

# ワイヤ駆動型ウェアラブル 6 自由度力覚提示デバイス “SPIDAR-W”

永井一樹<sup>†1</sup> 銭亦魁<sup>†1</sup> 赤羽克仁<sup>†1</sup> 佐藤誠<sup>†1</sup>

**概要:** 本研究ではワイヤ駆動型ウェアラブル 6 自由度力覚提示デバイス“SPIDAR-W”を提案する。本デバイスはユーザの両手に 6 自由度の力覚提示が可能である。ウェアラブル力覚提示デバイスは、ユーザが自由に移動できる状態での力覚提示を目的としたデバイスである。従来のウェアラブル手首力覚提示装置は、提示できる力覚が並進 3 自由度のみである、片手にしか力覚提示が出来ない、といった問題があった。本研究で開発するデバイスは、ユーザが背負って使用することを想定したフレームに、ユーザの手首を囲むようにモータを設置することで、手首への 6 自由度の力覚提示を実現している。そのため、軽量の機構で、両手への力覚提示が可能である。本デバイスにより、ユーザの自然な動作を阻害することなく、バーチャル空間とのインタラクシオンを実現できる。

## Wire Driven Wearable 6DOF Haptic Device "SPIDAR-W"

Kazuki NAGAI<sup>†1</sup> Yihan QIAN<sup>†1</sup>  
Katsuhito AKAHANE<sup>†1</sup> Makoto SATO<sup>†1</sup>

**Abstract:** In this paper, we propose wire driven wearable 6 DOF haptic device “SPIDAR-W”. This device gives 6DOF force feedback to user’s both hands. Wearable haptic devices provide haptic interaction for user without limiting his/her move. Previous wearable haptic device only possible to provide 3DOF haptic feedback or single hand operation. Our device realize 6 DOF haptic interaction to use’s wrist by arrange motor surrounding his/her hand on frame that can carry on his back. Therefore, this device provide haptic feedback to both hands by light and brief mechanism. Our device products more freely interaction with virtual space.

### 1. はじめに

近年、HMD 技術の向上により、VR 空間への没入度は視覚の面で飛躍的に向上した。これに伴い、人間の手の動きや歩行などの身体動作を VR 空間に反映させることで、VR 物体とインタラクシオンを行うための研究・開発が活発化している。HTC vive[1]はルームスケールのモーショントラッキングを実現する HMD であり、ユーザは目前に広がる VR 空間内を自由に移動できるようになるため、VR 空間との直感的なインタラクシオンが可能となる。しかし、自身が VR 環境の中に存在するような体性感覚を得られたとしても、VR 物体に触れた感触が再現できなければ、VR 物体の実在感を十分に得られない。そのため、VR 空間への没入感は削がれてしまう。VR 空間との触力覚を伴ったインタラクシオンを目的とした装置として、VR 物体に触れた感覚や重量感をユーザにフィードバックする力覚提示デバイスがある。しかし、普及している力覚提示装置は机の上などに固定して使用するものが多く、ユーザが動きながら使用することは出来ないため、自身が VR 空間内にいる体性感覚を得ることは難しい。ヒューマンスケールの力覚提示を実現するために、GROPE[2]や Big-SPIDAR[3]などが開発された。しかし、前者はデバイスが天井に接地されているため、ユーザが移動できる領域が限られてしまう、後

者はワイヤの干渉が発生するため自由な振り向きや移動が出来ないという問題があった。本研究ではこの問題を解決するために、装着可能な両手力覚提示装置を開発することで、ユーザが VR 空間内を自由に移動可能な状態で VR 物体との触力覚を伴ったインタラクシオンを実現可能にすることを目標とする。

### 2. 先行研究

ウェアラブルハプティックデバイスの先行研究の例として、Gupta らによるデバイス[4]が挙げられる。このデバイスは外骨格装着型であり、手、腕、肘にそれぞれ力覚を与えることが可能である。しかし、ユーザの腕に 4Kg のデバイスを直接装着するため、ユーザへの負担は大きく、実際の使用時には壁面などに設置して使われている。Letier らによる SAM[5]は、接地なしでユーザの腕に力覚提示が可能な外骨格装着型デバイスであるが、使用は片腕のみに限定されてしまう。ユーザの負担を軽減するためには、背負って装着できる機構が最適である。Kossyk によるデバイス[6]は、重量のある力覚提示機構をリュックサックのように背負う形状のデバイスである。しかし、機械式のシリアルリンク駆動であるために、機構が複雑であり、重量も 13Kg と重くなってしまっている。廣瀬らによる HapticGEAR[7]は、CAVE[8]などの没入型スクリーン内での使用を目的と

<sup>†1</sup> 東京工業大学 精密工学研究所  
Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology

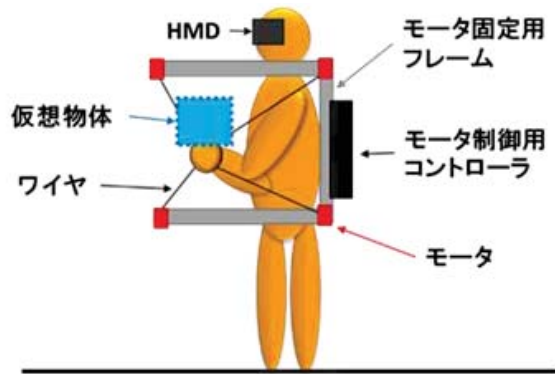


図1 SPIDAR-W 概念図  
 Figure 1 Concept of SPIDAR-W

したデバイスである。ワイヤを取り付けたペン先を介し、VR 物体との力覚を伴ったインタラクションを実現しているが、提示できる力覚は並進3自由度のみである。そこで我々はウェアラブル6自由度力覚提示デバイス SPIDAR-W の提案を行った[9]。しかし、以前の SPIDAR-W は装着しにくいフレーム形状であり、エンドエフェクタはユーザーの手首に固定して使用する必要があったため、アクセスビリティは低かった。これらの問題を解決すべく、SPIDAR-W の改良を行った。

### 3. 提案手法

#### 3.1 提案デバイス

本研究ではワイヤ駆動型のウェアラブルデバイス SPIDAR-W を提案する。デバイスは軽量なフレーム、DC モータ、エンドエフェクタ、モータ制御用基盤で成り立っており、またユーザーが背負って使用することが出来る形状となっているため、ユーザーに与える負担を軽減可能である。また、ワイヤ駆動型であるため簡素な機構で6自由度の力覚提示が可能となる。ユーザーへの映像提示には Oculus rift[10]を使用し、VR 空間への視覚的な没入度を向上させる。SPIDAR-W の概要図を図1に示す。

#### 3.2 システム構成

本デバイスでは力覚提示装置 SPIDAR[11]に基づき、手首に力覚提示を行う機構を構築する。SPIDAR ではエンドエフェクタにワイヤを取り付け、ワイヤの張力をモータで制御することで手首への力覚提示を実現している。また、ワイヤ長からエンドエフェクタの位置姿勢を求めることが出来る。本研究では並進3自由度、回転3自由度の6自由度の力覚提示を目的とするため、同じく6自由度の力覚提示が可能で SPIDAR-I[12]を参考としてモータとワイヤの配置を決定する。SPIDAR-I は図のようにエンドエフェクタの上下に直交するようにワイヤの出口を配置することで、6自由度の力覚提示を実現している。五十嵐らの論文[12]では、SPIDAR-I において位置姿勢計測の精度が最大となるようなモータとワイヤの配置が記述されている。本研究では

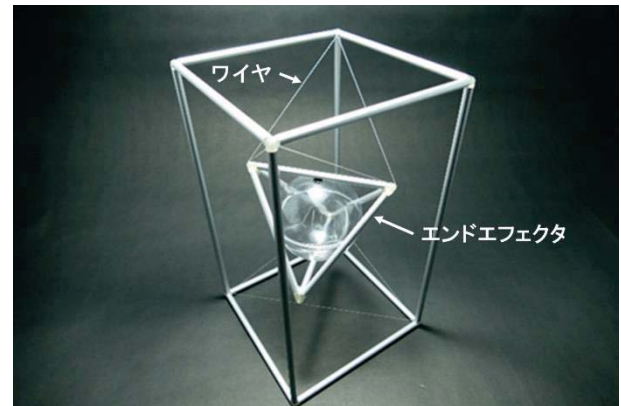


図2 SPIDAR-I 構成モデル  
 図2 Structure of SPIDAR-I

その配置法に基づき片手分のエンドエフェクタに8本のワイヤを取り付けている。この機構を左右それぞれの手に適用することで、両手への6自由度の力覚提示が可能となる。

#### 3.3 デバイス構成

デバイス全体を背中に背負うためには、ユーザーに負担が掛からないような重量のデバイスであることが望ましい。そのため、フレーム材料には比較的軽量なアルミパイプを選択する。DC モータには、重量およびコストを考慮してマブチモーター株式会社製の RF-320EH を使用する。エンドエフェクタは、ユーザーが両手に把持して使用できる形状であることが求められる。デバイス設計時には、フレームとワイヤが装着時に邪魔にならないように、モータやフレームの配置を決める必要がある。さらに、VR 物体の操作の際に十分な力覚提示領域を確保することも重要である。AIST 人体寸法データベース[13]より、人間の壁面・握り軸（肘から握り拳までの長さ）の寸法は平均 318.3mm であり、肩幅は平均 432.8mm である。また、腕を伸ばしきったときの長さの平均は、687.7mm である。また、前腕の外旋角は 60°、内旋角は 80°、上下の屈曲角は 145° である。このことより、左右 984.2mm×前方 687.7mm×上下 485.7mm を腕の最大可動域と考え設計を行う必要がある。

### 4. 設計開発

#### 4.1 モータモジュール設計

本デバイスのモータモジュールではワイヤへ最低張力を与えるために、ゼンマイバネを使用している。図3にモータモジュールの図を示す。モジュールにはロータリーエンコーダ、プーリ、ゼンマイバネが組み込まれている。ロータリーエンコーダのセンサーとゼンマイバネが動作のために必要なキャピティをそれぞれ確保するために全長 30mm×30mm×170mm 程度の大きさとなっている。

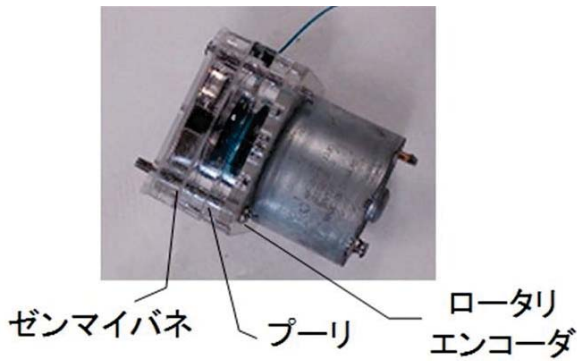


図3 モータモジュール

Figure 3 Structure Motor module

モータ軸にゼンマイバネを取り付けることで、プーリと連動させることが可能である。基本的にゼンマイの力を解放するとき糸を巻き、糸が引っ張られる時にゼンマイを巻くようにセットする。ゼンマイにかかる力は、

$$k\varphi = Fl$$

で表すことができる(図3)。ここで、 $k$ はバネ定数、 $\varphi$ は巻回数、 $F$ は力、 $l$ は糸のストロークである。これによって、電源が OFF の状態でも重力による糸の弛みを阻止することが可能となり、常に最低張力を張ることができる。このことにより、エンドエフェクタを常に中空で固定できるようになり、糸の絡まりを防ぐことができる。

ゼンマイバネは長さ 1980mm 厚さ 0.1mm の非接触型渦巻きバネを使用しており、これを 250mm の空間にセットすることで約 1m 程度の糸のストロークを生み出すことが可能となる。また、ゼンマイバネが最低張力を張ることができるため、モータのポテンシャルを全て提示力に使用することが可能となる。

#### 4.2 モータ配置

SPIDAR ではモータで囲まれた範囲が 6 自由度の力覚提示領域となる。そのため、前述の腕の可動域と 6 自由度力覚提示領域が重畳するようにモータの配置を行う必要がある。6 自由度力覚提示領域の大きさは、モータ間隔の大きさに依存する。そのため、フレームはモータ間隔を確保できる形状でなければならない。本論文では 500mm のモータ間隔を確保し、かつ人間が自然に動かせる腕の範囲に対して力覚提示が行えるようにフレームを設計した。その結果、6 自由度の力覚提示が可能な領域を実線、腕の最大可動域を破線で囲むと、図4の領域となる。このとき、片手に対して左右 500mm\*前方 500mm\*上下 700mm の領域に力覚提示が可能である。また、中央部に関しても、方向は限定されるが力覚提示は可能である。そのため、最大左右 1000mm\*前方 500mm\*上下 700mm が力覚提示領域となる。したがって、腕が自然に動く範囲を十分にカバーした領域となる。上下方向に対しては、図5の赤枠内に対して力覚

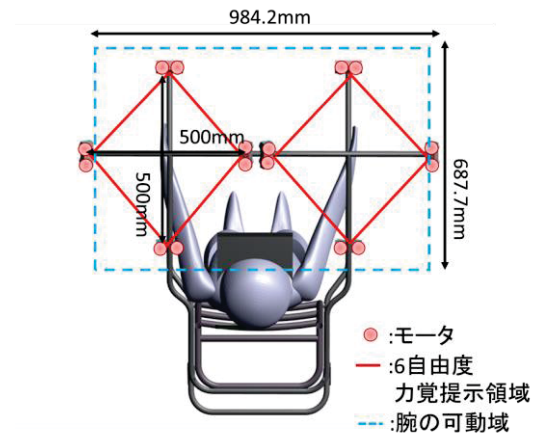


図4 SPIDAR-W 力覚提示領域と腕の可動域(俯瞰図)

Figure 4 Motor position, arm movement range and force presentable area (bird's-eye view)

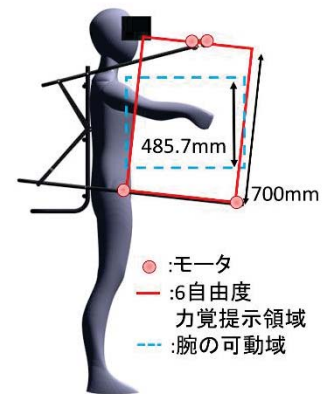


図5 SPIDAR-W 力覚提示領域と腕の可動域(側面図)

Figure 5 Motor position, arm movement range and force presentable area (side view)

提示が可能であり、前腕の可動域をカバーしていることがわかる。次に、モータ番号と SPIDAR-W の座標系を図6に示す。本デバイスの座標系は、ユーザの体に対し左右方向に X 軸、上下方向に Y 軸、前後方向に Z 軸を設定した左手座標系となっている。座標系の原点はそれぞれの手ごとに設定されており、下側のフレームに配置しているモータ間の中心点(5, 6 番モータと 7, 8 番モータの中心点)と上側のフレームをつないだ直線の中心点に設定している。表 1 は SPIDAR-W 座標系におけるモータ位置をまとめたものである。左右の手で同じ構成となっているため、本論文では右手のモータの座標のみを記述する。

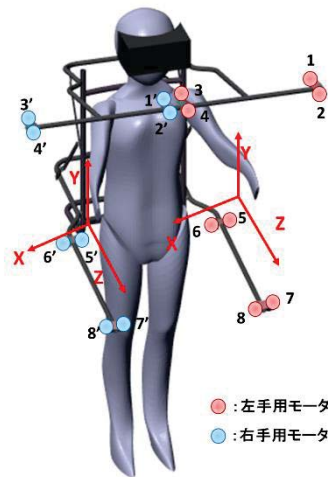


図 6 モータ番号と SPIDAR-W 座標系

Figure 6 Motor number and coordinate system of SPIDAR-W

表 1 右手モータの座標

Table 1 Position of the motor of right hand

モータ番号	X[mm]	Y[mm]	Z[mm]
1	-250.0	350.0	-15.0
2	-250.0	350.0	15.0
3	250.0	350.0	-15.0
4	250.0	350.0	15.0
5	-15.0	-350.0	250.0
6	15.0	-350.0	250.0
7	-15.0	-350.0	-250.0
8	15.0	-350.0	-250.0

### 4.3 フレーム設計

フレームはアルミパイプを曲げ加工したものをつなぎ合わせることで作成している。そのため、軽量のフレームとなっている。このフレームの特徴として、上側のフレームは、HMD とフレームとが干渉しないように、HMD の可動領域を確保した作りになっている。また、下側のフレームもウエストに対してゆとりを持たせた大きさとなっており、装着時に感じる窮屈さを軽減させている。また、背中側の結合部を軸に上下のフレームが回転するため、使用する用途に合わせてフレームの上下間の間隔を調整したり、運搬時にデバイスを折りたたんで運んだりすることが可能となっている。デバイスの最大横幅は 1080mm、最大縦幅は 950mm、最大高さは 780mm であり、1m 四方を大きく越えない大きさとなっている。

### 4.4 エンドエフェクタ設計

手首に力覚を与えるためのエンドエフェクタの形状は、位置・姿勢計測の忠実度が最適化されたパラメータを基に

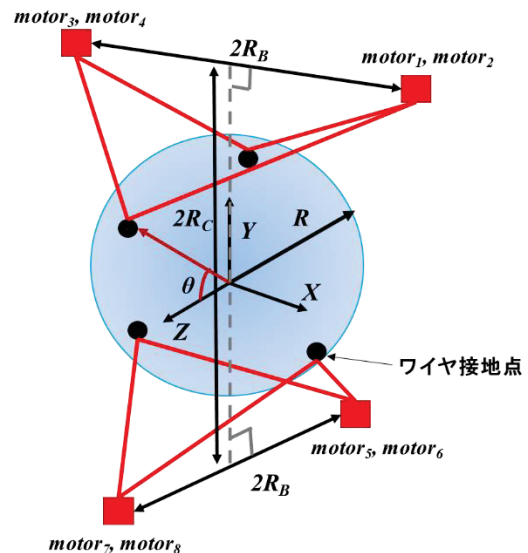


図 7 SPIDAR-I におけるモータとエンドエフェクタの模式図

Figure 7 Positional relationship of motor and end effector in SPIDAR-I

設計した。図 7 にエンドエフェクタの外接球とモータの関係を示した模式図を記載する。使用したパラメータ ( $R, R_A, R_B, R_C, \theta$ ) は以下のとおりである。

$R$ : エンドエフェクタの外接球の半径

$R_A$ : (エンドエフェクタのワイヤ取り付け位置間の距離)/2

$R_B$ : (モータ間隔)/2

$R_C$ : (モータの上下間の間隔)/2

$\theta$ : 外接球の中心からワイヤ取り付け点までの角度

また、各パラメータ間関係は以下の通りである。

$$R_A = R \cos \theta$$

$$R_B = R \cos \theta / \sin \theta$$

$$R_C = R / \sin \theta$$

五十嵐らの論文[11]では、位置姿勢計測に適した角度は  $\theta=35.264$  であり、このとき  $\sin \theta = \sqrt{3}/3$ ,  $\cos \theta = \sqrt{6}/3$  である。したがって、現在  $R_B=500(\text{mm})/2=250(\text{mm})$  としてグリップの最適な形状を考えると、 $R$  は

$$R = R_B \sin \theta / \cos \theta$$

$$R = 250 / \sqrt{2} = 176.78(\text{mm})$$

となる。このとき

$$R_A = 176.78 * (\sqrt{6}/3) = 144.34(\text{mm})$$

となる。この値を基に、エンドエフェクタの設計を行うと、



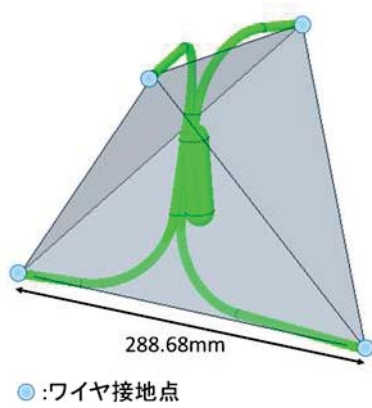


図 8 エンドエフェクタ設計図  
Figure 8 End effector design

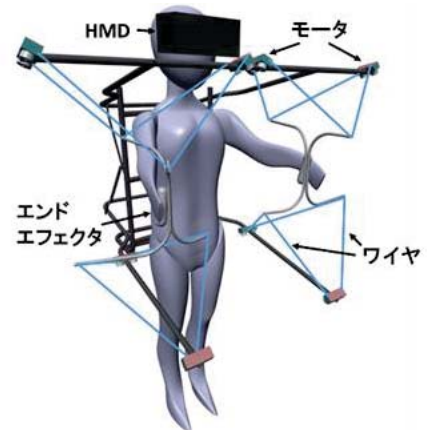


図 10 SPIDAR-W 3D モデル  
Figure 10 3D model of SPIDAR-W



図 9 エンドエフェクタ構成  
Figure 9 End effector structure



図 11 SPIDAR-W 装着図  
Figure 11 Shouldering SPIDAR-W

エンドエフェクタの糸取り付け口同士を直線で結ぶと、図 8 のように一辺が 288.68mm となる四面体が構成される形状になる。エンドエフェクタは 2 本の曲線パイプをつなぎ合わせることで作成している。その際、四面体の中心に Wii ヌンチャク[14]を配置するため、また両手を近づけて作業したときにエンドエフェクタ同士の干渉を防ぐために、パイプの交差点を四面体の中心から 100mm ほど内側にずらしている。作成したエンドエフェクタを図 9 に示す。ユーザは Wii ヌンチャクにより、物体を掴む・離すといった動作や、手の位置のキャリブレーションを行うことが可能になる。

#### 4.5 SPIDAR-W 全体図

上記の議論を基に設計した SPIDAR-W の 3D モデルを図 10 に、ユーザが SPIDAR-W 全体を装着したときの全体図を図 11 に示す。ユーザは SPIDAR-W をリュックのように背負い、ベルトで体に固定する。ユーザの頭部に装着された HMD よりユーザの目の前に VR 空間を提示し、その中の仮想物体をエンドエフェクタに装着した Wii ヌンチャクで操作する。VR 物体を操作したときの力覚が手首エンド

エフェクタを通してユーザに提示され、ユーザが VR 物体を触ったり動かしたりした感覚を得ることができる。フレームのみの重さは 4Kg、モータを含めたデバイス全体の重量は 5Kg であり、従来の背負って使うデバイスと比較すると軽量である

#### 5. まとめ

本研究では両手に 6 自由度の力覚提示が可能なワイヤ駆動型ウェアラブルフォースディスプレイ SPIDAR-W の開発を行った。このデバイスは軽量のアルミパイプ、DC モータ、ワイヤで構成されるため軽量であり、背負って使用できるため、外骨格型のデバイスと比較してユーザに与える負担を減らすことが可能である。また、腕の可動範囲をもとにフレーム形状とモータの配置を決定し、そこから手の位置・姿勢の計測精度が最大となるようにエンドエフェクタを設計した。このデバイスにより、ユーザは VR 空間内を自由に動きながら、仮想物体との力覚を伴ったインタラクションを行えるようになる。今後の課題として、HMD を装着すると現実世界が見えなくなるため、ユーザが

SPIDAR-W 内でのエンドエフェクタの位置を把握できないという問題がある。このことにより、適切な位置でのキャリブレーションをユーザ自身が行えず、フレームとエンドエフェクタとの干渉が発生してしまう。そのため、HMD を装着したユーザ自身が、エンドエフェクタとフレームとの位置関係を把握ながらキャリブレーションを行えるシステムを構築する必要があると考えられる。今後は、エンドエフェクタの位置姿勢計測精度や、最大提示力などのデバイス特性を性能評価実験により検証する予定である。をまた、ユーザ評価実験を通して、デバイスの使い易さや、装着により没入感に与える影響を調査する必要がある。

**謝辞** 本研究は、科研費(26540103, 26540104)の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) HTC vive: 2015. <http://www.htcvr.com/> 2015 年 12 月 1 日 閲覧
- 2) Brooks, Jr. F.P., Ouh-Young, M., Batter, J. J. and Kilpatrick, P.J. 1990. Project GROPE-Haptic displays for scientific visualization. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, vol.24 (4) (Aug. 1990), pp 177-185.
- 3) Cai, Y., Ishii, M., Sato, M. 1996. A human interface device for CAVE: size virtual workspace. In IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, (Beijing, CN, October 14-17, 1996), IEEE, vol.3, pp 2084-2089
- 4) Gupta, A. and O'Malley, M.K., 2006. Design of a haptic arm exoskeleton for training and rehabilitation. IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, vol.11 (3). (Jun. 2006), pp 280-289.
- 5) Leiter, P, Avraam, M., Veillerette, S., Horodincea, M., De Bartolomei, M., Schiele, A, Preumont, A. 2008. SAM : A 7-DOF portable arm exoskeleton with local joint control. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (Nice, FR, September 22-26, 2008), IEEE, pp 3501-3506.
- 6) Kossyk, I., Dörr, J., Raschendorfer, L. and Kondak, k. 2011. Usability of a virtual reality system based on a wearable haptic interface. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (San Francisco, US, September 25-30, 2011), IEEE, pp 3474-3479.
- 7) Hirose, M., Hirota, K., Ogi, T., Yano, H., Kakei, N., Saito, M. and Nakashige, M. 2001. HapticGEAR: the Development of a Wearable Force Display System for Immersive Projection Displays. In Proceedings of the Virtual Reality 2001 Conference (VR'01), (Yokohama, JP, March 13-17, 2001), IEEE, pp 123-129.
- 8) Cruz-Neira, C., Sandin, D.J. and DeFanti, T.A. 1993. Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE. In SIGGRAPH '93 Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, (Anaheim, US, August, 01-06, 1993), ACM, pp 135-142.
- 9) 田上想馬, 馬妹涵, 赤羽克仁, 佐藤誠 2015 ウェラブルな手首力覚提示デバイスの提案 情報処理学会 インタラクシオン 2015 pp 412-415
- 10) Oculus VR Oculus Rift: 2015. <https://www.oculus.com/enus/> Accessed: 2015-12-01
- 11) Hirata, Y. and Sato, M. 1992. 3-Dimensional Interface Device for Virtual Work Space. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (Raleigh, US, July 07-10, 1992), IEEE, vol.2, pp 889-896.
- 12) 五十嵐達郎, 田島寛之, 小山達也, 朱顔, 赤羽克仁, 佐藤

- 誠, 2012 ストリング内蔵型ハプティックインタフェース SPIDAR-I の開発 情報処理学会 インタラクシオン 2012 pp 293-300
- 13) 河内まき子・持丸正明, 2005 AIST 人体寸法データベース, 産業技術総合研究所 H16PRO 287.
  - 14) Wii Controllers <https://www.nintendo.co.jp/wii/controllers/> 2015 年 12 月 8 日 閲覧