

# インパルス成分を有する振動刺激によるインタラクティブ触覚ディスプレイ†

田中健司\*・諸橋隆治\*・前田太郎\*  
柳田康幸\*\*・館 障\*

## Method of Tactile Presentation Using Impulse Component in the Vibration

Kenji TANAKA\*, Takaharu MOROHASHI\*, Taro MAEDA\*,  
Yasuyuki YANAGIDA\*\* and Susumu TACHI\*

We have proposed and developed a vibratory tactile display system which enables the operator to recognize textures of the surface of a material in a virtual environment with somatosensory consistency. It displays the vibration generated to represent surface texture of a virtual object according to the movement of the operator's fingertip.

By focusing on impulses found in the recorded vibration, we propose a method of generating vibration in which frequency and power of the impulses are conserved.

We have found that the impulse component in the vibration is a significant factor in displaying tactile information. The proposed method proved to give the tactile sensation with a higher sensation of presence than methods in which neither phase information nor impulses are conserved. The validity of the proposed method was confirmed by psychophysical evaluation experiments.

**Key Words:** virtual reality, tactile display, vibratory stimulus, impulse component, tactile sensation

### 1. はじめに

仮想環境における力覚の提示においては、手や腕の大きな動きに対する反力によって生じる、あたかもそこに物体が存在しているかのような感覚を扱っている。これに対し、触覚の提示は、物質の表面を「なぞる」さいに、指先に伝わる振動や引っかかりによって生じる素材表面の細かな形状であるテクスチャの感覚を扱っており、力覚提示とは区別される。

前者は、力覚提示システムとしていくつかの例が報告されている。たとえば、Tachiらは、面とエッジが組み合わさったような複雑な形状を表現できる力触覚提示システムを提案している<sup>1)</sup>。また、2次元平面内に仮想的に定義された物体の形状と、操作者の手指との衝突を検出し、この衝突を操作者に力覚でフィードバックする装置も報告されている<sup>2)</sup>。これはXYプロッタを使用している。

これに対し、本研究で扱う触覚は後者に属するものである。

後者の例としては、Kontarinisらの触覚ディスプレイ<sup>3)</sup>があるが、これは基本的にテレオペレーションを主眼としたマスタ・スレーブシステムである。つまり、実世界の対象物を扱うものであり、スレーブ側マニピュレータによって、トルクと振動を取得し、これを再生する。

仮想環境での触覚提示を扱った触覚ディスプレイのうち、受動型のものとしては、Monkmanの触覚ディスプレイ<sup>4)</sup>が報告されている。これは、水平方向の位置に依存した素材表面の性質を提示するシステムで、電圧の印加により粘性が増加する流体を使用し、位置に依存した硬さを提示することにより、操作者が触覚による探索で、物体の比較的細かい構造を把握できる。提示できる起伏の解像度は、電極の配置の細かさに依存しており、1mm程度である。ただ、この解像度では、素材表面の粗さなど細かいテクスチャの提示に限界があると考えられる。

なぞりの感覚を提示するためには、素材表面の細かな形状であるテクスチャの感覚を十分に再現するためには、指先に、素材表面をなぞったさいに発生するであろう振動刺激を与える必要がある。この、いわば能動型の触覚ディスプレイとしては、次に挙げるものが報告されている。

Minskyらの、「バーチャルサウンドペーパー」<sup>5)</sup>では、コンピュータ画面に示された2次元上の位置に対応したトルクを機械的相互作用のシミュレーションによって提示し、仮想触

† 第34回計測自動制御学会学術講演会で発表(1995・7)

\* 東京大学工学部 東京都文京区本郷7-3-1

\*\* 東京大学先端科学技術研究センター 東京都目黒区駒場4-6-1

\* Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo

\*\* Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, Meguro-ku, Tokyo

(Received June 21, 1996)

(Revised March 12, 1997)

覚を提示している。このシステムでは操作部および提示部は、ジョイスティックを用いており、移動感をともなった触覚提示はできない。

この他に、振動ピンの集合を使用した広がりのある触覚提示<sup>6)</sup>も報告されている。

また、素材表面の「つるつる」「ざらざら」といった触感を超音波振動により制御する研究もある。短い加振により、平板上にあたかも突起が形成されたり、指が面に引っかかったりする感覚が得られることが報告されている<sup>7)</sup>。

上記のシステムは、いずれも一次元もしくは局所的な触覚のみを提示するもので、「なぞり」時の体性感覚に整合したテクスチャを提示することはできない。しかし、仮想環境での触覚提示においては、体性感覚に整合したテクスチャの提示を行うことが、よりリアルな「なぞり」感覚を提示するために必要であると考えられる。

2次元方向の移動感をともなったなぞり感覚の提示に関し、力覚および触覚提示機能を有するマウス状の装置が報告されている<sup>8)</sup>。これは、凹凸の感覚を持たせたGUI(グラフィカル・ユーザー・インタフェース)を実現するシステムで、マウスに、指に反力を返すようなアクチュエータを内蔵している。このシステムでは実際に素材表面をなぞって計測した振動をもとに振動を合成し、速さに応じて指先に加える。このさい、振動は、振幅の大小、ピッチの大小、およびそれぞれの不規則性といったパラメータから合成される比較的単純化、記号化されたものであり、粗さの区別はできるものの、忠実にある素材の手触りを提示することはできない。また、常にマウスを握っている必要があるため、手を動かすさいの拘束は小さくない。

これに対し、本研究では、体性感覚と整合した臨場感のあるテクスチャ感覚を、振動刺激によって提示することを追求した。振動刺激と人間の感覚との関係を系統的に解明し、その知見に基づいた振動の合成を行った。感覚尺度に関しても、粗さのほかにごつごつ感という尺度を導入しており、評価実験によって素材表面の多面的な性質を表現できることを確認した。また、一端が固定された、2自由度を持つ棒の他端から振動を提示することによって、比較的広い範囲の2次元平面内で、手を動かしている感覚をほとんど損なわず、体性感覚に整合したテクスチャを提示することも実現した。

## 2. 人間の手指の運動をともなうテクスチャ提示

**2.1 手指の運動をともなうテクスチャ提示に必要な性能**  
「なぞり」の感覚を提示するシステムに要求される性能を考えると、以下のようになろう。

- (1) 指先を動かす速さに応じた提示の変化。
- (2) 提示デバイスを押す圧力に応じた提示の変化。
- (3) コブや突起などによる、進行方向の反力の提示。
- (4) 溝などによる、進行方向と垂直な方向の力の提示。
- (5) なぞる動作にともなう音の提示。

本研究ではこのうち、(1)および(2)を考慮したシステム

を、インタラクティブな触覚ディスプレイとよび、その実現をはかる。ただし、本研究では、前述の力覚の提示を目標とはしていないため、素材表面は硬いものと仮定する。(1)は、「なぞり」時の体性感覚に整合したテクスチャの提示に、欠かせない条件である。

(2)の圧力に関しては、「軽く指をのせる程度」の力で提示デバイスを押すことを前提とすると、大きな出力インピーダンスをもつ提示デバイスを使用すれば、デバイス自体がとくに能動的に提示を変化させなくても、押す圧力に応じてデバイスからの反力が変化し、(2)の条件が保たれると考えられる。

振動は、上下(鉛直)方向の振動に限定し、(3)と(4)のような、水平方向の振動や、ひっかかり感に関する要素は取り上げない。とくに、指先には水平な(指の表面と平行な)振動を感じる部分があることが知られている<sup>(注1)</sup>、本研究では、上下方向の(指の表面と垂直な)振動のみを扱う。水平面内の振動はノイズととらえ、極力減らすように工夫することで、上下方向のみの振動を扱う。(5)は、異種感覚の融合の問題であるので、今回は取り上げないことにした。

また、本研究で扱う「なぞる」という動作は、Fig.1に示すとおり細い棒で素材表面をなぞり、その結果得られる振動を指先の限られた部位に提示するというものであり、提示システムと指が基本的に点接触であるという点で一般に考えられる手の指先でのなぞりとは異なっている。

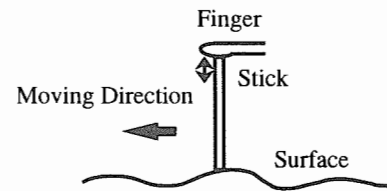


Fig. 1 Concept of the tactile display

本研究で試作した触覚ディスプレイは、任意の速さ、一定範囲の圧力で、ある素材表面をなぞった時の触覚を提示できるようなものである。この装置は、将来的に、力覚提示装置と組み合わせ、自由な形状をもち、自由な素材表面を持つ物体を表現することをめざしている。

振動の合成方法については、つぎの三つが考えられる。

- (1) 機械系の物理的な運動を記述し、振動をシミュレートして出力する方法、
- (2) 2次元平面内のある領域の各点に対し、その高さを(実際の素材表面を計測するか、一定のアルゴリズムで不規則な起伏を作り出して)定義しておき、指先の動きに応じて適当な力を提示することにより起伏をシミュレートする方法、

(注1) 人間の無毛皮膚部の触覚受容ユニットのうち、SAIIと呼ばれるものは皮膚を横に引っ張るような刺激に対し、神経からのインパルス発射がみられる。また、この引っ張りには方向性があることが知られている。<sup>10)</sup>

(3) 実際になぞったときの波形を記録し、その波形を指先の動きなどいくつかのパラメータによって加工し提示する方法。

(1) は、モデルの構築が困難であるうえ、複雑な機械系についての計算が必要であり、仮想環境内で重要なリアルタイム性と前述のインタラクティブ性を実現するのが困難であると考えられる。

また、(2) は、仮想素材表面を忠実に表現しようとするほど膨大なデータの記録が必要になり、細かい振動の表現よりも、前述した力覚提示に適した方法であると考えられる。

(1),(2) とともに理想的ではあっても実現困難であるため、高速でかつ少ないデータ量でも実現可能な(3)の方法が現段階における最も有効な方法である。

## 2.2 手指の運動をともなうテクスチャ感覚の解析

振動を記録や再生、または伝送するさい、

- 触感を損なわない再生を行うために必要な最低限のサンプリング周波数を決定する必要がある。また、
- 積極的に質の高い触覚を提示するために触覚知覚と関係の深い振動波形中の特徴量を抽出する必要がある。

触覚ディスプレイの設計にさきだって、指先に伝わる振動波形の構造と人間の触覚知覚との関係を調べるための解析を行った。

素材には、細かく、硬い不規則な凹凸(起伏の間隔は2~3mmで、計測装置である振動計の先端の形状に比べて十分大きい)をもったアクリル板と、サンドペーパーを用いた。

1kHz以上の周波数成分の、粗さ弁別への影響をみる実験を行い、振動の信号を1kHzのLPFに通した場合、2kHzのLPFに通した場合に比べパワーが弱く感じられたり、振動がくぐもって感じられたりするという結果を得た。この結果に基づいて、以降の実験ではサンプリング周波数を4kHzに設定した。

つぎに、人間の感覚に関わる振動の特徴量は主に振動のスペクトルであるという仮定を行い、振動をスペクトル分析し、位相を除いて合成し提示を行った。その結果、位相成分が取り除かれた振動の提示は、原波形そのままの提示にくらべて、粗さの再現性が悪いことが確認された。したがって、スペクトルの情報のみから合成される振動を提示する方法では、適切な提示が行われないことが明らかになった。

振動波形の時系列データを調べると、硬い物質表面をなぞった時に発生する振動波形には、通常の不規則信号よりも、かなり大きな確率でインパルス成分が含まれていることが確認できた(Fig.2)。これは、物質表面の起伏に由来し、棒がとび素材表面に衝突する時に発生するものと考えられる。棒を上下方向に固定しない場合は、棒の下向き加速度は理論的には重力加速度を超えないが、これが実験結果と合致することからもこの仮定が裏付けられる。

そこで、インパルス成分に関して定量的な解析を行った。まず、振動波形中のインパルスの発生頻度が、素材や、それをなぞる速さ(以下、なぞり速さという)とどのように関係

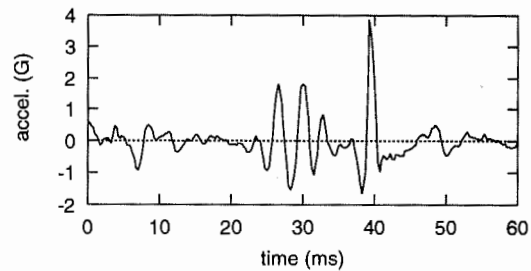


Fig. 2 Impulses found in the vibration. (material: acrylic board / tracing rate: 7cm/sec)

しているかを調べた。素材には、サンドペーパー 80,100,120番、不規則な凹凸のあるアクリル板を使用した。インパルスの発生頻度、あるいはインパルスのパワーとなぞり速さとの関係を Fig.3に示す。さらに、各値の間の相関を調べたところ、一般に、なぞり速さと信号のRMSがとくに大きな相関を持っていることが確認された。さらに、どの素材でもインパルスの発生頻度、パワーともに、なぞり速さに比例して増加すること、インパルス成分のみを含む信号のほうが、インパルス成分を除いた信号よりも振動波形のスペクトルのピークを与える周波数が、なぞり速さに比例する傾向が大きいことが確認された。

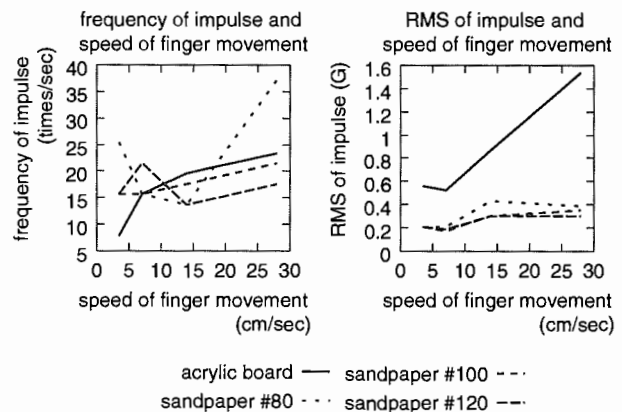


Fig. 3 The relation between frequency, RMS of impulse and speed of finger movement

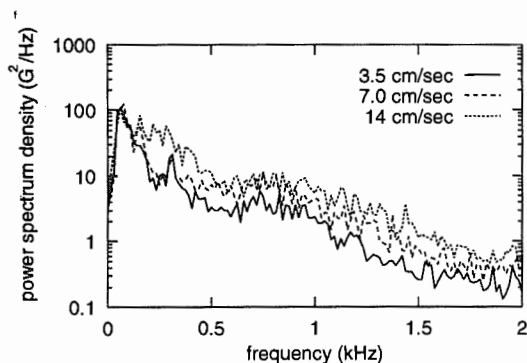
これらの結果から、振動波形中のインパルス成分は、表面の起伏に由来し、その発生頻度は、ほぼなぞり速さに比例することが明らかになった。

これに対し、インパルス以外の成分については、Fig.4のように、なぞり速さに応じたピークのシフトは見られなかった。

以上の実験及び解析より、波形のスペクトルのみを振動の特徴量として波形合成を行うと、触覚のうち「粗さ」が正しく知覚されず、振動中に含まれるインパルス成分を忠実に再現することが必要であることが明らかになった。

## 3. 提示システムの試作

2章の解析に基づいて、インパルス成分の忠実な再生と、

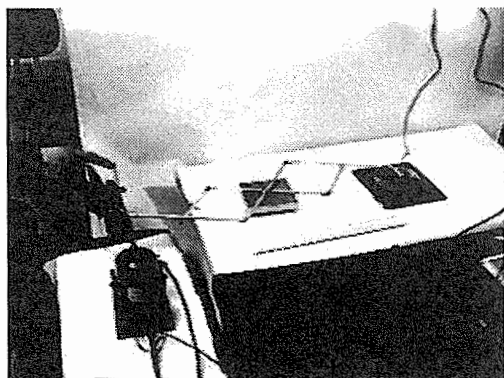


**Fig. 4** The spectra of the vibration (non-impulse component)  
The peaks (at 50 Hz and at about 800 Hz) don't shift according to the speed of trace material: sandpaper No.80

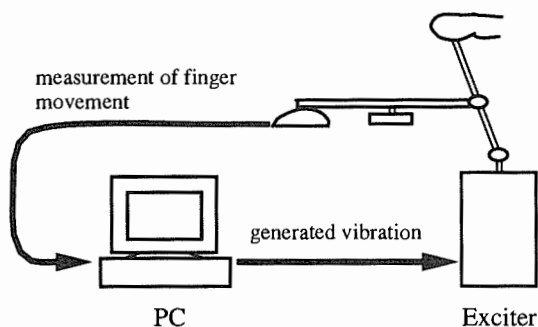
「なぞり」時の体性感覚に整合したテクスチャの提示能力を特徴とする振動型触覚ディスプレイを設計し、構成した。

### 3.1 提示システムの構成

本システムは、振動を合成する部分と操作者に振動を提示する機構の部分で構成される。Fig.5に、このシステムのダイアグラムを示す。また、Fig.6に、提示部分の機構を示す。



**Photo. 1** The tactile display manufactured for the experiment



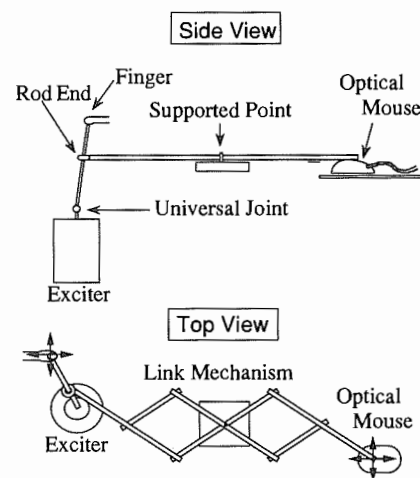
**Fig. 5** The signal diagram of the tactile display

機構部分は、振動駆動部分と、水平面内で2自由度の動きを持つ触覚提示部分、および、指先の動きを取得する部分で構成される。

振動駆動部分には、スピーカと似た構造を持ち、ムービングコイルによって駆動される Exciter<sup>(注2)</sup>を用いる。比較的输出が大きく、再生できる帯域も広いので、妥当なアクチュエータであると考えられる。

Exciterにユニバーサルジョイントを介してアルミ棒(直径2mm)を付けた。その棒の先端が提示部分になっており、ここに操作者の指を置くようにしている。これによって、提示部先端の2自由度(10cm×10cm)の動きが可能である。

指先の動きを取得するために、アルミ棒には、パンタグラフ型のリンク機構を接続し、リンク機構の他端には一光源式の光学式マウスを接続する。このリンク機構は支点に対して両端が点対称に動くので、指先の位置情報がマウスから正確に取得できる。アルミ棒とパンタグラフ型リンクとの接続にはロッドエンドを用い、上下の振動がノイズとしてマウスに伝わらないようになっている。



**Fig. 6** The mechanical structure of the tactile display

### 3.2 振動の合成

振動は、2.2節で得た知見を利用し、インパルス成分をあらかじめ原波形から抽出し、非インパルス成分と分離し、それぞれを速度に応じて合成して加算する。

インパルス成分は原波形中のインパルス成分の出現頻度とパワーを記録し、なぞり速度に応じて再生する。<sup>(注3)</sup>

インパルス以外の成分は、原波形からインパルス成分を除いた成分のスペクトルをホワイトノイズに畳み込む方法で合成する。ただし、スペクトルはなぞり速度によって変化するので、任意の速度での振動波形のスペクトルは、いくつかのなぞり速度で実測した振動波形のスペクトルの補間によって合成する。

ある素材表面を速度  $v_1$  でなぞった際に発生する振動を、時刻  $t$  の関数として  $f_1(t)$  と表した場合、この振動の RMS の

(注2) 新日本測器 511-B を一部変更したもの

(注3) 実際には記録したいくつかのなぞり速度におけるインパルス列をメモリに格納しておき、再生時はなぞり速度に応じてそれを切り替えて使用した。結果的にはこの方法で十分な触覚が提示できた。

3 倍の値以上<sup>(注4)</sup>の  $f_1(t)$  が観測された時に、それをインパルスの成分と定義する。

$$f_{I_1}(t) = \begin{cases} 0 & (0 \leq |f_1(t)| < 3\text{RMS}) \\ f_1(t) & (3\text{RMS} \leq |f_1(t)|) \end{cases} \quad (1)$$

ただし,  $\text{RMS} = \sqrt{\int f_1(t)^2 dt}$

また、インパルス成分を除いた成分は、

$$f_{R_1}(t) = f_1(t) - f_{I_1}(t) \quad (2)$$

と表される。

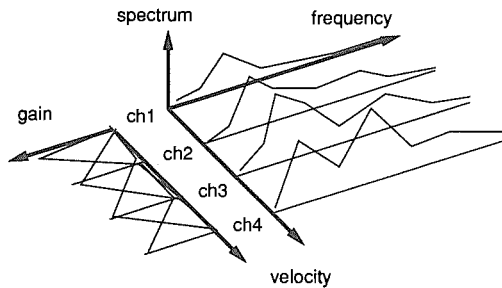


Fig. 7 The gain of each channel

いくつかの速度でのインパルス成分と非インパルス成分の時系列信号  $f_{I_i}(t)$  と  $f_{R_i}(t)$  ただし、 $(i = 1, 2, \dots, n)$  を作り、さらに指先の総移動距離  $x$  に対して起伏データ  $f_D(x)$  を用意する。そして、さらに速度に応じたゲインをコントロールするための重み関数  $g_{I_i}(v), g_{R_i}(v), (i = 1, 2, \dots, n)$  を設定する。(Fig.7)

出力する際には、個々のチャンネルについて、ゲインを速度情報に応じて制御しながら、それらを最後に加算することによって、速さ  $v$  と位置  $x$  に対応する波形を合成する。

$$f(x, t) = \sum_{i=1}^n g_{I_i}(v) f_{I_i}(t) + f_D(x) \quad (3)$$

この際、単に記録したデータの線形結合を再生するだけでは、信号間の相関がなくなるため、時系列データの加算が、スペクトルの加算を意味しなくなる。これを避けるために、不規則信号の発生にはただ一つのホワイトノイズを使用する。このことは、つぎの議論より明らかである。

一般にホワイトノイズを  $n(t)$ 、フィルターの伝達関数を  $H_1(j\omega), H_2(j\omega)$ 、合成したい信号は  $s_1(t), s_2(t)$  の線形結合によって  $s(t) = r s_1(t) + (1-r) s_2(t)$  と書けるとすると、信号  $s_1(t), s_2(t)$  は、ホワイトノイズ  $n(t)$  を伝達関数

$H_1(j\omega), H_2(j\omega)$  のフィルタにかけた結果得られたものであると考えても差し支えない。

$$\phi_{s_1 s_1} \xleftrightarrow{\mathcal{F}} |H_1(j\omega)|^2 \quad (4)$$

$$\phi_{s_2 s_2} \xleftrightarrow{\mathcal{F}} |H_2(j\omega)|^2 \quad (5)$$

$$\phi_{s_1 s_2} \xleftrightarrow{\mathcal{F}} H_1(j\omega) H_2(j\omega) \quad (6)$$

である。

$$\phi_{nn}(\tau) = \delta(\tau) \xleftrightarrow{\mathcal{F}} \Phi_{nn}(\omega) = 1 \quad (7)$$

であるから、

$$\phi_{ss}(\tau) \quad (8)$$

$$= \phi_{\{r s_1 + (1-r) s_2\} \{r s_1 + (1-r) s_2\}} \quad (8)$$

$$= \phi_{r^2 s_1 s_1} + \phi_{2r(1-r) s_1 s_2} + \phi_{(1-r)^2 s_2 s_2} \quad (9)$$

$$\xleftrightarrow{\mathcal{F}} (r^2 |H_1(j\omega)|^2 + 2r(1-r) |H_1(j\omega)| |H_2(j\omega)|)^{\frac{1}{2}} + (1-r)^2 |H_2(j\omega)|^2$$

$$= r |H_1(j\omega)| + (1-r) |H_2(j\omega)| \quad (10)$$

となり、時系列データの和をとった場合、それぞれのスペクトルの絶対値の和をスペクトルの絶対値とするような信号が得られる。

記録した振動データを繰り返し再生すると、時間的に周期的な振動が得られることになる。これを避けるため、指先が一定の距離を進むたびに<sup>(注5)</sup>、振動データの読み出し開始アドレスをランダムに決定する工夫を行っている。この初期化の周期を、指先の移動距離を参考に決めたのは、低速でなざる場合に、低周波成分が失われなくするためのである。

さらに、低速でなざる場合には、間隔の大きな(空間周波数の低い)起伏の情報が合成時に時系列データをつなぎ合わせるによって失われなくするための、素材表面の起伏情報をもとに、指の移動距離から変位を出力している。また、配列の始めと終わりは滑らかに接続されるように処理している。

#### 4. 試作システムを使用した触覚再生実験

##### 4.1 システムの評価

粗さ、ごつごつ感などのいくつかの尺度が、提案する方法でも、基準となる方法と同じように再現されるか(同じ尺度が構成されるか)を一对比較法で調べるという方法で、システムの評価を行った。

(注5) 実際には、指先が約 15mm 進むたびに、データポイントを初期化する。30mm/sec で指を動かす場合、初期化の周期は約 2Hz。1 回の初期化から初期化までの間につかうデータの量は、記録されているデータの 50% になる。これに対して 150mm/sec で指を動かす場合、初期化の周期は約 10Hz。1 回に使用するデータの量は 10% になる。1 回に使用するデータ量が少ないほど、振動波形がランダムなものになることから、この方法では、なぞり速さが速い方が「望ましい」振動が得られる傾向があると考えられる。

(注4) 一般に、 $f(t)$  を標準偏差  $\sigma$  をもつ定常なガウス過程とすると、 $f(t)$  の RMS は、 $\sigma$  で表され、この 3 倍の値以上の  $f(t)$  が観測される確率はほとんど 0 (約  $2.2 \times 10^{-5}$ ) となる。また、この基準で定義したインパルスの成分は、振動波形の特徴量として十分機能し、定義が妥当なものであることを実験等により確認した。

標準の方法として, (0) 直接棒を介して素材をなぞる場合と, Exciter を使用して, (1) 原波形をそのまま提示する方法, (2) スペクトルのみをもとに合成する方法, (3) インパルス分離して合成する方法(本研究で提案する方法)を比較する。素材には, アクリル板, サンドペーパーの80番, 100番, 120番の計4サンプルを用いる。

実験から構成された尺度を Fig.8に示す。直接棒でなぞった場合(方法(0))の結果から, アクリル板はサンドペーパーの100番と120番の間の粗さをもち, もっともごつごつしていること, サンドペーパーは粗さに関して番号と矛盾しない順位づけがされていることなどが確認できる。

粗さに関しては, (1),(3)が, (0)と大きな相関があり, 粗さの再現性に関して, 「提案した方法」が「スペクトルのみから合成する方法」よりすぐれていることが示された。「提案した方法」と「原波形を提示した場合」とは, ほぼ同じ再現性を示した。

ごつごつ感に関しては, (1),(2),(3)とも(0)と大きな相関があり, どの方法もそれなりによく再現できることが明らかになった。

以上の実験から, 提案した方法による提示を用いれば, 原波形をそのまま提示した場合と変わらない質で触覚を提示できることが確認された。

#### 4.2 感覚尺度と物理量との関係

粗さ, ごつごつ感という感覚尺度がどのような物理量と関係しているのか客観的な指標で調べることを試みた。

試作した触覚ディスプレイを用いて, いくつかの素材をなぞったさいの振動(原波形)を提示した場合に構成された感覚尺度と, その振動中に含まれるいくつかの物理量との相関をとる。物理量には, 振動波形全体のRMS, インパルス成分のみのRMS, インパルスの頻度の3つを使用する(Fig.9)。

粗さ, ごつごつ感との相関は, 3つの物理量のうち, インパルス成分のみのRMSがもっとも高い。この傾向は, 物理量を低速まで考慮した時にもっとも顕著である。この結果から, 本研究において, 人間の触覚知覚に大きな影響を与える物理量としてインパルスの頻度, パワーを選択したのが妥当であったことが明らかになった。

#### 5. おわりに

起伏を持った硬い物質の表面を細い棒でなぞる際に発生する振動にはインパルスの成分が特徴的に見られる。この成分は, 粗さやごつごつ感といった感覚尺度に大きな影響を与え, 振動中のインパルス成分を再現することが, より忠実な触覚再生にとって必須であることを明らかにした。この知見から, インパルス成分の忠実な再生能力を持つ振動型触覚ディスプレイを設計し, 構成した。

機構的には, 振動発生装置と振動提示部をユニバーサルジョイントで接続するなどの方法を採用することにより, 比較的広い2次元面内の可動領域を実現し, 移動感をほとんど損なわず, 「なぞり」時の体性感覚に整合したテクスチャの提

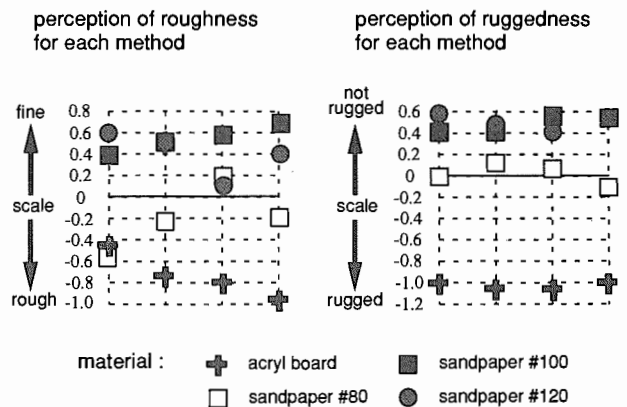


Fig. 8 The interval scale constructed by method of paired comparison

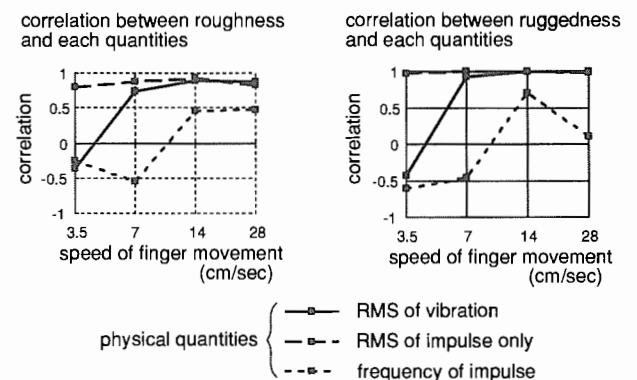


Fig. 9 The correlation between roughness, ruggedness and physical quantities

示を実現した。

この結果, 提案した方法を用いれば, 記録した振動をそのまま提示した場合と変わらない質で触覚を提示できることが確認された。

#### 参考文献

- 1) S. Tachi, T. Maeda, R. Hirata and H. Hoshino: A Construction Method of Virtual Haptic Space, Proceedings of the fourth International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence (ICAT'94), 131/138 (1994)
- 2) 福井 幸男, 下条 誠: 力覚をフィードバックする操作デバイスによる仮想形状のなぞり動作, 電子情報通信学会論文誌 D-II J74-D-II-8, 1052/1059 (1991)
- 3) D. A. Kontarinis and R. D. Howe: Tactile Display of Vibratory Information in Teleoperation and Virtual Environments, Presence, 4-4, 387/402 (1995)
- 4) G. J. Monkman: An Electrorheological Tactile Display, Presence, 1-2, 219/228 (1992)
- 5) M. Minsky, M. Ouh-young, O. Steele, F. P. Brooks, Jr., and M. Behensky: Feeling and Seeing: Issue in Force Display, Computer Graphics, 24-4, ACM SIGGRAPH 235/243 (1990)
- 6) 池野 晃久, 池井 寧, 福田 取一: 振動形触覚ディスプレイによる二次元テクスチャの表示, 第10回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, 207/210 (1994)
- 7) 渡辺 敏雄, 福井 茂寿: 瞬間的な超音波振動による触覚制御, 第34回SICE講演会予稿集, 751/752 (1995)

- 8) M. Akamatsu, and S. Sato: Multimodal Mouse: A Mouse-Type Device with Tactile and Force Display, Presence, 3-1, 73/80 (1994)
- 9) 大山 正, 今井 省吾, 和氣 典示: 新編 感覚・知覚 心理学ハンドブック, 49/52, 誠信書房 (1994)
- 10) 田崎 京二, 小川 哲朗: 新生理科学大系 9 感覚の生理学, 医学書院 (1989)

.....

[著者紹介]

田中 健 司 (学生会員)



1972年11月18日生。95年東京大学工学部計数工学科卒業, 現在, 東京大学大学院工学系研究科計数工学修士課程在学中。人間の聴器の一部である基底膜の構造と機能を応用したセンサおよびアクチュエータの研究を行っている。

諸橋 隆 治 (学生会員)



1973年3月6日生。95年東京大学工学部計数工学科卒業, 現在, 東京大学大学院工学系研究科計数工学修士課程在学中。超音波を利用した触覚センサの研究を主として行っている。

前田 太 郎 (正会員)



昭62年東京大学工学部計数工学科卒業。工博。同年通産省工業技術院機械技術研究所に入所。ロボット工学部バイオロボティクス課研究員を経て, 平4年9月より東京大学先端科学技術研究センター助手, 平6年9月より東京大学工学部助手。人間の知覚特性とモデル化, 神経回路網モデル, マンマシンインターフェイス, テレイグジスタンスなどの研究に従事。平2年計測自動制御学会論文賞, 平3年日本ロボット学会技術賞受賞。

柳 田 康 幸 (正会員)



1988年東京大学計数工学科卒業, 1990年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年東京大学先端科学技術研究センター助手, 現在に至る。主に人工現実感システムの研究に従事。日本音響学会, 日本ロボット学会会員。

舘 暁 (正会員)



1973年, 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。同年同大学助手。75年機械技術研究所入所。主任研究官, 研究課長。79~80年MIT 客員研究員。89年, 東京大学助教授。92年同教授。バースペクトルを用いる信号処理, 盲導犬ロボット, テレイグジスタンスなどの研究を行う。IMEKO TC17(Robotics) 議長。日本ロボット学会論文賞, 計測自動制御学会論文賞, 同技術賞などのほか, IEEE/EMBS 論文賞, 通商産業大臣賞を受賞。SICE フェロー

.....

