

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 25 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23680010

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Pen-tablet type interface with tactile feedback

研究代表者

高崎 正也 (TAKASAKI, Masaya)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：10333486

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,900,000円、(間接経費) 4,770,000円

研究成果の概要(和文)：圧電振動子を薄いガラス基板に結合させて実現するシート状超音波振動子の開発を行った。大型のガラス基板に振動を分布させるための知見を得た。また、効率を高めるための結合材や駆動回路を簡略化するための励振方法についても検討を行った。従来よりも大きな基板に超音波振動を分布させることが可能となった。自然な書き味を提示するために、「テレタッチ」の概念を導入した。実物をなぞった際のペンの振動を計測するスキャナと信号処理回路と皮膚感覚ディスプレイを組み合わせたものである。各要素が持つ伝達関数を考慮し、逆伝達関数補償を適用することで、スキャナとディスプレイ上のペンの振動が一致することを実験的に示した。

研究成果の概要(英文)：A sheet-like ultrasonic transducer, which consisted of a thin glass substrate and a piezoelectric element, has been developed. Through measurements, we got knowledge to expand its area. To enhance its performance, we considered driving circuits and acoustic coupling material between the substrate and element. As a result, feasibility of a large thin glass ultrasonic transducer for the tactile display.

To study reality of indicated tactile sensation, we started to consider concept of Tele-Touch, where we can feel drawing sensation on the tactile display as if it is very similar to one when we draw a line on existing material surface. According to the concept, a pen type scanner with a gyro sensor will be synchronized with drawing motion in user site pen type tactile display. We considered transfer function for each element in whole system. Applying inverse transfer function compensation, vibration of user site pen coincided with one of remote site pen.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学 メディア情報学・データベース

キーワード：ヒューマンインターフェイス 触覚フィードバック 皮膚感覚ディスプレイ 超音波 弾性表面波 力覚フィードバック GUI 視覚障害者支援

1. 研究開始当初の背景

今日、バーチャルリアリティやロボット等遠隔操作の分野において、触覚によるフィードバックが重要視されるようになってきた。触覚は生理学的に2種類に分類される。一方は力覚と呼ばれ、力や大まかな形状を認識する。他方は皮膚感覚と呼ばれ、体表面が物体に触れたときの摩擦や表面のテクスチャを認識する。以下、本報告書では皮膚感覚について扱う。研究代表者はこの皮膚感覚に着目し、「つるつる」「ざらざら」といった粗さ感覚に特化した皮膚感覚ディスプレイの実現に関する研究に従事してきた。これまでに、原理の提案と試作機による提示実験に始まり、皮膚感覚を提示する部分の面積を大きくしかつ透明とすることで、液晶ディスプレイと組み合わせることで視覚情報と触覚情報を同時に提示できるデバイスを提案している。粗さ感覚の提示には超音波の一種である弾性表面波を利用しており、デバイスを薄型に構成することができる。このような薄型かつ透明な皮膚感覚ディスプレイの例は世界的にも希(申請者の知る限りでは、他には透明電極による静電気力を用いたタイプのみ。)であり、国際会議等では高い評価をいただいている(Best Student Paper Award 1件、招待講演1件など)。

従来の弾性表面波励振技術では、皮膚感覚を提示する部分の面積を大きくできず、アプリケーションが限定される状況であった。平成18~21年度の「視覚と皮膚感覚を融合したコンピュータインターフェース」(NEDO、産業技術研究助成事業)では、ガラス基板表面に弾性表面波を励振してそれを皮膚感覚提示に利用するための研究を行った。結果、100mm四方のガラス基板で皮膚感覚の提示ができることを示した。一方、指先で皮膚感覚ディスプレイに触れて粗さ感覚を受容するためには、指の接触面に「スライダ」を装着する必要がある。皮膚感覚によるフィードバックを享受できても平行して行う作業を阻害してしまう可能性がある。そこで、ペンタブレット様インターフェースとすることでこの問題を解決する着想を得た。

2. 研究の目的

液晶ペンタブレットインターフェースであり、使用時に「書き味」のような触覚フィードバックを備えたデバイスの開発を行う。まず、12インチの液晶ディスプレイ全面で書き味の提示を可能とする技術を確立する。ガラス基板に超音波を励振し、超音波により摩擦係数を変化することを利用して「触覚」を提示する。次に、触覚フィードバックを備えたコンピュータ操作における書き味提示の方法について検討を行う。実際に多くの被験者に協力してもらい、最適なフィードバック方法について検討を行う。最終的に、コンピュータ操作における作業効率の向上、及び、視覚障害者のコンピュータ利用機会創出を

目的とする。

液晶ディスプレイの画面全体で触覚を提示するためには、画面と同じサイズのガラス基板の任意の場所に弾性波を励振し、液晶ディスプレイと重ねて使用する必要がある。また、将来の実用化を鑑みて、できる限りエネルギー消費量を抑制する必要がある。また、自然な「書き味」の提示方法に関する検討を行うために、「スキャナ」の開発を行う。

3. 研究の方法

(1) シート状超音波振動子 シート状ガラス基板に超音波振動を発生する圧電振動子を結合させる。この状態で圧電振動子に交流電圧を印加すると、圧電振動子基板表面の超音波振動がシート状ガラス基板にも伝搬し、基板上を伝搬する。基板端で反射し、基板上ある幅をもって振動を分布させることが期待できる。結果、一つの振動子でも、基板端に密に振動子を配列しなくても、全体に振動を分布させることができ、従来から適応されてきた「皮膚感覚ディスプレイ」の原理に従い、「皮膚感覚」や「書き味」を提示することができる。シート状ガラス基板上の振動子から離れた地点では、伝搬・反射による減衰の影響で観測される振動振幅が小さい。この減衰の様子を定量的に評価することにより、複数の圧電振動子の配列パターンを最適化するための知見を得る。結果、数少ない圧電振動子により基板全体で大きな振動の分布を見込める事ができ、超音波励振の省電力化をはかることができる。本研究では、ひとつの圧電振動子に対して減衰の定量的評価と振動分布測定を行う。また、個々の圧電振動子の駆動には高電圧パルスを用いる。こうすることで、駆動回路をシンプルに構成することができる。

(2) 自然な「書き味」の提示 画用紙に鉛筆等で線を描くときにはその鉛筆に振動が発生し、それを皮膚感覚を通して知覚することで「書き味」を受容している。「自然な」感触を提示するには、実際に鉛筆やペンに発生する振動を忠実に再現することになる。本提案のペンタブレットインターフェースに発生する振動は、ガラス基板表面の超音波振動によって増減された摩擦係数によって制御される。本研究では、ペンと皮膚感覚ディスプレイを伝達関数によって記述し、それらを利用して制御系を構築することを検討する。実際に鉛筆等で画用紙に線を描く時の振動を記録し、その振動を「再生」する手続きをとる。実際の描画時にペンが持つ伝達関数と皮膚感覚ディスプレイと組み合わせられたペンタブレットインターフェースが持つ伝達関数が異なるため、それらを同定する必要がある。同定するために、振動センサを内蔵したペンを製作し、それを一種の「スキャナ」として活用する。ペンにセンサが内蔵されていることで、ペンの振動を定量的に計測することが可能となった。書き味の評価において、

ユーザによる主観的評価に加え、書き味をペンの振動として定量評価を行うことが可能となる。

(3) 後天的視覚障害者向け GUI 補助 コンピュータの操作において近年主流となっているグラフィカルユーザインターフェース (GUI) は、カーソル位置を識別できなければ操作を完了させることは困難なインターフェースになっている。従って、視覚に障害を持ったユーザにはそのままの使用は困難である。本研究による提案では、画面に表示された情報を触覚を通して補充することができ、視覚障害者支援のツールとしても期待される。平成 24 年度に行った学会発表において、GUI 操作の補助そのものについての検討の必要性を指摘されたため、ペンタブレットのみならず力覚ディスプレイによる補助についても検討を開始した。デスクトップに複数のウィンドウが重なり合って表示されている際に力覚提示を利用してこのウィンドウを識別させることを提案した。この提案の実現には、安価なゲーム用力覚提示デバイスを利用した。

4. 研究成果

(1) シート状超音波振動子 本研究課題の目的を達成するためには、透明かつ薄型の超音波振動子が必要不可欠である。近年、利用が拡大しているタッチパネル機能を備えた液晶ディスプレイでは、指との接触による静電容量の変化を観測しているため、組み合わせる皮膚感覚ディスプレイ振動子に許容される厚さは 0.5 mm 程度以下である。その候補として、2 種類の超音波振動子を試作した。一つがシート状超音波振動子であり、薄型ガラス基板 (厚さ 0.3 mm 程度の薄いガラス基板) に超音波振動を発生する圧電振動子を結合させたものである。圧電振動子に交流電圧を印加すると、圧電振動子基板表面の超音波振動が薄型ガラス基板にも伝搬し、基板上を伝搬する。基板端で反射し、基板上ある幅を持った範囲に定在波を励振させることができる。長手方向 150 mm 程度のガラス基板を用いて皮膚感覚提示実験を行ったところ、圧電振動子の幅よりも広い範囲 (おおむね両側+5mm 程度) に超音波振動が分布していることを確認した。幅を広くして圧電振動子のある隙間を持って配列することで、基板全体に超音波を伝播させることができる。また、薄型であるため、市販のタッチパネルの表面へ設置することが可能である。実際に設置し、従来の皮膚感覚ディスプレイの制御方式を適用して、皮膚感覚を提示できることを実験的に確認した。もう一つが、透明な圧電単結晶基板を振動子として利用する方法である。ニオブ酸リチウムの 4 インチウエハを利用し、基板端部に超音波励振のための電極を設け、交流電圧の印加によりラム波の励振伝搬を期待したものであり、2 種類のプロトタイプを製作した。共振周波数を持ち、その

周波数の交流の印加により、基板全体に振動が伝搬していることを振動計により確認した。しかし、このタイプでは用いる材料が高価であるため、現実的な方法ではない。

一方、これまで採用してきた超音波励振方法では、圧電振動子表面に形成された 20 対程度の交差指電極に振動子の最終的な形状で決定される周波数の交流を印加して超音波を励振していた。圧電振動子を複数配列することで、シート状超音波振動子前面に振動を分布させることができるが、個々の振動子の共振周波数は異なるため、高周波電力増幅アンプも振動子の数だけ必要となる。リニア増幅アンプは高価であるため、個々の回路を簡略化して低コスト化を測る目的で、パルス波の印加による超音波励振方法を検討した。上記くし形電極は周期構造を持つため、インパルス入力に対して応力分布がその対数の分だけ生成される。その分布が振動子表面に励振される弾性波と結合すれば、対数と同数の波数をもった励振・伝搬される。電極が 20 対の場合、発振子もつ共振周波数の約 20 分の 1 の周波数のパルスを入力したときに、当該共振周波数の超音波が放射されることが期待できる。この着想に基づき、電界効果トランジスタからなる簡便なスイッチング回路を製作した。従前のニオブ酸リチウム基板表面で、くし形電極の共振周波数 9.6MHz の 20 分の 1 の周波数のパルスを印加した際に、9.6MHz のレイリー波が伝搬していることを確認した。また、ガラス基板と圧電振動子を組み合わせ、同様の駆動によりガラス基板表面に弾性波が伝搬していることを確認した。将来的にシート状超音波振動子において、この励振方法が適用できることを意味する。

ガラス基板への超音波振動の励振において、圧電振動子とガラス基板の音響結合が鍵となる。結合を促進する材料として比較実験を行った結果、粘度の低いシリコンオイルをカップラント材としたときに強い振動が見られる傾向にあった。

(2) 自然な「書き味」の提示 この検討をするために、「テレタッチ」の概念 (図 1) を導入した。手元の皮膚感覚ディスプレイをペンでなぞると、遠隔地にあるロボットがなぞり動作と同期して対象物の表面を同じペンでなぞる。なぞり動作・対象物の表面テクスチャに応じてペンが振動する。その振動をセンサで検出して電気信号へ変換し、信号処理回路を通して皮膚感覚ディスプレイコントローラへ供給される。信号処理が適切であれば、皮膚感覚ディスプレイ上のペンに発生する振動は遠隔地のものと同一になり、このとき、「テレタッチが成立」とした。ペンに発生する振動が「書き味」として知覚されるため、ペンに発生する振動を定量的に測定・比較することで、「自然な」書き味の評価をすることができる。

本研究では、手元のペンと同じ構造の遠隔

地のペンを製作し、ペンにジャイロセンサを付加した。(基礎実験を通して書き味としてのペンの振動計測には回転角速度検出が適していることを見出した。)図1で遠隔地と手元のペンのそれぞれのセンサ出力が一致すれば「テレタッチが成立」したことと等価となる。(遠隔地のロボットの制御やセンサ出力の転送などは本研究のスコープ外であるため、考慮しない)

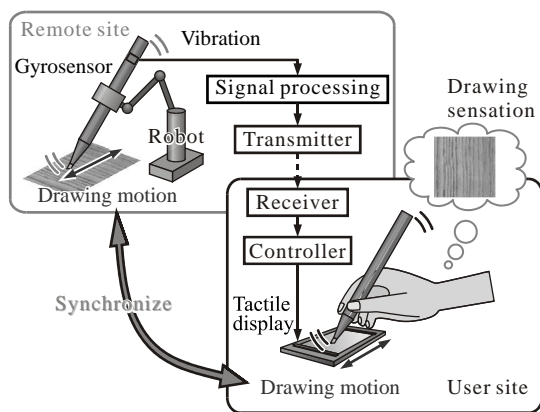


図1 ペンタブレットインターフェースによるテレタッチ

テレタッチ成立要件を考えるために、それぞれの要素が持つ伝達関数に着目した。遠隔地では、対象物表面テクスチャ $X(s)$ をペンでなぞった時にはペンが伝達関数 $G(s)$ を持ち、ペンの振動 $V(s)$ に変換される。その振動はセンサ(伝達関数 $K(s)$)により電気信号 $E(s)$ に変換される ($E(s)=G(s)K(s)X(s)$) 制御信号 $U(s)$ により、手元の皮膚感覚ディスプレイが制御され、結果、ペンの振動 $V'(s)$ が励起される。 ($V'(s)=H(s)U(s)$) このとき、皮膚感覚ディスプレイは伝達関数 $H(s)$ を持つ。このとき、図中信号処理回路が $K(s)H(s)$ の逆数の伝達関数を持つとき、制御信号は $U(s) = E(s) / K(s)H(s)$ となる。最終的に手元のペンに発生する振動 $V'(s) = H(s)U(s) = H(s) E(s) / K(s)H(s) = H(s) G(s)K(s)X(s) / K(s)H(s) = G(s)X(s) = V(s)$ となり、遠隔地のペンの振動と一致し、テレタッチは成立する。

信号処理回路実装のためには $K(s)H(s)$ を同定する必要があるが、皮膚感覚ディスプレイに着目すると、制御信号に対するペンのセンサ出力の伝達関数を同定することと等価である。制御信号として正弦波を入力し、センサ出力のゲインを計測しながら周波数を変化させて周波数応答を観測し、その結果から当該伝達関数を同定した。逆伝達関数をデジタル信号処理ユニット(DSP)にローパスフィルタとともに実装した。図中のロボットや信号伝達を省くために、遠隔地相当のペン(スキャナ)と手元相当のペンを固定し、対象物(グレーティング、木片、石片などテクスチャも持ったサンプル)と皮膚感覚ディスプレイを同一のステージ乗せてせん断方向に駆動させ、それぞれのペンの相対速度が常に同じになるようにして、テレタッチ実験を

行った。結果、双方のセンサ出力の時刻歴応答が一致し、FFT解析結果では10~100Hzの領域で結果が一致した。適切なスキャナを備え、逆伝達関数補償を適用することで、実物をなぞった際の「書き味」と同一の感触を与えられることを示した。

上記のテレタッチの概念を適用しない場合、皮膚感覚ディスプレイの制御の弾性表面波のOn/Off制御において、単一の周波数の矩形波を参照して制御するよりも、m系列信号を参照して出力される振動の周波数に揺らぎを持たせると、紙やすりをなぞった際の感覚に近くなることを実験的に示した。

「自然さ」「テレタッチ」の臨場感向上を鑑み、システムが持つべき帯域幅の検討を行った。皮膚感覚ディスプレイから出力される振動の周波数を上げていき、ユーザが感じなくなる振動閾値を計測した結果、ペン越しになぞる動作において人は4kHz程度の振動まで知覚している(当然感度は低くなる)ことを実験的に示した。よって、今後臨場感を考える際、皮膚感覚提示システムが持つべき帯域としては4kHz程度までののが妥当である。

(3) 後天的視覚障害者向けGUI補助 マウスポインタを目で追う代わりに、力覚を通してウィンドウの存在をユーザに認識させるシステムを提案した。仮想空間内にウィンドウに相当する「板」を配置し、前後方向に分散させることで、見かけ上重なったウィンドウを奥行を参照して個別に認識できるようにした。この提案に沿ってサンプルプログラムを作成した。後天的視覚障害者を想定し、晴眼者にアイマスクを装着してもらい、識別実験を行った。力覚ディスプレイそのものになっていないため、時間を要したものの、多くのユーザが同時に3つ表示されたウィンドウの中から指定されたウィンドウを識別することができた。得られた知見をもとに、総合的GUI操作補助について検討を行っていく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2件)

Takada, H., Tamon, R., Takasaki, M., Mizuno, T., Stylus-Based Tele-Touch System Using a Surface Acoustic Wave Tactile Display, International Journal of Intelligent mechatronics and Robotics, 2(4), pp.41-57, October-December 2012, 2012.12, 全文査読.

Tamon, R., Takasaki, M., Mizuno, T., Generation of Drawing Sensation by Surface Acoustic Wave Tactile Display on Graphics Tablet, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.5, No.4, pp.242-248, 2012 7, 全文査読.

〔学会発表〕(計17件)

佐藤大貴,高崎正也,水野毅,石野裕二,
シート状超音波振動子を用いた皮膚感覚
ディスプレイ 第4報 シート状超音波
振動子に用いるカップラントの評価 ,
ROBOMECH2014, 2014.5.26, 富山市総合
体育館(富山).

ムハマド・ファリス,水野毅,高崎正也:
Falcon を用いた力触覚提示による視覚障
害者のための GUI 操作補助,電子情報通
信学会ニューマン情報処理, 2014.03.18,
東京大学(東京).

Takasaki, M., Tactile Feedback Technology
using Surface Acoustic Wave, 5th
International Conference of Asian Society for
Precision Engineering and Nanotechnology
(ASPEN2013), 招待講演, 2013.11.13, 台
北(台湾)

多門良,高崎正也,水野毅, Hannes
Bleuler:力覚フィードバックを用いた視覚
障害者に対するマルチウィンドウ方式
GUI の操作補助,第13回「運動と振動の
制御」シンポジウム, 2013.8.28, 九州産
業大学(福岡)

佐藤大貴,石野裕二,高崎正也,水野毅:
テレタッチシステムの実現に向けた指ダ
ミーの個体差の検討,第13回「運動と振
動の制御」シンポジウム, 2013.8.28, 九
州産業大学(福岡)

高田裕樹,多門良,高崎正也,水野毅,
弾性表面波皮膚感覚ディスプレイにおけ
る知覚閾値の測定, ROBOMECH2013,
2013.5.22, つくば国際会議場(茨城).

高田裕樹,多門良,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-ペンの振動の高周波成分への
着目-,計測自動制御学会第13回システム
インテグレーション部門大会講演論文集,
pp.1334-1336, 2012.12.19, 福岡国際会議
場(福岡)

多門良,高田裕樹,高崎正也,水野毅:
パルス波による弾性表面波の励振と皮膚
感覚ディスプレイへの応用,
ROBOMECH2012, 1A1-B05, 2012.05.28,
アクトシティ浜松(静岡)

林直治,高田裕樹,高崎正也,水野毅:
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 テレタッチに
用いる指ダミーの伝達関数の同定 ,
ROBOMECH2012, 1A1-B04, 2012.05.28, ア
クトシティ浜松(静岡)

林直治,高崎正也,水野毅: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 伝達関数の違いを考慮し
た制御システムの提案 ,第12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, 2011.12.24, 京都大学(京
都)

高田裕樹,多門良,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 複数試料によるレタッチの
評価 ,第12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,
2011.12.24, 京都大学(京都)

高崎正也,須崎道広,水野毅:シート状
超音波振動子を用いた皮膚感覚ディス
プレイ 第3報 振動子特性 ,第12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, 2011.12.23, 京都大学(京
都)

高崎正也,須崎道広,高田裕樹,水野毅:
シート状超音波振動子の開発と皮膚感覚
ディスプレイへの応用,第32回超音波
エレクトロニクス基礎と応用に関する
シンポジウム, 2011.11.8, 京都大学(京都)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高崎 正也 (TAKASAKI, Masaya)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号: 10333486