

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月24日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500103

研究課題名（和文）非接地型低自由度力覚提示装置によるバーチャル物体表現に関する研究

研究課題名（英文）Haptic Rendering Method by Using Non-grounded Low DOF Haptic Interface

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

研究成果の概要（和文）：本研究では低自由度力覚提示装置とフラットパネルディスプレイ、タッチセンサを組み合わせた直接指示・間接指示環境を構築し、低自由度力覚提示装置によるバーチャル物体の力覚レンダリング手法を提案した。直接指示環境と間接指示環境でのポインティング精度実験の結果、力覚提示装置を付加することで両者のパフォーマンスの差が無くなること、さらには擬似力覚と併用することで力覚提示装置単体の性能を上回る力覚知覚が可能で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 tabletop haptic display system was developed. The system consists of a 1 DOF haptic interface, a flat panel display and a multi-touch overlay. A direct pointing and in-direct pointing environment were implemented by using the system. From the result of EMG variance etc in an experiment, by adding haptic sensation, the difference of the pointing environments did not contribute greatly to the performance. In addition, a pseudo-torque rendering method was developed in this study. By combining the pseudo-torque and the haptic interface, the users can feel greater torque than the torque that was generated by the stand alone haptic interface.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：バーチャルリアリティ

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：力覚提示装置、低自由度、非接地型、力覚レンダリング、擬似力覚

### 1. 研究開始当初の背景

携帯電話やゲームコントローラに内蔵された振動子による触覚提示など、触覚情報を用いた情報提示インタフェースが普及している。一方、3次元VR物体に触った際の反力をユーザに提示する力覚提示装置は、デザイン分野やエンターテイメント等で使われ

るようになってきたが、その数はごく少数に留まっている。これは装置が、多自由度であるために、装置が大型化、複雑化し、結果として故障も多いことが原因と言える。また、現在の力覚提示装置は力覚を忠実に再現することを目的としたシステムが多い。忠実な力ベクトル提示には、作用反作用の法則から

机や地面などと装置の一部を接地・固定する必要がある。このことは装置の可動範囲を狭くし、利用シーンを限定的にする。たとえば平面上で用いる力覚付きマウスの研究ではマウスと床面との摩擦抵抗を変化させるマウスや、リンク機構やワイヤーを使ったマウスなどが提案されている。いずれも机に接地されたマウスパットの上での利用が前提で可動範囲は限定されている。一方、忠実に力覚を提示せずに同等の効果を得る非接地方式として、偏心おもりの往復運動の速度を1周期の間で変化させることで、ユーザに擬似的に牽引力を感じさせる研究や著者らが開発したジャイロモーメントを用いた非接地型力覚提示装置などがある。これらは接地していないため可動範囲は非常に広い。

ところで、接地・非接地を問わず力覚提示に共通する考え方は、対象物体の次元、すなわち提示カベクトルの次元数と提示装置の自由度は一对一の関係にあることである。基本的にはカベクトルの次元が増えれば、提示装置の自由度を増やす必要がある。しかしながら、カベクトルのすべての要素が平等に重要なのではなく、主要なものと補足的なものに分けられる可能性が考えられる。たとえば物体形状認識であれば、指の位置に応じて各地点での高さが変わることを手がかりにした形状認識や、傾斜面を外側に押し出すような水平方向の力がどの場所でどの大きさ、タイミングで出るかを制御することで形状認識できる可能性がある。著者はレーザーレンジファインダと1自由度アクチュエータによる非接地ハンドヘルド型力覚提示装置を用いて、目隠しをした状態で力覚提示装置を手で持って動かしながら実物体を LRF で走査し、その奥行き情報提示のみで実物体の形状を知覚する実験を行った。球や円柱、角柱など既知の物体形状であれば幅が100ミリの形状であっても86%の正答率が得られることを実験により確かめた。また、ガラス面によってユーザの動作を制限すると100%近い

正答率となった。これは力覚による奥行き情報と、それと垂直な方向のユーザの体性感覚による移動感覚情報を統合することで形状認識が可能であることを示す結果と言える。

このような背景から、提示対象の自由度に対して、重要なもののみを提示することで、提示装置の自由度を減らしつつ非接地方式で形状等の情報を提示するにはどの自由度を使ってどのように力覚を提示すればよいのか調査する価値があると考えた。

## 2. 研究の目的

本研究では、通常の机の上等で用いることを前提に、力覚提示装置の自由度をあえて減らしつつ、通常のマウスのように非接地で形状認識等に効果的な力覚提示手法を開発し、力覚レンダリング方法およびこの手法の限界を明らかにする。

## 3. 研究の方法

本研究は以下の3つのテーマについて開発及び評価を進めた。

### (1) 力覚提示装置の開発

3自由度から自由度を減らした、1自由度および2自由度の低自由度力覚提示装置をそれぞれ開発した。1自由度力覚提示装置は、平面の法線方向の力覚提示を行う。すなわち、水平方向2自由度はフリーに動き、それとは異なる方向の動きについて力覚提示を行う。一方の2自由度力覚提示装置は水平方向2自由度の力覚提示装置とし、上下方向には力覚を提示しない。これはユーザの自由度と同じ方向の力覚提示となり、1自由度力覚提示とは異なる状況における調査のためである。なお、装置効果器の可動範囲は指のそれと同等とし、装置を非接地とすることで、可動範囲を大きくし、これらを組み合わせた形状認識実験を行う環境を整える。

### (2) 力覚レンダリングアルゴリズム開発および評価

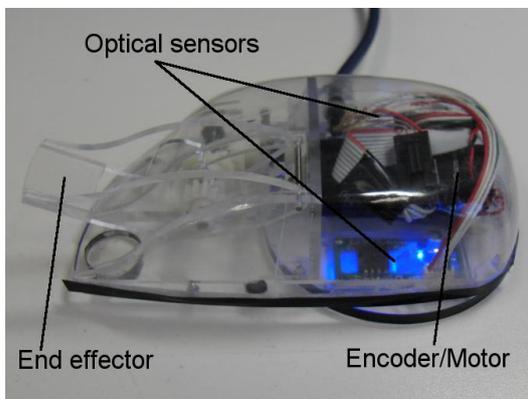


図1 1 DOF haptic mouse

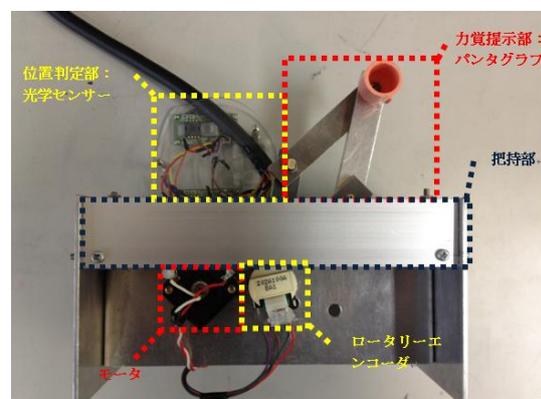


図2 2DOF haptic mouse

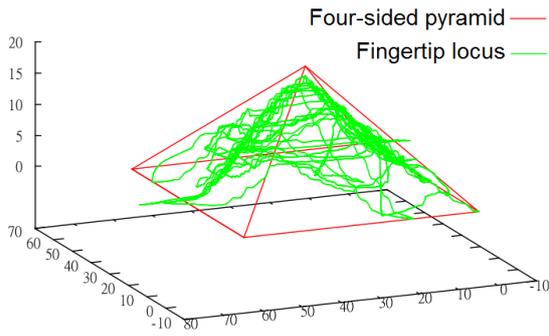


図3 1自由度装置による四角錐なぞり

上記力覚提示装置を用いて、VR 物体の形状情報を提示するアルゴリズムを開発する。形状や、大きさがどの程度わかるのか、苦手な形状はどんなものかを実験により明らかにする。また、装置自体を持って動かすことで可動範囲を超える大きさの物体の提示がどの程度可能であるのかも併せて明らかにする。

### (3) 視覚情報との統合

本手法の想定される使用状況は視覚と組み合わせるのが最も自然である。そこで、統合提示による影響を実験によって明らかにする。視覚提示方法には、画像の位置と力覚提示の位置が一致する直接指示と一致しない間接指示があるが、それぞれについて評価を行い、本方式による映像と力覚の同時提示の際の効果を明らかにする。さらに、擬似力覚を用いることで減らした自由度を補完することを考え、特にねじりトルクの表現に特化して、物理モデルに基づくレンダリング方法を考案し、心理物理学実験によりその効果を検証する。

## 4. 研究成果

(1) 低自由度力覚提示装置として図1および図2のシステムを開発した。図3は1自由度装置による四角錐のなぞりの様子である。

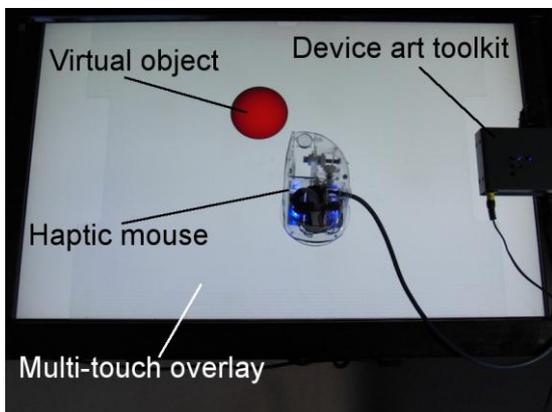


図4 テーブルトップ力覚提示環境

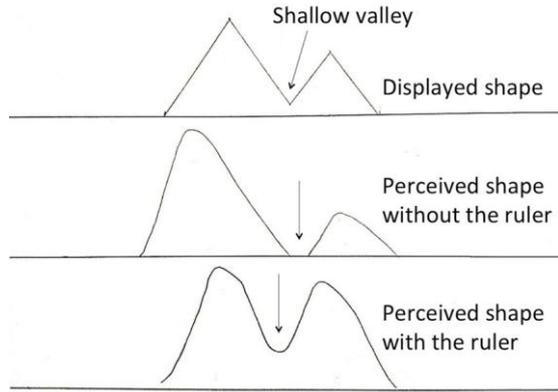


図5 被験者が書いた図（上：モデル形状、中：定規なし、下：定規有り）

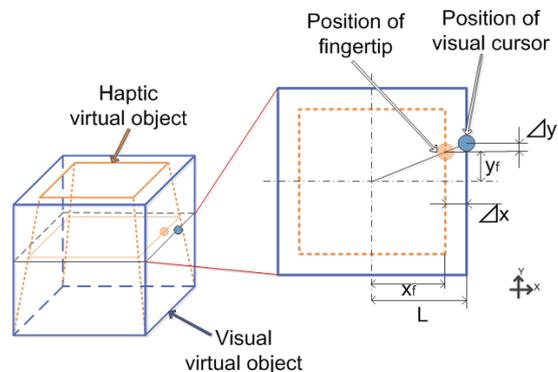


図6 段差提示手法

2自由度装置についても可動範囲を超える大きさの物体を提示出来ることを確認した。以降の研究では特に小型化が期待できる1自由度の力覚提示装置を用いた実験を行った。

(2) 実験に先立って図4に示すテーブルトップディスプレイと力覚提示装置を統合したシステムを開発した。力覚レンダリング手法としては、指先位置がバーチャル物体に侵入した侵入量に比例した反力を提示するペナルティ法に基づくレンダリングを行った。ポインティング可能な数ミリの大きさのものから知覚させることが可能で、球や四角錐等の基本立体を知覚することが可能であることが確かめられた。しかしながらこの方式では水平力が提示されないため辺や頂点の感覚が薄れる事もわかった。

また、定規を使うように装置の可動範囲を制限することで、物体認識精度が向上するかどうかを実験によって評価した。実験の結果、定規と力覚提示装置を用いることで、正確なポインティングが行えるとともに、図5の下図の矢印の場所のように、フリーハンドで触った時は気が付かない提示物体の詳細な形状情報を知覚可能であることが明らかと

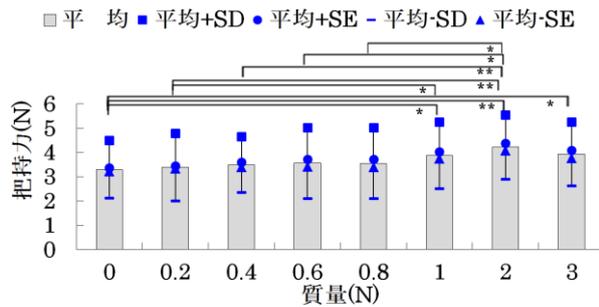


図7 擬似力覚と実力覚の融合 (gain 1.5)

なった。

一方で、ペナルティ法を用いると立方体のような切り立った側面を持つ物体の形状を表現すると、急に大きな力が加わるため不自然な振動が発生した。これを回避するレンダリングアルゴリズムとして力覚計算に用いる形状モデルに垂直面との違いを認知されにくい  $10^\circ$  程度の傾斜をつけた面を持たせた方式 (図6) を開発した。これにより振動を抑制するだけでなく、側面の任意の高さの位置をなぞることを可能とした。

(3) 図4に示した非接地1自由度力覚提示装置とテーブルトップディスプレイを組み合わせたシステムを用いて、視覚と力覚の提示位置を一致させた直接指示と両者を分離した間接指示環境による操作性の調査を行った。バーチャルな円環をなぞる実験を行い、その際の軌跡や時間の他に、指先の圧力、指の筋肉の筋電位を計測した。軌跡や時間については直接指示、間接指示の間に有意差はなく、力覚提示装置を用いることで両者のパフォーマンスに差がなくなることが明らかになった。また、実験中の指先圧力、浅指屈筋の筋電位が、直接指示環境のほうが有意に小さくなった。この結果から長時間の作業による疲労に差が出てくる可能性が示唆された。

最後に、本方式で減らした反力ベクトルの自由度を視覚的に補う方式として視覚と力覚のモデルを別に持たせた擬似力覚環境を開発した。特に従来、回転力に関する研究例が少ないため、回転トルクの提示手法を開発した。ここではバーチャルな円環と、新たに開発したモータ1台を用いた回転グリップ式力覚提示装置のグリップが、バネとダンパーによって接続されている物理モデルを用いた。円環の質量を大きくすると慣性が大きくなり実際の回転動作に比べて遅れて円環が回転する。開発した擬似トルク表現と力覚提示装置とを組み合わせることで、それぞれ単体で用いる以上のトルク感覚を提示できる。実際に実験を行ったところ、同じモータ出力でも擬似トルク表現の質量を増やすことで、グリップを握る把持力が有意に大き

くなることがわかった (図7)。トルクの大きさと把持力の大きさには比例関係があることがわかっている。実提示トルクは変化していないにもかかわらず擬似トルクを加えることで、相乗効果が得られることが明らかとなった。なお、実提示トルクの強度が低いと把持力に有意な差は現れなかったが、マグニチュード推定法による刺激量-知覚強度の定量化実験からは log 関数で近似できることがわかった。ただし、あまり大きな質量のバーチャル物体を提示すると回転動作が指先の回転運動よりも大きく遅れるため、実提示トルクと乖離が起こり別々のものと感じる限界がある事もわかった。

## 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1件)

- ① 吉田晃順, 矢野博明, 岩田洋夫: “擬似力覚によるねじりトルク感覚の増強”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 査読有, 2013, Vol.18, No.2, (印刷中)

[学会発表] (計12件)

- ① Hiroaki Yano, Teruyuki Yoshida and Hiroo Iwata:” Pseudo-Haptic Rendering for Displaying a Torsional Torque”, World Haptics Conference 2013, Abstract Digest of World Haptic Conference 2013, 査読有, 2013年4月15日~17日, p.15, Daejeon Convention Center (韓国)
- ② 矢野博明, 鈴木洋志, 岩田洋夫:” 1自由度ハプティックマウスによる段差提示手法”, 信学技報, 査読無, 2013年3月14日, vol. 112, no. 483, HIP2012-103, pp. 149-154, 沖縄産業支援センター
- ③ Hiroshi Suzuki, Hiroaki Yano and Hiroo Iwata:” 1 DOF Tabletop Haptic Mouse for Shape Recognition of 3D Virtual Objects”, Proceedings of ACHI2013, 査読有, 2013年02月27日, pp.309-314, ニース(フランス)
- ④ 鈴木洋志, 矢野博明, 岩田洋夫:” 1自由度力覚提示装置における直接指示と間接指示の比較”, 第17回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 査読無, 2012年9月12日, pp.239-242, 慶応大学(埼玉)
- ⑤ 吉田晃順, 矢野博明, 岩田洋夫:” 擬似力覚と力覚提示装置の組み合わせによるねじりトルク感覚の増強”, 第17回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 査読無, 2012年9月12日, pp.49-52, 慶応大学(埼玉)

- ⑥ 朴成洙, 矢野博明, 岩田洋夫:” アンカーレス2自由度力覚提示装置を用いた広域VR物体の力覚提示”, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, 2012年6月26日, Vol.112, No.106, pp.113-118, 東京大学(東京)
- ⑦ 吉田晃順, 矢野博明, 岩田洋夫:” ねじりトルクの疑似力覚提示に関する研究”, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告, 査読無, 2012年3月13日, Vol.17 No.HDC08, pp.19-22, 筑波大学
- ⑧ 青木健将, 矢野博明, 岩田洋夫:” 拡張現実感遠隔触知覚システム”, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告, 査読無, 2012年3月13日, Vol.17 No.HDC08, pp.3-6, 筑波大学
- ⑨ Hiroaki Yano, Takeyuki Aoki, and Hiroo Iwata:” Handheld Haptic Interface for Touching Remote Objects with Visual Display”, Proceedings of Haptics 2012, 査読有, 2012年3月5日, pp.349-354, Sheraton Wall Centre (カナダ・バンクーバー)
- ⑩ 鈴木洋志, 矢野博明, 岩田洋夫:” 直接指示環境における1自由度力覚提示に関する研究”, 第16回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 査読無, 2011年9月22日, pp.654-657, はこだて未来大学(北海道)
- ⑪ 鈴木洋志, 矢野博明, 岩田洋夫:” マウス型一自由度力覚提示装置に関する研究”, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告 Vol.16, No.HDC06, 査読無, 2011年3月8日, pp.15-1, 慶應義塾大学・日吉キャンパス
- ⑫ Hiroaki Yano, Hiroshi Suzuki and Hiroo Iwata:”1 DOF Haptic Mouse for Shape Recognition of Virtual Objects”, Abstract Digest of World Haptic Conference 2011, 査読有, 2011年6月21日~24日, p.17, イスタンブール(トルコ)

[その他]

ホームページ等

<http://intron.kz.tsukuba.ac.jp>

## 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