

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：35403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11916

研究課題名(和文)多指操作を向上させるバイオフィードバックによる高精度極安定力覚提示に関する研究

研究課題名(英文)Research on high definition stable haptic device for multi-finger by biofeedback

研究代表者

赤羽 克仁 (Akahane, Katsuhito)

広島工業大学・情報学部・准教授

研究者番号：70500007

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では力覚提示装置の高精度と極安定の向上を目的としてバイオフィードバックによる多指操作力覚提示装置に関する研究を行なった。物体接触時における力覚提示装置の高精度の向上を目指し、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。把持力の計測には把持を抽象化した専用のエンドエフェクタを作成し計測を行なった。これまでにない、操作性の向上と安定性の向上を計算機シミュレーションと評価実験により示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多指操作環境の構築は手術手技、リハビリ、技術伝承、生産システムなど、様々な応用が期待されている。特にストリング駆動の力触覚提示デバイスは我々が世界に先駆けて研究・開発を行なっているシステムである。その中で、我々が提案する操作者の状態を利用したバイオフィードバックはヒトが無意識のうちに行なっている把持操作における操作者の内部状態を操作の表には現れない内力としての把持力を推定し、制御に用いるものであり、多指操作環境において実現したことは重要な意味を持つものであると考える。

研究成果の概要(英文)：In this study, we studied a multi-finger operation haptic device using biofeedback for the purpose of improving the accuracy and stability of the haptic device. Aiming to improve the accuracy of the haptic presentation device when it comes into contact with an object, we actively incorporate changes in the grasping force that people perform unconsciously in their daily lives into the haptic presentation. By changing it, we realized a high rigidity that could not be presented until now. To measure the gripping force, we created a special end effector that abstracts the grip and measured it. A computer simulation and an evaluation experiment showed the improvement of operability and stability that had never existed before.

研究分野：ヒューマンインタフェース

キーワード：ハプティックデバイス ヒューマンインタフェース バーチャルリアリティ

## 1. 研究開始当初の背景

近年、計算機処理能力の飛躍的な発展により、比較的容易に3次元VR(Virtual Reality)空間を構築できるようになってきた。3次元空間での操作を行うためのヒューマンインタフェースとして、力のフィードバック機能を有する力覚提示装置の開発がされている。VR技術は様々な分野で応用されているが、本研究では把持操作に着目する。力覚提示装置を用いて操作する対象物を操作する際に、現実世界で操作者が物体を多指で操作する際に行う把持を力覚提示装置において実現する。剛体などの操作には並進と回転の力覚提示装置が必要であるが、この把持操作を実現するために、エンドエフェクタの自由度を上げ把持操作の自由度を追加することで実現する。このようなエンドエフェクタの多自由度化の研究は、訓練やシミュレーション、遠隔操作など様々な応用が期待できる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、VR世界における両手多指操作を実現するストリング駆動型力覚提示において、操作者の生体情報を利用した高精度かつ極安定なシステムを構築し、ヒトの巧緻な両手多指操作に必要な身体保持感の解明である。指先の感覚は非常に優れており、物体を把持・操作する場合ヒトは指先の感覚から巧みに指先を操る。これまでの多指操作を実現する力覚提示装置では物体操作に寄与する提示力のみを制御に注視されてきた。しかしながら、実世界での操作と真に等しい提示力の再現は困難であるため、操作者の意図通りに操作することが困難であり、身体保持感が乏しく、運動主体感の実現に大きな制約がかかっていた。そこで、物体操作においてヒトが制御する内力に相当する情報をセンシングしバイオフィードバックとして制御に利用することで操作者の意図を制御に反映し、これまでにない、高精度で極安定な多指操作環境の実現を目指す。

## 3. 研究の方法

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(Virtual Reality)世界の物体操作に応用することはできないだろうか。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、ストリング駆動型力覚提示装置SPIDAR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、ストリング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。

力覚提示装置は人間に対して力を提示する装置であるので、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我々が世界に先駆けて取り組んでいる研究テーマである。筋電や脳波といった生体信号を用いる研究は盛んに行われているが、電極の装着、大掛かりな装置、外乱の影響を受けやすい等、身近に利用するには問題点が多くある。本研究は、我々が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応用して、力覚提示に必要な個々の要素同士を結合し、操作の安定性と忠実性の両立を実現することを目指すものである。

指先に対してより高精度な力覚提示を実現するため更新周波数が100kHz以上を実現するシステムを構築しなければならない。既存のモータコントローラでは、そのような高性能なシステムはなく、専用開発しなければならない。専用のハプティックコントローラを設計し、高解像度多指操作環境の実現を目指した。

## 4. 研究成果

自然な把持操作を実現するワイヤ駆動型力覚提示装置の研究を行なった。エンドエフェクタ全体の位置・姿勢の力覚提示のみならず、物を掴む際に行う把持を力覚提示することを目的とする。ワイヤ(糸)は押すことができないので、 $n$ 自由度の力覚提示装置を構築する為には $n+1$ 以上の糸でエンドエフェクタを駆動する必要がある。そのための位置・姿勢計算および力覚提示の計算について取り組んだ。そして、従来型のエンドエフェクタとの性能比較として、可操作性楕円体に基づく評価と提示力の最大・最小提示可能範囲に関する比較検討を計算機シミュレーションにより行った。その結果、従来型よりも等方性の高い操作性の実現と、高い把持力の提示の実現が示された。また、試作機を製作し、剛体物理シミュレーションにより構築されたVR世界において、把持を伴うVR物体の操作環境を構築した。操作の安定性と忠実性に影響を与えるシステムの更新周波数については、物理シミュレーションの更新周波数は約2kHz、力覚各提示装置の更新周波数は約30kHzと高速な更新周波数を専用のハプティックコントローラを構築することで実現した。

提案システムの評価実験として、VR物体の把持操作における把持と剛体操作の計測を行なっ

た．その結果，把持の測定と把持力の提示が可能であり，同時に VR 物体に対する高い追従性と並進力・回転力の提示が可能であることを確認した．従来手法と提案手法を検証する為に，可動域における位置・姿勢の計測および提示力について計算機シミュレーションを行った．特に可操作楕円体に基づく評価値および提示力の最大・最小値の分布において比較検討を行い，提案手法の有効性を示した．本研究で対象とする糸を用いた装置において糸は負の張力を発生することができない．糸が弛んでしまうため力を伝えることができないからである．そのため，各糸の張力は最低張力と最大張力により制約を受ける．エンドエフェクタが原点にある場合に比べ，分布が偏り分布の中心がエンドエフェクタの原点に一致せず大きく歪む．このような分布状況の評価するため，すべての糸についての最低張力と最大張力の組み合わせからできる張力ベクトルを用いて実現できる提示力の集合を考えた．その集合の平均がゼロで分散が大きく，その  $n$  個の主軸方向の分散値が等しければ提示力の等方性が期待できる．一方，装置の各軸方向への最大・最小提示力の値は装置の性能評価として重要な役割を果たす．そこで，本研究ではこの提示力の集合の各軸方向の最大値と最小値に着目し，エンドエフェクタを各軸方向に移動した際の最大値と最小値の推移を数値計算により求めた．従来手法に比べ提案手法の評価値が操作域の中央付近でより高いことがわかった．並進方向では Y 軸方向において中心から  $\pm 0.06$  付近で従来手法よりも評価値が高く，その他の軸方向においてはモータ系出口で作る域内で常に提案手法の評価値が高い．回転方向については，X 軸方向において中心から  $\pm 35$  度付近で従来手法よりも評価値が高く，その他の軸方向においては常用する角度域 ( $\pm 45$  度付近)において常に提案手法の評価値が高いことがわかった．また，従来手法は並進方向の Z 軸において，モータの糸出口の Z 座標値 ( $\pm 0.1\text{m}$ ) になると評価値がゼロになり，特異姿勢が存在することがわかっていたが，提案手法では特異姿勢を回避できることがわかった．

試作機の製作を行い剛体物理シミュレーションにより構築された VR 空間において，把持を伴う剛体操作の VR 環境の構築を行った．力覚提示装置を構成する DC コアレスモータは Maxon モータ社製の RE-MAX220429 を用いた．また，モータ軸に取り付け糸を巻き取るプーリーを用いて，PE ライン (ポリエチレン) を制御した．専用のハプティックコントローラにおいて，位置・姿勢計算および提示力の張力分配計算などが処理される．ハプティックコントローラと PC は Ethernet による UDP 通信により接続される．VR 世界には剛体物理シミュレータを用いて構築した．VR 物体とエンドエフェクタの接続にはバーチャルカップリングを用いることで自由な操作を可能にした．把持力の生成にはペナルティ法による反力生成手法を用いた．剛体物理シミュレーションを伴う VR 世界において，提案システムの評価実験を行った．操作時の把持量と把持力の計測および，エンドエフェクタと VR 物体の変位と提示力の計測を行なった．その結果，把持量の測定と把持力の生成が可能であり，それと同時に VR 物体に対する高い追従性と並進力・回転力の提示が可能であることを示した．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 赤羽 克仁	4. 巻 25
2. 論文標題 自然な把持操作を実現する7自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置の開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 356 ~ 365
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18974/tvrsj.25.4_356	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 赤羽克仁
2. 発表標題 シリンジ操作を実現する8自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置の提案
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤羽克仁
2. 発表標題 掌への力覚提示を実現する8自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置の提案
3. 学会等名 ハプティクス研究委員会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤羽克仁
2. 発表標題 シリンジ操作を可能にする対称性を考慮した8自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置の試作
3. 学会等名 インタラクション2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤羽克仁
2. 発表標題 シリンジ操作を可能にする7自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置の実現
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会 ハプティクス研究委員会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 赤羽克仁
2. 発表標題 掌を使った把持操作を可能にする7自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置の試作
3. 学会等名 インタラクシオン2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤羽克仁
2. 発表標題 剪刀操作を実現する7自由度ワイヤ駆動型力覚提示装置の提案
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------