

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02734

研究課題名(和文) バイオフィードバックによる高忠実ハイブリッド力覚提示システムの実現に関する研究

研究課題名(英文) Study on high-fidelity hybrid force-feedback system using biofeedback

研究代表者

赤羽 克仁 (Akahane, Katsuhito)

東京工業大学・科学技術創成研究院・助教

研究者番号：70500007

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：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バイオフィードバックによるハイブリッド型力覚提示装置に関する研究を行った。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行い、バーチャルカップリングの係数を変化させることで現在まで提示できなかった高い剛性を実現した。フリースペースの操作性については、インピーダンス型の制御の有効性が示唆された。また、仮想壁の剛性については、アドミッタンスによる手法の有効性が示唆され、仮想壁の精度が向上した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we propose a high fidelity haptic interface based on biofeedback. When we interact with a very stiff virtual object in the virtual world by a haptic interface, the haptic interface frequently becomes unstable. We cannot feel the virtual object stably. On the other hand, when we interact with a real object in the real world, the dynamics of our fingers and arm always change and adjust to the appropriate value for the real object. We can feel the real object stably. By using the adaptation, we aimed for achieving the high fidelity haptic interface. In this study, the proposed system measured the grasping force generated by the user interacting with a virtual object by the haptic interface. We conducted evaluation experiments about the proposed system. The experimental results indicate that the proposed system improved the maximum stiffness of the virtual coupling, and achieved both stability and fidelity by using biofeedback.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：ヒューマンインタフェース

### 1. 研究開始当初の背景

近年、計算機能力の向上により様々なことが可能になってきている。VR (Virtual Reality) 世界の操作を直感的に可能にするヒューマンインターフェイスの構築もその1つである。VR空間を自由に操作しインタラクションを可能にする装置として、力覚提示装置の研究が行われている。我々は、ワイヤ駆動型力覚提示装置 SPIDAR (Space Interface Device for Artificial Reality) の研究をこれまで行ってきた。位置の計測と力の提示に剛性の高いPEワイヤを用いることで、装置自身のもつ慣性を小さくでき、ワイヤで平行にエンドエフェクタを制御するため、力提示における剛性を高くすることが可能であり、力覚提示装置として優れた特性を持つといえる。人は物体を把持するとき適切な把持力で操作する。把持力は操作物体に働き外へ現れない内力である。その内力を計測しVR世界の操作に応用できないだろうか。力覚の安定提示には装置と操作者を含めた受動粘性が重要な役割を果す。操作者の粘性は把持の状況により常に変化する。把持力から安定提示に必要な粘性を推定し、システムの状態をリアルタイムにフィードバックできれば、力覚提示装置の性能向上に大きな貢献が期待できる。本研究では、このバイオフィードバックによりワイヤ駆動型力覚提示装置の制御手法をハイブリッド化し、操作者を含めたシステムの状態に応じた最適制御を実現することを目的とする。本研究により、手術シミュレータ、技能伝承、力覚メディアを用いた新たな文化の創造などに応用可能である。

### 2. 研究の目的

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世界の物体操作に応用することはできないだろうか。力覚提示装置の制御方法はインピーダンス型とアドミッタンス型に分類できる。ワイヤ駆動型力覚提示装置はシステムの特長および構成上、インピーダンス型に分類される制御手法をこれまで用いてきた。しかしながらアドミッタンス型の制御手法を提案するバイオフィードバックによって適切にハイブリッド化することで、力覚提示装置の性能向上が見込める。これは、現在注目されている拡張現実感AR (Augmented Reality) や、人間身体拡張AH (Augmented Human) などに応用可能な技術である。人間が力覚提示装置を操作するに当たり、操作する指や手のダイナミクスは常に変化し操作する物体に対して適応している。そこで本研究では、人間が

SPIDAR-G を操作する時のグリップにかかる把持力を測定し、その力をフィードバックすることによって、把持における人のダイナミクスの適応能力を積極的に力覚提示に利用することをバイオフィードバックとする。そして、バイオフィードバックで仮想バネのエネルギー生成を抑制する。バーチャルカップリングのカップリング係数が高ければ高いほど、VR物体とポインタとの遅延がおきにくく、物体同士の接触時のような時に力の提示を強くすることもできるので、カップリング係数が高いことが忠実性が高いということになる。しかし、常に忠実性を高くとしようとするとバネが生み出すエネルギーが大きくなり、発振が生じてしまう。そこで把持力に応じてカップリング係数を変化させる手法を提案した。グリップの把持力が弱かった場合はカップリング係数を低くし、把持力が強い時はカップリング係数を高く設定する。これにより、操作全体を通して安定性が高くなり、必要な場面ではグリップを強く握ることで現在まで提示できなかった高い剛性を表現できる。従来のSPIDARは、エンドエフェクタの位置を計測し力覚を提示するインピーダンス型の制御を行っている。しかし、この制御は仮想物体の剛性表現に限界があり、また、仮想世界と接続するためにはバーチャルカップリングを行う必要があり、操作の安定性が損なわれてしまう。そこで、力覚を計測し位置を提示するアドミッタンス型の制御を用い、安定・忠実な剛性表現が可能なSPIDARを実現することを目指す。

### 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った。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った。VR世界+力覚提示装置+操作者の把持をモデル化しエネルギーに基づく受動定理により安定性を考慮したシステム設計を行なった。力覚提示装置のハイブリッド化のための制御基板の設計・試作を行なった。専用制御基板には、最新プロセッサとFPGAを搭載し、高解像度力覚提示技術を導入した。実際にVR世界の物体を操作し、安定で違和感のない操作を実現することを目指した。力覚提示グリップは軽量でなければ力覚提示能力が低下するため、把持力を計測する部分はできるだけ軽量に設計しなければならない。また、センサのデータを取り込むための周辺回路も小型化しなければならない。そのため、これまでの研究成果を生かして、専用の小型軽量で把持力計測を可能にする力覚提示グリップおよび測定回路を含む専用のハイブリッド型力覚提示装置制御基板を設計した。制御基板にはFPGAなどを用いこれまでの研究成果である高解像度力覚提示に関する技術を導入し制御基板を構築し

た．力覚提示装置の提示自由度を 1 自由度提示から行い，まず提案手法の有効性を検証した．

#### 4．研究成果

システムを実現するために作成した装置をここで説明する．力覚提示の性能を損なうことなく把持力を測定可能なグリップを設計するには，できるだけ軽量で小型にしなければならない．そこで力センサには薄くて軽量の FlexiForce を用いることにした．これを用いて変換回路により電圧に変換した．力センサと SPIDAR コントローラを用い，FlexiForce の力と電圧の関係を実測した．加圧面積は FlexiForce をグリップに入れることを考慮し，グリップ内での加圧面積と等しくした．力測定には，DBU-120A を用いた．これを用いてグリップを作成した．人の把持を極力妨げず，かつ無負荷時にはセンサに力が認識されないようにするために，軽くて収縮する性質をもつスポンジを採用した．圧力センサには把持力だけでなく SPIDAR の糸がグリップに提示する力も加わるため圧力センサから把持力だけを求める必要がある．そこで圧力センサを 2 枚用い，2 枚の圧力センサの平均値をとることで SPIDAR の糸が与える張力を除く．「把持力が弱い場合はカップリング係数を低くし，把持力が強い時はカップリング係数を高く設定する．」という対応が適しているのかを確認するための予備実験を行った．SPIDAR-G の使用時に人がどの程度の力で把持しているのかを確認した．VR 世界に球体の剛体 1 つと提示面(地面)を用意し，被験者には一度剛体を持ち上げた後，剛体を提示面にこすりつけるようにだけ指示をだした．VR 世界は ODE を約 333Hz で実行，力覚提示と計測は 1kHz，バネ定数は  $k=1200$ ，ダンパ定数は  $b=20.0$  で固定した．被験者は成人男性 5 名である．計測結果を，力覚ポイントを剛体にカップリングしていない状態，力覚ポイントを剛体にカップリングし，剛体を提示面に接触させていない状態，力覚ポイントを剛体にカップリングし，剛体を提示面に接触させている状態の 3 状態にわけた．力覚ポイントを剛体にカップリングしていない状態よりも力覚ポイントを剛体にカップリングし，剛体を提示面に接触させていない状態，力覚ポイントを剛体にカップリングし，剛体を提示面に接触させている状態のほうが人はより強く握るという結果が得られた．剛体同士の接触時の方が把持力が強いので，「把持力が弱い場合はカップリング係数を低くし，把持力が強い時はカップリング係数を高く設定する．」という対応で問題ないという確認がとれた．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，グリップを全力で握った時に発振が収まるバネ定数  $K$  の値を求めた(ダンパ定数  $B$  は固

定)．VR 世界は 1kHz，500Hz，333Hz，力覚提示は 1kHz で実行，ダンパ定数は 2.5 単位で行った．指先の力の最大値は 8.2kg である．物体の数は 1，2，4，…，32 個である．333Hz では  $B=10.0$  まで，500Hz では  $B=15.0$  まで，1kHz では  $B=30.0$  までとなっているが，これはダンパの値を 2.5 大きくした時に  $K=100$  とした場合に人が全力で把持をしても発振をふせげなかったためその値までしか求められなかったということである．次に，レンジの下限を調べる実験を行った．人の力の影響を及ぼさないために，グリップに 40g の重りをつけ，65mm の高さからグリップを静かに離した．その時に発振を起こさないバネ定数  $k$  の値を求めた(ダンパ定数  $b$  は固定)．その他条件は上限を求めるときと同じである．ここで求めた上限値以上のバネ係数を提示することができれば，提案手法により現在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，レンジの下限をここで求めた最小値にすることで，安定性を保てる最大のバネ係数に設定する．この時，全力で把持せずとも電圧 5v の時に  $K=6000$  による力提示をすることができた．ただし，発振がおこることもある．そこで  $K$  の値を上げてみたところ， $k>6500$  でほぼ常に発振が生じてしまった．元々  $B=5$  の時， $K=5570$  が限界だったので提案手法によって高い  $K$  が提示可能となり，力覚提示装置の忠実性を向上させることが可能であると推測できる．念のため  $B=2.5, 7.5, 10.0$  も確認してみたが  $K=6500$  の力提示することができず， $k$  の値を変化させた時も  $B=5$  の時  $k$  が最大であった．同様に 500Hz，1kHz についても行ったところ，VR 世界の更新周波数によって違いはあるものの，全ての周波数でバネ定数の値が向上することがわかった．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，提示面にぶつけた．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定数  $K$  の値であるが，提案手法の最大値  $K=6150$  と最小値  $K=2240$  とし， $B=5$  とした．結果より提案手法ではバネ定数の値が  $k=2800$  あたりから  $k=6150$  まで増加しているのがわかった．次に， $Y=0$  が仮想壁の位置になるので， $Y=0$  に近づけば近いほど精度がよいということになる． $k=2440$  の時，バネ定数の値が低いため約 12mm の位置で安定しているが，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った．また，提案手法で提示できる  $K=6150$  でバネ定数を固定してみたところ，限界値を超えているので発振が起こってしまった．そして， $K=2440$  の時出力できる力は約 11N であるが，提案手法では約 25N の力出力がされているのがわかった．これは壁へのめり込み量も力が弱いためにめり込んでいるということと整合性はとれている．このように現在まで提示できなかった高い  $K$  で仮想壁提示が可能となった．提案手法によ

る安定性の評価をした。提案手法では人の把持力によりカップリング係数を動的に変化させているので、発振が生じた場合に人が把持力を弱くすることによって自然と発振が収まる。発振が起こっている時のバネ定数  $K$  の値とカップリングをしている物体の xyz 座標の位置からよりバネ定数  $k$  の値が低くなった時に発振が収まっているのがわかった。アドミタンス型の位置制御を行うため、ワイヤ単位で目標位置指令値とエンコーダ計測値が一致するように PID で追従制御を行うこれらの制御を一般 PC による直接制御で行った場合、更新周波数は 1kHz 程度が限界となる。また、PC の汎用 OS にはリアルタイム性が無いため、高精度な更新も保障できない。そこで、開発した FPGA 搭載コントローラを利用し、PID 追従制御を 205kHz という高更新周波数で行う方法を提案する。DC モータはコントローラによって 205kHz の PWM 制御で駆動しており、ロータリエンコーダのサンプリング周波数は 320kHz となっている。このため、目標位置の指令値を PC からコントローラへ送り、PID による追従制御をコントローラ側で行えば、位置制御を最大 205kHz という高速な追従制御で行うことが可能であり、PC による直接制御と比較して高精度な位置制御が行えると考えられる。そして、従来のインピーダンス型では仮想壁の提示力を 1kHz で更新していたが、205kHz という高速な更新周波数によって仮想壁の位置を制御することができるため、仮想壁の高い安定性と剛性を実現できると考えられる。一般的なアドミタンス型力覚提示装置の力覚計測は、通常は力センサを接続して行っていたが、SPIDAR においてはワイヤ単位の力覚計測となる。そのため、高価な力センサを複数使用することになり、PC に対する負担、応答性の悪化などさまざまなデメリットが発生する。そこで、本研究では、SPIDAR のモータに流れる電流値を計測しモータトルクを計算することによって、提示力を推定する方法を提案する。SPIDAR のコントローラ内には A/D コンバータが搭載されており、これが取得した電圧とセンシング抵抗値から、DC モータに流れる電流値を計算することができる。DC モータのトルクは一般的に電流値に比例し、電流値にトルク定数を乗算することによって求められる。これにより、別途力センサの接続を必要としない力覚計測を実現した。結果から、フリースペースの操作性については、インピーダンス型の制御の有効性が示唆された。また、仮想壁の剛性については、提案手法の有効性が示唆された。これは、計測データに基づく評価実験と一致するため、信頼性の高い評価であると考えられる。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バーチャルカップリングに着目した。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、バーチャルカップリングの係数を変化させることで現在まで提示できなかった高い剛性を実現した。そして、仮想壁の精度も向上、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 8 件)

1. Katsuhito Akahane, Makoto Sato: Research on High Fidelity Haptic Interface Based on Biofeedback, HCI International 2017, pp. 481-491 (査読無)

2. 上正原 陽, 池井 寧, 佐藤 誠: 接線力法線振動同時提示型触覚ディスプレイにおけるテクスチャ提示特性の評価, 日本バーチャルリアリティ学会研究会論文集, Vol. 21, No. 1, 2016, pp. 17-18 (査読無)

3. 上正原 陽, 池井 寧, 佐藤 誠: 接線力法線振動同時提示型触覚ディスプレイに関する研究, 日本バーチャルリアリティ学会研究会論文集, Vol. 21, No. 2, 2016, pp. 16-18 (査読無)

4. 川喜田 裕之, 中川 俊夫, 佐藤 誠: テレビ画像を画面外へ拡張するシステムの開発, 映像情報メディア学会誌, Vol. 71, No. 1, 2016, pp. J20-J27 (査読有)

5. 永井 一樹, Yihan Qian, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: 没入型 VR インタラクションのためのウェアラブル力覚提示装置, 信学技報, 115, 2016, 15-20 (査読無)

6. 内山 貴雄, 赤羽 克仁, 佐藤 誠, 広田 光一: 磁気的干渉が少ない多指力覚提示装置に関する研究, 信学技報, 115, 2016, 33-38 (査読無)

7. 銭 亦ハン, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: ストリング駆動型の力覚提示装置における張力制御に関する検討, 信学技報, 115, 2016, 21-26 (査読無)

8. 川崎 太雅, 赤羽 克仁, 長谷川 晶一, 佐藤 誠: 力覚提示によるストリートダンス訓練システムの提案と開発, 電子情報通信学会技術研究報告, 115, 2015, 25-30 (査読無)

[学会発表](計 13 件)

1. 赤羽 克仁, 高橋実里, 佐藤 誠, 中本高道: 嗅覚及び力覚インターフェスをを用いたマルチモーダル VR 環境の構築, 電気学会電子・情報・システム部門, 2017.9.6-9.9

2. 橋下大二郎, 赤羽 克仁, 斎藤拓樹, 山口武彦, 原田哲也, 佐藤 誠: ウェアラブル 6 自由度力覚提示デバイス SPIDAR-W のフレームの軽量化とエンドエフェクタの改良, インタラクション 2017, 2017.3.2-4.

3. 高橋実里, 赤羽 克仁, 佐藤 誠, 中本高

道：嗅覚及び力覚インターフェスをを用いたマルチモーダルVRコンテンツの制作と評価、インタラクシオン 2017, 2017.3.2-4.

4.赤羽克仁,佐藤誠：高解像度ストリング型力覚提示装置の開発,電気学会電子・情報・システム部門,2016.8.31-9.3

5.赤羽 克仁、斎藤 拓樹、橋本 大二郎、山口 武彦、原田 哲也、佐藤 誠：没入型 VR インタラクシオンのためのウェアラブル手首力覚提示装置の開発,第 21 回日本バーチャルリアリティ学会,2016.9.14-16

6.Ma Shuhan、赤羽 克仁、中本 高道、佐藤 誠：携帯端末向け力覚提示付きマルチモーダルインタフェースの提案,第 21 回日本バーチャルリアリティ学会,2016.9.14-16

7.藤岡 駿介、広田 光一、野嶋 琢也、赤羽 克仁、佐藤 誠：力覚提示システムを用いた触認識に関する評価,第 21 回日本バーチャルリアリティ学会,2016.9.14-16

8.永井 一樹、田上 想馬、赤羽 克仁、佐藤 誠：没入型 VR 環境のためのウェアラブル手首力覚提示デバイス, Entertainment Computing 2015, 2015.9.25-27

9.銭 亦ハン、赤羽 克仁、佐藤 誠：可動するウェアラブルファッションの検討,第 20 回日本バーチャルリアリティ学会, pp. 170-171, 2015.9.9-11

10.田中 駿、赤羽 克仁、田中 弘美、佐藤 誠：手首力覚提示による手術教示システムに関する研究,第 20 回日本バーチャルリアリティ学会, pp. 72-73, 2015.9.9-11

11.内山 貴雄、赤羽 克仁、長谷川 晶一、佐藤 誠：高速な多指操作シミュレーションのための柔軟な指先モデルの提案,第 20 回日本バーチャルリアリティ学会, pp. 68-71, 2015.9.9-11

12.永井 一樹、田上 相馬、赤羽 克仁、佐藤 誠：装着可能な力覚提示デバイスの開発について,第 20 回日本バーチャルリアリティ学会, pp. 148-149, 2015.9.9-11

13.川崎 太雅、赤羽 克仁、長谷川 晶一、佐藤 誠：力覚提示によるストリートダンス訓練システムの提案,第 20 回日本バーチャルリアリティ学会, pp. 471-474, 2015.9.9-11

〔図書〕(計 2 件)

1.Fujioka Shunsuke, Uchiyama Takao, Tagawa Kazuyoshi, Hirota Koichi, Nojima Takuya, Akahane Katsuhito, Sato Makoto: Haptic Interaction, 分担, Object Manipulation by Hand with Force Feedback, Springer Singapore, pp. 261-266. DOI:10.1007/978-981-10-4157-0\_45, 2017.7

2.Takahiro Okubo, Katsuhito Akahane and Makoto Sato: Haptic Interaction, 分担, A Proposal of Model-Based Haptization System for Animal Images, Springer Japan 2015, PART , pp. 313-316, DOI:10.1007/978-4-431-55690-9\_57, 2015.9

〔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://sklab-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・科学技術創成研究院・助教  
研究者番号：70500007

(2)研究分担者

佐藤 誠 (SATO Makoto)

首都大学東京・システムデザイン研究科・  
特任教授  
研究者番号：50114872

(3)連携研究者

長谷川 晶一 (HASEGAWA Shoich)

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授  
研究者番号：10323833