

弾性表面波皮膚感覚ディスプレイマウスの開発

Development of A Surface Acoustic Wave Tactile Display Mouse

高崎正也^{1,2*}、水野 毅¹
Masaya Takasaki^{1,2*}, Takeshi Mizuno¹

¹埼玉大学 工学部機械工学科
Department of Mechanical Engineering, Saitama University

²科学技術振興事業団さきがけ研究 2 1
PRESTO, Japan Science and Technology Corporation(JST)

Abstract

Previously, we proposed a novel method to provide human tactile sensation using surface acoustic wave (SAW). A pulse modulated driving voltage excites temporal distribution of shear force (Passive Type) or friction shift (Active Type) on the surface of SAW substrate. The force / friction distribution can be perceived as tactile sensation at mechanoreceptors in the finger skin. In this report, the SAW tactile display using SAW linear motor principle (Passive Type) was applied for a computer mouse. Two phases of shear force were used to excite alternative force distribution in the operators finger skin. The mouse could indicate sensation of exploring on solid surface by a finger. The indication of the sensation was clearer than the previous demonstration. An objective evaluation of the display was also discussed.

Keywords: Ultrasonic, Surface Acoustic Wave, Virtual Reality, Tactile Sensation, Computer Interface

1. 緒言

近年、遠隔地に存在するロボット、あるいは計算機内部に構成された世界にあたかも自分が存在しているかのような臨場感を提示する技術としてバーチャルリアリティが注目されている。その際、行動や動作の臨場感の提示には触覚の提示が重要となる。一口に触覚といっても、物体の重量、抵抗感、大まかな物体形状の感覚である深部感覚と、物体表面の粗さ、摩擦感、細かいテクスチャなどの皮膚感覚とに大別される[1]。深部感覚は筋肉や関節によって受容され、皮膚感覚は皮膚組織内の機械受容器細胞によって受容されることが知られている。深部感覚を提示する装置の研究・開発は広く行われており、一部製品化も見られる[2]。一方、皮膚感覚を提示するデバイスに関する研究も行われているが、決定的なデバイスの登場は未だ見られない。

皮膚感覚を提示する際、ある一つの物体表面形状を瞬時に変形させることで、多様な皮膚感覚を提示することが考えられる。その一つの実現法として、弾性体上の波動を利用して、表面状態を制御する方

法が挙げられる。弾性体の超音波振動を用いた摩擦感制御ディスプレイが提案されている[3][4]が、用いられている周波数が 80 kHz 程度であるため、生成される定在波の波長は指の接触部分よりも長く、瞬間的な加振で単一の微小突起感は生成できるものの、表面粗さを連続的に変化させるには至らなかった。ほかにも指に接触した部分を変位・振動させる目的で、小型スピーカ[5]、振動ピンのアレイ[6]、空気圧アクチュエータ[7]、小型電磁振動子[8]、などが提案された。これらの方式では、デバイスには体積を必要としていたが、皮膚に振動を与えることが皮膚感覚の提示に有効であることが示された。そこで、弾性表面波 (surface acoustic wave : SAW) の機械振動を利用することが提案された[9][10][11]。

弾性表面波は振動エネルギーを弾性体媒体表面に集中させて伝搬し、振動子を薄く構成でき、振動子の裏面は振動しないため支持が容易である。弾性表面波デバイスは、圧電性基板をトランスデューサ及び弾性体媒体として用いることで構成され、一般的に駆動周波数は数 MHz 以上である。基板表面にくし形電極 (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だけで弾性表面波は容易に励振される。これらの特徴を生かし、SAW を利用した機能デバイスを

* 〒338-8570 さいたま市下大久保 255
電話 : 048-858-3451 FAX : 048-856-2577
Email: masaya@mech.saitama-u.ac.jp

薄型に構成する事ができる。現在、高周波用 SAW フィルタが実用化され、携帯電話などの情報機器に多く用いられている。一方、弾性表面波の機械振動を取り出す研究も行われており、超音波モータ[12]、アトマイザ[13][14]などへの応用が報告されている。

これまでに、弾性表面波の機械振動を利用して人の指に刺激を与え、擬似的に皮膚感覚を提示する手法が提案されている。固体表面の「粗さ」を提示する方法として、弾性表面波の進行波を用いるもの(Active Type)[9]と、定在波を用いるもの(Passive Type)[9]と、2種類の方法が提案されている。Passive Type では使用者は指を動かすことなく皮膚感覚を体験でき、Active Type では使用者自らなぞり動作を行って(弾性表面波基板とディスプレイと接触している部分の皮膚との相対的運動を必要とする)初めて皮膚感覚を体験できる。前者の方法では、弾性表面波リニアモータの駆動原理を応用している。この原理に基づいてこれまでに試作された皮膚感覚ディスプレイ[9]では、1組のトランスデューサしか用いていなかったため、皮膚に与えるせん断力が一方向に限られており、皮膚感覚の提示において明瞭な感覚を得ることができなかった。そこで、本研究では、2組のトランスデューサを用いてディスプレイ使用者の指表面に与えるせん断力を交番力とした。こうすることで、指である粗さを持った固体表面をなぞったときの感覚をこれまでよりも明瞭に提示することができた。また、Passive Type の弾性表面波皮膚感覚ディスプレイを1つのユニットとし、コンピュータ用マウスの左ボタンに取り付け、コンピュータを用いた皮膚感覚提示実験を行った。

2. 皮膚感覚提示原理

2.1. 弾性表面波

圧電材料基板の表面にFig. 1に示すような IDT を形成し、交流電圧を印加すると弾性表面波が励振され、同図中矢印の向きに基板表面を伝搬する。印加する電圧の周波数は IDT の電極ピッチに依存する。

(電極間距離に反比例する) 振動エネルギーを表面に集中させて伝搬するため、「弾性表面波」と呼ばれており、基板裏面では振動の分布がほぼゼロである。このため、基板を接着剤で任意の場所に貼り付けるといった支持方法も可能である。

2.2. 皮膚感覚提示原理

弾性表面波の1種であるレイリー波の場合、進行波を励振すると、Fig. 2に示すように弾性体媒体表面の粒子は楕円軌道に沿って振動する。このとき、振動面にある程度剛性を持った物体を適切な予圧を

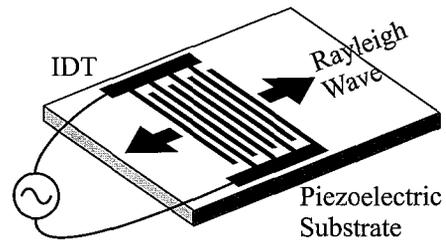


Fig. 1 弾性表面波の励振

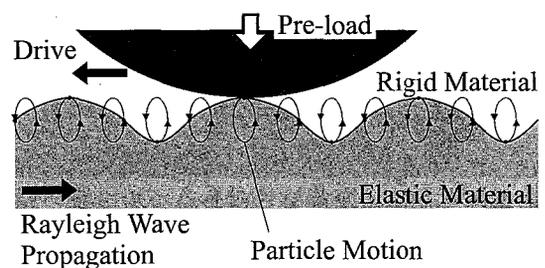


Fig. 2 弾性表面波によるせん断力の発生

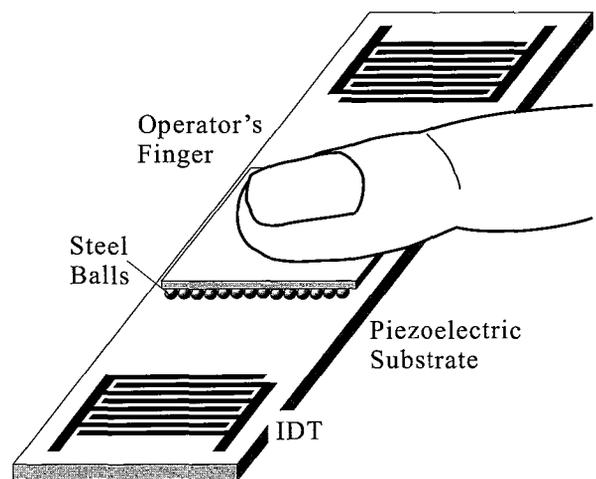


Fig. 3 弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの基本構成

与えて接触させると、超音波モータと同じ原理でこの物体は同図中の矢印の向きに駆動力を得る。この駆動力を応用するため、基板とディスプレイに接触している皮膚との相対的な運動を必要とせず、使用者は自ら指を動かす必要がない。ゆえに、Passive Type と呼ばれている。

Fig. 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。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鉄球を多数分布させたパッドを配置する。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パッドに接している皮膚はせん断力を受け、波が励振されていない状態ではせん断力を受けない。レイリー波の駆動交流電圧を搬送波と考え、搬送波にパルス変調をかけることで、レイリー波の進行波の励振を制御でき、指皮膚が受けるせん断力は時間領域で制御される。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の分布を作り出すことで、ある表面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。

ある粗さを持った固体表面を指でなぞったときに指の皮膚に発生する振動はなぞり速度と表面粗さに依存すると考えられる。より現実的な感覚を提示するためには、弾性表面波皮膚感覚ディスプレイでの「粗さ」表現において、なぞり速度と表面粗さの情報をもとに、変調信号であるパルス波の周波数を決定することが重要と考えられる。

2.3. せん断力の発生

これまでに試作された Passive Type の弾性表面波皮膚感覚ディスプレイでは、1組のトランスデューサしか用いていなかったため、得られる駆動力は1方向のみであった。そのため、パッドを支えているラバーフィルムの弾性により、パッドを元の位置に戻していた。このモデルをFig. 4 (a)に示す。この試作機による皮膚感覚提示実験において十分な振動を得ることができず、明瞭な感覚を得ることができなかった。これは、パッドを支持するラバーフィルムの弾性が十分ではなく、さらにパッドに対する指の乗せ方でパッドと弾性表面波基板の間の摩擦が変わり、必要な復元力を得ることができなかったためと思われる。復元力が不足して、パッドの変位が得られず、変調信号に応じた振動を得ることができなかった。

そこで、本研究では、Fig. 4 (b)に示すように2組のトランスデューサを用い、Fig. 5のように2相の弾性表面波駆動電圧を用いて交互に弾性表面波を放射することでディスプレイ使用者の指表面に与えるせん断力を交番力とした。これにより、指である粗さを持った固体表面をなぞったときの感覚をこれまでよりも明瞭に提示することができる。

3. 弾性表面波皮膚感覚ディスプレイマウス

3.1. 弾性表面波皮膚感覚ディスプレイユニット

試作した弾性表面波皮膚感覚ディスプレイユニットをFig. 6に示す。レイリー波を励振しかつ伝搬させる圧電材料として、LiNbO₃ 128° Y-cut 基板を用いた。圧電材料基板のサイズは16 x 60 x 1 mm³であり、

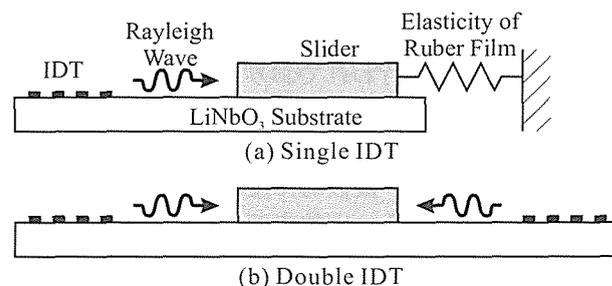


Fig. 4 せん断力発生モデル
(a) : 1組の IDT を用いた場合 (従来)
(b) : 2組の IDT を用いた場合 (本研究)

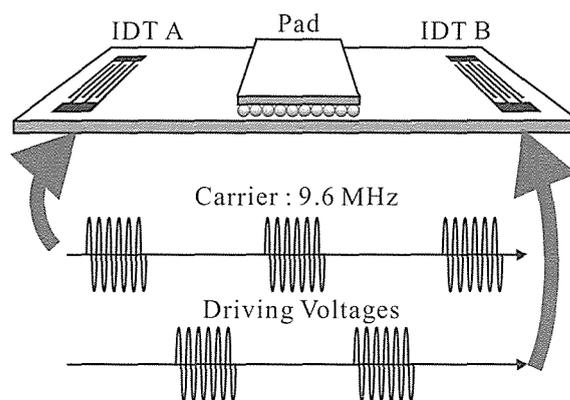


Fig. 5 弾性表面波の駆動

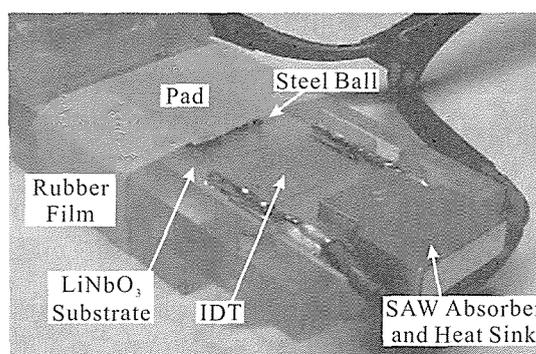


Fig. 6 弾性表面波皮膚感覚ディスプレイユニット

レイリー波を励振するための IDT が基板両端に配置されている。(同図左奥の IDT はアクリルカバーで覆われている) 2組の IDT の中間に多数の鉄球を備えたパッドが配されている。パッドはラバーフィルムに支持されており、ある程度の自由度を有しているため弾性表面波によるせん断力を受けて振動する。圧電基板の両端には吸音材が貼り付けられてお

り、伝搬してきたレイリー波を吸収している。吸音材が無いと基板端で反射がおき、定在波が励振されてしまい、表面の楕円軌道に沿った振動が得られず、前述の駆動力を得ることができなくなってしまう。吸音材で吸収された振動エネルギーは熱に変換され、吸音材に結合された放熱器より放熱される。

3.2. 皮膚感覚ディスプレイマウス

弾性表面波皮膚感覚ディスプレイユニットを取り付けたコンピュータ用マウスをFig. 7に示す。ユニットは左ボタン上に取り付けられており、ユーザーはユニットごしにクリック・ドラッグなどの操作が可能である。ゆえに、マウスを動かすことでそれをなぞり動作とし、動作に合わせて固体表面をなぞったときの感覚提示を受けることでより現実的な感覚を体験することができる。

皮膚感覚ディスプレイマウスを用いることで、コンピュータ画面上の情報を皮膚感覚を通してユーザーに提示することも可能となる。これにより、コンピュータと人の相互作用がより密になり、従来のコンピュータより多くの情報を伝達でき、さらに、作業効率を向上できると考えられる。さらに、音声による補助で皮膚感覚ディスプレイマウスの操作を行うことで視覚情報なしにコンピュータを操作することができるようになり、視覚障害者に近年のGUI (graphical user interface) 中心のソフトウェアを利用することが可能となる。このように、弾性表面波皮膚感覚ディスプレイマウスは皮膚感覚を提示するだけでなく、人と機械のコミュニケーションを補助する役割も果たすことができる。

3.3. 制御

ある粗さを持った固体表面を指でなぞった時を想定する。このときの感覚を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。本研究では、弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの性能を示すためのデモンストレーションにおいて、以下のような手順で制御を行った。

マウスの速度をオペレーションシステムを介して検出する。検出されたマウス速度 v_m に表面粗さ情報 r を乗算して変調周波数情報を決定する。決定された周波数情報は8ビット整数としてコンピュータの平行ポートから出力され、PICマイコン (Microchip社、PIC16F84A) に入力される。PICマイコン内では、周波数情報に係数 k_c が乗算され、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、2相のパルス波を生成する。それぞれのパルス波のデュー

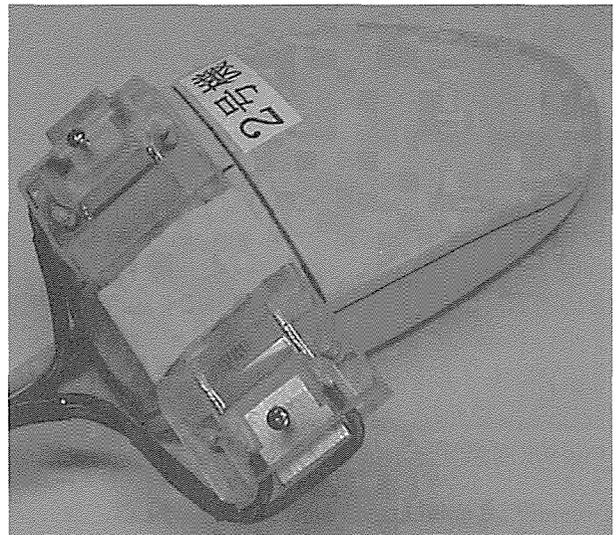


Fig. 7 コンピュータマウスの左ボタン上の皮膚感覚ディスプレイ

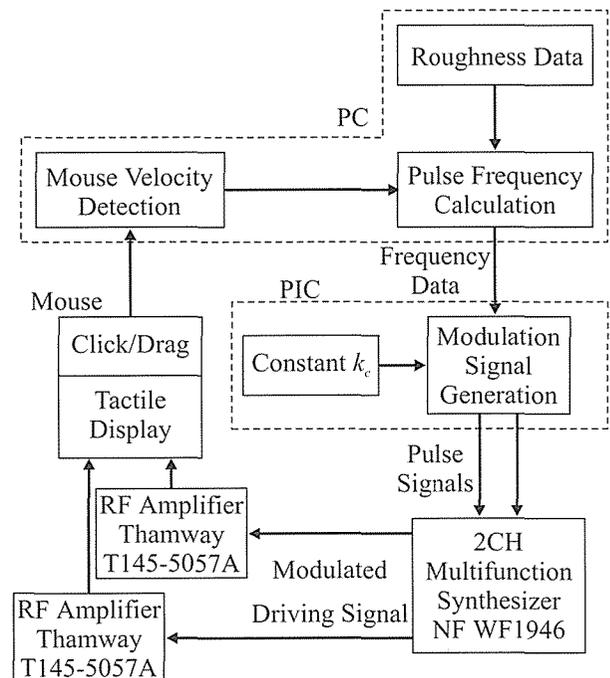


Fig. 8 弾性表面波皮膚感覚ディスプレイマウスの制御

ティー比は 1/8 であり、位相は 180 度ずれている。2相のパルス波は 2ch シンセサイザ (NF WF1946) に入力され、2ch の弾性表面波駆動信号に対して on/off のスイッチングを行う。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

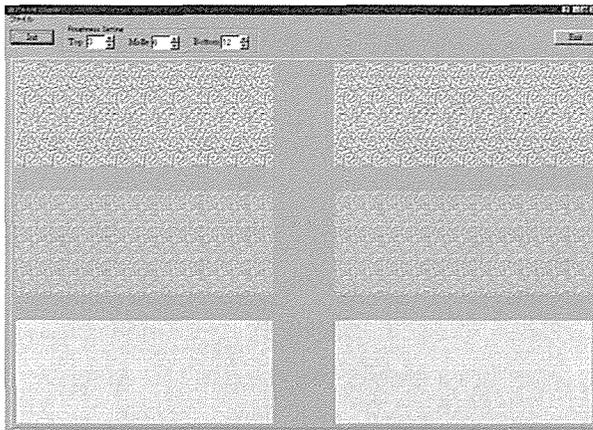


Fig. 9 皮膚感覚提示実験に用いたコンピュータ画面

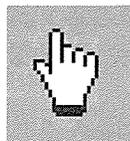


Fig. 10 マウスポインタ

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 で振動する。上記の一連の制御手続きをFig. 8に示す。また、駆動電圧をスイッチングするパルス波の周波数 f は

$$f = k_r v_m r \quad (1)$$

により表される。

4. 皮膚感覚提示実験

4.1. デモンストレーション

試作した弾性表面波皮膚感覚ディスプレイマウスの性能を評価するために、コンピュータ画面に連動した制御プログラムを作成した。コンピュータ画面上にはFig. 9に示すように粗さの異なる表面を表現するイラストが描画されている。上段の2枚は粗い表面を連想させ、下段の2枚は細かい表面を連想させる絵になっている。6枚の絵の間は灰色に塗られており、なめらかな面を表現している。この画面上をFig. 10に示すマウスポインタでなぞる（ドラッグする）と、なぞっている部分の粗さ情報となぞり速度に応じて弾性表面波皮膚感覚ディスプレイユニット上のパッドが振動する。

弾性表面波駆動周波数 9.6 MHz、平均入力電力 10 W 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を用いて、3



Fig. 11 粗さ比較テストに用いた画面

Table 1 比較テストの結果

Success	Failure
7	4

(男性 20 代)

種類の粗さを識別することができた。

4.2. 客観的評価の検討

上記のデモンストレーションの結果は著者らによるもので、主観的な評価である。そこで、客観的な評価を検討した。粗さの異なる面を皮膚感覚ディスプレイを用いて比較するテストを行った。Fig. 11に比較テストに用いた画面を示す。青（同図中上段部分）と緑（同図中下段部分）の2つの部分の粗さを比較する。まず、乱数により一方の r が他方の4倍となるように設定する。テスト被験者はどちらの部分の粗いかわからない。被験者に弾性表面波皮膚感覚ディスプレイマウスを用いてどちらの部分の粗いかわかってもらうというテストを行った。

11 人の被験者の協力を得て比較テストを行った結果をTable 1に示す。正解は7人であり、粗さの区別が完全では無いことが示された。また、「何も感じない」という回答も得られた。原因として、パッドが発生する振動が不十分であったことが考えられる。著者らによるテストのときも、ボタンを押す力の加減や向きによって感じられる振動が大きく異なった。弾性表面波皮膚感覚ディスプレイマウスが提示する感覚の再現性を高めることで、比較テストの正解率を向上させることができる。再現性を高めるためには、マウスボタンを押すときの力の加減や向きによらず、確実にパッドが振動することが重要である。今後、鉄球の大きさや配置、支持方法などを検討して、パッドの振動を大きくしていく。また、より多くの被験者の協力を得て、性別、年齢と

の相関についても調べていきたい。

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2つのレイリー波を励振して利用し、ある表面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り付けて、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、複数の被検者による表面粗さの比較テスト等を行い、皮膚感覚ディスプレイマウスの客観的な評価の検討を行った。

参考文献

- [1] 大山正, 今井省吾, 気典二編「感覚知覚心理学ハンドブック」誠信書房, (1994).
- [2] 例えば“PHANToM”, <http://www.sensable.com/>
- [3] 渡辺敏雄, 福井茂寿:「超音波振動を用いた触感制御法の研究」, 日本機械学会 第4回設計工学・システム部門講演会講演論文集, 130-133, (1994).
- [4] T. Watanabe et al, “A Method for Controlling Tactile Sensation of Surface Roughness Using Ultrasonic Vibration, ” Proc. IEEE Int’l Conf. Advanced Robotics (ICAR), IEEE Robotics and Automation Soc., Piscataway, N. J., pp. 1134-1139, 1995.
- [5] R. D. Howe et al, “Remote Palpation Technology, ” IEEE Eng. In Medicine and Biology, Vol. 14 No. 3, pp. 318-323, 1995.
- [6] Y. Ikei et al, “Texture Presentation by Vibratory Tactile Display, ” Proc. IEEE Virtual Reality Ann. Int’l Symp (VRAIS 96), IEEE CS Press, Los Alamitos, CA, pp. 199-205, 1996.
- [7] A. Sato et al, “Development of Non-Constrained Arm with Tactile Feedback Device, ” Proc. IEEE Int’l Conf. Advanced Robotics (ICAR), IEEE Robotics and Automation Soc., Piscataway, N. J., pp. 334-338, 1991.
- [8] 福田 ほか, 「マイクロ振動子を用いた触覚提示」, バーチャルリアリティ学会第2回大会論文集, (1997)pp. 198-201.
- [9] M. Takasaki et al, “A Tactile Display Using Surface Acoustic Wave”, IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, Osaka, Japan, Sep. 27-29, pp. 364-367, 2000.
- [10] T. Nara et al, “An Application Of SAW To A Tactile Display In Virtual Reality”, IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, San Juan, Puerto Rico, Oct. 22-25, pp. 1-4, 2000.
- [11] M. Takasaki et al, “A Tactile Display Using Surface Acoustic Wave”, IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Switzerland, Jan 21-25, pp. 240-243, 2001.
- [12] M. Takahashi, M. Kurosawa and T. Higuchi: "Direct frictional driven surface acoustic wave motor, " Proc. of Transducers '95 and Eurosensors IX, 401-404, (1995).
- [13] M. kurosawa, T. Watamabe, A. Futami and T. Higuchi: "Surface acoustic wave atomizer, " Elsevier Science, Sensors and Actuators, A 50, 69-74, (1995).
- [14] 二見明, 黒澤実, 渡辺敬之, 樋口俊郎:「ニオブ酸リチウム基板を用いた弾性表面波霧化器」, 信学技報, US95-20/EMD95-16/CPM-28, 1-8, (1995).