

令和元年6月24日現在

機関番号：32641

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2018

課題番号：26709006

研究課題名(和文) 可変粘弾性機構を用いた装着型力覚提示デバイスの開発と知能化空間への応用

研究課題名(英文) Development of wearable force feedback devices using variable visco-elastic mechanism for VR/AR intelligent space

研究代表者

中村 太郎 (Nakamura, Taro)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：50315644

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,400,000円

研究成果の概要(和文)： 現在VR/AR空間ではHMDによる視覚的情報の提示が多く用いられている。しかしながらスポーツやリハビリ等の分野における能動的な動作のアプローチに対して、よりリアリティのある環境を実現するためには「力覚」の提示が必要不可欠である。本研究では、申請者が開発している人工筋肉と機能性流体デバイスで構成された可変粘弾性機構を用いることで、腕部に対して軽量でありながら機構的に高機能・高出力な力覚を提示できる全く新しい「装着型力覚提示デバイス」を開発する。開発された上肢4自由度の装着型力覚提示装置をHMDによる3DのVR空間に適用させた結果、複数の被験者に対して有用な結果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果により、今まで視覚効果に頼っていたHMDによるVR/AR空間での感覚提示において、人間の挙動に沿った可変粘弾性の力覚の提示が効果的であることが分かった。この知見における社会的な意義として、本システムが、視覚効果のみでは意志を伝達しにくい、医療系トレーニングシステムやスポーツ教育、リハビリテーションの分野において新たなイノベーションを起こす可能性を示した。

研究成果の概要(英文)： Recently, technology to construct a large virtual reality space has been developed. Force feedback devices that can render haptic perception such as operating real objects are required. General devices are desktop types. Desktop types restrict range of motion of the operator.

In this study, we developed a wearable 4 degrees of freedom (DOF) force feedback device for upper-limb using variable visco-elastic mechanisms which are composed of pneumatic artificial muscles and magneto-rheological clutches. Further, 3D VR/AR intelligent space was consisted, this wearable device was applied to the intelligent space.

As a results of the experiments, the proposed wearable type force feedback devices showed good performance in the developed 3D VR space.

研究分野： ロボット工学

キーワード： 力覚提示装置 パーチャルリアリティ 拡張現実感 可変粘弾性アクチュエータ 人工筋肉

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年医療系トレーニングシステムやリハビリテーション、VR/脳科学等の分野において力覚や触覚等を人間に提示するハプティックデバイスの開発が盛んに行われている。一般的に力覚提示デバイスは、無負荷時のバックドライバビリティを確保するため、アクチュエータとして主に DD モータが用いられている。しかし剛性や粘性等の多様な力覚情報を提示するために、フィードバック制御が必要となり応答が遅くなる傾向がある。さらに、大きな出力を必要とする提示をターゲットとした場合、小型・軽量化が困難となるため、腕部や脚部の力覚を提示するデバイスのほとんどが卓上型である。したがって、現在モバイル機能を有するデバイスは5指の力覚や瞬間的な力覚の提示、触覚提示等の比較的出力低出力なハプティックデバイスに限られている。

さらに、力覚提示に伴う視覚的情報提示についても、そのデバイスが卓上型であることから、操作者を着席させ、2次元ディスプレイ上で操作していた。よって操作者は仮想物体を実3次元空間内において操作したり、広範囲な位置・姿勢に移動しながら力覚情報を得ることが難しかった。

一方、申請者は軸方向繊維強化型空気圧ゴム人工筋肉(以下:人工筋肉、図1)の開発とその可変剛性制御に関する研究を行っている。本人工筋肉は従来の McKibben 型に比べ、同圧力・形状下において4倍の収縮率と収縮力を出力することができ、同分野では世界最高レベルの出力を誇る。また申請者らは図2のような磁気粘性流体(以下:MR流体)をはじめとした機能性流体デバイスの制御とその応用に関して検討している。この成果をうけ、申請者は本人工筋肉とMRデバイスを用いた可変粘弾性関節を有するマニピュレータ(図3)を世界に先駆けて開発した。本マニピュレータは軽量でありながら高出力で、ジャンプや投擲等の瞬発力の発生や可変粘性による振動制御など、多様な機能を実現できる。

さらに、本力覚提示デバイスの機能要素を有効に利用するため知能化空間内での適用を検討している。空間知能化は i-space やセンシングルームなどの研究で見られるように、空間にセンサを多数配置することで、人の活動内容や周辺環境の状況を識別できるシステムを構築する研究である。申請者らは、この空間に移動可能で多様な力覚情報を持った仮想物体を設置し、上述の力覚提示デバイスや視触覚提示デバイスと組み合わせれば、実3次元空間内で広範囲に力覚情報を提示できるような、全く新しい疑似空間システムが構築できると着想した。

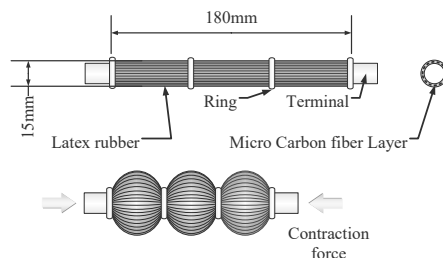


図1 軸方向繊維強化型ゴム人工筋

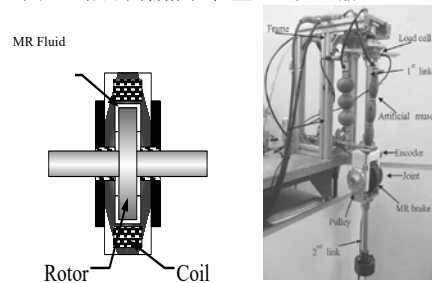


図2 機能性流体デバイス

図3 マニピュレータ

2. 研究の目的

本研究の目的として以下の2点を示す。

○ 軽量高出力な装着型力覚提示デバイスの開発と力覚提示方法の確立

- 人工筋肉とMRデバイスを用いた力覚提示デバイスの開発と多様な力覚(剛性・粘性・摩擦)の提示手法の確立。
- 本デバイスの小型化/装着方法の検討。なお本申請では、上肢の肘・肩部の屈曲伸張動作による位置・姿勢の感覚提示を行うため回転4自由度の装置を開発する。なお、肩の内転や回旋は固定せず構造的に自由な構造を採用する。

○ 本デバイスの知能化空間への適用

- 視覚・力覚・触覚情報を組み合わせた3次元の仮想物体の提示手法の構築
- 具体的な複合的感覚提示方法提案と構築。(例:仮想壁迷路、本デバイスを用いた仮想物体の機械インピーダンスの提示、仮想物体を投げた時の軌道・力学計算、空間内にいる複数の装着者が相互的に疑似空間の力覚情報を共有できるようなシステムを構築)

3. 研究の方法。

本研究は以下の手順にしたがって遂行された。

STEP1: 人工筋肉と機能性流体デバイスを用いた卓上型1自由度力覚提示デバイスの開発と制御方法の確立

STEP2: 人工筋肉とMRデバイスによる力覚提示機構(可変剛性/粘性/摩擦/質量/瞬発力)の開発

STEP3: 1自由度モバイル型力覚提示装置の検討

STEP4: 知能化空間内における力覚提示システムの開発(プロジェクタによる視覚提示)

STEP5: 4自由度モバイル型力覚提示装置の開発

STEP6: 知能化空間内における3次元力覚提示システムの開発(HDによる視覚提示)

4. 研究成果

3章で示した研究手順にしたがって、5章で示すような研究成果が得られたが、本報告では、

紙面の関係により、主に STEP5-6 における 4 自由度力覚提示装置の開発と 3 次元知能化空間への応用に焦点を当てて報告する。

4.2.1 4 自由度力覚提示装置

・力覚提示装置の基本構造と力覚提示手法

提案する力覚提示装置の基本構造を図 4 に示す。力覚提示装置の各関節は空気圧ゴム人工筋肉、プーリー、MR 流体クラッチ、エンコーダおよび上肢装着用リンクで構成される。人工筋肉の剛性は空気圧で制御され、その剛性はワイヤを介してプーリーで関節剛性に変換される。関節剛性は MR クラッチによって伝達され、操作者は上肢装着用リンクから人工筋肉の剛性を提示される。また、MR クラッチのトルクを制御すれば、粘性のような力覚も提示できる。これにより、本装置は自由空間や仮想物体の剛性や粘性をパッシブに提示できるように設計した。なお、本装置では、特に重力の影響が大きい関節に対して自重補償機構を導入する。

・力覚提示装置の概要

開発した外骨格型 4 自由度力覚提示装置を図 5 に示す。本装置は、肩に 2 自由度、肘に 2 自由度の合計 4 自由度に対して力覚提示できる。各関節には空気圧人工筋肉、MR クラッチが配置される。手先は回転 3 自由度を有しており、位置を変化させずに姿勢を変えられる。

本装置は操作者の上肢と腰に装着する。また、肩に装置重量を支えるための保持部がある。上肢は上腕部で 2 箇所、前腕部で 2 箇所を非伸縮性のバンドで固定する。腰の装着部はベルトに板ばねを併用することで、装置本体が傾くことを防ぐ。Joint2 には装置の上腕部の重量を軽減するため、ばねとリンク機構を用いた自重補償装置⁽⁴⁾を採用した。総重量は 5.2 kg となる。

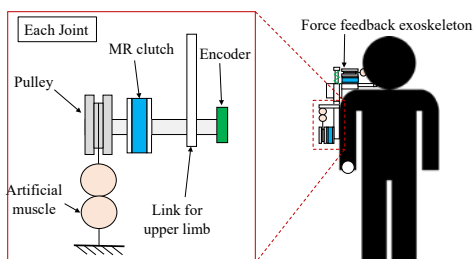


図 4 4 自由度力覚提示装置の基本構造

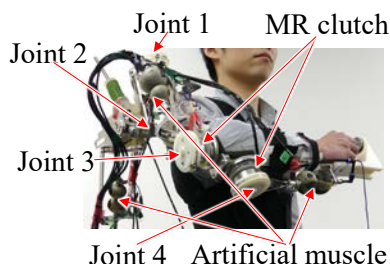


図 5 4 自由度力覚提示装置

4.2.2 制御システム

・駆動システム

本装置を駆動させるシステムを図 6 に示す。本装置は MATLAB/Simulink で作成した制御系を dSPACE で制御する。dSPACE はモータドライバ (MR ドライバ) と比例電磁弁に指令信号を送る。MR ドライバで MR クラッチの伝達トルクを、比例電磁弁で人工筋肉への空気圧供給をそれぞれ制御する。ここで、人工筋肉から比例電磁弁までのチューブの長さは操作者が移動する場合を考え、5~6 m とした。手先の力はロードセルで、各関節の角度はエンコーダで計測する。

・制御システムとモデル化

本装置の制御システムを図 7 に示す。あらかじめ提示する目標手先剛性 $\mathbf{k}_d = [k_{dx}, k_{dy}, k_{dz}]^T$ を入力し、目標関節剛性 $\mathbf{k}_{dj} = [k_{dj1}, k_{dj2}, k_{dj3}, k_{dj4}]^T$ を求める。このとき、 \mathbf{k}_{dj} は、 \mathbf{k}_d の要素をそれぞれ抽出した対角行列 \mathbf{K}_{dj} 、 \mathbf{K}_d とヤコビアン \mathbf{J} を用いて次式で求める。

$$\mathbf{K}_{dj} = \mathbf{J}^T \mathbf{K}_d \mathbf{J} \quad (1)$$

操作者は右腕を動かし、装置の関節角度 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]^T$ を変化させる。それに応じて、 \mathbf{k}_{dj} を各人工筋肉の制御器に入力する。人工筋肉には目標関節剛性に応じた空気圧 $\mathbf{P} = [P_1, P_2, P_3, P_4]^T$ を印加する。仮想物体に接触した場合、MR クラッチに伝達トルク $\boldsymbol{\tau}_c$ に応じた電流 \mathbf{i} を印加する。これにより装置は操作者の手先に 3 軸のばね定数 $\mathbf{k} = [k_x, k_y, k_z]^T$ を提示する。

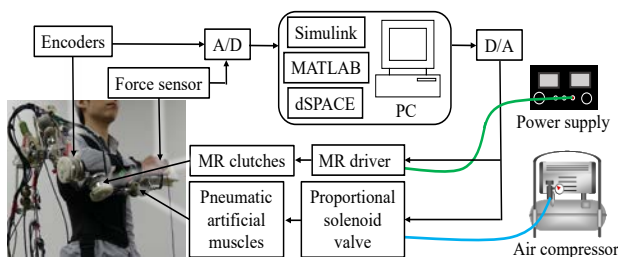


図 6 3 次元力覚提示システムの概要

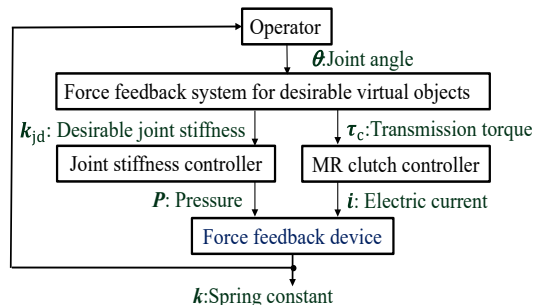


図 7 力覚提示システムの制御系フローチャート

4.2.3 剛性提示実験

本装置の提示できる基本的な力覚である剛性の特性を定量的に評価する。本実験では、手先剛性を制御して仮想物体の剛性を提示する。

・ 剛性提示実験の実験環境

本実験の様子を図8に示す。本実験では、X軸、Y軸、Z軸の力を独立に測定する。そのため、本装置の手先は一軸方向のみに動かせるようにスライドラールの摺動部に固定する。スライドラール上には自由空間と剛性提示領域を設定する。操作者は手先を自由空間から剛性提示領域に侵入させた後、自由空間の初期位置に戻す。このとき、本装置の基準座標がずれることを防ぐために装置の背部を床に固定する。

・ 剛性提示実験の実験結果

本実験では常に人工筋肉が張るように自由空間では人工筋肉に対して圧力を0.17 MPa印加しておく。また、人工筋肉への印加圧は0.12 MPaから0.27 MPaまでに制限する。

手先剛性実験の結果を図9、図10、図11に示す。グラフより、手先の位置が大きくなると、提示した力が増大した。また、X軸およびZ軸では手先剛性の増加により、力の位置に対する傾きが上昇しており、剛性を提示できたと言える。Y軸に関しては、手先剛性の出力値の変化が見られなかった。これは、実験時はスライドラールの摺動部を支えながら手先を動かすため、摺動動作が安定せず、剛性提示の傾向が出にくかったためだと考える。

4.2.4 VR空間での非接地剛性提示実験

本装置で剛性を提示できるか、また、剛性の大きさの違いを人間が感じられるほどに出力できるかを主観評価によって検証する。

・ VR空間を用いた実験環境

三次元測定センサのKinect v2や、立体映像を提示するヘッドマウントディスプレイ(HMD)を組み合わせ、仮想空間を構築する。実験環境を図12に示す。HMDとKinect v2により、操作者の頭部の位置・姿勢や関節位置を取得する。仮想空間上で、操作者の右手は赤い球形のマーカとして表現される。操作者はマーカを通じて仮想物体に接触し、操作できる。これらの処理には計測用PCを用いる。また、計測用PCは力覚提示装置の制御用PCにTCP/IP通信でデータを送信する。制御用PCは力覚提示装置に指示を送り、仮想物体の剛性を提示する。これにより、操作者は仮想物体と視覚と力覚を伴ったインタラクションができる。

・ 実験手法

剛性を提示する仮想物体の配置されたVR空間での挙動を図13に示す。赤い球が操作者の右手位置を示すマーカであり、青い立方体が剛性提示する仮想物体である。操作者が青い立方体をマーカで押すと、立方体がマーカに沿って移動する。青い立方体が仮想的な壁に接触すると、触れている間だけ赤く変色する。立方体からマーカを離すと、立方体は初期位置に戻る。立方体に触れたとき、力覚提示装置は剛性提示を行う。

本実験では、剛性の大きさを感じ取れたかを正答率で評価する。加えて、アンケートによる主観評価を実施する。実験手順を以下に示す。

- (1) 被験者がHMDのみを装着し、仮想物体とインタラクションしてもらう。
- (2) 被験者が力覚提示装置とHMDを装着する。
- (3) 被験者に低剛性、中剛性、高剛性の3種類の剛性を提示する。
- (4) 基準となる中剛性を提示する。

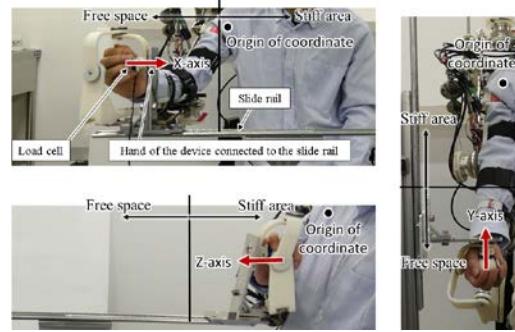


図8 3次元剛性力覚提示実験

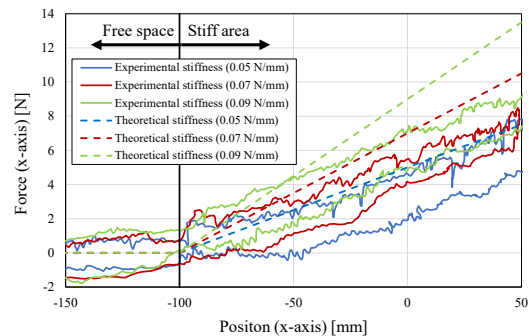


図9 X軸方向における剛性提示の実験結果

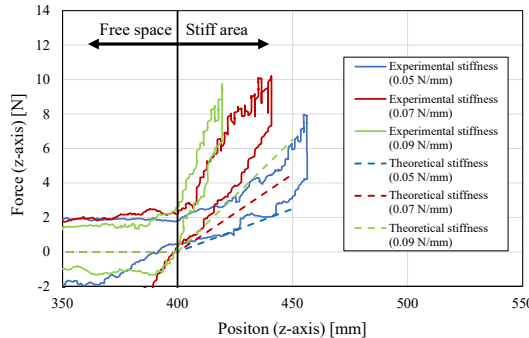


図10 Y軸方向における剛性提示の実験結果

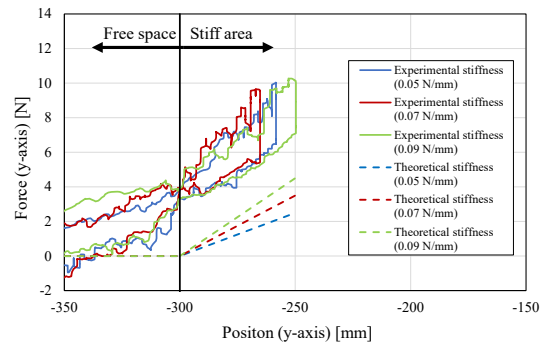


図11 Z軸方向における剛性提示の実験結果

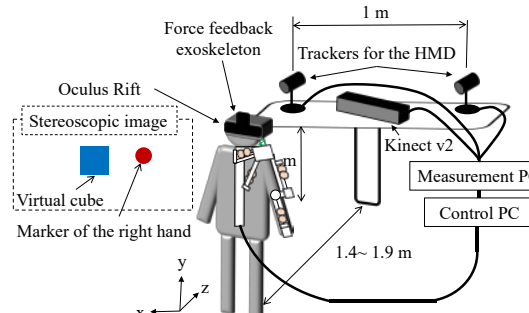


図12 3次元力覚提示システムの構成

- (5) 3種類の剛性のいずれかを提示し、被験者には基準と比較して仮想物体の剛性が小剛性か、中剛性か、高剛性かを回答してもらう。
- (6) (4)~(5)の手順を3種類の剛性で5回ずつ、X軸、Y軸、Z軸の3つの方向に合計45回繰り返す。

ここで、X軸、Y軸、Z軸の方向における低剛性、中剛性、高剛性の対応を表1に示す。本実験での正答率のチャンスレベル（ある事象が偶然起こる確率）は33%である。本装置は肘と肩に力覚提示するため、立方体を操作する際は、肘と肩を主に動かすように指示した。被験者は20代の男性5名で、手順(1)と手順(6)の後にアンケートに回答してもらう。

・剛性提示の大きさについての正答率評価

本実験の被験者の平均正答率を図14に示す。ここで、この図のエラーバーは標準偏差を表す。全体平均正答率は65.7%であり、チャンスレベルを大きく超える平均正答率を示している。このことから、本装置によって剛性の大きさを提示できたと言える。

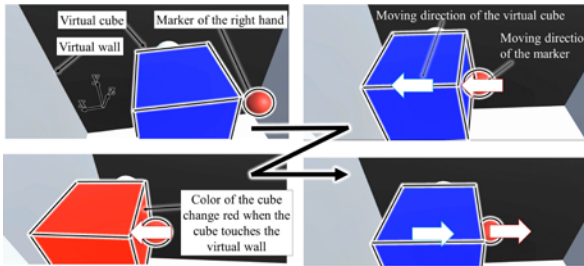


図13 3次元空間における青い立方体の挙動

表1 各剛性値の値

	X axis	Y axis	Z axis
Low stiffness	50 N/m	50 N/m	50 N/m
Medium stiffness	70 N/m	70 N/m	90 N/m
High stiffness	90 N/m	90 N/m	130 N/m

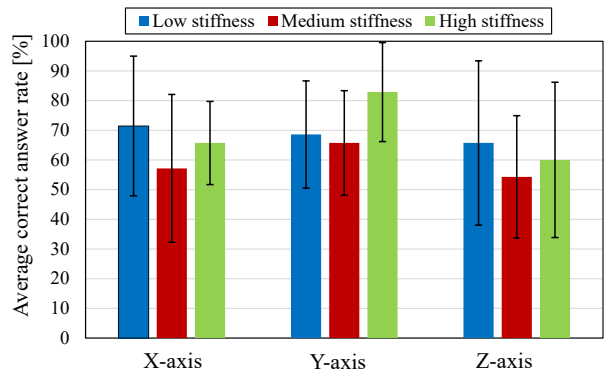


図14 各軸に対する剛性提示の正解率

・力覚提示装置の有無に関する主観評価の比較

HMDのみと力覚提示装置を併用した場合をアンケートにより比較する。アンケートの質問項目を以下に示す。

Q1: 仮想物体に触れている間、仮想物体の剛性（柔らかさ/硬さ）を感じた。

Q2: 仮想物体がその場にあるかのように感じた。

アンケート結果を図15に示す。それぞれの質問項目に対し、力覚提示装置の有無で検定した結果、Q1で有意差が認められた ($p < 0.05$)。そのため、力覚提示装置により、被験者は仮想物体の剛性をより感じられたと言える。一方Q2では有意差が見られなかったことから、本VR空間では被験者はHMDだけでも十分臨場感を得られていると考える。しかし、中央値を見ると、力覚提示装置の方が評価が高く、今後複雑な仮想物体を提示するには力覚提示装置の効果が明確に現れると推測する。

・装置の装着感に対する主観評価

力覚提示装置の装着感に関する評価について述べる。質問項目を以下に示す。

Q1: 装着した際に「圧迫感」や「拘束感」を感じた。

Q2: 装置の重量が気になった。

Q3: 装置の装着部がずれたと感じた。

アンケート結果を図16に示す。それぞれの質問項目に対し、「4: どちらでもない」という回答を基準値とした検定を行った。その結果、Q2に有意差が検出された。また、Q1の中央値を見ると、装置が圧迫感や拘束感を被験者に与えてしまったことが示唆される。被験者へのヒアリングを行った結果、装置が傾いた結果、肩の保持部から圧迫感や負荷を感じているとの指摘が多かった。そこで、今後は装置を軽量化し、胸部に装着用のベルトを追加することで、装置の傾きを抑制し、装着感の向上を図る。

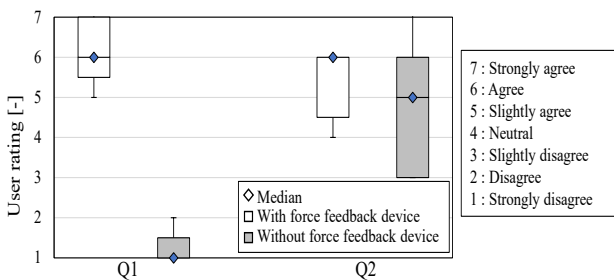


図15 力覚提示装置の評価の回答

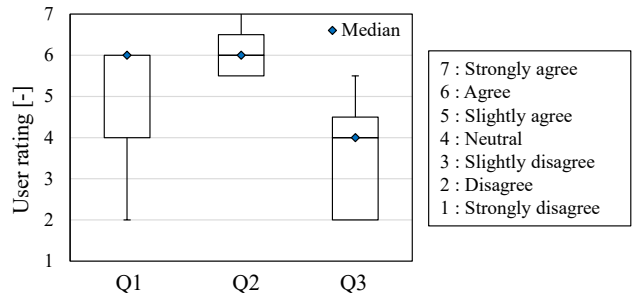


図16 力覚提示装置の装着感の評価

4.3 結言

MR クラッチと人工筋肉を用いた外骨格型 4 自由度力覚提示装置を開発した。実験から、本装置は様々な剛性の大きさを提示できることを定量的に確認した。また、VR 空間に適用し、本装置による力覚提示手法で操作者に剛性の大きさを提示できることを主観評価で検証した。今後は、装置の軽量化や装着部の改良によって装着感を改善する。また、本装置で粘性提示を実施し、その力覚提示の特性を確認する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

・鈴木 遼, 江川 正和, 山田 泰之, 中村 太郎, "MR ブレーキと空気圧人工筋肉を用いた装着型 1 自由度力覚提示装置の開発と拡張現実空間での評価", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.23, No.1, p.45-54

〔学会発表〕(計 18 件)

・ Y. Onozuka, R. Suzuki, M. Okui, Y. Yamada and T. Nakamura, "Development of a Wearable 4-DOF Force Feedback Device for Upper-Limb Using MR Clutches and Pneumatic Artificial Muscles", 16th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, G-2-2, Maryland, (United states), (2018.7)

・ Yuki Onozuka, Ryo Suzuki, Yasuyuki Yamada and Taro Nakamura, "An Exoskeleton Type 4-DOF Force Feedback Device Using Magnetorheological Fluid Clutches and Artificial Muscles" , 2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), WCT1.6, Auckland, (New Zealand), (2018.7)

・ Ryo Suzuki, Masakazu Egawa, Yasuyuki Yamada, Taro Nakamura, "Development of a 1-DOF Wearable Force Feedback Device with Soft Actuators and Comparative Evaluation of the Actual Objects and Virtual Objects in the AR Space", Proceedings of The 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV 2016), P0220, Phuket, Thailand (2016.11)

・ Masakazu Egawa, Takumi Watanabe, Taro Nakamura, "A 1-DOF Wearable Force Feedback Device with Pneumatic Artificial Muscles and MR Brake" Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Mechatronics(ICAM2015),Tokyo,Japan,2A1-04,(2015.12)

・ Masakazu Egawa, Takumi Watanabe, Taro Nakamura, "Development of Semi-Active-Type Haptic Device Using Variable Viscoelastic Elements", Proceedings of the 8th International Conference on Intelligent Robotics and Applications, Portsmouth, UK, 24-27 August (ICIRA2015), Vol.9244, pp. 421-432, (2015.8)

・ Masakazu Egawa, Takumi Watanabe, Taro Nakamura, "Development of a Wearable Haptic Device with Pneumatic Artificial Muscles and MR brake" IEEE Virtual Reality Conference 2015, Arles, France, 23 - 27 March 2015 (VR2015), p.174, (2015.3)

・ Hirano Junya, Tanaka Dai, Watanabe Takumi, and Nakamura Taro, "Development of Delta Robot Driven by Pneumatic Artificial Muscles" Proceedings of 2014 IEEE ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics in Besancon France(AIM 2014),p1440-1405,(2014.7)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称：力覚提示装置

発明者：中村太郎他

権利者：中央大学

番号：特願 2014-107221

出願年：2015 年

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mech.chuo-u.ac.jp/~nakalab/index.html>

6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：奥井学

ローマ字氏名：Manabu Okui

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。