される。

10 人の被験者に対し, 図 17 右側のイラストで提示される皮膚感覚の違いと, 図 18 に示す定義を説明した後, ランダムに割り当てられた図柄がどれかを皮膚感覚により識別してもらう実験を行った。その結果, 10 人中 8 人が割り当てられた図柄を当てることができた。マウス操作に伴う皮膚感覚提示により, 特定の情報をユーザに提供するコンピュータインタフェースの可能性を示すことができた。

5. 結 言

弾性表面波リニアモータを皮膚感覚ディスプレイに応用し, 2 組の IDT を用いて伝搬方向の異なる二つの

レイリー波を励振して利用し, ある表現粗さをなぞったときの感覚を提示する装置を試作した。試作したディスプレイをコンピュータ用マウスに取付けて, 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。また, 視覚的情報を皮膚感覚を通して提示することを検討し, 実験によりその可能性を示した。

文 献

- (1) Fore example, PHANToM, <http://www.sensable.com/HapticMASTER>, <http://www.fcs-cs.com/robotics/Cyber Force>, <http://www.immersion.com/>
- (2) Howe, R. D. et al., Remote Palpation Technology, *IEEE Eng. In Medicine and Biology*, Vol. 14, No. 3 (1995), pp. 318-323.
- (3) Ikei, Y. et al., Texture Presentation by Vibratory Tactile Display, *Proceedings of IEEE Virtual Reality Ann. Int'l Symp.*, (1996-3), pp. 199-205.
- (4) Asamura, N. et al., Selectively Stimulating Skin Receptors for Tactile Display, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 18, No. 6 (1998), pp. 32-37.
- (5) Watanabe, T. and Fukui, S., A Method for Controlling Tactile Sensation of Surface Roughness Using Ultrasonic Vibration, *Proceedings of IEEE Int'l Conf. Advanced Robotics*, (1995-9), pp. 1134-1139.
- (6) Konyo, M. et al., Tactile Feeling Display for Touch of Cloth Using Soft High Pilymer Gel Actuators, *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan* (in Japanese), Vol. 6, No. 4 (2001), pp. 323-328.
- (7) Takasaki, M. et al., A Surface Acoustic Wave Tactile Display With Friction Control, *Proceedings of IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, (2001-1), pp. 240-243.
- (8) Nara, T. et al., Surface Acoustic Wave Tactile Display, *IEEE Computer Graphics and Applications*, (2001-11, 12), pp. 56-63.
- (9) Takahashi, M. et al., Direct Frictional Driven Surface Acoustic Wave Motor, *Proceedings of Transducers '95 and Eurosensors IX*, (1995-6), pp. 401-404.
- (10) Osakabe, N. et al., Surface acoustic wave linear motor using silicon slider, *Proceedings of IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, (1998-1), pp. 390-395.
- (11) Takasaki, M. et al., Active Type Surface Acoustic Wave Tactile Display, *Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers* (in Japanese), Vol. 42, No. 4 (2006), pp. 327-333.