様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成　２９　年　　６　月　１６　日現在

機関番号：　１２１０２
研究種目：　挑戦的萌芽研究
研究期間：　2014～2016
課題番号：　２６５４００９６

研究課題名（和文）間接フィードバック型力覚提示に関する研究

研究課題名（英文）Study on Indirect Haptic Feedback

研究代表者
矢野　博明（YANO, Hiroaki）

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：８０３１２８２５

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）：力覚提示装置における動作入力と反力提示の場所を分離した間接力覚提示を提案した。力覚提示場所は手の拇指球付近とすることで、物体の形状や表面摩擦を知覚させることが可能で、直接指示、間接指示環境における視覚提示と組み合わせることで物体形状などをより理解しやすくなること、視覚と力覚情報の間に矛盾がある場合は視覚情報が優位な傾向にあることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：In this study, a haptic rendering method named indirect haptic feedback is proposed.
The method separates motion input point and reaction force exerted point of a haptic interface. A prototype system, which consists of a motion tracker, a 2-DOF haptic interface that is equipped with a force sensor, and a visual display, is developed. The system measures the position of the fingertip of a user and produces an appropriate horizontal force on the thenar eminence of the user. Through the visio-haptic interface, a user can perceive the surfaces of 3D virtual objects. In addition, the user can perceive the frictional force on the surface of the objects. Through evaluation tests, it was verified that the subjects could effectively perceive the 3D virtual objects using this system. Moreover, it was suggested that visual dominance was observed when changing the elastic modulus of the visual model of the elastic virtual object by using our system

研究分野：　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　マルチモーダルインタフェース　ハプティクインタフェース　間接指示　間接提示

１．研究開始当初の背景

計算機内にバーチャルな空間を構築し、その中で様々な作業を行うバーチャルリアリティ技術において、バーチャルな物体に触った感覚を提示するハプティックインタフェースの研究が進んでいる。様々な種類のハプティックインタフェースが提案されているが、指などの体の一部とバーチャルな物体が接触すると、接触した部位に反力などのフィードバックが行われるという仕組みは共通であった。反力提示には何らかの機械的刺激を提示するための機械が必要である。さらに、バーチャル物体が接触する身体部位に反力を提示するために機械の効果器をその部位に接触させる必要があった。効果器は質量を持つため、どうしても接触部位に機械からの慣性力等が働き自由な動きを阻害する。さらに、素手など身体で直接物体に触れることができないため例えば実物体にバーチャル物体を重畳し、実物体を素手で触りつつ、バーチャル物体からの反力を感じるような使い方ができなかった。

２．研究の目的

本研究は、上記課題を受けて、人差し指でのバーチャル物体とのインタラクションを想定した。人差し指の先端位置計測を行い、計算機内で指先とバーチャル物体との干渉チェックを行い、必要な反力を計算した後に、反力を指先ではなく別の部位に提示することで、効果器の慣性の影響を無くし、素手で実物体に触れながらバーチャル物体とのインタラクションも可能な、間接力覚提示という離帰宅提示手法を提案し、間接力覚提示の実現性と適応限界を明らかにすることを目的とした。

３．研究の方法

はじめに間接力覚提示のための力覚提示部位を検討した。次に、指先位置を検出しつつ、力覚提示部位に力覚を提示するための間接力覚提示装置のプロトタイプシステムの設計・製作を行なった。この装置を用いて、バーチャル物体の形状等を知覚させる実験を行い、間接力覚提示の有効性を検証するとともに、映像提示との組み合わせによる相乗効果について、被験者実験を行い検証した。

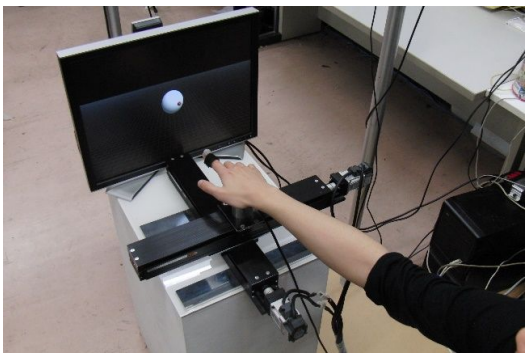


図１　間接指示・間接力覚提示システム

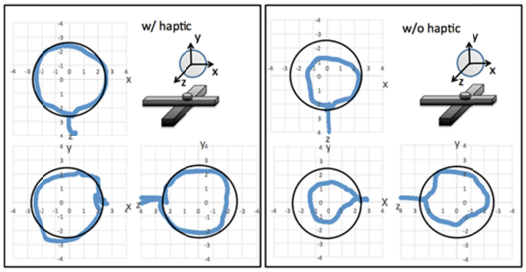


図２　３次元物体のなぞり実験（左：間接力覚提示、右：力覚提示なし）

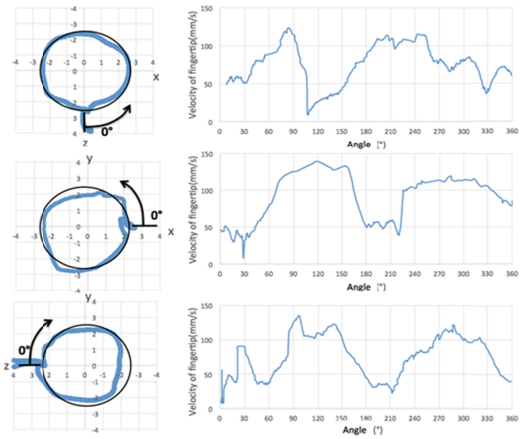


図３　間接力覚提示装置を用いてバーチャルな円筒をなぞった時の指先の移動速度

４．研究成果

まず力覚提示部位については、指先の動きを妨げず、提示部位からの力を検出する筋紡錘までの力の伝搬が、実際の指先に力が加わった場合と類似する部位とすること、力覚提示部位の皮膚が柔らかいと接触部位が変わってしまう恐れがあるため皮膚伸縮が極力少ない部位であることを考慮して、提示部位は使用する手の拇指球とした。また、皮膚変形が生じた場合でも正しい反力が提示されるように、力センサを拇指球直下に配置することとし、システムの安定性を考慮して２次元平面上での力覚を提示する X-Y プロッタ型の間接力覚提示装置を開発した。視覚ディスプレイと組み合わせ、図１に示す間接指示・間接力覚提示システムを開発した。

このシステムを用いて、バーチャル物体の表面なぞり実験を行い、立方体や球の表面をなぞらせたところ、指先を表面形状に沿って動かすことが可能であること、表面の摩擦係数による抵抗力の違いを知覚することも可能であることが明らかとなった。さらには、指先に上下方向も含めた動きを許すことで、３次元物体の映像を見ながら指先を宙に浮かせて触動作をすることで、２次元平面方向の力覚提示しか行っていないにも関わらず、３次元物体（例えば球や立方体など）の表面を正確になぞることができる（図２）ことが

わかった。特に図３に示すように、円筒面では指先から球に加えられる力の方向と円筒の法線ベクトルとのなす角が大きくなった時に指先の移動速度が大きくなっていたことから、円筒の形状に即したなぞり動作が誘発された。球をなぞるとこの現象が特に顕著で、実際の球殻をなぞっているような感覚を与えるという被験者の内観報告からも、本システムによって３次元物体を触っている感覚を得ることが可能であることが示唆された。



図４　直接指示・間接力覚提示システム

さらに、視覚提示との組み合わせの効果を調べるために、図４に示すディスプレイ面を直接指先で触れる直接指示・間接力覚提示システムを開発した。これを用いてバネダンパのメッシュで構成したバーチャル物体を視覚提示モデルと力覚提示モデルそれぞれを計算機内に定義し、指でその物体を触って変形できる環境を構築した。バネ係数、ダンパ係数を変更すると変形の様子が変わるために、視覚提示のみでも擬似力覚的な効果が得られるが、間接提示と組み合わせることで、物体の粘弾性の変化がわかりやすくなることが被験者実験から明らかとなった。また、力覚モデルのパラメータを固定したまま、視覚モデルの係数を変更して提示できる環境を用いて、被験者が触っている物体の硬さを、標準刺激となるバネダンパ係数を持つバーチャル物体の硬さを 100 として答えさせるマグニチュード推定法による被験者実験を行なった。図５に代表的な力覚モデルのパラメータでの実験結果を示す。なお、視覚モデルの番号が大きいほど視覚モデルの弾性パラメータが大きいことを意味する。実験結果からはそれぞれのモデル間で知覚された硬さに有意差があった。ただし、モデルの硬さと知覚された硬さは反比例の関係となった。これは本実験で示したバーチャル物体が我々の生活空間に存在する物体よりもかなり柔らかい物体であったため、指先を押し込んだことによる変形が局所的な変形のみとなり、見かけ上塑性変形が起こったような印象を受けていたことが被験者の内観報告からわかった。一方、バネ係数を大きくした場合、指先の物体へのめり込みに対して指先近辺だけでなく物体全体に変形が起こってゴムのような弾性感が生起されたことが被験者の内観報告からわかった。物体を操作した時の挙動の解釈が被験者の原体験に依存することが考えられるものの、これらの結果から、本システムは視覚モデルと力覚モデルの間に不一致があった場合、視覚優位の傾向にあることが示唆された。

また、実物体の触感に間接力覚提示が何らかの影響を与えることが可能かを調べるため、ディスプレイ面に異なる摩擦係数を持つ透明フィルムを貼り付け、複数の物体のバーチャル物体を提示してバーチャル物体の摩擦の大きさを答えさせる実験を行なったところ、実物体の摩擦係数に寄らず間接力覚提示による摩擦係数とほぼ同等の摩擦係数と知覚していることがわかった。実物体の摩擦に関わらず情報を提示できるというメリットでもあるが、実物体の情報を修飾することは本実験系ではできなかった。ただし、粘性が大きなフィルムでは知覚された摩擦係数が、有意差はなかったものの実際よりも小さく知覚される傾向が見られた。指先と拇指球に同時に同じような大きさの力が加わった時に指先の触知覚に何らかの影響がある可能性が示唆された。ここでは、比較的小さな摩擦力への影響を調査したが、弾性体などから指先へ比較的大きな反力が提示された時に間接力覚による触知覚が何らかの影響を与える可能性も考えられる。そのため、指先に直接力覚を提示するシステムと間接力覚提示を組み合わせたシステムを構成して影響調査を行う必要がある。これについては今後の課題としたい。

以上のことから、間接力覚提示による情報提示は従来の力覚提示装置の持つ指先の拘束感を解放することが可能な手法であり、２次元平面での力覚提示装置でありながら３次元バーチャル物体の形状を提示することが可能であることが明らかとなった。また、硬さ知覚においても視覚の影響を強く受ける傾向があることが明らかとなった。ただし、拇指球は効果器の上に乗せているだけであるため、手を上下方向に動かすと力覚提示ができなくなるため、例えばバーチャル物体の下面を触るときに摩擦力を計算するための

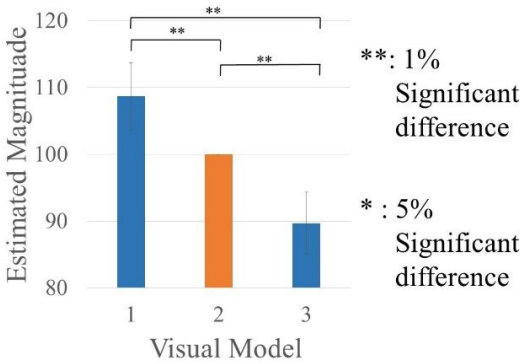


図５　直接指示･間接力覚提示システムを用いたバーチャル物体の視覚モデルの弾性係数のみを変化（力覚モデルは固定）させた時の知覚硬さ

垂直抗力が正しく求まらない（あらかじめ力センサの値から手の重さをキャンセルして使用するため手の重さまでの範囲であれば垂直抗力を擬似的に求めることは可能である）など本方式の適用限界が明らかになった。

今後は物体からの指先への反力と間接力覚提示による力覚との相互作用を明らかにするとともに、ウエアラブルな間接力覚提示による場所や素手を使った実物体とバーチャル物体とのシームレスな触知覚環境の実現を目指す。

５．主な発表論文等

〔学会発表〕（計　4 件）

1. 谷口　将一郎，矢野 博明，岩田 洋夫: ”１自由度間接提示による 2 次元 VR 物体の力覚提示”，SI2014 論文集，pp.0825-0828(2014)
2. Hiroaki Yano, Shoichiro Taniguchi, and Hiroo Iwata: “Shape and Friction Recognition of 3D Virtual Objects by Using 2-DOF Indirect Haptic Interface”, Proceedings of World Haptic Conference 2015, pp.202-207 (2015)
3. Takayuki Ishikawa, Hiroaki Yano, Hiroo Iwata:” Visual Haptic Interface by Using 2-DOF Indirect Haptic Interface”, Proc. of Asia Haptics 2016, 56B-3(2016)
4. Shun Takanaka, Hiroaki Yano, Hiroo Iwata:” 3DOF Multitouch Haptic Interface with Movable Touch Screen”, Proc. of Asia Haptics 2016, 32A-1 (2016)

〔その他〕

ホームページ等

http://intron.kz.tsukuba.ac.jp/wp-vrlab/2_dof_indirect_haptic_interface/

６．研究組織

(1)研究代表者

矢野　博明　（YANO, Hiroaki）
筑波大学・システム情報系・准教授
研究者番号：80312825

(4)研究協力者

岩田　洋夫（IWATA, Hiroo）
筑波大学・システム情報系・教授

谷口　将一郎（TANIGUCHI, Shoichiro）
筑波大学・システム情報工学研究科・博士前期課程

石川　貴之（ISHIKAWA, Takayuki）
筑波大学・システム情報工学研究科・博士前期課程

高中　駿（TAKANAKA, Shun）
筑波大学・システム情報工学研究科・博士前期課程