

超音波振動の振幅変調を用いた複合触覚呈示法

A Display Method for Multiple Tactile Sensations Using Amplitude Modulation of Ultrasonic Vibration

正 昆陽 雅司 (慶應義塾大学) 音川 佳代 (慶應義塾大学) 正 前野 隆司 (慶應義塾大学)

Masashi Konyo, Kayo Otokawa, and Takashi Maeno,
Keio University, konyo@educ.cc.keio.ac.jp

Abstract— In this paper, we propose a novel tactile display that can control temporal frequencies and amplitudes of minute distributed vibrations easily and precisely using only one piezoelectric actuator. The device has a pin-matrix type structure and each pin is actuated by natural vibration driven by a piezoelectric ceramic plate. We proposed that periodic amplitude modulations of ultrasonic vibration in less than several hundred frequency ranges make a selective stimulation on several tactile receptors based on the human tactile receptors' frequency characteristics. The proposed feedback control of amplitude modulations demonstrated that the prototype ultrasonic vibrator could generate stable amplitude-modulated vibration more than 400 Hz. These frequencies are enough to control the activities of tactile receptors selectively.

Key Words: Tactile display, Ultrasonic vibrator, Piezoelectric actuator

1. はじめに

多様な触覚情報を人間に呈示する技術は、遠隔操作などで人間の感覚を基盤とした高度な情報処理能力を活かすために重要である。

ヒトの触覚の特徴は「ざらざら、ふわふわ」などの素材の粗さ情報や硬さ情報、接触時の滑り情報など、多様な情報が複合されていることである。従来の触覚ディスプレイはこのよう多様な触覚すべてに対応することが困難であった。筆者は、触覚受容体の周波数応答特性を利用して、高分子ゲルアクチュエータ(ICPF)を用いた微小分布振動刺激子を開発し、周波数成分の変調・合成によって複合的な触覚を呈示する方法を提案してきた^{1, 2)}。ICPFは非常に小型軽量であるため、手指に装着可能なデバイスを実現するのに有効であるが、発生力の弱さ、振動振幅の厳密な制御、湿潤状態での駆動、などの点で問題があった。

本研究では、小型軽量で皮膚に微小分布刺激を与え、かつ、振動の周波数成分を厳密にコントロール可能な触覚ディスプレイを開発する。本稿では、圧電素子を用いた小型超音波振動子を用いて、振幅変調による周波数成分を利用した複合触覚の生成法を提案する。また、微小分布刺激を生成する小型振動子の設計、振動振幅を高速に安定制御し、振幅変調による周波数成分を生成する手法について述べる。

2. 複合触覚呈示法

ヒトは皮膚を対象物に接触させることで、対象物の物理的特徴を自らの皮膚の変形に置き換え、その変形を皮膚中の触覚受容体が検出することによって複合的な触覚を得る。このことから、人工的に触覚を呈示するには(1)皮膚の変形を再現する、(2)触覚受容体の活動を再現する、の2つのアプローチが考えられる。前者は、すべての触覚情報に対応した皮膚の変形を同時に再現することが物理的に困難であるため、複合触覚呈示には向いていない。後者は選択的刺激性³⁾として提案された考えで、理論的には任意の触覚を再現可能である。

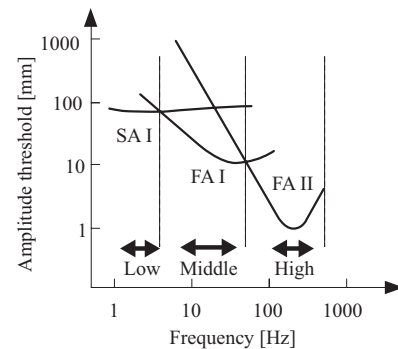


Fig. 1 Thresholds of tactile receptors for vibratory stimulus and selective stimulation ranges.

筆者らは触覚受容体の時間周波数応答特性を利用して、振動刺激の周波数領域によって触覚受容体の活動を選択的に制御する手法を提案している^{1, 2)}。Fig. 1に3つの触覚受容体(SA I, FA I, FA II)の振動検出閾値の周波数特性を示す。振動検出閾値は小さいほど受容体の感度が高いことを示す。この図より、低域・中域・高域の周波数帯によって、最も感度よく応答する受容体が異なることが分かる。この特性を利用して、振動刺激の周波数領域によって、受容体を選択的に刺激することが可能である。

筆者らは(1)5 Hzの振動刺激による圧覚呈示(SA I刺激)(2)触運動の速度と素材表面の凹凸の空間波長の関係によって生成する振動の周波数変化の再現による粗さ感呈示(ちょうどFA Iが応答しやすい周波数領域になる)、(3)触運動の加速度と200 Hzの振動刺激を対応させた摩擦感呈示(FA II刺激)、が可能であることを実験的に示し、これらの3つの手法の周波数を合成することで布の手触りのような複合的な触感が生成することを確認した²⁾。

本研究でも、上記と同様な時間周波数成分の合成により複合的な触感を生成する手法を用いる。この手法を実現するための刺激生成デバイスの必要条件は次のようにまとめられる。

- 皮膚に微小分布状の振動刺激を与えること。

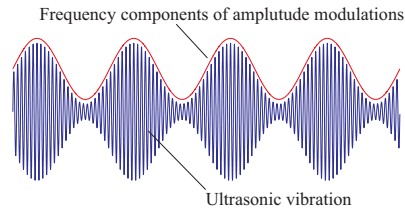


Fig. 2 Generation of frequency components using amplitude modulations of ultrasonic vibrations.

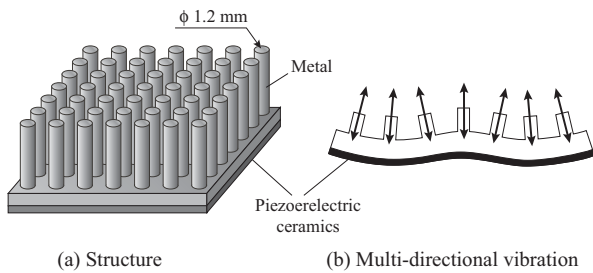


Fig. 3 Structure of a pin-matrix type ultrasonic vibrator.

- マイスナー小体の刺激方向の指向性を考慮して皮膚の剪断方向にも振動刺激を与えること。
- 数 Hz ~ 200 Hz 程度で周波数を連続的に変調可能であること。
- すべての周波数領域で振幅を厳密に制御可能であること。
- 小型軽量で、手指に装着可能であること。

3. 超音波振動子の設計・製作

3.1 振幅変調による刺激法

超音波振動子は従来から触覚ディスプレイに用いられてきたが、スクィーズ効果を用いて摩擦力の変化を利用したものが多かった^{4, 5)}。本研究では、Fig. 2のように、超音波振動の振幅変調を用いて振動刺激の周波数成分を生成する。振幅を数 Hz ~ 200 Hz で周期的に変調することで、超音波振動子の振幅の変化が皮膚に伝わり、触覚受容器の応答特性に応じた振動成分を生成することが可能になると考えられる。このとき、超音波域の振動は触覚受容器の周波数感度限界を超えているため、超音波振動自体を触覚受容器が検出することはない。

Fig. 3 (a) に提案するピンマトリクス型の超音波振動子の構造を示す。金属の弾性体の平板に垂直に多数の円柱状のピンを配置し、弾性体の底面に圧電セラミックスを貼り付けてある。圧電セラミックスに振動子の共振周波数付近の交流電圧を印加すると、振動子全体が振動する。Fig. 3 (b) に示すように、固有振動時に底部平板が隆起するようなモード形状になる場合、ピンの先端部は固有振動の腹と節の上では垂直に振動するが、それ以外の部分では斜め方向に振動する。このようなピンマトリクス構造は、底部平板に起こる振動の振幅をピン先端部で拡大する働きと、皮膚に対して剪断方向の振動に変換する働きをもつ。なお、ピンマトリクスの振動の空間分布は方向、振幅と

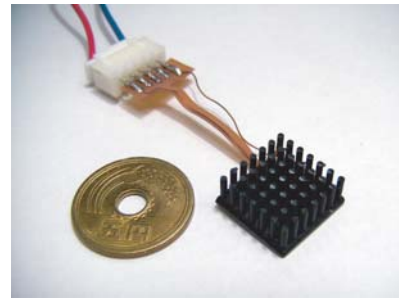
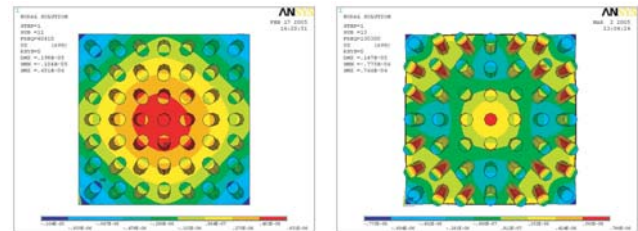


Fig. 4 Overview of the ultrasonic vibrator developed.



(a) Mode I (40.4 kHz) (b) Mode II (130.3 kHz)

Fig. 5 Analysis on vibration modes and natural frequencies.

もに様ではない。振動の方向に関しては、SA I, FA I, FA II の触覚受容器が刺激方向を検出する受容器でないことから影響はないと考える。振動振幅の空間分布に関しては、本研究では、刺激量は接触部の振動の総和であると考え、振動の空間分布よりも、時間周波数情報を伝えることに重点を置くこととする。ただし、滑り・固着などの局所的な空間分布が触覚情報処理に本質的に関係する可能性もあり、空間分布に関してはさらなる議論が必要である。本研究の振動子の場合、振動モード形状の選択によって、ある程度振動分布を選択することは可能である。

3.2 試作

本稿では、試作として、底部平板の大きさ 16×16 mm、厚さ 1 mm、ピンの直径 1.2 mm、長さ 5 mm、 7×7 本のマトリクス構造をもつ振動子を製作した。金属部はアルミを用い、平板部とピンマトリクスは一体成形されている。Fig. 4 に振動子の外観を示す。圧電セラミックスの電極は交流電圧を印可するための入力相と、圧電セラミックスのひずみを電圧として出力するセンサ相の 2 極に分極されている。本試作では、圧電セラミックスの電極の $1/4$ をセンサ相に用いた。また、金属部には、入力相とセンサ相で共通する接地電極を設けた。

3.3 固有振動モード解析

振動子は固有振動モードのモードの選択によって、振動の空間分布、振動のしやすさなどが変化する。特に、振動子は指と接触するため、発生力を重視して設計する必要がある。Fig. 5 に有限要素モデルを用いた固有モード解析の結果の例を示す。ただし、(b) はモード形状を分かりやすくするために圧電素子にセンサ相を設けず、全面入力相として解析した結果を示す。図中の色分布はピンの垂直方

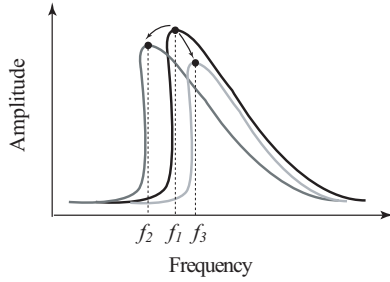


Fig. 6 Nonlinear characteristics of natural vibration.

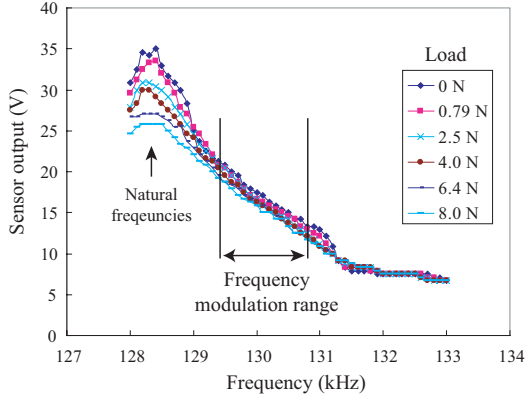


Fig. 7 Frequency characteristics of vibration amplitudes on each normal force loads.

向の振幅を表わし、中央の色（緑）が節を表す。（a）モード I（固有周波数 40.4 kHz）に対し、（b）モード II（固有周波数 130.3 kHz）の方が、アドミタンスが大きいことから、外部から負荷がかかった際も駆動力が大きいと考えられる。

モード II は、S 相を考慮して考えると共振周波数 133.1 kHz となり、モード形状はやや崩れる。このとき、ピン先端部の接線方向と法線方向の最も大きい振幅は、それぞれ、約 $1.5 \mu\text{m}$ 、約 $0.8 \mu\text{m}$ となった。

4. 周波数遷移による振幅制御法

4.1 周波数特性と振幅変調法

超音波振動の振幅を変調する方法として、(1) 周波数一定で入力電圧を変化させる、(2) 入力電圧一定で周波数を変化させる、の 2 つが考えられる。

(1) の方法では、一般に固有振動の振幅と入力電圧の関係は Fig. 6 に示すように非線形であるため制御が困難である。特に、駆動による発熱により固有周波数が変動すること、また、外部から負荷が加わった際に固有周波数が増加することから、Fig. 6 の f_2 、 f_3 のように固有周波数が変動すれば、同じ周波数であっても電圧と振幅の関係は変化する。本研究では振幅を厳密に制御することにより周波数刺激を生成する必要があるため (1) の方法は不適切である。

(2) の方法では、印加周波数を固有周波数から遠ざける方向に遷移させると振幅が減少することを利用する。ただし、固有周波数よりも低い側では、Fig. 6 に示すよう

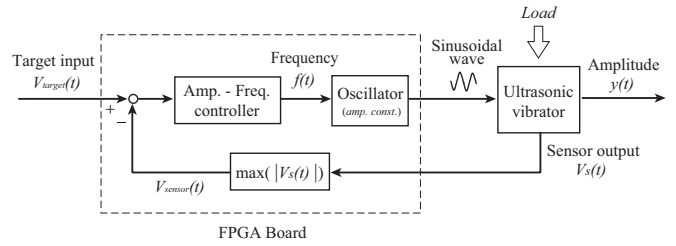


Fig. 8 Amplitude control system using frequency modulations.

に、振幅の変化が急激であることと、周波数遷移の方向によってヒステリシスがあることから振幅は非常に不安定になる。このため本研究では、固有周波数よりも大きい方に周波数を遷移する方法で振幅を制御する方法を用いる。

Fig. 7 に前節で試作した振動子を用いて、周波数特性を測定した結果を示す。印加交流電圧は 10 V で一定とし、無負荷の状態と、振動子全面に荷重を加えた場合について、センサ相の出力電圧の周波数特性を求めた。後述するように、センサ相は振動振幅と比例することが知られている。この結果より、固有周波数よりも、印加周波数が増加するに従って、振幅が減少することが確認された。また、荷重負荷に対しては、固有振動付近で特に振幅が減少すること、ある程度固有振動から遠ざかると負荷によらず減少傾向が一定になることが確認された。この結果より、約 129 ~ 131 kHz の領域で周波数を遷移させることで、振幅を安定して制御できると考えられる。

4.2 制御システム

超音波振動子は、皮膚に押しつけた際の荷重、発熱による固有振動の変動などに対して安定して振幅を制御する必要がある。本研究では、センサ相からの出力をフィードバックすることで、振幅を安定に制御する。Fig. 8 に制御システムを示す。周波数制御器では、指令電圧を線形近似によって周波数に変換する操作と、センサ相を帰還させ比例制御を行う操作を行う。振幅指令電圧を V_{target} 、センサ相から帰還する電圧を V_{sensor} とすると周波数 f の変換は次式で行われる。

$$f = f_{max} - K_p \cdot (f_{max} - f_{min}) \cdot (V_{target} - V_{sensor}) \quad (1)$$

$$\text{ただし、} 0 \leq V_{target} \leq 1, 0 \leq V_{sensor} \leq 1$$

Fig. 9 の結果より、周波数の遷移領域は $f_{min} = 129.4$ [kHz]、 $f_{max} = 130.4$ [kHz] とした。センサ相は超音波振動と同期して、出力が変動するため、センサ出力の崩落をとるために絶対値の最大値を帰還させる。比例係数 K_p は十分な応答速度が得られた 0.2 とした。周波数制御器から出力された周波数 f は発振器に入力され、一定電圧の交流電圧を出力する。

制御システムは、超音波領域での制御が必要であるため、FPGA を用いたハードウェア論理回路によって実装する。本研究では、AD/DA 変換器が実装された NALLATEC 社製 DSP Development Kit を用いてシステムを構築した。

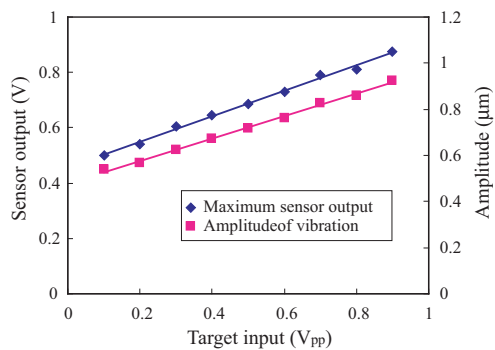


Fig. 9 Target inputs vs. vibration amplitudes ($f = 10$ Hz).

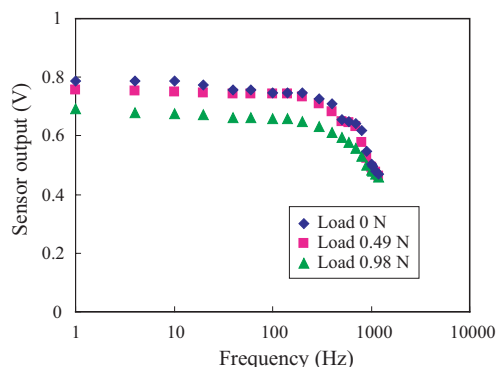


Fig. 10 Frequency response characteristics of maximum sensor outputs (\propto vibration amplitudes).

制御周期は 30 kHz で行った。超音波振動子の交流電圧印加には高速アンプを用いて 20 V に増幅する。また、センサ相はそのままでは数 10 V の電圧が出力されるが、振幅指令電圧と整合するように、可変抵抗により最大で 1 V 程度になるように調節する。

4.3 振幅制御実験

振幅制御システムの妥当性を検証するために、振幅指令と振動振幅の関係を測定する。計測には 3 次元計測が可能なレーザ・ドップラ速度計 (以下 LDV) を用いて、ピンの先端部の振動を測定した。測定位置は、Fig. 5 (b) のピンマトリックスの左上を原点 (0,0) とし、(2,2) の位置のピンを測定した。このピンの位置では、法線方向の振動がほとんどなく、接線方向の振動が起こる。振幅指令入力には 0.5 V のオフセットを設けた 10 Hz の正弦波を用い、その振幅の p-p 値を指令入力とする。Fig. 9 に指令入力と振動子の接線方向の振動振幅、そのときのセンサ出力の最大値の関係を示す。これより、指令入力に対し、実際に振動子の振幅が線形に変化することが確認された。また、センサ相の出力を見ると振動振幅とセンサ相は比例しており、センサ相出力をフィードバックすることが効果的であることが確認された。

4.4 振幅変調の周波数応答実験

超音波振動の周期的な振幅変調によって生成される周波数成分を利用する本提案手法では、すべての触覚受容器を



Fig. 11 Touching the prototype ultrasonic display.

刺激するために数 Hz ~ 200 Hz 程度で安定して振幅変調を行える必要がある。試作した超音波振動子の周波数変調の応答特性を検証するために、一定の指令振幅で変調周波数を変化させ、センサ出力の最大値 (\propto 振動振幅) の変動を測定した。また、皮膚との接触を想定して、一定の荷重を加えた際の特性も測定する。Fig. 10 に測定結果を示す。負荷によらず振幅変調周波数が 400 Hz 程度まで一定の振動振幅が生成されることが確認できる。また、0.5 N 程度の負荷なら、振幅をほとんど減少させることなく、制御することが確認された。1 N 程度の負荷が加わった場合は、振動振幅は減少するものの一定の振幅を生成することが確認された。

5. まとめ

本稿では、超音波振動の振幅変調の周波数成分を用いて、選択的に触覚受容器を刺激する手法の提案と、小型軽量で微小分布振動を生成する超音波振動子の設計と制御について述べた。本稿で試作した超音波振動子は、まだ発生力と振幅が小さいため、十分な触覚刺激を呈示するには至っていない。Fig.11 のように、試作した超音波振動子に軽く触れると、振幅変調で生成した振動を感じるものの、強く押し当てると振動を感じるができない。試行的に、筆者らが提案した複合的な触感の呈示²⁾を行ったところ、軽く撫でた際に、わずかに触感の違いを感じることを確認している。今後は、振動子の材料、形状を選定し、力係数、アドミッタンスなどを最適化することで、振幅と発生力の改善ができると思われる。

参考文献

- 1) 昆陽, 田所, 高森, 小黒, 徳田, 高分子ゲルアクチュエータを用いた布の手触り感覚を呈示する触感ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 6, No.4, pp.323-328, 2001.
- 2) 昆陽, 赤澤, 吉田, 新宅, 才脇, 田所, ICPF アクチュエータを用いた触感ディスプレイの研究 第 9 報: 触運動に応じたテクスチャ感の呈示手法, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '04 講演論文集, 1P1-H-4, 2004.
- 3) H. Shinoda, N. Asamura and N. Tomori, A tactile feeling display based on selective stimulation to skin receptors, Proc. IEEE ICRA, pp.435-441, 1998.
- 4) T. Watanabe, and S. Fukui, A Method for Controlling Tactile Sensation of Surface Roughness Using Ultrasonic Vibration, Proc. IEEE ICRA, pp.1134-1139, 1995.
- 5) T. Nara, M. Takasaki, T. Maeda, T. Higuchi, S. Ando, and S. Surface Acoustic Wave Tactile Display, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 21, No. 6, pp. 56-63, 2001.