

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K12472

研究課題名(和文)接線振動型仮想力覚提示による行動誘導の研究

研究課題名(英文)Study on behavior induction by tangential vibration type virtual force sensation

研究代表者

暦本 純一(Rekimoto, Junichi)

東京大学・大学院情報学環・教授

研究者番号：20463896

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：人間の触覚の非線形性により非対称に振動する振動子を把持すると仮想的な力覚を感じることを応用し、フィードバックやナビゲーション手段等に適用し、利用者に行き先方向に牽引力を感じさせるなどの応用可能性について検証した。積層型 piezo 振動子を用いた一次元振動子は安定した性能を有し、利用者を左右に誘導するなどの応用に適することが検証できた。振動子を複数個組み合わせ二次元空間での仮想力覚提示、および機器を把持するのではなく接線方向に振動を与えることでも仮想力覚が提示可能かについて検証した。二次元空間での力覚提示は一次元と比較して正確さが一部及ばないが、行動誘引応用などへの適用可能性を検証できた。

研究成果の概要(英文)：This research topic focuses on applying the feeling of virtual haptic sense when grasping the asymmetrically oscillating device due to the nonlinearity of the human tactile sense and applying it to feedback, navigation means, to make the user feel the traction force in the direction of the destination. It was verified that the one-dimensional device using the laminated piezoelectric transducer has stable performance and is suitable for applications such as guiding the user. We also verified whether a virtual force sense could be presented by combining a plurality of transducers and presenting a virtual force sensation in a two-dimensional space and giving vibration in a tangential direction rather than gripping the device. The force sense presentation in 2D space is partially over precision compared to 1D, but we could still verify the applicability to behavior attractiveness applications and others.

研究分野：ヒューマンコンピュータインタラクション

キーワード：触覚インタフェース 仮想力覚 ヒューマンコンピュータインタラクション ユーザインタフェース
バーチャルリアリティ

1. 研究開始当初の背景

触覚インタフェースは、仮想空間でのフィードバック、携帯機器の操作の補助、さらには視覚障害者の誘導など多くの応用展開が可能な技術である。その中で、本研究課題では仮想力覚に着目した。

非対称に振動する振動子を指で把持すると、人間の触覚の非線形性により振動だけではなく仮想の力覚を感じる。本研究ではこの原理を応用し、利用者の空間誘導などの応用への適用が可能であること、さらに、指で振動子を把持せずに指腹への接線方向の振動を与えることにより、前後左右の2自由度の仮想力覚を提示可能な構成の検証を行う。

この構造は、より質量の大きな携帯装置の一部（たとえばスマートフォンのボタンや視覚障害者用杖上に設置されたボタン）を振動させることで、携帯装置を持っている利用者に移動方向を提示することを可能にする。仮想力覚と通常の振動パターンによる情報提示も可能になる。本研究では、この原理により現実空間での行動誘導に適用できる仮想力覚提示技術の実現性を検証する。

2. 研究の目的

人間の触覚における刺激と知覚の非線形性 (Stevens の冪法則 (Stevens' s power law)) により、非対称に振動する振動子を把持すると、本来は存在しない仮想的な力覚を感じることができる。たとえば機器が押されたり引っ張られたりする感覚を振動波形のみから提示することができる。

提案者は、この原理に基づいて従来よりも大幅に小型軽量(重量5.2g)の仮想力覚提示装置を開発し、国内学会 WISS, 国際学会 SIGGRAPH E-tech, ACM UIST 等での公開展示で数百名の体験者に対して仮想力覚の効果を検証した。この構造はナビゲーション手段として利用者に行き先方向に牽引力を感じさせるなどの応用が可能で、視覚障害者の行動誘導にも有効であると期待される。

しかしながら、現状の構造は、小さな振動子を複数の指で把持する必要がある、このままでは他の携帯機器(たとえばスマートフォンなど)に組み込むことが困難である。

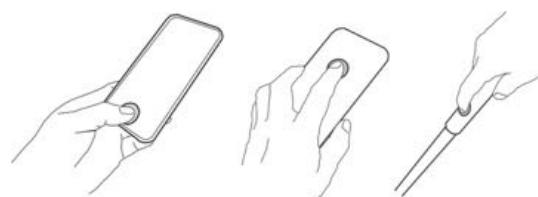
また、携帯機器全体を振動させると、振動をより強くしなければ利用者が感じることができないが、より多くの電力を必要とするのみならず、振動を感じる部位が指先ではなく携帯機器を保持している手の平となり、仮想力覚の効果が十分に感じられないという問題があった。

そこで、本研究課題では、従来型の仮想力覚振動子をさらに小型にするために、積層型の piezo 振動子を用いた構成についても仮想力覚が発生するかどうかを検証する。

さらに、装置を把持せずとも、単一の指の

腹に接線方向の振動を与えるだけでも同様の仮想力覚効果が得られるかどうかを検証する。この場合、スマートフォンなどの携帯機器全体を振動することなしに、その一部(たとえばスマートフォンのホームボタン、あるいは機器の背面の一部分)を振動させることで仮想力覚が得られる。また、振動子を縦横方向に組み合わせ配置し、それぞれの振動子の位相および振幅を制御し、方向が可変な合成振動を生成することで、力覚の提示方向を変化させることが可能であることも原理確認した。これは、たとえば視覚障害者用の杖の表面にこのような振動部位を設けることで、視覚障害者の行動誘導にも供することが可能になる。

本研究が想定する仮想力覚振動子の応用想定図を以下に示す：

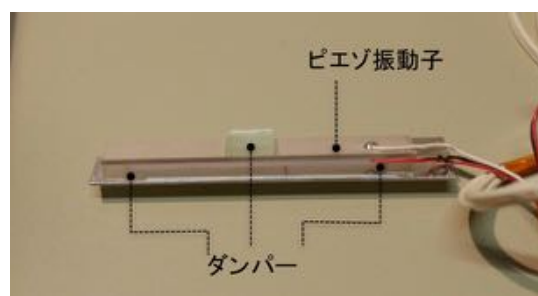


仮想力覚振動子の設置想定例

本研究ではこのような原理に基づいた新しい触覚提示装置を構築し、実際に現実空間での行動誘導が可能かどうかを検証することが目的となる。

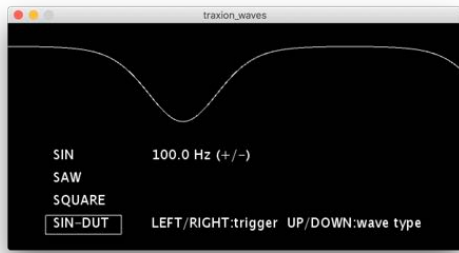
3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、機器に組み込める振動子を積層型の piezo アクチュエーターを用いて実現し、その特性を利用者実験によって明らかにする。



積層型 piezo 振動子の構造

上図は、積層型 piezo 振動子の構造を示したものである。左右および中央にダンパーを配し、実際にはこの構造を筐体に格納する。各種の振動波形の実験を可能とするために、音響信号を、piezo に必要な電圧に昇圧する駆動回路を作成した。また、各種の波形を生成する実験環境を構築した(以下は実験環境の画面例)。



制御信号発生インタフェース画面例

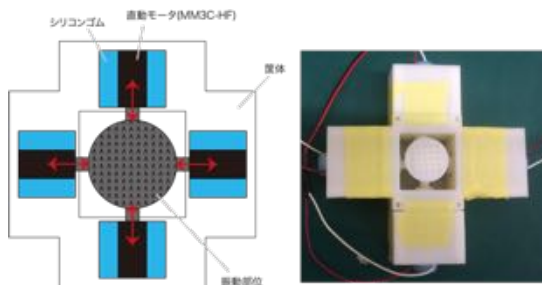
本構成により、積層ピエゾ型の振動子でも仮想力覚が発生することを検証した。

従来のモーターや電磁石を用いた構造と比較して、与えた駆動電圧をより忠実に振動として再現できていることを振動パターンのレーザー測距装置(キーエンス LK-G5000)によって確認した。

非線形振動波形源としては、三角波、矩形波(デューティ比を非対称となるように調整)のいずれでも仮想力覚の発生を確認できた。また正弦波を非対称に調整したもの(上図の制御ソフト画面例で提示されているもの)でも仮想力覚が発生し、振動子から発生するノイズが最も小さいことを確認できた。

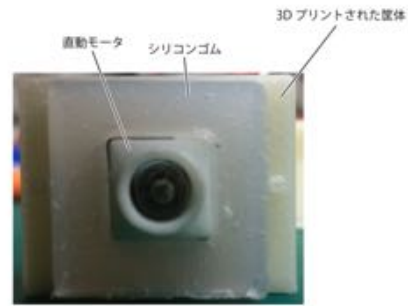
以上から、一次元の仮想力覚発生原理として、従来知られている振動アクチュエーターに加えて、積層型ピエゾ振動子も利用可能であることが確認できた。このことから、左右方向の歩行誘導など、振動子を指に把持して利用する応用においては、本課題で作成した機構が適用可能であるといえる。

以上の知見に基づき、さらに、振動子を水平・垂直の二方向に設置し、振動の合成により二次元の自由度で振動を発生させ、単一指への一自由度ないし二自由度の接線方向の振動刺激を与えることができる装置を開発した(下図)。



二自由度振動提示装置の構成

本構成ではシリコンゴム(Ecoflex 00-50)をダンパーとして振動子の周囲に設置し、それぞれの振動子の振動方向以外の二自由度の振動の余地を確保している。



シリコンゴムによる振動子と振動板の結合

このような構成を有することで、上下左右方向の非対称振動に加え、上下左右の振動を合成することにより斜め方向の振動を提示することが可能となる。



振動板の3Dプリンタによる形成例

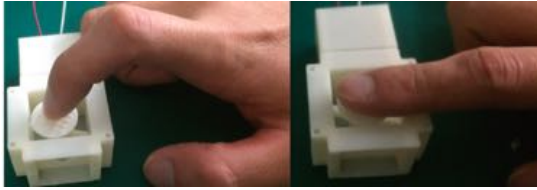
また、利用者が指で触れる振動部位は上図に示すような直径18mmの円盤型の形状であり、指と接触する部分および振動子との接合部分は、3Dプリンタによって成形され、表面に凹凸加工を施すなど、種々のテクスチャーをもった部品を成形し、評価することが可能な構成としている。



振動板の移動の状況(高速カメラ960fpsで撮影)

上図に、振動板上で平面方向の振動が発生している様子を、高速カメラ(960fps)で撮影した様子を示す。水平方向および垂直方向の振動が合成され、斜め方向の遷移が発生していることが確認できた。

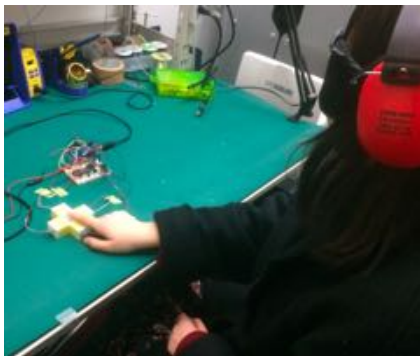
この機構を用いて、利用者が指で振動面に触れることで二自由度の振動を感じることができる。



振動板に単一指を当てている例(屈曲条件、伸展条件)

上図に、機器を把持せずに指で振動子に触れている様子を示す。この場合、指には接線方向の振動刺激が与えられている。図に示すように、指の先で触れている場合、指の腹で触れている場合の評価を行った。

評価実験に用いる環境では、下図に示すように、実験参加者にはイヤーマフ・耳栓・アイマスクを装着してもらい、振動子そのものから発生する音および視認による誤誘導などの影響がないように配慮した。この構成で、単純な一次元方向の振動、上下、左右の振動、またそれらを複合した斜め方向の振動について、実験参加者の把握した仮想力覚を評価した。



評価実験環境

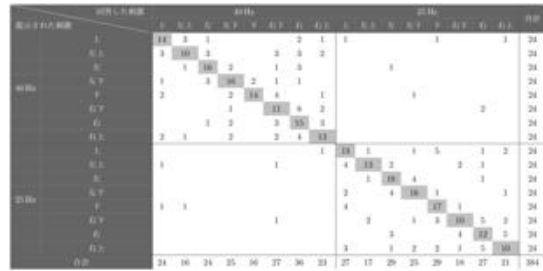
11 人の実験参加者が評価実験に参加した。実験手続きの不備により三人がサンプルから取り除かれ、最終的な分析には 8 人の実験参加者のデータを用いた。8 人の参加者の平均年齢は 24.4 歳(標準偏差:1.51)であり、うち六人が男性、二人が女性であった。また、実験参加者のうち 7 人は右利き、一人が左利きであった。

上下水平の刺激提示に加え、斜め方向の振動提示を併せた 8 種類の刺激提示について、その方向を認識できるかを評価した。また、複数の振動周波数(40Hz, 25Hz)について、それを弁別できるかも併せて評価した。一種類の刺激は一セッション内で合計三回提示されたため、提示された刺激の総数は 48 回(8 方向 × 2 種類の周波数 × 3 回の繰り返し)である。順序効果を考慮し、刺激の提示順はランダム化された。

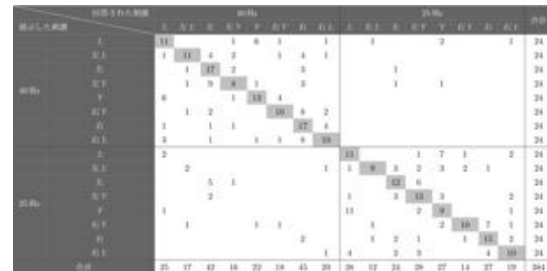
実験には、上図で示したような二種類の指の接し方条件による評価を行った。それぞれのセッションの間には前の実験の効果残余を

相殺するために、30 分の時間間隔を置いていた。

評価実験の概要を以下のテーブルで示す。



指を曲げた状態(屈曲条件)で刺激を提示した際の全実験参加者の混同行列



指を伸ばした状態(伸展条件)で刺激を提示した際の全実験参加者の混同行列

実験の結果、力覚の方向の正答率のみに注目した場合、正答率は 54.8% であった。ただし、表から分かるように、実験参加者が回答を誤った際であっても 45 度ずれた位置の回答(例:左方向の刺激を提示した際に左上もしくは左下と答える)を回答している状況が多い。これを考慮し、45 度の誤差を許容した際の正答率は 79.6% であった。

また、周波数の正答率のみに着目した場合、正答率は 94.9% であった。周波数の正答率を一般化線形混合モデルを用いてフィッティングしたところ、指の曲げ具合・刺激の提示順・方向・周波数の交互作用がパラメータとして残った。各方向のパラメータを多重比較した結果、有意差があるペアは存在しなかった。

以上から、接線方向の二自由度(8 方向)の刺激提示を直接行った場合、単独の回答では触覚誘導として用いるには正確さが不足しているとの結果になった。しかしながら、45 度の誤差を許容する場合は正確度が増すので、刺激誘導として、前後左右を提示する応用や、方向が次第に変化する応用では本機構を利用できる可能性を確認できた。

また、刺激周波数に関する弁別能力は正確であったので、仮想力覚刺激と併用できる可能性を確認できた。たとえば、前方方向に誘導している際に、仮想力覚により方向を提示しながらも、目的地との距離を振動周波数の切り替えによって同時に提示することが考えられる。また、方向が切り替わる際に周波数を変化させて、利用者のその遷移をより明確に認識させることが考えられる。

このように、仮想力覚の方向提示能力に、

周波数変化などの情報を重畳させることで情報提示能力を向上させることができることが判明した。

4. 研究成果

本課題研究期間の研究及び実験により、以下を成果として得ることができた。

- (1) 積層型ピエゾ振動子による仮装力覚提示装置を開発することができた。従来知られているものよりもさらに小型で、駆動振動波形に対してもより追従性の高い性能を有している。
- (2) 二自由度・接線方向の振動刺激提示が可能な提示装置を開発した。振動子を複数組みあわせて、振動子と振動板をシリコンゴムで結合することで、個々の振動子の振動が振動板上で合成されることを可能にした。振動板上での複数の触感を提示可能なように、振動板上のテクスチャーを3Dプリンタで成形し交換可能となるようにした。
- (3) 上記の構成で振動方向の弁別、駆動振動周波数の弁別につき、指の伸展条件、屈曲条件について利用者評価実験を行った(実験者参加者数8名)。この結果、単独の八方向弁別評価実験の回答正答率は54.8%であるものの、両隣(45度)の範囲内に収まっている回答正答率は79.6%であり、仮想力覚による方向誘導などの可能性を検証できた。
- (4) 提示周波数を弁別する評価実験では94.9%の正答率を得た。これにより、仮想力覚提示中に周波数の変化によって情報を重畳提示する可能性が示唆された。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

- (1) ElasticVR: Providing Multi-level Active and Passive Force Feedback in Virtual Reality Using Elasticity, Hsin-Ruey Tsai, Jun Rekimoto, CHI EA '18: Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems(国際学会・査読付)(2018).

- (2) Jun Rekimoto, Living AR, Singularity University Japan Summit(招待講演), (2017)

〔図書〕(計 1 件)

- (1) 暦本純一(著・編)「オーグメンテッド・ヒューマン」AIと人体科学の融合による人機一体、究極のIFが創る未来, エヌ・ティー・エス(2018), 512p.

〔その他〕

ホームページ等

<http://lab.rekimoto.org/projects/traxion>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

暦本 純一 (REKIMOTO, JUNICHI)
東京大学・大学院情報学環・教授
研究者番号: 20463896

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

野澤 和徳 (NOZAWA, KAZUNORI)
東京大学・教養学部学際科学科・4年生

Hsin-Ruey Tsai (Tsai, Hsin-Ruey)
東京大学・大学院情報学環・国際研究員
Department of Computer Science and Information Engineering, National Taiwan University, Taiwan