

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24700113

研究課題名(和文) 操作者のバイオフィードバックによるアクティブカップリングの実現に関する研究

研究課題名(英文) Research on realization of the active coupling by the biofeedback of the user

研究代表者

赤羽 克仁 (Akahane, Katsuhito)

東京工業大学・精密工学研究所・助教

研究者番号：70500007

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：VR(Virtual Reality)世界の物体を自由に操作するには、位置計測と力提示を行う力覚提示装置と操作物体を常に適切な剛性でカップリングする必要がある。また、人は物体を把持するとき適切な把持力で操作する。本研究では、その適切な操作者による物体を把持する力を計測、把持のインピーダンスを推定し、これをバイオフィードバックとしてアクティブにカップリングの剛性を制御することで操作の安定性と忠実性を高い次元で両立することを目指した。

研究成果の概要(英文)：In this research, I propose a system for high definition wire driven haptic display. There is a problem that when we display very stiff virtual wall, the virtual wall may become active. In order to solve it, we measure grasp force of user and control the virtual coupling coefficient to reduce the energy which the virtual coupling makes. When we use haptic display, dynamics of our fingers and arm always change and adjust with virtual object. Therefore, in this study, we define bio-feedback which use human dynamics for adapting world. We improve stability and fidelity of haptic display with bio-feedback.

研究分野：総合領域

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：ヒューマンインタフェース ハプティックデバイス バーチャルリアリティ

1. 研究開始当初の背景

VR (Virtual Reality) 世界の操作対象物体を自由に操作するには、力覚提示装置と物体を常に適切なインピーダンス (粘弾性) でカップリングする必要がある。このカップリングは通常、バネとダンパを用いたバーチャルカップリングによって行われる。このカップリングのインピーダンスによって操作の安定性と忠実性が決まるため VR 世界の物体操作において重要な要素となる。しかしながら、現状のシステムではそのカップリング係数を試行錯誤によってあらかじめ決定することが多く、特に操作者の状態を考慮したダイナミックなカップリング係数の制御は行われていない。我々が日常生活において物体を操作するとき、無意識のうちに物体を適切な把持力で把持している。もしくは適応して最適な把持力で物体を操作するようになる。そして、物体操作に合わせて常に把持力を適切に制御している。我々が実世界で無意識に行っているこの把持操作におけるバイオフィードバックを VR 世界の物体操作に利用することはできないだろうか。本研究では操作者が物体を操作する時の把持力をリアルタイムに測定し、その把持力から操作者の把持をするときのインピーダンスを推定し、そのインピーダンスを用いて力覚提示装置と VR 世界の操作対象物体とのカップリングを行う。

2. 研究の目的

VR 世界の物体を自由に操作するには、位置計測と力提示を行う力覚提示装置と操作物体を常に適切な剛性でカップリングする必要がある。また、人は物体を把持するとき適切な把持力で操作する。本研究では、その適切な操作者による物体を把持する力を計測、把持のインピーダンスを推定し、これをバイオフィードバックとしてアクティブにカップリングの剛性を制御することで操作の安定性と忠実性を高い次元で両立することを目指す。カップリングの剛性が高いときは VR 物体と力覚提示装置の結合力が高いので操作の忠実性が高くなる。しかしながら、安定提示可能なバネ係数はその更新周波数に比例する。VR 世界の更新周波数を高い精度で安定に維持することは一般的な PC 環境では難しく発振の原因の一つとなる。VR 世界、力覚提示装置および操作者をモデル化し、把持力とカップリングインピーダンスの関係をモデルから得られる安定提示可能な条件式から導き、最適なカップリングパラメータをリアルタイムに推定するシステムの構築を行う。これにより、更新周波数の乱れなどにより不安定な状況になったとしても、物体操作における操作者のバイオフィードバックにより力覚提示の安定性と忠実性の両立が可能であることを明らかにする。力覚提示装置は人間に対して力を提示するデバイスであるので、その安定性と忠実性の両立は重要な問題の一つである。把持力のような外に

表れない内力を利用した実用的な力覚提示装置の研究は前述したように少ない。実世界において人が日常無意識に行っている把持力のバイオフィードバックによる適切な物体操作の能力を利用して、VR 世界におけるカップリングパラメータをリアルタイムでアクティブに制御することで、操作の安定性と忠実性の両立を実現することはこれまでに例がなく重要であると考えられる。

3. 研究の方法

把持力の測定を可能にする軽量な力覚提示グリップの設計を行う。また、把持力の計測に遅延が大きいと操作者のバイオフィードバックの効果が得られない可能性があるため、専用の高速な計測コントローラの設計を行う。把持力から操作者のインピーダンスの推定を行いシステムのモデル化により得られる安定条件からカップリングパラメータを求める。バイオフィードバックの効果を確認するため、実際に VR 世界の物体を操作可能であるか、安定性と忠実性が両立されているかを評価実験をおこない確認する。

(1) 把持力の測定を可能にする軽量な力覚提示グリップの設計

最大 5 本の指先が力覚提示グリップを把持するときの各指にかかる力を測定する。力覚提示部には把持する各指の腹が接触する部分 5 か所に軽量な薄膜タイプの力センサを配置し各指にかかる力を測定する。計測される力には把持力のほかに力覚提示装置が発生している力 (提示力) も含まれるため、計測される力から把持力と提示力の分離を行う。

(2) 高速な専用計測コントローラの設計

把持力の計測に遅延が大きいと操作者のバイオフィードバックの効果が得られない可能性がある。我々は 200kHz の更新周波数を実現する力覚提示装置のコントローラを開発している。その高性能コントローラで有効にデータを利用するため、最大 200kHz で動作する高速 A/D コンバータでデータを取り込む専用の計測装置の設計を行う。

(3) 把持力から操作者のインピーダンスの推定

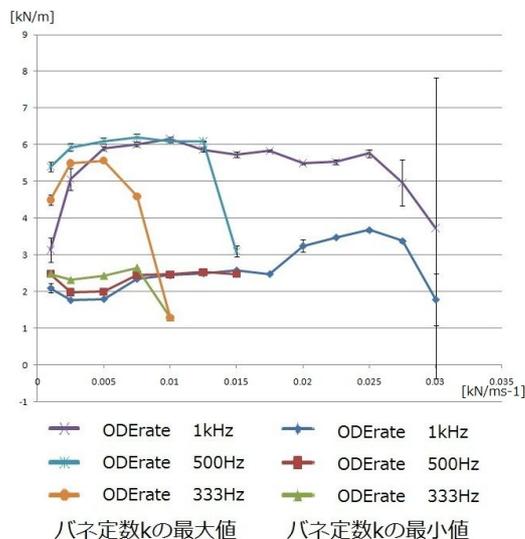
23 年度に設計された把持力計測グリップとその計測コントローラを用いて把持力の測定を行う。得られた把持力から把持の際の操作者のインピーダンスを推定する。また、VR 世界 + 力覚提示装置 + 操作者のモデル化を行い。VR 世界、力覚提示装置のみならず、操作者の把持の状況に合わせて安定提示可能なカップリングパラメータの推定を行う。

(4) バイオフィードバックの効果の確認

力覚提示装置に把持力計測グリップを取り付け、バイオフィードバックにより実際に VR 世界の物体を操作可能であるか、安定性と忠実性が両立されているかを評価実験をおこない確認する。

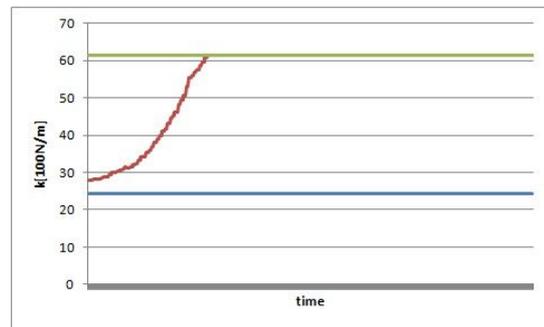
4. 研究成果

把持力に応じてカップリング係数を変化させるために、変化のレンジを調べるための実験を行った。レンジの上限を調べるために、エンドエフェクタを全力で握って物体を VR 壁に衝突させたときに、発振が収まるバネ係数 K とダンパ係数 B の値を求めた。VR 世界は 1kHz, 500Hz, 333Hz, 力覚提示は 1kHz で実行した。実験結果を下図に示す。次に、レンジの下限を調べる実験を行った。把持していなくても安定に提示可能な最大のカップリング係数を求めるためである。そのため、エンドエフェクタを把持しないで、40g の重りをつけ、65mm の高さからエンドエフェクタを静かに離し VR 壁に接触したときに発振を起こさないバネ係数 K とダンパ係数 B の値をもとめた。その他条件は上限を求めるときと同じである。実験結果を下図に示す。ここで求めた上限値もしくはそれ以上のバネ係数を提案手法であるバイオフィードバックにより提示することができれば、これまで提示することができなかった硬さを表現することができる。また、レンジの下限は、把持をしていなくても安定に実行可能となる最大のカップリング係数である。

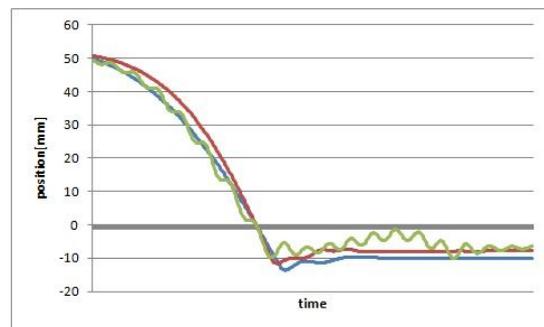


VR 壁を提示したときの力覚提示部の軌跡を計測した。VR 世界に球体の剛体一つと提示面を用意し、剛体を持ち上げた後、提示面に接触させた。VR 世界は ODE を 333Hz で実行、力覚提示と計測は 1kHz で行った。提案手法と比較するバネ係数 K の値は、物体衝突時の軌跡提案手法の最大値 ($K=6150$) と最小値 ($K=2240$) とし、ダンパ係数は $B=5$ とした。下図(a) がバネ係数の値、(b) が提示面に垂直な y 軸方向のエンドエフェクタの位置座標、(c) が物体衝突時の提示面に垂直な y 軸方向の提示力である。図(a) より提案手法ではバネ係数の値が接触の前に約 $K=2800$ から約 $K=6150$ まで把持力に応じて増加しているのがわかる。視覚情報によりユーザが物体の接触に備えて把持力を上げているのがわかる。よって、日常生活で無意識下で行ってい

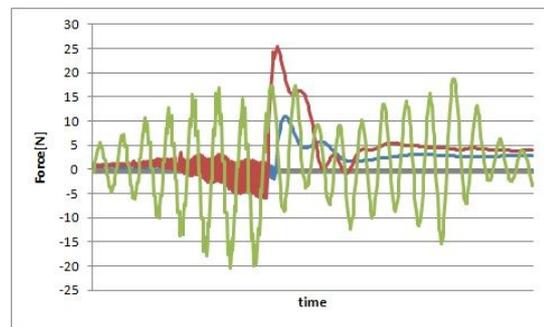
る把持動作における力の変化を計測し、カップリング係数に反映することが可能になった。



(a)



(b)



(c)

次に、図(b) では、 $y=0$ が仮想壁の位置になるので、接触後の提示位置が $y=0$ に近ければ近いほど精度がよいことになる。バネ係数が最小値 ($K=2440$) のとき、バネ係数の値が低いため約 12mm の位置まで面に侵入し安定しているが、提案手法では約 8mm の位置で安定に面を提示できていることがわかる。また、提案手法では提示可能な最大のカップリング係数 ($K=6150$) で固定してみたところ、発振により提示面に安定に収束していないことがわかる。よって、インピーダンスが一定の場合よりも、バイオフィードバックによる提案手法によってより精度の高い安定な壁が提示できているのが分かる。

そして図(c) より、バネ係数が最小値 ($K=2440$) のとき、出力できる力は約 11N であるが、提案手法では約 25N の力が出力されているのがわかる。また、提案手法では提示可能な最大のカップリング係数 ($K=6150$) で固定してみたところ、発振により提示力が安定に収束していないことがわかる。このように現在

まで提示できなかった高いバネ係数 K により仮想壁が安定に提示可能となったことがわかる。

本研究では力覚提示装置の忠実性と安定性の向上を目的として、ユーザの把持力によるバイオフィードバックを用いてバーチャルカップリングの動的制御を行った。特に、物体接触時における力覚提示装置の忠実性の向上を目指し、人が日常生活で無意識下で行っている把持力の変化を積極的に力覚提示に取り入れることをバイオフィードバックと定義した。実際に把持力を測定するエンドエフェクタを設計し、バーチャルカップリングの係数を動的に変化させることで現在まで提示できなかった高い剛性が実現できることを評価実験を通して示した。提案システムにより、仮想壁の精度の向上、発振が生じた場合でも自然に安定な状態に戻すことが可能となり、ユーザの把持力によるバイオフィードバックにより安定性と忠実性の両立が実現した。

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2件)

[1]村石辰徳, 赤羽克仁, 佐藤誠: `高速物理シミュレーションを実現する高解像度力覚提示システムの開発, 電子情報通信学会論文誌 査読有 Vol. J96-D, No. 10, pp. 2371-2378, 2013 10

[2]赤羽 克仁, 浅田 惇一, 佐藤 誠: `バイオフィードバックによる高忠実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論文誌 査読有 Vol. 17, No. 4, pp. 343-351, 2012 12

[学会発表](計18件)

[1]村石 辰徳, 川喜田 裕之, 大久保 貴博, 田島 寛之, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: `スマートフォンをエンドエフェクタに用いる力覚インタフェースの開発, 情報処理学会インタラクシオン 2014, DVD, 2014.2.27-3.1, 東京台場日本科学未来館

[2]丸山 直紀, 劉 蘭海, 田上 想馬, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: `フレーム可動型両手多指力覚提示装置の フレーム制御に関する提案, 情報処理学会インタラクシオン 2014, DVD, 2014.2.27-3.1, 東京台場日本科学未来館

[3]田島 寛之, 季 雨農, 馬 妹酒, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: `6 自由度力覚提示装置 SPIDAR-I の提示力等方性について, 情報処理学会インタラクシオン 2014, DVD, 2014.2.27-3.1, 東京台場日本科学未来館

[4]Lanhai Liu, Satoshi Miyake, Katsuhito Akahane, Makoto Sato: `Development of String-based Multi-finger Haptic Interface SPIDAR-MF' ICAT 2013 (The 23rd International Conference on Artificial

Reality and Telexistence), USB, 2013.12.11-13, Tokyo Japan

[5]Anusha Jayasiri, Kenji Honda, Katsuhito Akahane, Makoto Sato: `Feeling Wind: An Interactive Haptization System for Motion Rendering in Video Contents using SPIDAR' ICAT 2013 (The 23rd International Conference on Artificial Reality and Telexistence), USB, 2013.12.11-13, Tokyo Japan

[6]Naoki MARUYAMA, Lanhai LIU, Katsuhito AKAHANE, Makoto SATO: `A Proposal of two-handed multi-finger Haptic interface with rotary frame' ICAT 2013 (The 23rd International Conference on Artificial Reality and Telexistence), USB, 2013.12.11-13, Tokyo Japan

[7]Xiangning Liu, Anusha Jayasiri, Katsuhito Akahane, Makoto Sato: `Comparison of Image Haptization Systems for 2D and Depth Images with Local Deformation' Proceedings of 3DSA2013, CD, 2013.6.26-29, Osaka Japan

[8]Anusha Jayasiri, Katsuhito Akahane, Makoto Sato: `A Proposal of 3D Haptic Motion Rendering of an Object in a Video' Proceedings of 3DSA2013, CD, 2013.6.26-29, Osaka Japan

[9]田島 寛之, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: `6 自由度力覚提示装置 SPIDAR-I の提示力等方性について' 電子情報通信学会技術研究報告 HIP2012-73 ~ HIP2012-106, Vol. 112, No. 483, pp. 137-142, 2013.3.13-14, 沖縄産業支援センター

[10]肥後 明豪, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: `ワイヤ駆動型力覚提示装置におけるデバイス自身が持つ受動粘性の動的制御の提案' 電子情報通信学会技術研究報告 HIP2012-73 ~ HIP2012-106, Vol. 112, No. 483, pp. 131-136, 2013 3.13-14, 沖縄産業支援センター

[11]村石 辰徳, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: `物理シミュレータ搭載高解像度ハプティックコントローラによる機能分散', 電子情報通信学会技術研究報告 HIP2012-73 ~ HIP2012-106, Vol. 112, No. 483, pp. 121-126, 2013 3.13-14, 沖縄産業支援センター

[12]周東 正高, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: `フレーム可動型両手多指ハプティックインタフェースの開発', 電子情報通信学会技術研究報告 HIP2012-73 ~ HIP2012-106, Vol. 112, No. 483, pp. 103-108, 2013 3.13-14, 沖縄産業支援センター

[13]Anusha Jayasiri, Katsuhito Akahane, Makoto Sato: `Feeling the Motion of Object in a Dynamic Image Sequence through Haptic Interface' International Conference on Advances in ICT for Emerging Regions (ICTer2012), pp. 19-26, 2012 12.13-14, Sri Lanka

[14]Anusha Jayasiri, Katsuhiko Akahane,

Makoto Sato: 'Haptic Rndering of Dynamic Image Sequence Using String based Haptic Device SPIDAR' Joint Virtual Reality Conference of ICAT-EGVE-EuroVR (2012), DOI: 10.2312/EGVE/JVRC12/009-015, 2012 10.17-19, Spain

[15]周東 正高, 赤羽 克仁, 脇田 航, 田中 弘美, 佐藤 誠: '技巧的操作が可能なハプティックインタフェースの提案', 第 17 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, CD, 2012.9.12-14, 慶応義塾大学日吉キャンパス

[16]肥後 明豪, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: '回生ブレーキのスイッチングによる動的粘性制御', 第 17 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, CD, 2012.9.12-14, 慶応義塾大学日吉キャンパス

[17]田島 寛之, 小山 達也, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: '提示力の等方性を考慮したハプティックインタフェースの開発', 第 17 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, CD, 2012.9.12-14, 慶応義塾大学日吉キャンパス

[18]村石 辰徳, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: '物理シミュレータ搭載高解像度ハプティックコントローラの機能分散手法', 第 17 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, CD, 2012.9.12-14, 慶応義塾大学日吉キャンパス

〔図書〕(計 1 件)

Katsuhito Akahane, Jungwoo Hun, Itsuo Kumazawa, Makoto Sato: 'Multi-finger Haptic Interaction' Springer, 147(109-147) 2013

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://skllab-www.pi.titech.ac.jp/blog/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

赤羽 克仁 (AKAHANE Katsuhito)

東京工業大学・精密工学研究所・助教

研究者番号: 70500007