

超音波振動を用いた触覚インターフェースの開発 (第2報：ピンアレイの共振を利用した小型圧電振動子の開発)

Development of a Tactile Interface Using an Ultrasonic Vibration (2nd Report: Development of a Small Piezoelectric Vibrator Using Resonance of a Pin-Array)

学 元木 陽平 非 山田 浩史 正 昆陽 雅司 正 田所 諭 (東北大) 正 前野 隆司 (慶応大)

Yohei Motoki, Hiroshi Yamada, Masashi Konyo, Satoshi Tadokoro (Tohoku Univ.) and Takashi Maeno(Keio Univ.)

Abstract—We developed a small piezoelectric vibrator using an ultrasonic resonance of a pin-array. The ultrasonic vibrator consists of a single piezoelectric ceramics and an elastic metal. Tactile stimulation is generated by amplitude modulations of an ultrasonic vibration. In order to make large generative force and vibration amplitude, the ultrasonic vibrator was designed by finite element analysis. The theory of dynamic damper was applied between a pin-array and a bottom plate of vibrator, could get the large vibration amplitude and arranged the vibratory distribution of a pin-array. Finally, we made a prototype of an ultrasonic vibrator and evaluate it.

Key Words: Tactile Display, Ultrasonic Vibration, Piezoelectric Analysis

1. 緒論

本研究ではジョイスティックや携帯端末などに搭載し、ヒトに手軽に触覚情報を呈示可能な触覚インターフェースの開発をめざす。これより、携帯端末などに表示されるキャラクタなどと触れ合うことが可能となる。例えば、ゲームのキャラクタと触れ合う触感を呈示することで、ユーザは対象の存在を実感する。

従来の機械式触覚ディスプレイは、刺激の空間分布によって凹凸や形状を表現するために、多数のアクチュエータを独立して駆動する必要がある、デバイスの小型化は困難であった。また、触覚のリアリティの向上には触運動を伴う知覚の能動性が重要である。そこで、携帯端末の十字パッドやジョイスティックを操作する指先に触覚情報を呈示することを考える。これを実現するためには、ポインティングデバイスに搭載可能な小型軽量の触覚ディスプレイが必要である。

筆者らの触覚合成手法は、時間周波数帯に応じて触覚受容器を選択的に刺激する手法であり、圧覚、粗さ、摩擦感を独立して制御することに成功している^{1, 2)}。さらに、手指の触運動に応じて刺激を制御することで、タオル、デニム、ボアなどの素材の手触りの合成や、圧覚を利用した3Dオブジェクトの手触りの呈示に成功している¹⁾。このように本手法はヒトの触運動の能動性を積極的に利用している。また、この手法では刺激の空間分布を制御する必要がないためにディスプレイの小型化に有利である。

そこで筆者らは、Fig.1のようなゲームコントローラのジョイスティックに搭載可能な、単一の圧電セラミクスを用いて分布振動刺激を与える小型超音波振動子を開発してきた³⁾。触感の呈示は、超音波振動を振幅振調することより呈示する手法を提案している⁴⁾。しかしこれまでの振動子では、振動子の設計が不十分であったため、十分な発生力と振動振幅を得ることができず、触感を呈示することはできなかった。

そこで本稿では、有限要素解析より振動子の共振を利用し十分な触感を得るための小型超音波振動子の設計につい



Fig.1 An ultrasonic vibrator attached to game controller.

て検討する。また、振動子を製作しその特性を評価する。

2. 超音波振動子による触感呈示法

本研究では、ヒトの母指に伝わる包絡線成分の振幅と周波数を制御し、複合的な触覚を呈示する⁴⁾。ヒトの指腹部には表皮に近い順に、マイスナー小体、パチニ小体など4種類の触覚受容器が存在し、それぞれ異なる振動検出閾値を有している。筆者らはこの特性の違いを利用することで多様な触感を呈示する手法を提案している²⁾。

振動子を数 100 kHz の超音波で振動させて皮膚を刺激すると、ヒトは超音波領域の振動を感じる事ができず、Fig.2のような超音波の包絡線成分のみを感じる。これは接触の非線形性により引き起こされ、数 10 Hz 以上の振動では包絡線の検波が起こるためである⁶⁾。本研究ではこの性質を利用し、超音波振動の振幅を制御することで触感を呈示する。

3. 超音波振動子の設計

3.1 設計指針

複合的な触感を呈示するための触覚ディスプレイには以下のことが求められる。

- ヒトの指に対して接線方向、垂直方向に振動刺激を与えられること
- 数 Hz ~ 200 Hz 程度で周波数を連続的に制御可能なこと
- 皮膚に発生する振動振幅が、触覚受容器の振動検出閾値以上の振幅を得ること

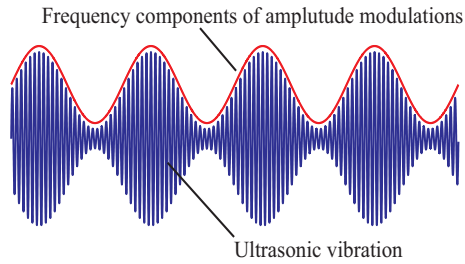


Fig.2 Generation of frequency components using amplitude modulations of an ultrasonic vibration.

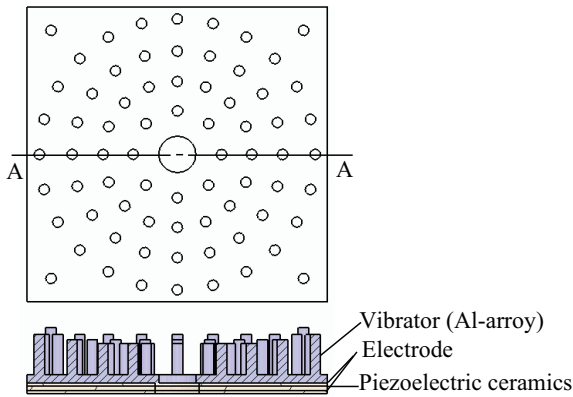


Fig.3 Structure of an ultrasonic vibrator.

これらを実現するために、筆者らはこれまでピンアレイ型の超音波振動子を製作してきた。ここで、振動子の構造を Fig.3 に示す。構造の詳細は第 3.2 で述べるが、ピンを除く圧電セラミクスと金属弾性体の平板を貼り合わせたものを振動子底板と定義しておく。3 つ目の”触覚受容器の振動検出閾値以上の振幅を得ること”が、振動子自体の振動振幅が小さいために実現できていなかった。また、振動子を単一の圧電セラミクスにより駆動した場合、中心から外へ広がっていく面積振動を考えると考えられるので、振動振幅が均一には発生しないと考えられる。そのために任意のピンの振動振幅を増幅させることが必要だと考えられる。

そこで、本稿では次の設計指針に従い、これらの問題の解決をめざす。

- ピンとピンを除く振動子底板に対し個々に固有振動数を設定し、振動子全体を連成させたときの共振を巧く利用し（動吸振器の理論）、任意の位置のピンの振動振幅を増幅できるようにする。

3.2 超音波振動子の構造

設計する超音波振動子の基本構造を Fig.3 に示す。振動子は、単一の正方形の圧電セラミクスとピンマトリクス型の金属弾性体を貼り合わせた構造になっている。また、金属弾性体は、ヤング率、ポアソン比、密度が小さいという特性を有した材料が解析上アドミタンス、振幅共に大きかったこと、さらに内部減衰率、切削性を考慮し Al 合金 (A2024) を選定した。

圧電セラミクスの両面にはあらかじめ電極を設けてある。振動子側の電極を接地させ、反対側の電極に圧電セラミクスの共振周波数付近の交流電圧を印加して振動させることで、

振動子全体を共振させる。また超音波振動子を制御するために印加側の電極の一部を分離しセンサ極として用いる。

ピンの配置は、正方形の圧電セラミクスの振動モードである中心から外へ広がっていく面積振動を想定して、同心円状としている。また、ピンの間隔は、テクスチャを呈示する場合はヒトの 2 点別閾値より小さくする必要は無く、1.9 mm 程度の間隔あればいいと報告されている⁷⁾ことから、1.9 mm 程度とした。また、ピン先端と母指との接触面を大きくするために母指の曲率を想定した高さ分布を設けている。

さらに超音波振動子を様々なデバイスに取り付けやすくするため、中心部を M2 ネジで固定のために $\phi 2.1$ mm 穴を開ける。圧電セラミクス側はネジとの接触を考慮し $\phi 2.5$ mm の穴を開けることとする。

3.3 有限要素解析の解析条件

本稿の超音波振動子の設計には汎用有限要素解析ソフト ANSYS を用い、振動子のアドミタンス特性、力係数、振幅量を評価する。解析手法には周波数応答解析及び圧電解析を用いる。

解析モデルとしては、圧電セラミクスと Al 合金は完全に固着されているものとし、減衰率は、金属弾性体と圧電セラミクスを接着した振動子では一般に機械的 Q 値が 1000 程度になることが知られていることから 0.0005 とした。印加電圧は圧電セラミクスの振幅に大きく影響するが、発熱を考慮し $20 V_{p-p}$ とする。また、圧電セラミクスの下面に電圧を印加し、上面は接地するようにする。M2 ネジによる拘束部は上面を $\phi 3.8$ mm、下面をゴムで拘束するために $\phi 6.0$ mm を z 成分方向に完全拘束とする。以上のことを考慮し有限要素モデルを作成する。

ここで、振動子の底面に垂直な方向を z 軸とし、底面に平行な方向に x 軸、 y 軸と定義する。

4. 共振を用いた振幅増幅法

4.1 ピンの固有振動数と動吸振器の理論の適用

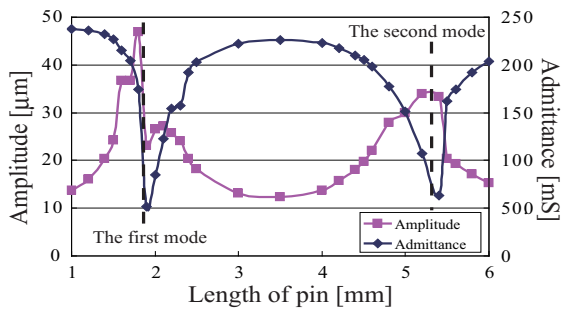
ピンが振動子底板から受ける力を考えた場合、ピンには縦振動による固有振動モードと横振動による固有振動モードが発生すると考えられる。この 2 つの固有振動モードのうち発生すると考えられるのは、印加周波数の関係から横振動による固有振動モードである。

Al 合金の底板は一体型となっていることから、ピンの支持条件は一端固定 - 他端自由になっていると考えられるので、曲げによるピンの固有振動数 f_i は

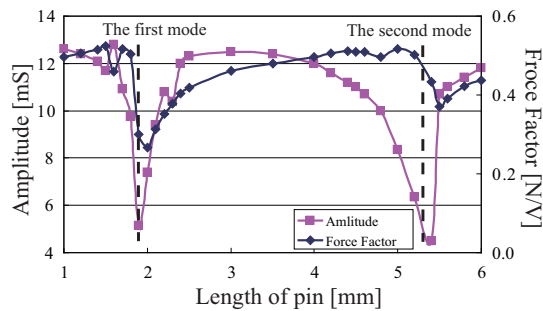
$$f_i = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\lambda_i}{l} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

より求めることができる。ここで、 l , A , E , I , ρ はそれぞれピンの長さ、断面積、ヤング率、慣性 2 次モーメント、密度である。式 (1) から、ピンの横振動による固有振動数は直径と長さによって任意に制御することが可能である。

このことから、振動子底板を一つの振動体と仮定すると動吸振器の理論をピンに適用することが可能である。動吸



(a) Vibrator



(b) Bottom plate of the vibrator

Fig.4 Effect of dynamic damper by eigenfrequency of pin.

振器とは、振動体である振動子底板の固有振動数とピンの固有振動数を等しくしたとき、振動子底板の運動エネルギーをピンが吸収することにより振動指底板の振幅を抑える制振理論である。この理論から、ピンの固有振動数を振動子底板の固有振動数に近づければ、振動子底板は制振されることからアドミタンスは小さくなるが、運動エネルギーを吸収するピンは振幅が大きくなると考えられる。そこで、ピンの曲げによる固有振動に動吸振器の理論を適用できるかを圧電解析により検証する。

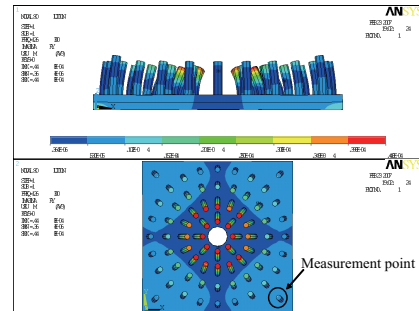
4.2 有限要素解析

解析条件

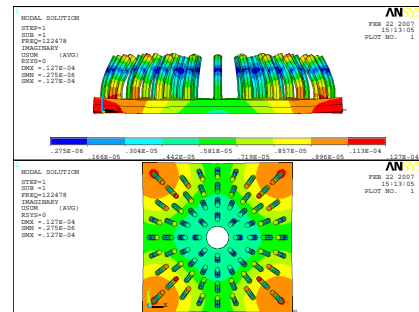
ピンの曲げによる固有振動数を統一するために、ピンの直径を 0.8 mm と統一して、長さを変化させることにより固有振動数を変化させる。ピンの低次のモードと高次のモードを検討するために長さは 1.0 mm ~ 6.0 mm としている。振動子底板の厚さは解析の結果より 0.5 mm とし、このときの共振周波数は 124.14 kHz である。ここで、ピンの固有振動数は、1 次モードではピンの長さが 2.0 mm のとき 143 kHz、2 次モードでは 5.0 mm のとき 143 kHz となっており、この近傍で振幅が大きくアドミタンスが小さくなると考えられる。

解析結果と考察

振動子のピンの長さ、振幅、アドミタンスの関係を Fig.4(a) に示し、振動子底板のピンの長さ、振幅、力係数の関係を Fig.4(b) に示す。また、ピンの固有振動モードが遷移する所を破線で示している。Fig.4(a) より、振動子底板のモード形状に関わらず、ピンの曲げによる固有振動数



(a) Applied theory of dynamic damper



(b) Not applied theory of dynamic damper

Fig.5 Arranged vibratory distribution of pins by the theory of dynamic damper.

が振動子底板の共振周波数である約 125 kHz の近傍で、振幅が大きくなり、アドミタンスが小さくなっていることが分かる。このことから、ピンが動吸振器の役割をしていることが分かる。また、ピンの 2 次モードよりも 1 次モードの方が振幅量が多いことが分かる。これより、固有振動モードは 1 次モードを採用することとする。

ピンの直径を 0.6 mm、1.0 mm と変化させても同様の結果が得られたため、ピンの直径によらず動吸振器の理論を適用できることを確認した。

4.3 任意のピンへの動吸振器の理論の適用

前節の解析結果から、Fig.4 より全てのピンに動吸振器の理論を適用した場合、振幅量は大きくなるがアドミタンスは小さくなることが確認できた。しかしこの場合、Fig.4(b) より力係数も減少してしまっていることが分かる。そこで、アドミタンスの著しい減少と力係数の減少を防ぐために、全てのピンに動吸振器の理論を適用するのではなく、振幅振幅を大きくしたいピンにのみ動吸振器の理論を適用できないかを検討する。

本稿では、母指との接触を考慮し、接触面の中心部に動吸振器の理論を適用し、この方法により、アドミタンスをあまり小さくせずに、力係数を大きく、かつ任意のピンで振幅振幅が大きくなるかを検討する。

解析条件

中心部のピンにのみ、動吸振器の理論を適用する固有振動数に設計し、他のピンはアドミタンスが高かったピンの長さを選択し、高さ分布をつけた。ピンの長さは中心部から 1.75 mm、1.95 mm、2.25 mm、2.65 mm とし、ピンの

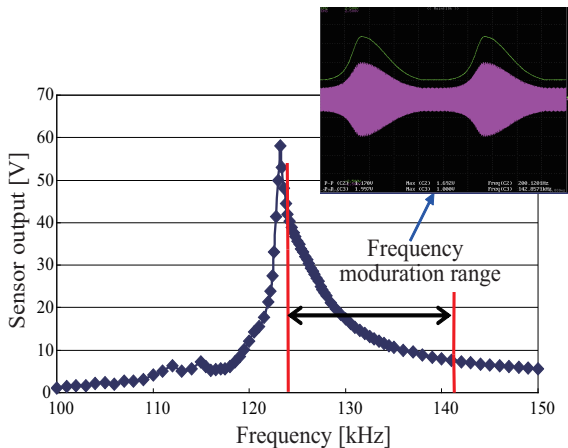


Fig.6 Frequency characteristics of vibration amplitude.

直径は細い方が振動振幅が大きかったことから全て 0.6 mm に統一した。

解析結果

振幅量を示した振動モード形状を Fig.5(a) に示す。また、比較として、前節より動吸振器の理論が適用されていないと判断できるピンの長さ 3.0 mm の振幅量による振動モード形状を Fig.5(b) に示す。Fig.5(a), (b) のいずれも振幅が大きいところが赤色、小さいところが青色を示している。解析結果から、動吸振器の理論を適用した振動子の共振周波数は 126.30 kHz、アドミタンスは 203.6 mS、最大振幅は 44.8 μm 、力係数は 0.48 N/V であった。一方、動吸振器の理論を適用していない振動子は、アドミタンスが 222.5 mS、最大振幅は 11.5 μm 、力係数は 0.46 N/V であった。また、Fig.5(a) より、適用した場合は中心部のピンが最大振幅となっていて、Fig.5(b) より、適用していない場合は外側のピンが最大振幅となっていることが分かる。このことから、振動子底板のモード形状が同じでも、中心部のみに動吸振器の理論を適用した場合は、振幅、アドミタンス、力係数共に大きくすることができていることが分かる。

これより、振動振幅を大きくさせたいピンにのみ動吸振器の理論を適用させることが、振動検出閾値以上の振幅を得る方法として有効であることが分かった。

5. 超音波振動子の製作と評価

5.1 振動子の振幅変調

第 4-3 節で設計した超音波振動子を製作し、その特性を評価する。

筆者らは、超音波振動子の振幅をセンサ極からの出力をフィードバックすることにより安定に制御する方法を用いている⁵⁾。そこで、電圧 20 V_{p-p} を印加したときの、センサ極の出力電圧による周波数応答特性の測定結果を Fig.6 に示す。Fig.6 から、センサ極出力のピークは 123.2 kHz 付近であることが分かり、解析で示した共振周波数とほぼ同じであることが分かる。また、Fig.6 より周波数は 124 kHz ~ 142 kHz の帯域で遷移させることとする。

次に、Fig.5(a) において円で囲んだピンの 124kHz と 142kHz の周波数のときの振幅を、レーザ・ドップラ速度計より計測した。中心部のピンの計測は他のピンによる干渉

のために困難であるため、外側のピンを計測した。その結果、X-Y 成分の振幅は 124 kHz では 0.467 μm 、142 kHz では 0.032 μm であった。解析では、中心部と外側のピンでは約 5 倍なので、中心部の振幅は 124 kHz 付近では 2.3 μm 、142 kHz では 0.15 μm 程度であると推測される。これより、124 kHz と 142 kHz では 10 倍以上の振動振幅の違いがあり、Fig.6 に示すように、振幅変調がされていることが確認できた。

5.2 呈示実験

製作した超音波振動子で、振幅変調法による 30 Hz ~ 300 Hz の周波数帯で刺激が確認できるか実験を行った。その結果 200 Hz 付近では触運動をすると十分な振動刺激を感じられた。これは触覚受容器の中で 200 Hz 付近に振動検出閾値を持つパチニ小体が刺激されたためであると考えられる。しかし、母指で少し強く押さえると刺激がほとんど感じられなかった。また、40 Hz 付近で実験を行ったが、十分な刺激は得られなかった。

指で押さえたときに刺激が感じられなくなる原因は、振動子の共振周波数が変化するため発生力・振幅共に小さくなってしまったことであると考えられる。

6. 結論

本稿では、有限要素解析により十分な発生力・振動振幅を得るために、ピンアレイの共振を利用した動吸振器の理論を適用した微小分布刺激の振動子の開発を行った。解析結果から、動吸振器の理論を適用しない場合に比べ、大きな振動振幅を得ることができ、振動振幅の増大法として有効であることが示された。しかし発生力が弱く、200 Hz 付近でしか刺激が感じられず、複合的な触感を呈示するには至っていない。今後、十分な刺激を得るための詳細な振動子の設計をすることにより、複合的な触感が呈示できると考えられる。

参考文献

- 1) 昆陽雅司, 吉田晃典, 田所諭, "高分子ゲルアクチュエータを用いた皮膚表面刺激による 3 次元オブジェクトの手触りの呈示" 第 11 回ロボティクスシンポジウム講演論文集, pp. 301-307, 2006
- 2) M.Konyo, A.Yoshida, S.Tadokoro, N.Saiwaki, "A tactile synthesis method using multiple frequency vibration for representing virtual touch", IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1121-1127, 2005.
- 3) 山田浩史, 昆陽雅司, 田所諭, 前野隆司, "超音波振動子を用いた触覚インターフェースの開発", 第 7 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 104-4, 2006.
- 4) 昆陽雅司, 音川佳代, 前野隆司, "超音波振動の振幅変調を用いた人工触感呈示法", 第 24 回日本ロボット学会学術講演会, 2k13, 2006.
- 5) 昆陽雅司, 音川佳代, 前野隆司, "超音波振動の振幅変調を用いた複合触覚呈示法", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集, 1P1-N-101, 2005.
- 6) 奈良高明, 柳田康幸, 前田太郎, 舘, "弾性波動を用いた皮膚感覚ディスプレイ", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.3, No.3, pp.89-97, 1998.
- 7) 大岡昌博, 毛利行宏, 杉浦徳宏, 古賀宏嗣, 三矢安永, "分布圧覚ディスプレイ装置による仮想形状呈示", 日本機械学会論文集 C, Vol.68, No.674, pp.2970-2976, 2002.