

プロジェクト名：触覚フィードバックを備えたペンタブレットインターフェース

プロジェクト代表者：高崎 正也（理工学研究科・准教授）

1. 緒言

手や指で物体表面をなぞることでその材質やテクスチャを知覚することができる。これと同様にペンなどのツールで物体表面をなぞると、ツールを介して物体表面に応じた力覚・皮膚感覚を知覚し、材質やテクスチャを認知することができる。このように指やツールなどで物体表面をなぞるときの動作を、本報では能動的触動作と呼ぶ。近年、上記のような感覚の再現が注目され、これまで、実在する物体とツールの接触・能動的触動作の際に得られるツールの加速度をユーザーに与える力覚提示の手法として **high frequency acceleration matching of teleoperated tools**^[1]が提案されている。これは遠隔地にあるツールの軸方向加速度をユーザー手元にあるツールに内蔵された VCM の振動を力覚として再現するシステムであり、高周波領域に着目した触覚フィードバックを行っている。本研究は、ペンによる能動的触動作によって得られる皮膚感覚に着目し、Fig. 1 のように空間的な隔りがある状態で再現することを目的とする。本研究では皮膚感覚ディスプレイとペンを組み合わせて粗さ感覚の再現を行う。これを応用すれば、バーチャルリアリティや遠隔地のマニピレータの操作における触覚フィードバックなどに利用可能である。

これまでに、粗さ感覚を提示するデバイスとして、弾性表面波（**surface acoustic wave : SAW**）皮膚感覚ディスプレイ^[2]が開発されており、さらにこれを応用したペンタブレット型皮膚感覚ディスプレイ^[3]が提案されている。これを用いることで、ペンにおける粗さ感覚の提示を行うことができるが、一様な感覚の提示のみを行っていた。また、指による能動的触動作において、皮膚感覚ディスプレイを用い、遠隔地で皮膚感覚の再現を行うテレタッチ^[4]が提案されている。本研究ではテレタッチの概念を用い、ペンによる能動的触動作におけるテレタッチを行う。ペンの振動を電気信号に変換できるスキャナと、遠隔地において皮膚感覚を提示するペンタブレット型皮膚感覚ディスプレイを用いることにより、空間的隔りがあっても皮膚感覚の再現、すなわちテレタッチが可能であると考えられる。

テレタッチの実現のため、ペンの振動を取得するセンサを取り付けたペン型スキャナを製作した。スキャナにより得られた信号を遠隔地の皮膚感覚ディスプレイの制御信号に用いる。制御信号の生成に必要な伝達関数を周波数特性から同定した。ペンによる能動的触動作におけるテレタッチを実装し、複数の試料に対して、それぞれの振動を比較した。

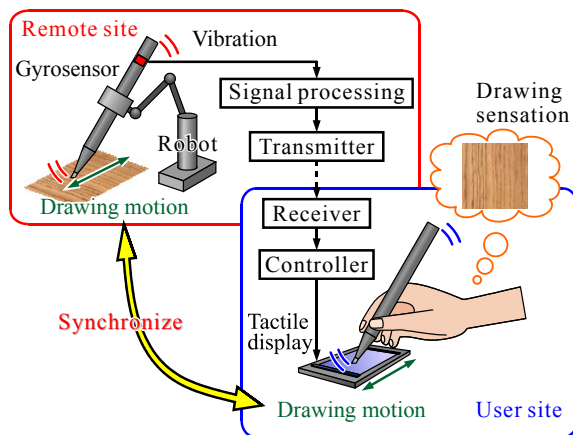


Fig. 1 Concept of stylus-based tele-touch.

2. ペンタブレット型 SAW 皮膚感覚ディスプレイ^[2]

ペンタブレット型 SAW 皮膚感覚ディスプレイでは、 LiNbO_3 の表面に形成したくし型電極（**interdigital transducer : IDT**）に交流電圧を印加することで SAW を励振し、ディスプレイ表面上に伝播させる。ディスプレイ表面に対してシリコンゴムとスライダが一体となったペンによる能動的触動作の際に SAW が励振されると、励振されていない状態と比べて、スライダにかかる摩擦力は小さくなり、励振をやめると摩擦力が元に戻るため、SAW の振幅に応じて摩擦力の増減が生じる。SAW の励振を制御することにより、摩擦力を変化させ、摩擦力の増減により能動的触動作の際にペンに生じる振動を擬似的に再現する事が可能である。

3. ペン型スキャナ

物体表面に対する能動的触動作の際のペンの振動を電気信号に変換するために、センサを取り付けたペン型スキャナを製作した。製作したペン型スキャナを Fig. 2 に、構造は Fig. 3 に示す。市販のペンの先端をシリコンゴムに差し替え、加速度センサ、ジャイロセンサを取り付けた。製作したグレーティングをなぞる実験において、能動的触動作によるペンの振動は把持点を中心とした回転振動が主たる振動となって



Fig. 2 Pen type scanner.

いた^[5]。そこで、ペンの回転振動の角速度を取得するジャイロセンサが適切であると判断し、ジャイロセンサによってペンの振動を検出する構成とした。

4. テレタッチ

4.1. テレタッチの原理

Fig. 4 にテレタッチが実現されるためのブロック線図を示す。ペン型スキャナによる能動的触動作により、表面形状 $X(s)$ からペンの振動 $V(s)$ が生成され、このときの伝達関数を $G(s)$ とする。振動 $V(s)$ はジャイロセンサ $K(s)$ によって電気信号 $E(s)$ に変換される。この電気信号 $E(s)$ にコントローラによって $H(s)K(s)$ の逆数を乗じた制御信号 $U(s)$ を皮膚感覚ディスプレイに入力する。ディスプレイに対するペン型スキャナによる能動的触動作によってペンの振動 $V'(s)$ が生成され、このときの伝達関数を $H(s)$ とする。この振動 $V'(s)$ は、式(1)となる。

$$V'(s) = \frac{G(s)K(s)}{H(s)K(s)} H(s)X(s) = G(s)X(s) = V(s) \quad (1)$$

皮膚感覚ディスプレイに対する能動的触動作の際に手に伝わる振動 $V'(s)$ が、物体表面に対する能動的触動作の際に手に伝わる振動 $V(s)$ に一致するため、得られる皮膚感覚も一致すると考えられる。これにより、物体表面形状 $X(s)$ に対する能動的触動作に伴う感覚を皮膚感覚ディスプレイ上に再現することが可能となり、ペンタブレット型皮膚感覚ディスプレイを用いたペンによる能動的触動作におけるテレタッチが実現される。また、振動を再現することから物体表面形状 $X(s)$ に依ることなくテレタッチが実現すると考えられる。

4.2. 伝達関数の同定

先述のようにテレタッチを実装するためには $H(s)K(s)$ を同定し、電気信号 $E(s)$ にコントローラによって $H(s)K(s)$ の逆数を乗じて皮膚感覚ディスプレイに入力する必要があることから、 $H(s)K(s)$ のゲインの周波数特性を取得し、 $H(s)K(s)$ の伝達関数を同定する必要がある。周波数特性の取得方法として、はじめに、コントローラから皮膚感覚ディスプレイに入力する制御信号 $U(s)$ を正弦波とし、周波数を設定する。次に制御信号をシンセサイザにより皮膚感覚ディスプレイの振動子の共振周波数の駆動信号に対して AM 変調を行い、ディスプレイ表面に励振される弾性表面波の振幅を変化させる。皮膚感覚ディスプレイに弾性表面波を励振すると摩擦力が下がり、励振をやめると摩擦力が元に戻るため、信号波の周波数と同じ摩擦力の増減が生じる。そのため、ディスプレイに対するペン型スキャナによる能動的触動作によって、同じ周波数の電気信号 $E(s)$ が取得でき、これをコントローラの入力電圧で割ったものをゲインとする。能動的触動作の速度を変化させ $H(s)K(s)$ のゲインの周波数特性を取得した。この周波数特性を Fig. 5 に示す。能動的触動作の速度による変化は少ないことから、得られた周波数特性の概形

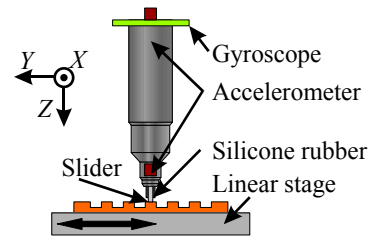


Fig. 3 Configuration of pen type scanner.

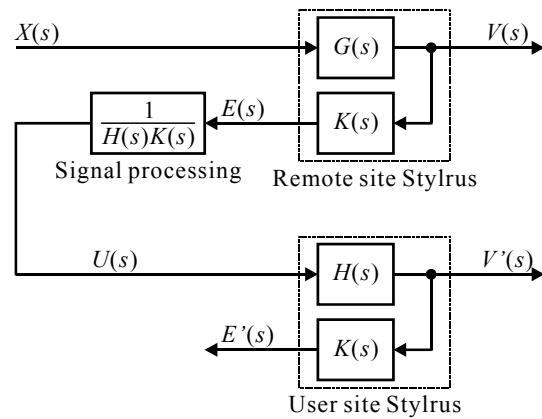


Fig. 4 Block diagram of tele-touch.

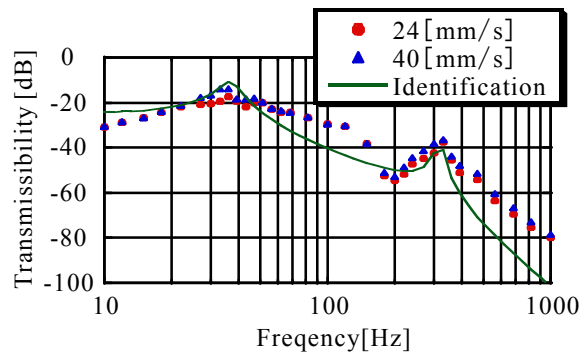


Fig. 5 Frequency response of $E'(s)/U(s)$.

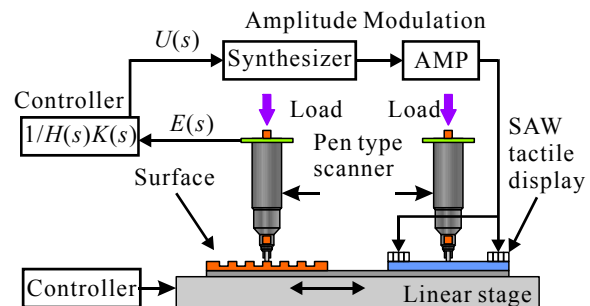


Fig. 6 Configuration for Tele-touch.

のピークのみに着目し、式(2)のように同定した。これを Fig. 5 の実線に示す。

$$H(s)K(s) = \frac{A_v \omega_{n1}^2 \omega_{n2}^2}{(s^2 + 2\zeta_1 \omega_{n1} s + \omega_{n1}^2)(s^2 + 2\zeta_2 \omega_{n2} s + \omega_{n2}^2)}$$

$\omega_{n1}=230, \zeta_1=0.1, \omega_{n2}=2000, \zeta_2=0.01.$ (2)

4.3. テレタッチの実装

同定した伝達関数 $H(s)K(s)$ の逆数を digital signal processor に実装し、コントローラとした。実装において高い周波数でのノイズの増幅を防ぐためにカットオフ周波数 500 [Hz] のローパスフィルターを加えた。

本研究の実験装置の構成を Fig. 6 に示す。サンプル表面として3種類の試料を用意した。これらを Fig. 7, Fig. 10, Fig. 13 に示す。リニアスライダに各サンプル表面と、皮膚感覚ディスプレイを取り付け、リニアスライダを一定速度で動かして能動的触動作を再現し、テレタッチを行った。本研究の実験構成では制御信号の保存、再生を行っていないため、リアルタイムで能動的触動作速度を同期させる必要がある。各サンプル表面と皮膚感覚ディスプレイのそれぞれに対する能動的触動作をするペン型スキャナの角速度を取得し、取得した2つの角速度を比較した。その結果を Fig. 8, Fig. 11, Fig. 14 に示す。FFT を用いたそれらの解析により得られた各周波数スペクトルを Fig. 9, Fig. 12, Fig. 15 に示す。Fig. 8, Fig. 11, Fig. 14 よりサンプル表面と皮膚感覚ディスプレイのそれぞれに対して能動的触動作をするペン型スキャナの角速度が時間領域においてほぼ一致していることが確認できる。Fig. 9, Fig. 12, Fig. 15 より周波数領域において、パワースペクトルの傾向が一致していることが確かめられた。これらよりサンプル表面に依らずテレタッチが成り立つと言える。

また、パワースペクトルの傾向はサンプル表面に応じて異なっていることがわかる。各サンプル表面におけるパワースペクトルの特徴を解析し、再現することができれば、1度スキャンするだけでテレタッチが実現すると考えられる。

また、20代男性5名を被験者としてテレタッチの評価を行った。両手にペン型スキャナを持ち、左手でサンプル表面を、右手で皮膚感覚ディスプレイを能動触動作するようにしてもらい、リニアスライダを40 [mm/s] で往復運動させることによって能動的触動作の同期を模擬に行った。被験者の5名全員が、皮膚感覚ディスプレイに対する能動的触動作で得られる感覚は、サンプル表面に対する能動的触動作で得られる感覚と同様であると回答した。

5. 結言

ペンによる能動的触動作におけるテレタッチを提案した。能動的触動作の際にペンに生じる振動を取得できるペン型スキャナを製作した。制御信号の生成に必要な伝達関数の同定において、周波数特性による推定を試みた。複数のサンプル表面に対してテレタッチを実装し、それぞれの振動を比較してテレタッチの実現を検証した。

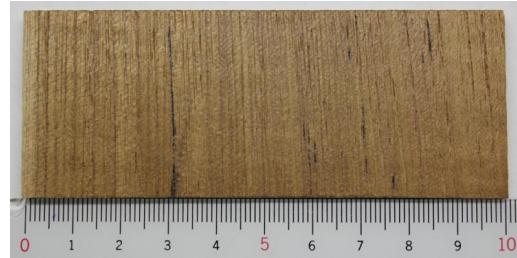


Fig. 7 The wood plate as surface 1.

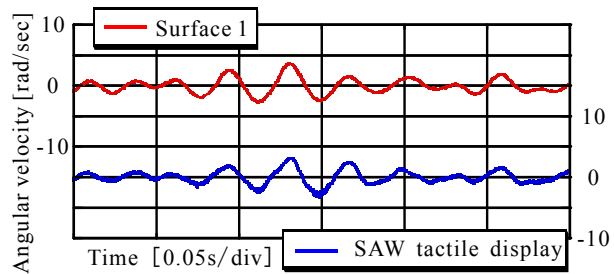


Fig. 8 Measured vibrations in Tele-touch on surface 1.

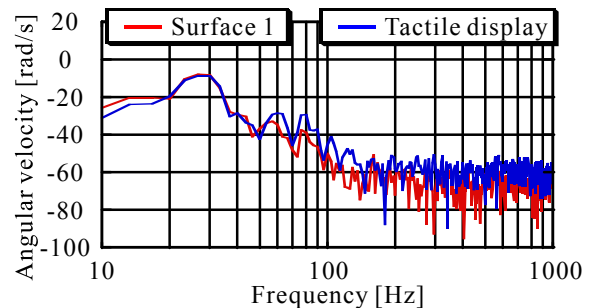


Fig. 9 FFT analysis result of the vibrations.

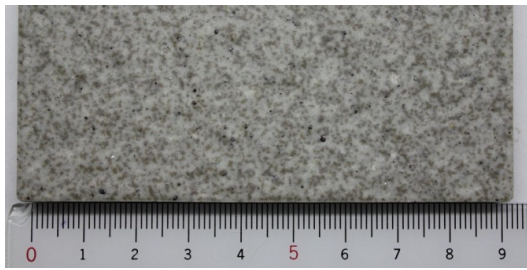


Fig. 10 The stone plate as surface 2.



Fig. 13 The brick plate as surface 3.

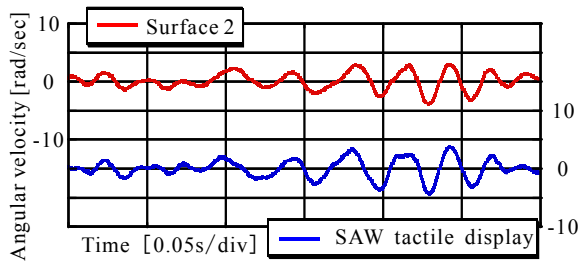


Fig. 11 Measured vibrations in Tele-touch on surface 2.

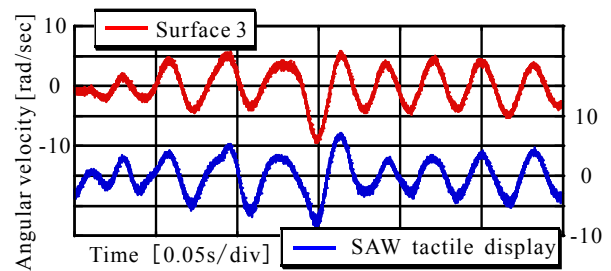


Fig. 14 Measured vibrations in Tele-touch on surface 3.

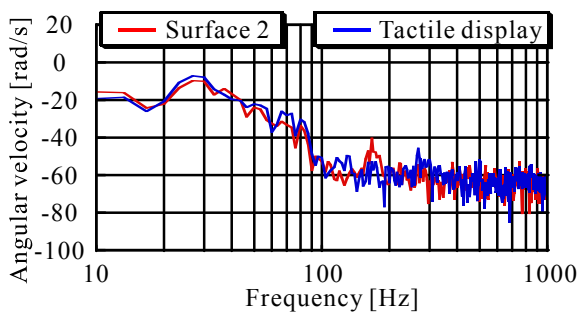


Fig. 12 FFT analysis result of the vibrations.

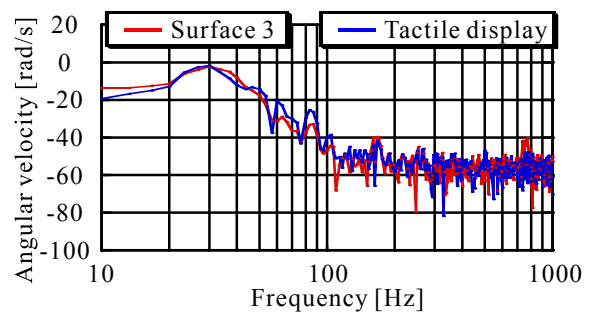


Fig. 15 FFT analysis result of the vibrations.

参考文献

- [1] Katherine J. Kuchenbecker William McMahan, "Haptic Display of Realistic Tool Contact Via Dynamically Compensated Control of a Dedicated Actuator," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009.
- [2] 高崎正也, 小谷浩之, 遠藤大, 奈良高明, 水野毅, "アクティブ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ," 計測自動制御学会論文集 Vol. 42, No. 4, pp. 327-333, 2006.
- [3] 吉紅旭, 小谷浩之, 高崎正也, 水野毅, "弾性表面波皮膚感覚ディスプレイを用いたペンタブレット型インターフェース," 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 論文集, pp. 506-507, 2006.
- [4] 中鉢耕平, 中島壯樹, 水野毅, 高崎正也, "弾性表面波皮膚感覚ディスプレイと指ダミーを用いたテレタッチの開発," 第10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 論文集, pp. 171-172, 2009.
- [5] 高田裕樹, 中鉢耕平, 高崎正也, 水野毅, "ペンタブレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ—ペン型スキャナを用いたテレタッチの実現—," 日本機械学会[No.11-5]ロボティクスメカトロニクス講演会'11 講演論文集, 2P1-O07, 2011.