

波長の実時間推定による能動触のための粗さ感伝達システム

岡本正吾 (東北大), 昆陽雅司 (東北大), 前野隆司 (慶大), 田所諭 (東北大)

Roughness Feeling Telepresence System with Communication Time-Delay

Shogo Okamoto (Tohoku Univ.), Masashi Konyo (Tohoku Univ.),
Takashi Maeno (Keio Univ.) and Satoshi Tadokoro (Tohoku Univ.)

Abstract— A framework of tactile telepresence systems has been proposed in the present paper, which enables active touch with time-delay communication between a tactile sensor side system and a display side system. In the framework, a tactile display can apply tactile stimuli to fingers of an operator in synchronization with his rubbing motions based on physical parameters of objects which are estimated by a tactile sensor. To verify the concepts of the framework, was developed a roughness feeling telepresence system which produces vibratory stimuli computed by estimated surface wavelength of objects and rubbing speed of an operator. To implement the framework, real-time estimation of physical parameters of objects are required as core technology. System implementation and real-time estimation of surface wavelength have also been proposed.

Key Words: Tactile Telepresence, Active Touch, Tactile Display, Tactile Sensor

1. 緒論

実際には触れていない物の触り心地を伝えるという触感伝達技術は各分野への応用が期待される。例えば、ロボットアームによる遠隔操作に触感伝達を組み込めば、遠隔操作においても触覚を利用した物体の認識や滑りの検出、物体の操りなどが可能になる。本研究の目的は、このような触感伝達を実現することである。

触感伝達を実現するには、ヒト指の代わりに触り心地を計測する触感センサと任意の触感を合成し、人工的に人に呈示することができる触感ディスプレイが必要である。さらに、能動触に対応する触感伝達システムを実現する必要がある。能動触はヒトが日常的に行う触察行為であり、遠隔地からの触感伝達においても実現されなければならない。

一方、従来の触感伝達技術は、能動触への対応を考慮したものではない。これまで、触感伝達技術に関しては低侵襲性手術における触診技術 [1][2]、柔らかさ感を伝達する手法 [3]、テクスチャ感を伝達する技術 [4] などが研究されてきた。これら従来の研究はセンサ、ディスプレイ間の情報通信の点からまとめると同一の手法を採用している。これらのシステムは触感センサの変形や物体との接触状態を計測し、それらを時々刻々と触感呈示システムに伝達する。そして、触感呈示システムがそれらを復元することで触感を伝達する。これらの従来の研究は遠隔地からの触感伝達を目的としておらず、そのまま適用したとしても以下に述べる理由から能動触への対応は不十分である。

まず、触感センサシステムからの情報伝達に通信遅れがある場合には、操作者の触運動に遅れて触感が呈示され、操作者に違和感が生じる。従って、既存の手法では通信の遅れがある場合に対応できない。つぎに、情報量の面からも既存のシステムでは能動触の実現に

は課題がある。ヒトは触対象表面の数 μm から数 cm までの幅広い違いを知覚でき、パチニ小体は 300 Hz 以上の機械刺激にも応答する。加えて、触感情報を呈示すべき部位はヒトの皮膚表面に分布しており、通信されるべき情報量は大きくなる。この情報を通信するための帯域が保障されなければならない。

本論では、これらの課題を解決し、通信遅れのある遠隔地からでも能動触に対応する触感伝達の手法を提案する。提案手法では、触対象の物理パラメータと操作者の触運動に基づき触刺激を生成するため、操作者の触運動に応じた触感呈示が可能である。この手法の実現のためには、触対象の物理パラメータの実時間推定が必要な技術になる。なぜならば、提案手法ではひとたび物理パラメータが推定・伝達されれば、触運動に応じた触感呈示が可能であるが、物理パラメータが推定されるまでは正しい触刺激を呈示できないからである。また、触感センサシステムから伝達する情報として触対象の物理パラメータを選択しているため通信される情報量も削減できる。

本論では、提案する触感伝達手法の有効性を確かめるため、粗さ感の伝達を試みる。粗さ感を選んだ理由は、心理物理学の知見より、触対象の物理パラメータと粗さ感の関係が比較的明らかであるからである。粗さ感をターゲットにすることにより、提案手法自体の有効性に焦点を当てた議論を行うためである。しかし、提案手法は柔らかさ感・摩擦感・温度感など、他の触感伝達にも適用可能であると考えられる。

本研究に類する研究として、西坂らは遠隔地間で同じ弾性物体を把持しているかのような感覚を共有するシステムを提案している [5]。遠隔地にある触対象の物理パラメータを実時間で推定し、手元では指の変位に応じた刺激を生成するという点で、西坂らの手法は本

研究のアプローチに近い。しかし、ヒトとヒトで感覚を共有するシステムであり、柔らかさ感をターゲットにしている。本研究は、触感センサとディスプレイの接続法に主題を置き、粗さ感を伝達するという点で違いがある。

本論の構成を述べる。まず、提案する触感伝達手法について述べる。つぎに、触感センサを用いた粗さ感に関する物理パラメータの実時間推定法とその評価、触感ディスプレイによる粗さ感の呈示法とその評価について述べる。最後に粗さ感伝達システムの構成と伝達実験結果について述べる。

2. 通信遅延を考慮した粗さ感伝達システムの提案

通信遅延のある環境でも能動触を実現する触感伝達システムの枠組みとして、物理パラメータの実時間推定によるマスタ・スレーブ型触感伝達システムの概要を述べる。

提案手法では操作者の手とロボットアームをマスタ・スレーブ型システムにより接続する。操作者の指に触感ディスプレイを、ロボットアームの手先に触感センサを装備する。操作者の手が動くと、ロボットアームが動き、ロボットアームの手先に装備された触感センサが触対象の物理パラメータを推定する。推定された物理パラメータは操作者側システムに伝達され、触感ディスプレイによって操作者に触感が呈示される。したがって、マスタ・スレーブシステムを採用することにより、操作者の運動に応じて触感情報を計測することができる。

本論では粗さ感に支配的な影響を与える触対象の物理パラメータとして、触対象表面の波長を推定・伝達する。ヒトの粗さ感に関する心理物理学的研究 [6][7] より、ヒトが本研究で用いるような粗さ試料をなぞったときに感じる粗さ感は試料表面の波長、溝の幅という主要な物理パラメータによってほとんど決定されることがわかっている。これらのうち、本研究では波長を伝達する。

図 1 に触対象の表面波長の伝達に基づいたマスタ・スレーブ型触感伝達システムの一例のブロック線図を示す。図 1 では触感センサは触対象表面の波長を実時間で推定し、操作者側システムに伝達する。操作者側システムではその瞬間の操作者の触速度と波長を合わせて操作者の指腹部に呈示すべき振動刺激を生成し、呈示する。このような実装方法により、触感センサシステムとの間に通信遅れがある環境下でも操作者のその瞬間の運動に応じた触感を呈示できる。提案手法は触対象の材質が比較的均一である場合に有効であると考えられる。

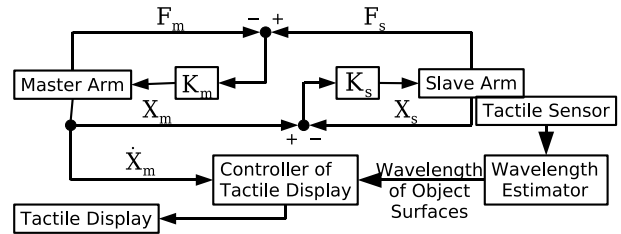


Fig.1 表面波長の実時間推定に基づくマスタ・スレーブ型触感伝達システムのブロック線図一例

3. 試料表面の波長実時間推定システム

3.1 波長推定に用いるヒト指型触感センサ [8]

本研究では触感センサとしてヒト指型触感センサ [8] を用いる。このセンサはヒト指に近い弾性・層構造・指紋状の凹凸などの特徴を有し、ヒトが物体をなぞったときと同様の変形挙動・インタラクションを触対象との間に生じさせると考えられる。指紋を模したセンサ表面の凹凸の振動情報はセンサ内部に埋設されているひずみゲージにより計測される。センサの保持部には六軸トルクセンサが装備されている。センサの外観および構造を図 2 に示す。

これまでに、このセンサで試料を等速でなぞったときのセンサ出力からフーリエ変換を計算し試料表面の波長を推定することは可能であることが確認されている。本論ではさらに、実時間推定で波長を推定する手法を提案する。

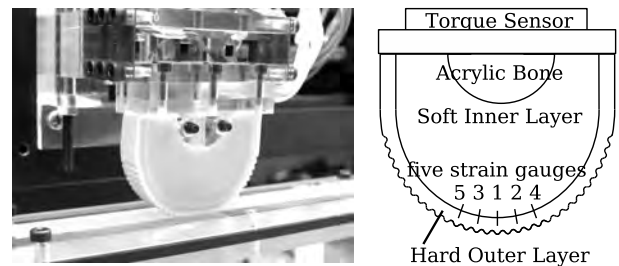


Fig.2 ヒト指型触感センサの外観と構造

3.2 触対象表面の波長の実時間推定アルゴリズム

ヒト指型触感センサを用いた触対象表面の波長の実時間推定方法について述べる。この手法では、センサの振動周波数を実時間推定する。センサの振動周波数が得られれば、試料表面の波長は $\lambda = v/f$ の関係より導出できる。

センサが図 3 のような溝幅と丘の幅が等しい試料表面を走査する。このとき、ひずみゲージの出力から直流成分を除去するため、ハイパスフィルタを通過させると図 4(上) のような波形が得られる。マイスナー小体の周波数応答特性を考慮し、遮断周波数は 5 Hz とした。つぎに、フィルタ通過後の波形が $0 \bar{V}$ 周辺の帯を通過したときに、図 4(下) のようにインパルスを発射する。 $0 \bar{V}$ 周辺に帯を設けるのは、センサ出力の微小振動によってインパルスが出ないようにするためであ

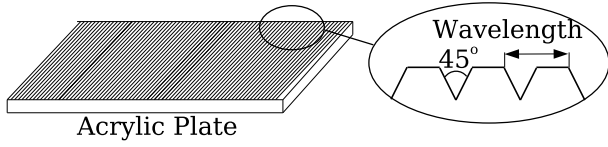


Fig.3 測定に用いた粗さ試料

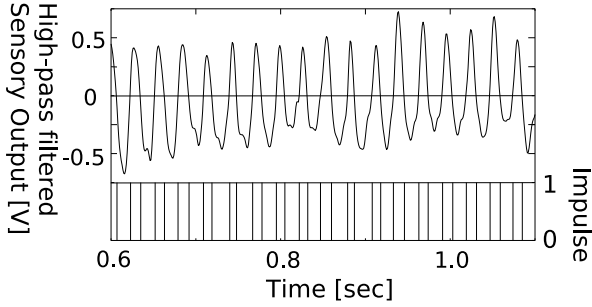


Fig.4 試料をなぞったときのセンサ出力例・パルス例

る．インパルスの有無を式 (1) で記述する．センサの推定振動周波数 $f_e(t)$ はインパルスの個数を A sec 数えることで求める． $f_e(t)$ を式 (2) で記述する．

$$p(t) = \begin{cases} 1 & \text{インパルスが発射されたとき} \\ 0 & \text{インパルスが発射されていないとき} \end{cases} \quad (1)$$

$$f_e(t) = \frac{\sum_{\tau=t-A}^t p(\tau)}{2A} \quad (2)$$

3.3 提案手法の数値解析と最適化

上記の提案手法を評価し，最適な A を決定するために提案手法による波長の推定誤差の定式化を行う．提案手法は，時刻 t の振動周波数を過去 A sec 間の平均によって推定する．このことから，提案手法により推定された振動周波数 $f_e(t)$ を式 (3) で近似的に記述する．ここで， $f(t)$ は振動周波数の真値であり，式 (4) で記述する． λ はセンサが走査している試料表面の波長である． $v(t)$ はセンサの試料に対する相対速度である．以後， $v(t)$ を触速度と呼ぶ．

$$f_e(t) = \frac{\int_{t-A}^t f(\tau) d\tau}{A} \quad (3)$$

$$f(t) = \frac{|v(t)|}{\lambda} \quad (4)$$

試料表面の推定波長 $\lambda_e(t)$ を式 (5) で記述する．

$$\lambda_e(t) = \frac{v(t - \frac{A}{2})}{f_e(t)} + X \quad (5)$$

$f_e(t)$ は $f(t)$ に比べ， $A/2$ sec 遅れるため，参照する触速度も $A/2$ sec 前のものになる． X はセンサ出力のノイズによる誤差である．以上より，推定した波長の誤差は式 (6) で定義される．

$$|\lambda_e(t) - \lambda| = \left| \frac{v(t - \frac{A}{2})}{f_e(t)} - \lambda + X \right| \quad (6)$$

これ以上の議論を行うには，触速度 $v(t)$ の形を仮定する必要がある．ここではヒトの触速度に近い形として正弦波を用いる． $v(t)$ を式 (7) に示す．ここで， α は触速度の最大値 (mm/sec)， f_v は触運動の周波数 (Hz) である．

$$v(t) = \alpha \sin(2\pi f_v t) \quad (7)$$

式 (7) を式 (3)，(4) に代入すると，式 (8) が得られる．条件によって，式の形が異なるため 2 式に分けられる．

$$f_e(t) = \begin{cases} \frac{\alpha}{A f_v \lambda \pi} |S(\pi f_v A) S(2\pi f_v (t - \frac{A}{2}))| & \text{if } t \in T_1 \\ \frac{\alpha}{A f_v \lambda \pi} (1 - |C(\pi f_v A) C(2\pi f_v (t - \frac{A}{2}))|) & \text{if } t \in T_2 \end{cases} \quad (8)$$

$$S(x) = \sin(x), C(x) = \cos(x)$$

$$\forall t(t \in T_1 \leftrightarrow v(t)v(t-A) \geq 0)$$

$$\forall t(t \in T_2 \leftrightarrow v(t)v(t-A) < 0)$$

視覚的な理解のため， $v(t)$ ， $f(t - A/2)$ ， $f_e(t)$ ， $\lambda_e(t)$ をプロットしたものを図 5 に示す．

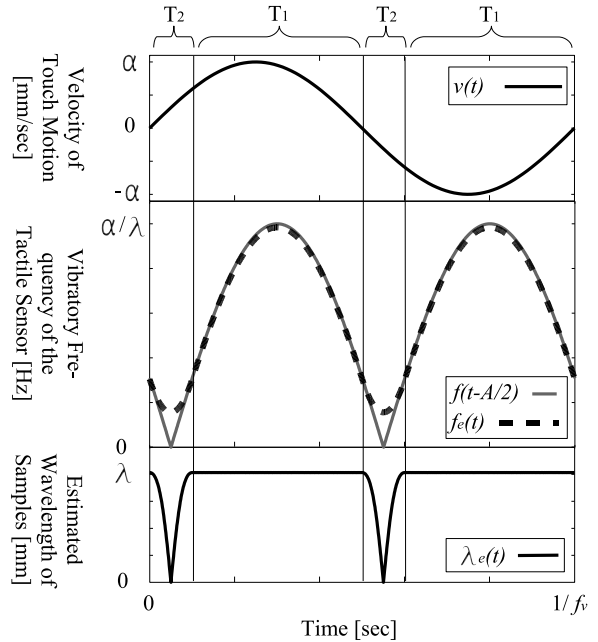


Fig.5 $v(t)$ ， $f(t - A/2)$ ， $f_e(t)$ ， $\lambda_e(t)$ のプロット例:

$A = 0.2$ sec, $\lambda = 2.0$ mm, $\alpha = 100.0$ mm/sec,

$f_v = 1.0$ Hz, $X = 0$ mm

図 5 を見ると，領域 T_2 での振動周波数と波長の推定精度が領域 T_1 に比べて悪いことがわかる．領域 T_2 とは，触速度の方向が変わった付近である．この領域では触速度の加速度が相対的に大きい．推定手法は過去 A sec 間の平均によって t の瞬間の振動周波数を推定するものであることから，触速度の加速度の大きい領域では推定精度が悪化すると解釈できる．また，推定手法はヒト指型触感センサが触対象表面を滑っている状態を前提としている．しかし，触速度の方向が変

わろうとしている付近では動摩擦の状態ではなく、触感センサと触対象の接触面に固着領域と滑り領域が混合する状態であると考えられる。以上のことから、領域 T_1, T_2 では異なった推定手法が必要である。

ここで、提案手法での推定が適している領域 T_1 についてさらに評価を進める。推定した波長の誤差は式 (6) に式 (7), (8) を代入して得られ、式 (9) に示される。

$$\begin{aligned} |\lambda_e(t) - \lambda| &= \left| \frac{Af_v \lambda \pi}{\sin(Af_v \pi)} - \lambda + X \right| \\ &\leq \lambda \left| \frac{Af_v \pi}{\sin(Af_v \pi)} - 1 \right| + |X| \quad (9) \end{aligned}$$

式 (9) では、推定した波長の誤差はアルゴリズム由来の誤差 (第 1 項) とノイズ項 (第 2 項) に分かれている。ノイズは独立で正規分布に従うとし、その代表値として期待値を用いる。 X が $N(0, \sigma^2)$ に従うとき、 $|X|$ の期待値は式 (10) で示される。ここで、 f_s はサンプリング周波数である。式 (10) によると、加算区間 A が大きくなると、サンプリング回数が増えるため、ノイズの影響が小さくなる。

$$E(|X|) = \frac{2\sigma}{\sqrt{2\pi}Af_s} \quad (10)$$

式 (9), (10) より、推定手法による誤差を式 (11) のように再定義する。

$$|\lambda_e(t) - \lambda| = \lambda \left| \frac{Af_v \pi}{\sin(Af_v \pi)} - 1 \right| + \frac{2\sigma}{\sqrt{2\pi}Af_s} \quad (11)$$

式 (11) の中で、アルゴリズム由来の誤差が 0 になる条件は、 $Af_v \rightarrow 0$ である。しかし、 A が小さくなり過ぎると、ノイズの影響が大きくなるため、推定誤差がかえって大きくなる。推定誤差を小さくするにはアルゴリズム由来の誤差とノイズによる誤差の両方を考慮しなければならない。したがって、 A の最適値は式 (11) が最小となる A である。

ところで、式 (11) のアルゴリズム由来の誤差項では、 A はいずれも f_v との乗算の形 Af_v で現れている。このことから、パルスの加算時間 A は触速度の周波数 f_v に応じて、適応的に変化させるべきとわかる。しかし、 f_v を実時間で推定するには課題が多い。よって、 A を決定するに際し、 f_v には代表値を用いる。ヒトの触運動の周期が 0-2 Hz ほどであることから、 $f_v = 1.0$ Hz とする。ノイズの標準偏差 σ は等速で試料を走査したときの実測値をもとに、 $\sigma = 1.0$ mm とする。 $f_v = 1.0$ Hz, $\sigma = 1.0$ mm のとき、式 (11) が最小となるのは $A = 0.080\dots$ である。よって、推定に用いるパルスの加算区間 A を 0.08 sec と決定した。

3.4 波長推定実験

提案している波長推定手法の精度評価を行う。評価には図 3 の粗さ試料を用いる。推定実験では、ヒト指型触感センサは一軸ア - ムに鉛直方向に稼働するスライダを介して固定される。試料表面に静止状態でおよ

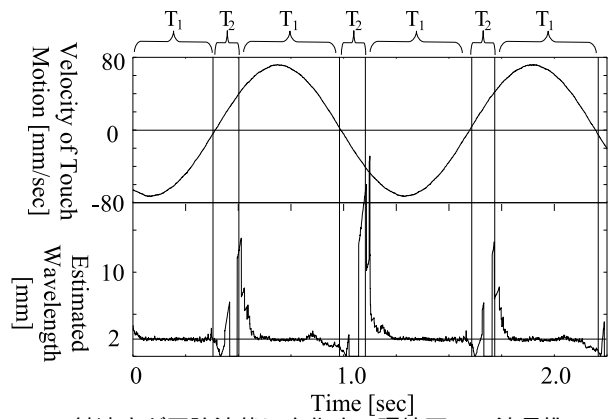


Fig.6 触速度が正弦波状に変化する環境下での波長推定例, $\lambda = 2$ mm $v = 70 \sin(2\pi 0.83t)$ mm/sec

そ 60 g の反力 (およそ 1 mm の押し込み) が計測されるまで押し込み、70 mm/sec の速度で試料表面を走査した。実験に用いた試料は 4 種類で、それぞれの波長は 1, 2, 3, 4 mm である。各試料につき、10 回ずつ測定した。実験装置の外観を図 9 に示す。以上の方法により試料表面の波長を推定した結果を表 1 に示す。表 1 を見ると、等速で試料を走査した場合は各試料の波長を十分に区別できている。

Table 1 粗さ試料表面の波長を推定した結果

試料の波長 [mm]	1.0	2.0	3.0	4.0
推定値平均 [mm]	1.148	2.045	3.059	4.005
標準偏差	0.073	0.033	0.097	0.079

つぎに、触速度が等速でない場合の波長推定結果の一例を図 6 に示す。図 6(上) が触速度、図 6(下) が推定された波長である。図 6 の例では、走査した試料表面の波長は 2 mm であった。したがって、触速度が変化する状況下でも波長を推定できていることがわかる。しかし、先の図 5 に示した解析では、波長の推定精度が著しく低下するのは領域 T_2 であったのに対し、図 6 では領域 T_2 の前後にも推定精度が低下している部分がある。触速度の周波数、速度を変化させても同様の傾向が観察された。この理由としては、推定アルゴリズムが前提としている「センサが滑っている状態」が領域 T_1 よりも狭い範囲でしか生じていないことが考えられる。この問題は滑りを検出する機構を実装することで解決できる。

領域 T_1 でも推定精度の低下する部分があることが確認されるが、大抵の領域では精度良く推定されている。ヒトが触対象表面の波長を認識するときに触対象表面が均一であることを仮定すれば、一部分の波長が誤認識されたとしても、大部分で正しく認識されていれば良いと考えられる。よって、提案手法は推定精度の観点から粗さ感伝達システムに適用できると考えられる。

推定手法の実時間性について確認するための実験を

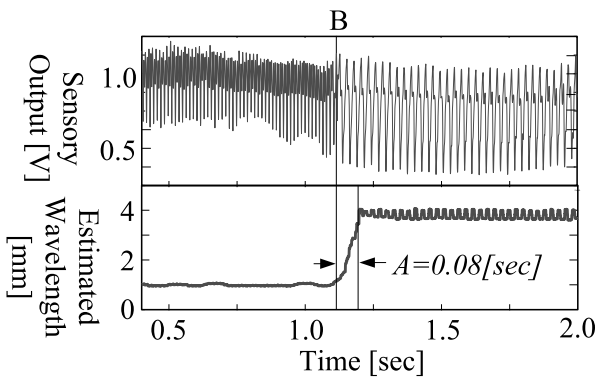


Fig.7 推定手法の実時間性評価実験: 異なる試料の境界を走査したときの波長推定結果例

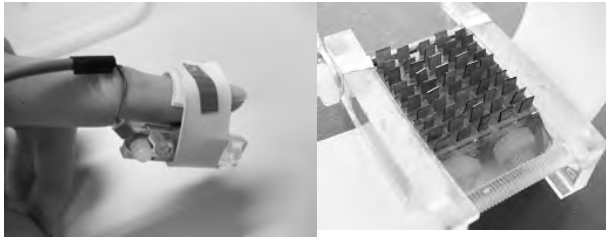


Fig.8 ICPF 触感ディスプレイ

行った。推定手法の性質から考えると、触感センサが触れている試料の波長が変化したとしても、 A sec 後には正しい推定結果が得られるはずである。このことを確認するため、波長 1 mm と 4 mm の試料を 2 つ並べ、それらの上を触感センサに走査させた。そのときのひずみゲージの出力・波長推定結果を図 7 に示す。図 7 の B 点で、センサは 2 つの試料の境界に達した。そこから、0.08 sec 後には推定波長は 4 mm 付近になっている。したがって、試料の変化にも A sec で対応でき、実時間性の観点からも粗さ感伝達システムに適用できると考えられる。

4. ICPF 触感ディスプレイを用いた粗さ感呈示法

本研究では触感ディスプレイとして ICPF 触感ディスプレイ [9] を用いる。この触感ディスプレイはマトリクス状に配列されたイオン導電性高分子ゲルアクチュエータの振動を制御し、操作者の指表面に振動刺激を与えることにより、人工触感を生成する。図 8 にディスプレイを装着した様子と外観を示す。

ICPF 触感ディスプレイを用いて粗さ感を呈示する方法 [9] について述べる。ヒト指が図 3 のような波長 λ を持つ試料を速度 v でなぞったとき、指腹部表面には $f = v/\lambda$ の振動が生じると考えられる。このとき、ICPF 触感ディスプレイのアクチュエータを周波数 f で振動させることにより仮想的に粗さ感を呈示できる。アクチュエータに与える電圧指令値は式 (12) のように決定する。ここで a は $5 \bar{V}$ とする。

$$y = a \sin \left(2\pi \frac{v}{\lambda} t \right) \quad (12)$$

上記の粗さ感呈示法を用いて波長の異なる仮想物体

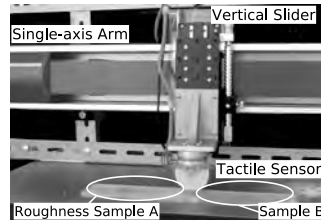


Fig.9 スレーブ側システム

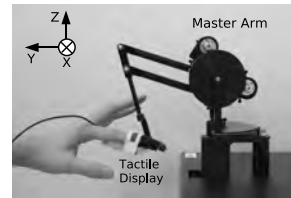


Fig.10 マスタ側システム

Table 2 ICPF 触感ディスプレイによる波長弁別実験の結果 (被験者 3 人の平均)

	標準刺激 [mm]			
	1.0	2.0	3.0	4.0
平均下閾	0.82	1.78	2.80	3.55
平均上閾	1.28	2.14	3.42	4.40
弁別閾	0.23	0.18	0.31	0.43
3 人の弁別閾の標準偏差	0.095	0.10	0.082	0.13

を呈示し、被験者の波長弁別能力を測定した。測定では被験者の人差指に ICPF 触感ディスプレイを装着し、触速度はマスタアームにて計測した。実験装置の外観を図 10 に示す。被験者は水平方向に手を動かし、図 10 の x 方向の触速度を v とした。被験者の触運動を平面上に限定させるためマスタアームからは z の正方向に力を発生させ、仮想的な平面をつくり出した。

波長の弁別閾は極限法により測定した。標準刺激はそれぞれ 1, 2, 3, 4 mm とし、比較刺激は 0.2 mm きざみで与えた。上昇系列, 下降系列は一つの標準刺激に対して 2 回ずつ, 合計 4 系列与えた。被験者は標準刺激と比較刺激を口答で任意に切替えることができ、制限時間は設けなかった。被験者は標準刺激と比較刺激のどちらの波長が大きいかを答え、実験者が記録した。被験者は 20 代男子 3 名である。測定した波長の弁別閾を表 2 に示す。表 2 を見ると、被験者らは 1-4 mm の波長を 1 mm きざみで弁別できている。このことから、本節の粗さ感呈示方法は粗さ感伝達システムに適用できると考えられる。また、呈示物体の波長が大きいほど、被験者の弁別閾も大きくなっている。これは、呈示物体の波長が長い場合は振動周波数の相対的な違いが小さくなるためであると考えられる。

5. 粗さ感伝達実験

波長の実時間推定に基づくマスタ・スレーブ型触感伝達システムを用いて、異なる表面波長を有する試料を区別することが可能かどうかを検証する。

5.1 実験システム

粗さ感伝達実験の実験システムについて述べる。図 9 のように触感センサは、一軸アームに取り付けられており、マスタアームの x 方向の速度と同じ速度で動くように制御した。触感ディスプレイは図 10 のように、被験者の人差指に取り付けた。ヒト指型触感センサは実験の最中は試料表面の波長を推定する。推定された波長 $\lambda_e(t)$ は 10 msec の間隔でパケットとして操作者

側システムに伝達した．推定値のうち，領域 T_1 のときに推定された値のみを用いた．

触感センサシステムから伝達された波長 $\lambda_e(t)$ に基づき，ICPF 触感ディスプレイを駆動する電圧指令値 y を 4. 節同様に式 (12) を用いて決定した．

5.2 実験方法

実験に用いた試料は図 3 の格子であり，試料の波長はそれぞれ 1, 2, 3, 4 mm である．被験者は 4. 節で波長の弁別実験を行った被験者のうち 1 名であり，これら 4 つの試料の区別する能力を有していると考えられる．実験は一対比較法で行った．試料が 4 種類あるため，6 通りの組合せについてそれぞれ 10 回，合計 60 回，被験者は実験を行う．スレーブシステムは被験者からは見えないようになっており，被験者の手の初期位置の左右に異なる試料が配置されるようにした．制限時間は設けず，被験者に自由に 2 つの試料をなぞることを許し，どちらの試料の波長が大きいかを答えさせた．

5.3 実験結果

表 3 に被験者の実験結果を示す．表セル中の数値は正答率である．例えば，波長 4 mm と 3 mm の交差するセルにある数値は 4 mm と 3 mm の試料対を被験者に呈示したとき，波長 4 mm の試料の方が波長が大きいと答えた比率である．いずれの対でも，正答率は 0.7 以上であった．

Table 3 粗さ感伝達実験の結果:被験者の正答率

	4 mm	3 mm	2 mm	1 mm
4 mm	-	0.7	1.0**	0.9*
3 mm	-	-	0.9*	0.7
2 mm	-	-	-	0.9*

**：有意水準 99.9% で優位差がある (t 検定)

*：有意水準 95% で優位差がある (t 検定)

6. 考察

5. 節の実験結果より，試料表面の波長の 1 mm の違いを被験者に伝えることができた．

しかし，優位傾向は観察されたものの，被験者が完全に区別できたとは言えない対もあった．この原因として考えられるのはシステムの伝達能力によるものとヒトの知覚特性によるものの 2 つである．

まず，システムの伝達能力を向上させるとき，ボトルネックと成りうるのは波長の推定能力である．本システムの実装では，なぞり行為が往復するときに波長の推定精度が低下する部分がある．これには滑りの状態を計測し，推定法へ反映させることで推定精度を向上させられると考えられる．

つぎに，ヒトの知覚特性の限界を考慮しなければならない．ヒトが 2 つの物に触れたときに，両者が異なることは認識できても，どちらの表面の波長が大きい

かを言い当てる能力には限界がある．ヒトが実物に直接触れたときの波長弁別能力と，伝達システムを用いた結果とを比較することによってヒトの知覚特性の影響を知ることができると考えられる．

今後，これらの点について改善を行い，触感伝達を実現するうえでの課題を追究する．

7. 結論

触対象の物理パラメータと触運動を組み合わせることにより，通信遅延のある環境でも能動触を実現する触感伝達システムを提案した．触対象表面の波長を実時間推定する手法を提案し，解析による最適化を行った．提案した伝達システムをマスタ・スレーブ型システムにより実装し，粗さ感伝達システムを作成した．伝達実験の結果，触対象表面の波長が伝達されたことを確認した．

References

- [1] R. D. Howe, W. J. Peine, D. A. Kontarinis and J. S. Son, Remote Palpation Technology, IEEE Engineering in Medicine and Biology, Vol. 14, Issue 3, pp. 318–323, 1995
- [2] Maria Vatshaug Ottermo, Oyvind Stavadahl, Tor A. Johansen, Palpation Instrument for Augmented Minimally Invasive Surgery, Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3960–3964, 2004.
- [3] Antonio Bicchi, Enzo P. Schilingo and Danilo De Rossi, Haptic Discrimination of Softness in Teleoperation: The Role of the Contact Area Spread Rate, IEEE Transactions on Robotics And Automation, Vol.16, Issue 5, pp. 305–310, 2000
- [4] Akio Yamamoto, Shuichi Nagasawa, Hiroaki Yamamoto, and Toshiro Higuchi, Electrostatic Tactile Display with Thin Film Slider and Its Application to Tactile Tele-Presentation Systems, IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, Vol. 12, No. 2, pp. 168–177, 2006
- [5] 西坂聡，池田義明，藤田欣也，Haptic Broadcast:筋活動電位による把持力推定を用いた弾性物体の能動的把持感覚伝達システムの試作，日本パ - チャルリアリティ学会論文誌，Vol. 11, No. 1, pp. 19–26, 2006
- [6] Takashi Yoshioka, Barbara Gibb, Andrew K. Dorsch, Steven S. Hsiao and Kenneth O. Johnson, Neural Coding Mechanisms Underlying Perceived Roughness of Finely Textured Surfaces, The Journal of Neuroscience, pp. 6905–6916, 2001
- [7] Carissa J. Cascio and K. Sathian, Temporal Cues Contribute to Tactile Perception of Roughness, The Journal of Neuroscience, pp. 5289–5296, 2001
- [8] Y. Mukaibo, H. Shirado, M. Konyo and T. Maeno, Development of a Texture Sensor Emulating the Tissue Structure and Perceptual Mechanism of Human Fingers, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2565–2570, 2005
- [9] M. Konyo, A. Yoshida, S. Tadokoro and N. Saiwaki, A Tactile Synthesis Method Using Multiple Frequency Vibrations for Representing Virtual Touch, Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3965–3971, 2005