

マスタ・スレーブ型触感伝達システムの開発

-第一報 ヒト指模倣型触感センサを用いた触感因子の実時間抽出法-

Development of Master-Slave Typed Tactile Telepresence System

-1st Report, Real-time Estimation of Tactile Factors Using Human Finger Mimetic Tactile Sensors-

学 岡本正吾 (東北大), 正 昆陽雅司 (東北大), 学 向坊由佳 (慶大),
正 前野隆司 (慶大), 正 田所諭 (東北大)

Shogo Okamoto, Tohoku Univ., Masashi Konyo, Tohoku Univ.,
Yuka Mukaibo, Keio Univ., Takashi Maeno, Keio Univ., Satoshi Tadokoro Tohoku Univ.

We are developing the master-slave typed system transmitting tactile feeling in synchronization with rubbing motion of a human to realize active touch remotely. This paper describes the methods to estimate the tactile factors such as perceived roughness, softness and friction using human-finger mimetic tactile sensor and shows one sensor apparatus can cover the various tactile factors as well as a human finger does. Real-time estimation of the roughness factor was conducted by emulating impulse emissions of Meissner's corpuscles and Young's modulus of the objects proved to be estimatable using the internal strain distribution of a sensor.

Key Words: tactile, telepresence, active touch, roughness, softness, friction

1. 緒論

本研究では多様な触感を呈示し、能動触に対応した触感伝達システムの開発を目指す。遠隔地にある物の表面の質感を触運動を伴って探索することができ、触運動 → 知覚 → 触運動という一連の流れを実現するシステムを想定している。

触感の伝達に成功した研究例としては臓器内のしこりを発見することを目的とした触診システム¹⁾、板上のふくらみや微小な段差を検出し呈示するシステム²⁾、物体の硬軟感を指と触感ディスプレイの接触面積を制御することによって呈示するシステム³⁾⁴⁾が報告されている。しかし既存のシステムは単一の触感因子しか観測・呈示しないため、触感の多様性という観点からは問題がある。また、触感因子の推定に長いサンプリング時間が必要であるシステムや、触感センサからの情報伝達の遅れに対応しないシステムがあり、能動触を実現するという観点からも問題がある。

以上のことから触感伝達システムを実現するには大きく分けて次の二つの条件群を満たさなければならないと考えられる。

1. 多様な触感を観測・呈示できる。
 - a) 多様な触感を呈示できる触感ディスプレイがある。
 - b) 多様な触感因子を観測できる触感センサがある。
2. 能動触に対応できる。
 - c) 触感因子を瞬時に観測・推定できる。
 - d) 情報伝達の遅れに対応できる。

本研究では a) を多様な触感を呈示できる ICPF 触感ディスプレイ⁵⁾によって、b) を多様な触感を観測できる可能性のあるヒト指模倣型触感センサ⁶⁾によって解決する。c) は本稿で提案する触感因子の実時間推定法によって、d) は触対象物の物理パラメータを推定することによって解決する。

本研究で用いることを想定している ICPF 触感ディスプレイは ICPF というソフトアクチュエータの振動を制御することでヒト指に振動刺激を与え、粗さ感、硬軟感、摩擦感を同時

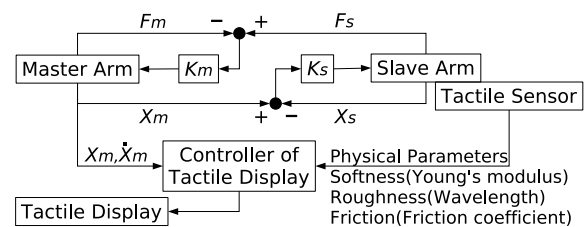


Fig.1 マスタ・スレーブ型触感伝達システムの例

に呈示できる⁵⁾。

本論ではまず、マスタ・スレーブ型触感伝達システムについて述べる。次にヒト指模倣型触感センサについて概要を述べ、センサの振動周波数の実時間推定をヒトのマイスナー小体の神経インパルス発射から知見を得た手法によって実現したので報告する。さらに物体のヤング率の推定をセンサ内部のひずみ分布を利用し瞬時に推定する方法を提案する。

2. マスタ・スレーブ型触感伝達システム

触運動により発生する触感から対象物の形状や表面の質感を得ることはヒトが日常的に行っている行為である。ヒトは触運動を行い、それによって発生した知覚をもとにさらに触運動を続ける。遠隔地にある対象物においても能動触を実現するシステムとしてマスタ・スレーブ型触感伝達システムを提案する。

Fig.1 に本研究で想定しているマスタ・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。Fig.1 のシステムは力帰還型のマスタ・スレーブシステムに加え、マスタ側には触感を呈示するための触感ディスプレイが装備され、スレーブ側にはスレーブアームの先端に触感因子を観測するための触感センサが装備される。オペレータがマスタアームを操作すると、スレーブアームが連動し触感センサが触対象物の物理パラメータを観測・推定する。触感センサからマスタ側に伝達された物理パラメータと、触運動の情報 (マスタアームの運動の情報) を用いて触感ディスプレイによってオペレータに触感を呈示す

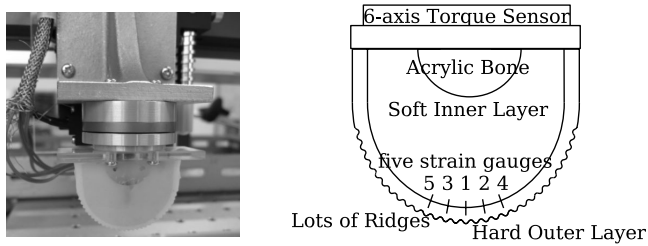


Fig.2 Human finger mimetic tactile sensor ⁶⁾

る。触感を呈示されたオペレータはさらに触運動を続ける。このシステムでは、物理パラメータの伝達が遅れたとしても、既に推定されている触対象物の物理パラメータと触運動の情報を用いてマスタ側のみで触感を呈示することができる。例えば、触速度と触対象物表面の波長から、粗さ感として与えるべき振動周波数は計算できる。

3. ヒト指模倣型触感センサ

ヒト指模倣型触感センサ (Fig.2)⁶⁾ はヒト指の機能を模倣している。センサは外側が硬く、内側が柔らかい二層のシリコンゴムと骨にあたるアクリルからなり、二層の境界に五本のひずみゲージが埋設されている。表面で変形が起きたとき、応力はこの層の境目に集中し易いことがわかっている。これはヒト指の触覚受容器であるマイスナー小体が柔らかい脂質と硬い表皮の境目にあることと一致する。表面は指紋の隆線を真似た凹凸に囲まれている。凹凸は振動を内部に伝え、スティック・スリップ現象などもヒト指同様に発生すると考えられる。土台部分にはトルクセンサが取り付けられている。

これまでにヒト指模倣型触感センサで試料を等速になぞったときに計算時間は要するがセンサ出力のフーリエ変換を計算するとセンサの振動周波数を抽出できる、センサをヤング率の異なる物体に押しつけたときヤング率の違いが五本のひずみゲージの出力の分散に反映される、摩擦はトルクセンサによって観測できるということが分かっている。

4. ヒト指模倣型触感センサを用いた粗さ感因子の実時間抽出法

本節ではマイスナー小体の神経インパルス発射から知見を得た振動周波数の実時間抽出法を提案する。さらに提案手法は触速度の変化や試料への押しこみ量に対しロバストであることを示す。

4.1 マイスナー小体の神経インパルス発射から知見を得た粗さ感因子の実時間抽出

ヒトの粗さ認識機構を模倣したシステムをロボットの触感センサに応用し、平板中の数十 μm の突起の認識に成功した例が大岡らによって報告されている⁷⁾。また、ヒト指模倣型触感センサは触感因子の推定手法もヒト模倣することによって、実時間でのロバストな推定ができる可能性がある。

マイスナー小体に関する生理学的知見を述べる。ヒトの粗さ感認識に関係すると言われている触覚受容器のマイスナー小体は、周辺組織のひずみの時間微分に反応する。ひずみの時間微分がある閾値を越えるとマイスナー小体につながったニューロ

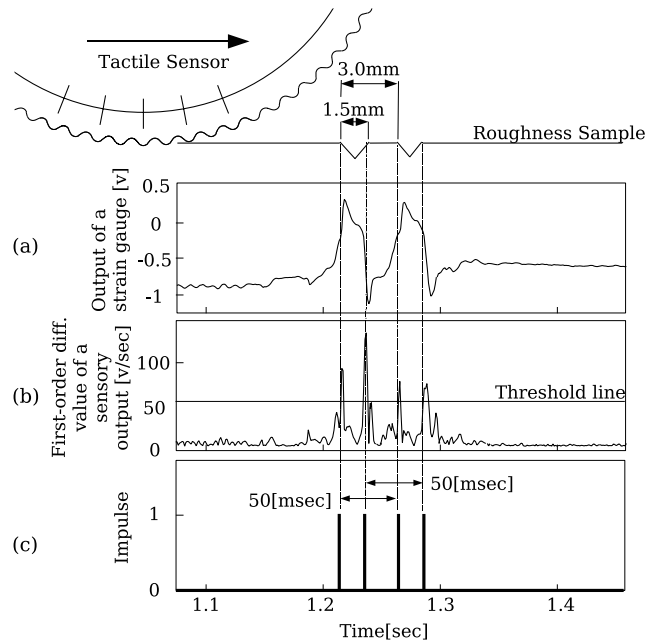


Fig.3 溝を二つ有する試料をなぞったときに得られるヒト指模倣型触感センサの出力

ンからインパルス発射が観測される。インパルス密度が増加するとヒトの感覚も増加する。これらの知見を後に用いる。

ヒト指模倣型触感センサで 60mm/sec の等速で Fig.3 に示す幅 1.5mm の溝を二つ有する粗さ試料をなぞったときのセンサ出力を Fig.3(a) に示す。二つの溝は 1.5mm の間隔を空けて配置されている。Fig.3(a) を見ると、センサが溝にさしかかったときに出力が急に大きくなり、センサが丘に当たったときに出力が急に小さくなっていることがわかる。

Fig.3(b) にセンサ出力を時間微分したものを示す。この微分値がある閾値を越えたときに発射されたインパルスを Fig.3(c) に示す。これらインパルスの間隔から、センサの振動周波数を計算することができる。センサが丘に当たったことによって発射された二つのインパルスの間隔は 50msec であった。センサが 60mm/sec で移動しているため $60\text{mm/sec} \times 0.050\text{sec} = 3.0\text{mm}$ となり、これは二つの溝の間隔に等しい。センサの振動周波数は $1/0.050\text{sec} = 20\text{Hz}$ と計算できる。

以上の現象と生理学的知見を用いて振動周波数の実時間抽出法を定式化する。 $\epsilon(t)$ がセンサのひずみゲージからの出力であるとき、 $\epsilon(t)$ の時間微分の絶対値 $x(t)$ は式 (1) である。

$$x(t) = \left| \frac{d\epsilon(t)}{dt} \right| \quad (1)$$

$p(t)$ は時刻 t におけるインパルス発射である。 $x(t)$ が閾値 h を越えたとき $p(t) = 1$ となり、それ以外では $p(t) = 0$ である。これは実際のマイスナー小体の振舞いとは若干異なるが、 $x(t)$ がどの位の時間、そして量的にどの程度閾値を越えているかという情報をあえて排除することにより刺激の強さに影響を受けずに振動周波数を抽出する。閾値 h は式 (2) の通り過去 a sec 間のひずみの履歴によって決定する。 $c(t)$ は時刻 t より過去 b sec の間に生じたインパルス発射の回数であり式 (3) で表

される。 $c(t)$ はパルス密度である。

$$h(t) = k \int_{t-a}^t x(\tau) d\tau \quad (2)$$

$$c(t) = \int_{t-b}^t p(\tau) d\tau \quad (3)$$

理想的な条件では物体表面の一つの波に対して二回のインパルス発射が起こるため、センサの振動周波数 $f(t)$ は式 (4) となる。

$$f(t) = \frac{c(t)}{2b} \quad (4)$$

触対象物表面の波長 $\lambda(t)$ はセンサの触速度を $v(t)$ としたとき式 (5) で推定できる。

$$\lambda(t) = \frac{|v(t)|}{f(t)} \quad (5)$$

a は実験的に 200 msec とし、表 1、表 2 に示す通り b 、 k は能動触環境下において最も推定精度が良くなる $b = 200\text{msec}$ 、 $k = 1.6$ を採用した。表 1 は 1Hz、振幅 100mm/sec の正弦波状の速度でセンサで試料をなぞったときに推定した振動周波数の理論値からの平均誤差と理論値からの時間遅れをまとめたものである。表 2 は閾値 $h(t)$ を決定する定数 k と推定精度の関係を表す。

Table 1 パルスの加算時間と振動周波数の推定精度の関係

b[msec]	50	100	150	200	250	300	350
時間遅れ [msec]	10	32	53	73	93	112	125
平均誤差 [Hz]	9.23	7.11	5.44	4.53	5.07	6.97	9.55

Table 2 閾値を決定する定数 k と振動周波数の推定精度の関係

k	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
平均誤差 [Hz]	9.22	7.77	6.00	4.53	4.06	4.32	4.78

4.2 自然な能動触環境下における粗さ感因子の推定実験

マスタ・スレーブ型触感伝達システムで用いられる触感センサは、触速度が変化する環境でも触感因子を抽出できなければならない。本論では人間の自然な能動触に近い触速度である 1Hz、振幅 100mm/sec の正弦波で粗さ試料をなぞった結果を報告する。実験で用いた粗さ試料は Fig.4 に示す GW と RW で特徴づけられるものである。Fig.5 に (GW,RW)=(0.9mm,0.9mm) の粗さ試料をなぞったときに推定したセンサの振動周波数 $f(t)$ 、及び触対象物表面の波長 $\lambda(t)$ を示す。Fig.5(a) に実験時の触速度 $v(t)$ を、Fig.5(b) に $f(t)$ を、Fig.5(c) に $\lambda(t)$ を示す。Fig.5(b) を見ると、センサの振動周波数は触速度が変化する環境でも理論値に追従し、およそ 70msec の時間遅れで推定できていることがわかる。Fig.5(c) を見ると、触速度が速いときの方が遅いときに比べ正しい波長

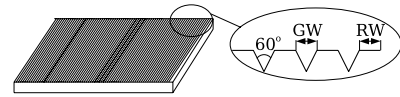


Fig.4 GW,RW で特徴づけられる実験に用いた粗さ試料

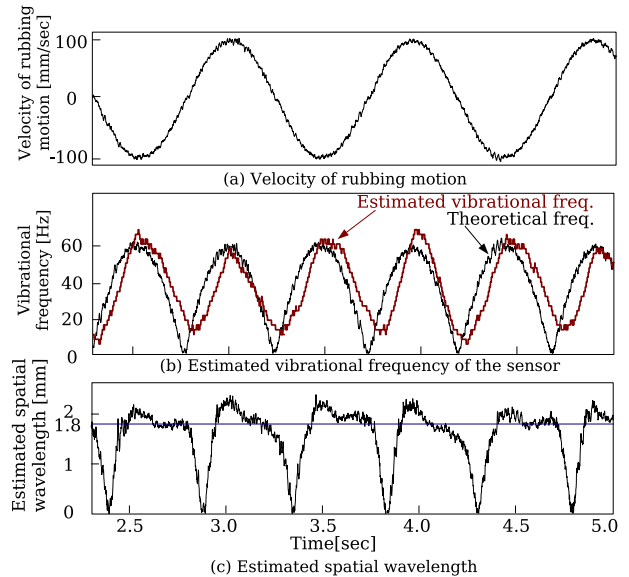


Fig.5 能動触環境下における振動周波数と触対象物の表面波長の推定結果

1.8mm に近い値を推定できていることがわかる。ヒトが触対象物の粗さを認識するときも触速度が遅いときよりもある程度速いときの情報を利用していると考えられるが、ヒト指模倣型触感センサでも同様に触速度がある程度速いときの方が触対象物表面の波長を正確に推定できる。

4.3 触対象物への押しこみ量に対するロバスト性

ヒト指模倣型触感センサは触対象物への押しこみ量によらず、触対象物の物理パラメータを推定できなければならない。センサの試料への押しこみ量を 0.2mm~0.8mm まで変化させて粗さ試料を等速でなぞったときの推定結果を Fig.6 に示す。Fig.6 を見ると、押しこみ量によらず触対象物の表面波長をほぼ一様に推定できていることがわかる。その理由としてはセンサ表面が硬く、内側が柔らかい構造によって、表面が大変形しても内部には影響が及びにくいこと、しかし表面の隆線が振動を確かに伝えること、閾値 h が変動することによって刺激の強さによらず振動情報のみを抽出することなどが考えられる。しかし、(GW,RW)=(0.3mm,0.3mm) の試料をなぞったときの推定結果は本来の 0.6mm とは離れたものになっている。センサ表面の凹凸よりも細かな物体をなぞったときはこのように推定結果が悪くなることを確認している。

5. ヒト指模倣型触感センサを用いた物体のヤング率の実時間推定

物体のヤング率を観測するには通常、物体への押しこみ量と物体からの反力の履歴情報を用いる。そういった情報に加え、ヒトは触感を用いて物体の剛性を瞬時に推定していると考えられる。また、指と触感ディスプレイの接触面積を制御することにより、物体の硬軟感を呈示することに成功した研究例³⁾⁴⁾が

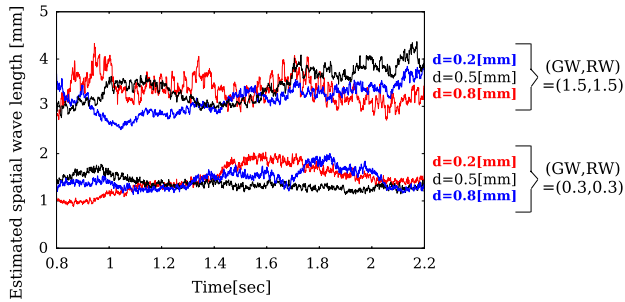


Fig.6 試料への押しこみ量を変化させてなぞったときの触対象物表面の波長推定結果

報告されている。以上のことからヒトは物体を触ったとき、指内部の応力空間分布を用いて瞬時に物体の剛性を判断しているという仮説が考えられる。ヒト指模倣型触感センサでもセンサ内部のひずみ分布から一回のサンプリングで対象物のヤング率を推定できる可能性がある。

5.1 内部のひずみ分布を用いた物体のヤング率の推定法

ヘルツの接触理論によると、半径 R 、ヤング率 E_f の球状一様弾性体がヤング率 E_o の平らな物体に相対距離 w_f 、 w_o で接触すると接触面積 A は式 (6) となる。

$$A = \pi R(w_f + w_o) \quad (6)$$

二つの球のヤング率と相対距離の間には式 (7) の関係がある。

$$w_o = w_f \frac{E_f}{E_o} \quad (7)$$

式 (6)(7) から式 (8) が得られる。

$$\frac{A}{w_f} = \pi R \left(1 + \frac{E_f}{E_o}\right) \quad (8)$$

ヒト指模倣型触感センサでは触対象物との接触面積 A や物体との相対距離 w_f を観測することはできないが、 $\frac{A}{w_f}$ とセンサの五本のひずみゲージの出力の標準偏差 S_d には似た振舞いがある。Fig.7(a) に示すように、センサが E_o の大きい硬い物体と接触したときは A は小さく、反力が中心付近に集中する。このとき、センサ内部のひずみも接触面の中心付近ほど大きくなり、 S_d は大きくなる。Fig.7(b) に示すように、センサが E_o の小さな柔らかい物体と接触したときは A は大きく、物体からの反力が均等になる。このときセンサ内部のひずみは接触面に比較的均等に分布し、 S_d は小さくなる。よって、五本のひずみゲージの出力の標準偏差 S_d は物体のヤング率の推定に利用できると考えられる。

5.2 ヤング率の異なる物体への押しこみ実験

Fig.8 にヒト指模倣型触感センサをヤング率の異なる物体に押しつけたときの S_d 、センサへの反力 f と物体のヤング率 E のプロットを示す。Fig.8(a) を見ると、ヤング率の異なる三つの試料は押しつけ力がある程度高いときは区別できている。Fig.8(b) を見ると同じ力でセンサを物体に押しつけたときには対象物のヤング率が大きい程、 S_d が大きくなるのがわかる。このときも押しつけ力が数十 gf と小さいときは対象物のヤン

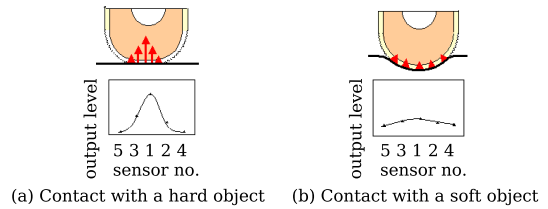


Fig.7 ヒト指模倣型触感センサがヤング率の異なる物体に接触したときの接触面積と反力分布の様子

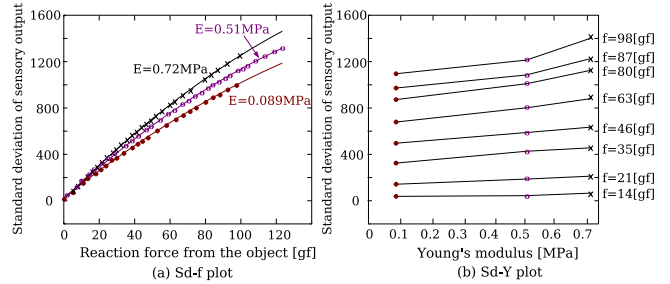


Fig.8 センサをヤング率の異なる物体に押しつけたときに得られる五本のひずみゲージの出力の標準偏差、物体からの反力のプロット

グ率の違いが S_d に現れないが、押しつけ力がある程度大きいときは S_d から対象物のヤング率を区別できている。よって、対象物のヤング率はヒト指模倣型触感センサ内部のひずみ分布を用いて推定できると言える。

6. 結論

ヒト指模倣型触感センサを用いて三つの触感因子を実時間で推定することに成功した。センサの振動周波数はヒトのマイスナー小体の神経インパルス発射から知見を得た手法によって実時間で推定した。触対象物のヤング率はセンサ内部のひずみ分布を計算することで瞬時に推定した。物体をなぞったときの摩擦はトルクセンサで観測できる。今後は推定した触感因子を触感ディスプレイに伝送し、マスタ・スレーブ型触感伝達システムを早期に開発する。

参考文献

- 1) R. D. Howe, W. J. Peine, D. A. Kontarinis and J. S. Son, "Remote Palpation Technology", IEEE Engineering in Medicine and Biology, 1995
- 2) Akio Yamamoto et al., Tactile Telepresence System using PVDF Sensors and Electrostatic Stimulator, proc. of IROS2005
- 3) Anitonio Bicchi, Enzo P. Schilingo and Danilo De Rossi, "Haptic Discrimination of Softness in Teleoperation: The Role of the Contact Area Spread Rate", IEEE Trans. on Robotic and Automation, Vol.16, No.5, October 2000
- 4) 池田義明, 藤田欣也, 指先の接触面積と反力の同時制御による柔軟弾性物体の提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.9, No.2, pp.187-194, 2004
- 5) M. Konyo, A. Yoshida, S. Tadokoro and N. Saiwaki, "A Tactile Synthesis Method Using Multiple Frequency Vibrations for Representing Virtual Touch", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005
- 6) Yuka Mukaibo et al., Development of a Texture Sensor Emulating the Tissue Structure and Perceptual Mechanism of Human Fingers, proc. of ICRA2005, 2005
- 7) 大岡昌博, 川村拓也, 板橋達也, 宮岡徹, 三矢保永, ヒトの表面粗さ認識機構を模倣した触覚認識システム, 日本機械学会論文集 (C 編), 69 巻, 682 号, pp.1719-1725, 2003