

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25280073

研究課題名(和文) タブレット型端末を用いるコミュニケーションロボットの開発と疑似的触感の生成

研究課題名(英文) Development of a communication robot that moves a tablet computer for tactile feedback

研究代表者

熊澤 逸夫 (Kumazawa, Itsuo)

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：70186469

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：ステージ上に置いたタブレットを動かしてタッチパネルに触れている指に触覚情報を提示するコミュニケーションロボットを開発した。ステージ上面と端末下面の間に圧力センサを6個配置して、計測される押圧力の情報を用いてタッチ面の上下動の動作量や動作速度を制御することにより、タブレット端末のタッチパネルに触れている指にタッチ面の仮想的な3次元形状や硬さ、柔らかさを表現した。さらに1年延長し、モバイル用途に適した小型軽量版を試作し、モバイル端末の裏面に当てた指に裏面から触覚情報を提示して3次元形状や柔らかさ硬さの触覚情報を提示することに成功した。

研究成果の概要(英文)：A communication robot that moves a tablet put on its stage and provides tactile feedback to the fingers on its touch panel is developed. Six pressure sensors are implemented to detect the pressure given from a finger to the touch panel. The feeling of stiffness and touching a 3D shape is represented by moving the tablet and giving a force to the finger depending on the pressure. The project is extended with a year and a handheld version of the communication robot is developed. The robot provides tactile feedback to the fingers on the back of a smartphone. It detects the finger action and the relative position of the smartphone against the face using an accelerometer, a rotary encoder, a pressure sensor and an image sensor and operations for the smartphone are performed intuitively in an interactive fashion using these sensors and the tactile feedback.

研究分野：画像認識、画像処理、ユーザインターフェイス

キーワード：触覚 圧力センサ タブレット端末 タッチパネル 硬さ柔らかさの触感 凸凹の触感 マンマシンインタラクション ユーザインターフェイス

1. 研究開始当初の背景

本課題に関連した既存研究としては、ロボット技術を用いた人とコンピュータ間のコミュニケーションの手段として使用した岐阜大の川崎等による研究(2010 H.Kawasaki)がある。ユーザは指をロボットの指に密着しながら動かすと、ロボットの指は指先の位置や速度に応じて、人の指先に異なる力覚フィードバックを返す。これによりユーザは様々な物体に触り、操作している触感を仮想的に得ることができた。

しかしながら、こうした既存研究では、装置が大掛かりであり、ユーザの指が拘束される点が問題であった。本課題では図1に示す利用形態を想定することによって、「指に一切の拘束を与えず」に、一般ユーザが日常生活の中で気軽に触覚情報をコミュニケーションの手段として利用できるようにすることを目標としてきた。さらに本課題では、カメラを始めとする多様なセンサの情報を統合して、ユーザの行動を予測しながら触覚フィードバックを生成することによって、「ストレスのない迅速な応答」を実現する点で既存研究に対する優位性を確保することを目指した。タブレット型端末を使った既存研究としては、本課題のように端末本体を丸ごと動かすわけではないが、タッチパネル面あるいはタッチパネル上に設けた透明アクリルパネルを動かすことで、ユーザに触覚フィードバックを与える研究が多数行われている(2005 A.Akahane, 2012 S.Norieda)。特に振動やクリック感生成のための微小変位は、既に実際の製品に応用されている。しかしながらこうした既存技術では、パネルの変位が小さく、パネルの動きの自由度も制限されていた。大きな変位、高い自由度でタッチパネルを動かすためには、本課題のようにタブレット型端末全体を丸ごと動かすアプローチが有効であるが、そのためには質量の大きな物体を大きな加速度で動かすための特殊な工夫が必要であった。

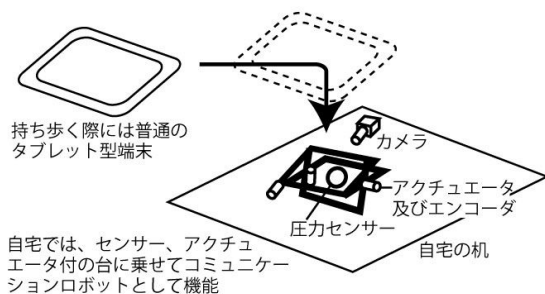


図1

指の運動に迅速に連動させて、タブレット端末全体を上下に動かし、また傾きを変えて、タッチパネルに触れている指に、仮想的な立体形状や面の硬さや柔らかさの触感を与える。また画面の表示内容と連動した本体の動きを使ってユーザと対話する。

2. 研究の目的

キーボードを備えた旧来のコンピュータや携帯電話に代わり、直観的なタッチパネルによる操作を主体としたタブレット型コンピュータやスマートフォンが急速に普及している。本課題では、こうしたタブレット型端末を通じて、人とコンピュータの新しいコミュニケーションの形態を確立することを目的として、次の技術を研究してきた。

(a) タッチパネルに触る指の運動に連動してタッチパネルを上下に動かし、また面の角度を変えることで任意の3次元形状の表面を触っている触感を仮想的に作り出す。

(b) 指のパネル上の動きと連動して、タッチパネルの上下動をアクチュエータとセンサで制御して、指に返す抗力を調整することによって、パネル表面の硬さの触感を任意に変えて知覚させる。

(c) タブレット型端末本体を丸ごと動かして、以上に加え、ジェスチャを表す。

以上の技術によって、タッチパネル面を高い自由度と十分な変位量で動かして、立体形状の触感や面の硬さ柔らかさ等の豊富な触覚情報を表現できる点が、本課題の特色となる。本課題で開発したタブレット型端末を使った新しいコミュニケーションの形態を図1に示す。この図によれば、外出時には持ち歩く通常のタブレット型端末を、帰宅時には、デスク上等に設置された「台」の上に乗せると、この「台」に実装されているカメラや姿勢、圧力センサと、タブレット型端末本体が備えているタッチセンサー等が連携して、タブレット型端末に対するユーザのアクションを検出する。そして検出したアクションに応じて、「台」が備えているアクチュエータがタブレット型端末を丸ごと動かして、その物理的な動きを通じて、ユーザのアクションに対する反応を表す。このタブレット型端末の動きは、既存の振動やクリック感生成のための微小な変位に比べて、動作量が大きく、また前後左右、上下、傾斜等、動きの自由度が高く、表現力が豊富である点に特色がある。更に多様なセンサを駆使したユーザの行動予測に基づく、応答の高速さに本研究課題の独自性がある。

3. 研究の方法

平成25年度には、それまでの予備実験と事前試作の結果(図2)の結果を踏まえ、ホイールの回転運動からクラッチで駆動エネルギーを取り出すことにより、瞬発的に強い力でタブレット端末を動かす方式を検討した。そしてこの方式の強い瞬発力を利用して、重いタブレット端末でも遅延なく大きな変位量で動かして、タッチパネル上の指の運動に対して遅延なく明瞭な触覚フィードバックを与えることを試みた。従来の方法ではタブレット端末本体のような重いものを瞬発的に動かすことは困難であったが、上記の機構によってその困難を克服することを試みた。

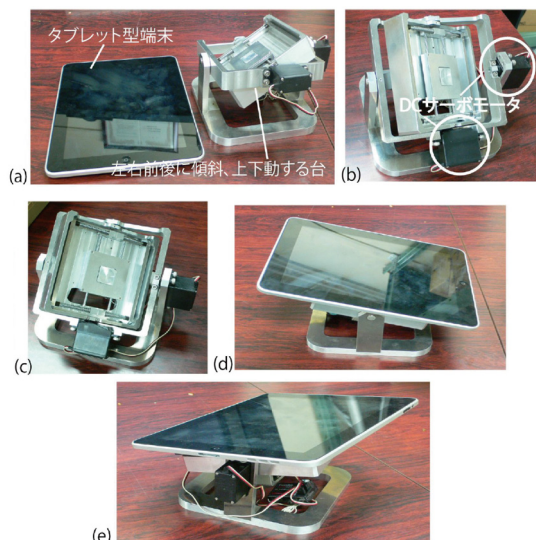


図2 タブレット端末を乗せて3自由度で姿勢を制御するステージ

図2に示す試作では、サーボモータを使用してタブレット端末を乗せたステージを動かすが、タブレット端末の質量が大きいため、サーボモータでは力が不足して十分な加速度でステージを動かすことができない。そこでサーボモータに代わり、強い瞬発力をステージに加えることのできる図3の機構を考案した。この機構については平成26年度と27年度にさまざまな改良を繰り返して合計8回の試作を行い、重いタブレット端末を乗せたステージを駆動するのに十分な性能を確保することができた。

さらに平成27年度から28年度にかけて、図4に示すようにステージとタブレットの間に圧力センサを設置して、タブレットに指から加わる力を圧力センサで検出して、圧力に応じてステージを駆動するモータの力を変えて、仮想的に硬さと柔らかさの感触を指に与えることを試みた。また素早く動く指の運動を検出するためにフレームレートの高い光学マウスのセンサを利用した独自の指運動追跡方式を開発して、タブレット端末上の指の運動を指がタッチパネルに接触する前に空中で検出して、その運動に応じてタブレット端末を動かすことによって指に様々な触覚情報を提示する技術を開発した。

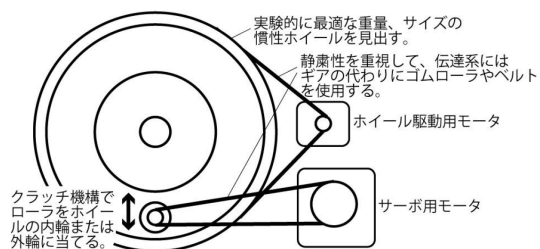


図3 慣性ホイール（フライホイール）を利用して強い瞬発力を生成し、ステージとその上に載ったタブレットを急峻に動かすためのアクチュエータの原理

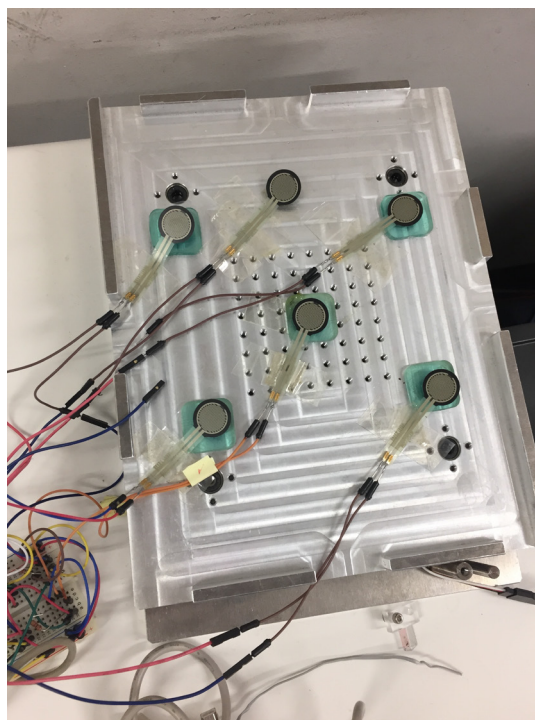


図4 ステージ上に設置した圧力センサ

以上の各手法によって、カメラ、圧力センサ、タッチパネル等から与えられる指の運動情報を用いて、タッチパネル（タブレット端末本体）の上下動、傾斜角度を、指の運動に最適に連動させて制御するプログラムを開発して、タッチパネル上の指にリアルな3次元形状と面の柔らかさや硬さの触感を与える方法を研究した。そしてこうして指が感じる3次元形状や面の硬軟度の情報を応用して、ゲームや各種オペレーションの操作性を改善することを試みた。

以上の各手法の効果については、様々な評価実験を行った。まず重量のあるタブレット型端末本体を丸ごと十分な変位量で高速に動かすために、各種アクチュエータが生成する力が十分であるかを物理的に評価した。通常のコイルモータでは始動時にロータの回転速度の立ち上がりに時間を要し、さらにそれがギヤの減速増力を経ると大きな遅延を生じるため、指の運動に同期して瞬発的に大きなトルクを得ることは難しいことが明らかになった。特にDCモータでは、十分な回転数に達していない状況で、瞬発力を得ようとして大きな電圧をかけると、逆起電力が低い状態にあるため、コイルに大電流が流れ、モータが焼ける原因となった。

またこの応答の遅延が操作性に及ぼす影響を心理学的に評価した。その結果、タッチパネル上の指の運動に対して、触覚フィードバックを与えるタイミングに遅延があると、仮想的な3次元形状や、表面の硬さや柔らかさの触感をリアルに感じられないということであった。したがって応答の高速さと大きな瞬発力を両立させることが、重要な課題となった。この課題は、図3に示す独自のアク

チュエータによって解決できることが評価実験によって確認できた。図3の機構では、重量があるホイールの回転の慣性を利用して、その回転エネルギーをクラッチの機構で瞬間的に取り出して、タブレット型端末を駆動する。電気エネルギーを慣性ホイールの運動エネルギーに蓄積して利用するので、強い力が欲しいときに蓄積されている運動エネルギーから力を得るようにし、モータに大電流を流さずに済むようにした。本課題が対象とする装置は、産業用ロボットや研究用とは異なり、日常のコミュニケーションに使うので、モータの焼き付き等の問題を防いで信頼性を向上することは重要であり、そのために慣性ホイールを用いることは有効であることが明らかになった。また安価なモータで高速な応答と大きな瞬発力が得られるため、装置のコストを下げることができた。

図3のアクチュエータでは、瞬間的に大きな力と変位量を取り出せる利点がある半面で、力の大きさや変位の速度を任意に制御できない点がデメリットとなる。この問題を解消するために、図3のアクチュエータと通常のサーボモータを組み合わせて使うハイブリッド方式を開発した。

このようにアクチュエータの改良を進めると並行して、図4に示すようにステージ上面と端末下面の間に圧力センサを6個配置して、それらの検出値に基づき、指からタッチパネルに加えられる押圧力を推定するアルゴリズムを開発した。この圧力については、物理的、定量的な力の大きさだけでなく、ユーザが感じる主観的な押圧力との関係も重要であるので、被験者を通じた心理実験を実施して、センサ検出値と主観的な押圧力の感覚との関係を明らかにした。こうして求めた押圧力の情報を用いてタッチ面の上下動の動作量や動作速度を制御することにより、タブレット端末のタッチパネルに触れている指にタッチ面の仮想的な3次元形状や硬さ、柔らかさを表現し、複数の被験者を通じた心理実験により、表現のリアリティ(実際の物体を触った時の形状、硬さ、柔らかさの知覚との差異)を評価した。このリアリティを向上するため、形状や硬さ柔らかさの知覚の自然さに影響する要因を多数の被験者に対する主観評価と定量的評価を通じて確認し、センサで検出した指の動きや押圧力に対して、Actuated Stageの上下動の制御を最適化することによって、リアリティを向上した。

4. 研究成果

本課題では、タブレット型端末の操作に対して豊富な触覚情報を遅延なくフィードバックすることに成功し、「動くタブレット端末」をロボットのように使う、新しい形態のコミュニケーションを提案し、その基盤となるハードウェアを開発した。

このハードウェアを従来のアクチュエータで駆動する場合、重いタブレット端末を大きな加速度で動かすのに必要な強い力を遅

延なく生成することが難しかったため、フライホイールとクラッチを用いる独自のアクチュエータを開発し、その効果を確認した。

例えば、タッチパネル面に指が素早くタッチし、面上を素早く滑る場合にも、その素早い動きに遅延なく運動して、高速にタッチパネル面を上下動できるようになった。このような迅速な応答により、ユーザにストレスを感じさせずに、3次元形状と面の硬さ及び柔らかさ、そして面のテクスチャーを仮想的に知覚させることができた。そして、これらの知覚がよりリアルに感じられるように、評価実験を行いながら、タブレット端末の上下動を制御するプログラムを開発し、リアルな3次元形状や硬さ軟らかさ、面のざらざら感などの質感の触感をタブレット端末上で知覚させ、こうした触覚情報を視覚情報や聴覚情報と組み合わせる新しい形のコミュニケーションを検討した。

当研究課題は27年度で終了する予定であったが、試作していた疑似触感を生成するコミュニケーションロボットのうち、モバイル用途に適した小型軽量版の試作が27年度中に終了しなかったため、28年度にまで延長することになった。この試作では、スマートフォンやタブレット端末等のモバイル端末の各種操作やアプリケーションに触覚情報を付加して操作性の向上を試みている。モバイル端末の裏面に当てた指に裏面から触覚情報を提示して、三次元形状や柔らかさ硬さの触覚情報、そしてざらざらしたテクスチャーや凹凸感の感触を提示することを試みた。試作は図5に示すように完了し、モバイル端末背面で、指の運動を各種センサで検出するとともにその運動に連動して、ボイスコイルを基本にした複数のアクチュエータで遅延なく指に触覚情報を提示することを可能とした。

このコミュニケーションロボットでは、モバイル用途に適するように小型、軽量、低消

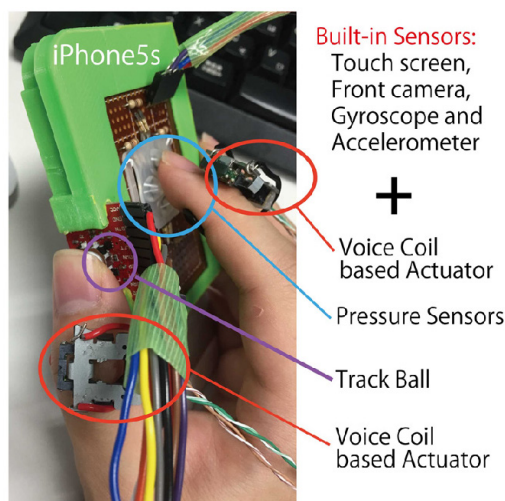


図5 スマートフォン背面で使用するモバイル用コミュニケーションロボットの開発

費電力の目標は達成できたが、指に加えることのできる力の強さや変位の大きさが目標に到達できず、明瞭な触覚刺激を得るには至らなかった。しかしながら、注意すれば識別できる程度の強さの刺激は生成でき、かつ遅延なく迅速に刺激を生成できる点で従来方式よりも優れた触覚刺激装置を構成できた。当試作装置を利用して空中の仮想ボタンの操作や仮想物体への接触時の触覚刺激を生成し、誤操作を低減したり、現実感を向上したりできることを実験的に確認した。

また上記の刺激の明瞭さを向上して、様々な触覚を生成するために図6、図7、図8の機構を試作した。それぞれ、振動モータの配列、端末の厚さを変える機構そして端末裏で指に二次元方向の力を加える機構で多様な触覚刺激を生成することができる。

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)

① Combined Use of Rear Touch Gestures and Facial Feature Detection to Achieve Single-Handed Navigation of Mobile Devices. Yoshikazu Onuki, Itsuo Kumazawa. IEEE Transactions on Human-Machine Systems. Volume 46. No. 5. pp. 684 - 693. Oct 2016. (査読あり)

② Single-Handed Cursor Control Technique Optimized for Rear Touch Operation and Its Usability. Yoshikazu Onuki, Itsuo Kumazawa. International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). Volume 7. Number 1. Jan 2016. (査読あり).

[学会発表] (計 2件)

① Various Forms of Tactile Feedback Displayed on the Back of the Tablet: Latency Minimized by Using Audio Signal to Control Actuators. Itsuo Kumazawa, Kyohei Sugiyama, Tsukasa Hayashi, Yasuhiro Takatori, Shunsuke Ono. IEEE Virtual Reality Conference 2015. Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference 2015. pp. 335-336. Mar 2015. (査読あり)

② What Can We Feel on the Back of the Tablet? -- A Thin Mechanism to Display Two Dimensional Motion on the Back and Its Characteristics. Itsuo Kumazawa, Minori Takao, Yusuke Sasaki, Shunsuke Ono. IEEE Virtual Reality Conference 2015. Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference 2015. pp. 213-214. Mar 2015. (査読あり)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

熊澤 逸夫 (KUMAZAWA, Itsuo)
東京工業大学・科学技術創成

研究院・教授

研究者番号：70186469

(2) 研究分担者

佐藤 誠 (SATO, Makoto)

首都大学東京・システムデザ

イン研究科・教授

研究者番号：50114872

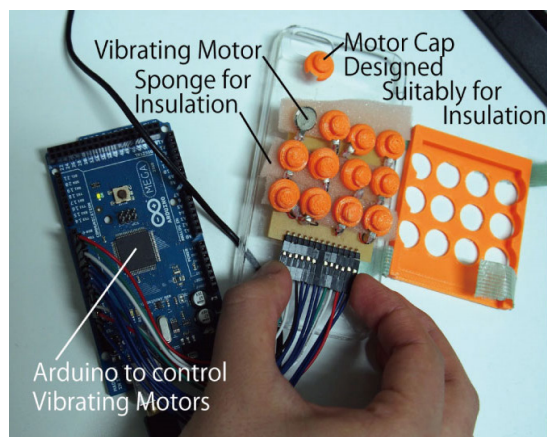


図6 スマートフォン裏側で3行4列に配列した振動モータで空間的、時間的に変化する振動パターンを提示する機構の試作。



図7 スマートフォンを2枚重ねて表裏のタッチパネルで指位置を検出できるようにして、2枚のスマートフォンの間隔をモータで変えることにより、厚みを変えて触覚情報を提示する試作。



図8 スマートフォン裏側で二次元に動いて指に力を提示する機構の試作。