

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26540101

研究課題名(和文) 立体映像に触覚を付加するウェアラブルハプティック技術の開発

研究課題名(英文) Wearable haptic technology for enhancing 3D image

研究代表者

藤田 欣也 (Fujita, Kinya)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30209051

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、指先への3自由度の力や、手への反力分布を複数のアクチュエータを用いた代替提示するウェアラブルなハプティックデバイスを開発した。また、手の各部とVR物体の干渉を検出して手の各部に作用する反力分布を算出するレンダリングアルゴリズムを開発し、反力分布の提示がユーザの形状認知を支援する可能性を確認した。さらに、把持したVR物体が他の物体と干渉した際のトルクを強調することで、干渉状態の認知が容易になる可能性を実験的に示した。

研究成果の概要(英文)：This study developed two wearable substitutive force display devices using multiple-vibrotactile actuators. Fingertip-worn device displays three degree-of-freedom force vector at fingertips and glove-shaped device displays the force distribution at fingers and palm. An algorithm was also developed that detects the interaction between hand links and virtual object, and calculates the distribution of reaction forces. It suggested the feasibility that display of reaction force distribution facilitates the recognition of object shape. The study also suggested that enhancing the tangential force at fingertips assists the recognition of interaction between manipulating and another objects.

研究分野：ヒューマンインタフェース・バーチャルリアリティ

キーワード：バーチャルリアリティ 力覚 力覚レンダリング ファントムセンセーション 振動

1. 研究開始当初の背景

立体映像への触覚の付加，すなわち触れる3Dテレビの実現は，新たなメディアとして開発が期待されている．しかし，既存の力覚提示デバイスの大半は大型で映像提示の障害となり，非接触デバイスは最大出力の制約などの課題があった．そこで，ウェアラブルな力触覚提示デバイスの応用が期待されるが，提示が局所的で力の方向が提示できないことや，力の分布が提示できないなどの課題があった．

また，立体形状を有する物体と手指を含む手全体のインタラクションのためには，複数点の干渉を効率的に検出し，手の各部に作用する力を適切に算出できる力覚レンダリングアルゴリズムが求められていた．

さらに，手指の位置を物理的に拘束する能力を持たないウェアラブルな代替力覚提示装置を用いたVR環境において，把持した物体と他の物体の干渉状態の，指を介した適切な認知を可能にするための方法は，これまでほとんど検討されていなかった．

そこで，申請者らは振動の強度と位置を用いた手指へのウェアラブルな代替力覚提示の可能性を検討し，その実現可能性が示唆されたため，本研究課題の提案に至った．

2. 研究の目的

本課題では，手指や掌に作用する力を，指腹や掌に印加する刺激の強度と位置を動的に制御することによって提示するウェアラブル触覚提示デバイスを開発することを第一の目的とする．

また，手の各部と対象物体の複数点の干渉を効率的に検出し，手の各部に作用する反力分布を算出する力覚レンダリングアルゴリズムの開発を第二の目的とする．

さらに，ウェアラブルデバイスを用いた力覚提示では困難な，把持物体を介した間接的な接触状態の認知を支援する方法の開発を第三の目的とする．

3. 研究の方法

(1) 代替力覚提示デバイス

本研究では，振動ファントムセンセーションを利用して手指に3自由度の力覚を代替提示するデバイスと，手全体に複数の刺激を加えることで，物体形状に応じた反力分布を疑似的に提示するデバイスの2つを開発した．

ファントムセンセーションを用いた手指への3自由度代替力覚提示装置は，指腹に5個の振動子を配置し，それらの強度比を制御することで，振動感覚の強度と位置を制御する構成とした．また，垂直振動方式はコイルの指腹方向への突出が課題となることから，ボイスコイルを用いて，指腹に平行な摩擦振動を提示する方式を採用した．

手全体への代替力覚提示デバイスは，手指の各指節と手掌に複数の振動子を配置し，VR物体との接触によって各部分に生じる反力

を，各振動子の振動強度で代替表示する方式を採用した．

(2) 形状提示のための力覚レンダリング

物体との干渉によって発生する反力を算出するためのレンダリング法は，手の物体に対する侵入量に比例した力を発生するペナルティベースの方法が一般的である．しかし，ウェアラブルなデバイスはユーザの実手の動作を物理的に拘束することができないため，ユーザの手指はVR物体に大きく侵入する．その結果，本来発生するよりも大きな反力が算出されるという問題が生じる．そこで，本研究では，ユーザの実手に運動するし，かつ，VR物体にほぼ侵入しないVR手を定義して物理シミュレーションすることで，物理的に妥当な挙動と適切な反力の算出を実現する方法を採用した．

VR手は，手全体への代替力覚提示デバイスに合わせて，各指の指節を表現する14のリンクと，手掌の各部を表現する9つのリンクで構成した．また，VR手とユーザの実手の運動は，ユーザの実手とVR手の間に位置差に比例して並進力を発生するバーチャルカップリング(VC)と，それぞれ対応する関節の角度差に比例してトルクを発生する回転バーチャルカップリングを設けることで実現した．

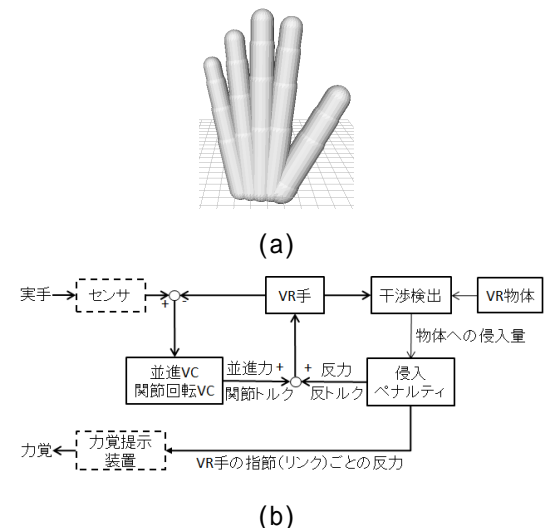


図1 (a)VR手モデル．(b)手と物体の多点干渉を検出して手の各部に提示する反力を算出するVR環境のシステム構成

ここで，通常のVC法ではVCが出力する力をユーザに提示するのが一般的であるが，VR手の各リンクには，並進力とトルクが作用するため，提示する反力を2つのVCから算出することは困難になる．そこで本研究では，図1のように，手の各リンクが干渉したVR物体を構成するポリゴンから受ける反力の総和を求めることで，手の各リンクへの反力を算出し，手の各部に代替提示する力とした．

(3) 干渉状態認知支援のための力覚強調

力覚レンダリング法には、VC 法や God Object 法などが知られているが、いずれも実際のユーザ位置と VR 物体あるいは理想のユーザ位置の差に基づく方法である。ところが、指先に装着するウェアラブル代替力覚提示装置を用いた作業において把持物体を他の物体に干渉させる作業にこれらの手法を適用すると、把持のための指の屈曲や移動のための手全体の並進による位置差に対して、干渉によって生じる把持物体の回転に起因する位置差が小さいため、干渉によるトルクの認知が困難になる問題があった。そこで本課題では、ユーザの指先とシミュレートされた VR 指先の位置差を、指の屈曲、腕の運動、手と把持物体の間の回転の 3 成分に分解し、回転によって生じる位置差にのみ大きな VC 係数を適用する強調方法を採用した。

システムは、ファントムセンセーションを用いた手指への 3 自由度代替力覚提示装置と、アドミッタンスタイプの物理シミュレータ、磁気式トラッキング装置、データグローブからなり、並進運動に対する VC 係数 800N/m に対して、回転成分には 2000N/m を適用し、手と VR 物体の間の回転による指先への接線力を強調提示することで、把持物体の干渉によるトルクの認知を支援した。

4. 研究成果

(1) 代替力覚提示デバイス

開発した指先への 3 自由度の力覚提示装置を図 2 に示す。ボイスコイルを指腹に平行に配置する振動方式を採用することで、質量 14g、長さ 45mm、幅 20mm、指腹からの突出 8.5mm が実現された。また、摩擦振動は接触圧の変化の影響を受けやすいことから、振動子の高さを調整することで接触圧を調整する機構を組み込んだ。

開発したデバイスの提示能力の評価のために、6 人の被験者を対象に 12 方向の弁別実験を実施したところ、提示した移動方向と、回答した方向の平均誤差角度は 10.3° で、標準偏差は 17.0° であり、適切振動位置の制御による反力の代替提示に利用可能であることが確認された。

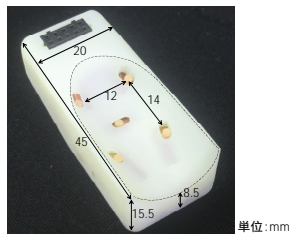


図 2 振動ファントムセンセーションを用いた指先への 3 自由度代替力覚提示デバイス

手全体への代替力覚提示デバイスは、手指の各指節 14 箇所と手掌の 9 箇所の合計 23 箇所に、応答性に優れ出力振幅によって振動周

波数が変化しない、直径 10mm の線形共振形振動モータを配置する構造とした。これらの振動子を伸縮性に優れたウーリーナイロン製の手袋に縫い付けてユーザの手指に密着させ、モータの駆動により発生した振動で反力を擬似表現した。図 3 にデバイスの概観と、使用例を示す。



図 3 複数の振動子を用いた手指への多点代替力覚提示デバイス

(2) 形状提示のための力覚レンダリング

開発した力覚レンダリングアルゴリズムと多点代替反力デバイスからなるシステムによる形状提示能力を検証するために、波長と振幅が異なる正弦波状の形状の識別実験を実施した。VR 物体は波長 100, 50, 25mm、振幅 100, 50, 25mm を組み合わせた 9 種類とし、ランダムに提示した。

実験条件は 1) 示指の指腹のみへの 1 点提示と 2) 手全体への 23 点提示の 2 条件とした。被験者は 20 代の男性 4 名と女性 2 名の計 6 名とし、2 つの条件につき各 27 回、計 54 回のタスクを課した。被験者にはシステムに慣れるため、タスク実施前に約 10 分間、視覚情報を提示した状態で、各形状の触覚を学習させた。

波長と振幅それぞれの正答率と、両者を併せた正答率を図 4 に示す。波長と振幅両方に対する正答率は、手全体に反力を代替提示することで、示指の指腹のみに提示した時の 18.5% から 26.5% に向上した。また、波長、振幅それぞれに対する正答率もチャンスレベルである 33.3% を超える結果となった。指先 1 点への提示よりも手全体への提示での正答率が高かったことは、手全体への反力分布パターンをハプティックに提示することによって VR 物体の形状認知が促進される可能性を示唆するものと考えられる。

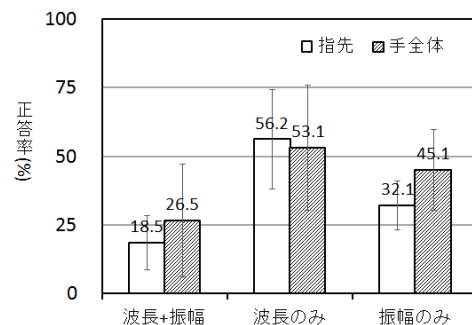


図 4 正弦波形状識別実験の結果

また、誤答時の反力の経時変化を分析したところ、シミュレートされた VR 手の挙動の不安定性が観察された。その原因は、侵入量に基づく反力計算が単純和であることが推察される。侵入体積によって反力を求めるなど、より精密な計算方法への改良が今後の課題である。

(3) 干渉状態認知支援のための力覚強調

方法で述べた、指先への 3 自由度代替力覚提示装置と物理シミュレータ等からなる VR 環境において、視覚的な手がかりが無い状態で 4 種類の傾斜角度の面をランダムに提示し、実験参加者に直方体を把持して傾斜面のなぞり作業を行わせ、ハプティック情報のみから干渉面の角度を回答させたときの、通常 VC 条件と回転成分強調 VC 条件での回答適合率を表 1 に示す。回転成分強調 VC によって指先に作用する接線力を強調することで、有意に適合率が高くなることが示された ($p < 0.01$)。

表 1 傾斜角度識別実験における回答角度適合率

通常 VC	回転成分強調 VC
53.5%	77.1%

このときの、VC 条件と回転成分強調 VC 条件のタスク開始から回答までの平均回答時間を図 5 に示す。それぞれ 20.8s と 15.0s であり、回転成分強調 VC 条件の回答時間が、有意に短いことが読み取れる ($p < 0.01$)。これらの結果は、把持物体の回転によって指先に生じる接線力のみを分離して強調提示することで、手に作用する回転トルクの認知、すなわち、VR 物体操作における干渉状態の認知が支援可能であることを示唆するものと言える。

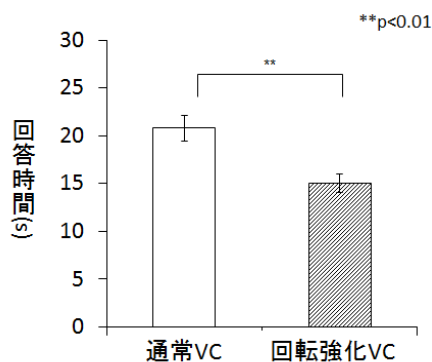


図 5 傾斜角度識別実験における通常 VC および回転成分強調 VC 条件での平均回答時間

以上のように、本課題では、複数のアクチュエータを有するウェアラブルな振動デバイスによる、指先への 3 自由度の力や手への反力分布の代替提示の可能性が確認された。また、VR 物体と手の多点干渉を検出し反力分

布を算出する方法を検討し、実験をとおして反力分布の提示がユーザの形状認知を支援する可能性を確認した。さらに、把持した VR 物体が他の物体と干渉した際のトルクを強調することで、干渉状態の認知が容易になる可能性を実験的に示した。今後の課題は、振動以外の方法による力覚の代替提示の可能性の検討と、より精密な反力分布の計算方法の検討、ならびにレンダリングの高速化である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

荒川, 小粥, 藤本, 藤田, 非接地型力覚提示装置を用いた作業におけるトルク認知支援のための回転成分強調 VC の提案, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 査読有, 22 巻, 2017, 103-112, DOI:10.18974/tvrsj.22.1_103

〔学会発表〕(計 12 件)

山崎朱華, 坂本瑛介, 広田光一, 藤本雄一郎, 藤田欣也, 多点振動提示装置を用いた手全体に対する 3D 物体形状提示, 日本バーチャルリアリティ学会第 18 回力触覚の提示と計算研究会, 2017.3.28, 東京農工大学 (東京都小金井市)

近藤恵太, 藤田欣也, VR 組み立て作業の操作性向上のための手首関節剛性の動的制御, 日本バーチャルリアリティ学会第 18 回力触覚の提示と計算研究会, 2017.3.28, 東京農工大学 (東京都小金井市)

高橋哲生, 藤本雄一郎, 藤田欣也, VR 物体の二指での安定把持のための複数剛体による指腹変形の模擬, 日本バーチャルリアリティ学会第 18 回力触覚の提示と計算研究会, 2017.3.27, 東京農工大学 (東京都小金井市)

山崎朱華, 広田光一, 藤本雄一郎, 藤田欣也, 3D 物体に対する手への多点力覚提示アルゴリズム, 日本バーチャルリアリティ学会第 21 回大会, 2016.9.14, 筑波大学 (茨城県つくば市)

渡辺泰地, 坂本瑛介, 藤本雄一郎, 藤田欣也, 能動触に対する手指への振動フィードバックによる 3 次元形状の疑似提示法の検討, 日本バーチャルリアリティ学会第 21 回大会, 2016.9.14, 筑波大学 (茨城県つくば市)

山崎朱華, 広田光一, 藤本雄一郎, 藤田欣也, 3D 物体に対する手への多点力覚提示アルゴリズム, 日本バーチャルリアリティ学会第 17 回力触覚の提示と計算研究会, 2016.3.18, 東京工業大学 (神奈川県横浜市)

武藏翔吾, 荒川大樹, 藤本雄一郎, 藤田欣也, 非接地型力覚提示装置を用いた両手作業 VR における作業支援, 日本バーチャルリアリティ学会第 20 回大会, 2015.9.9,

芝浦工業大学（東京都港区）
荒川大樹，藤本雄一郎，藤田欣也，非接地型指先力覚提示装置を用いたVR操作のための運動成分分離VCの提案，日本バーチャルリアリティ学会第20回大会，2015.9.9，芝浦工業大学（東京都港区）
Ryota Nakagawa and Kinya Fujita, Wearable 3DOF substitutive force display device based on frictional vibrotactile phantom sensation, AsiaHaptics, 2014.11.20, つくば国際会議場（茨城県つくば市）
中川瞭太，藤田欣也，摩擦振動のPSによるウェアラブル3自由度疑似力覚提示デバイス，日本バーチャルリアリティ学会第19回大会，2014.9.19，名古屋大学（愛知県名古屋市）
武藏翔吾，藤田欣也，視覚に依存しない共同物体操作者の意図理解を可能にする力覚提示法，日本バーチャルリアリティ学会第19回大会，2014.9.18，名古屋大学（愛知県名古屋市）
荒川大樹，藤田欣也，回転成分強調VCによる非接地型力覚提示装置を用いたトルク認知の支援，日本バーチャルリアリティ学会第19回大会，2014.9.18，名古屋大学（愛知県名古屋市）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 欣也（FUJITA KINYA）
東京農工大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：30209051