

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

永井一樹^{†1} 田上想馬^{†1} 赤羽克仁^{†1} 佐藤誠^{†1}

近年、HMD の性能向上により、VR 空間への視覚的な没入度が向上している。それに伴い、身体動作を VR 空間に反映させることでゲームの操作が可能になるデバイスの開発が進められている。一方、VR 空間のリアリティを向上させる要素として、VR 空間の VR 物体に触れている感覚を再現する「力覚」が存在する。そこで本研究では、HMD との併用を前提とした、VR 空間と力覚を伴った両手 6 自由度インタラクションを実現し、かつユーザの位置や姿勢を制限しないウェアラブル手首力覚提示デバイスの開発を行う。

Wearable wrist haptic devices for immersive VR environment

Kazuki NAGAI^{†1} Soma TANOUE^{†1}
Katsuhito AKAHANE^{†1} Makoto SATO^{†1}

In recent years, the performance improvement of the HMD has improved the visual immersion degree of VR space. Thereby, developing a device for operating a game that reflect the body movements into VR space has been activated. On the other hand, as an element to improve the reality of VR space, sense of touching the virtual object in a virtual space called a haptic exists. In this study, we develop a wearable wrist haptic devices, it is assumed to be used with HMD, that achieve the six- degrees-of-freedom interaction accompanied by virtual space and haptic with both hands and do not limit the position and orientation of the user.

1. はじめに

1.1 研究背景

近年、HMD の性能向上により、まるで自分自身が VR 世界の中に入り込んでいるかのような感覚を視覚的にもたすことが可能となっている。HMD は人間の頭に装着して使用するウェアラブルな視覚機器であり、外界の情報を遮断して VR 世界の映像のみを目の前に映し出すため、外の情報を見ることなく VR 世界に没入することができる。子のような HMD の普及に伴い、身体動作を VR 空間に反映することでゲームの操作ができるデバイス開発が進められている。そのため、ユーザと VR 空間とのインタラクションは非常に直感的になってきている。



図1 HMD(Oculus rift)による VR 世界への没入
Figure1 Devotion to the VR world by HMD

VR 世界におけるリアリティの向上を実現するために必要

な要素の一つとして、VR 世界の物体に触る・重さを感じるといった力覚が挙げられる。HMD と力覚提示装置を併用し、視覚と力覚の二つの感覚を利用して VR 世界に入り込むことで、VR 世界に存在する物体の実在感の向上や、直感的な操作が可能になる。ユーザがより自然な形で VR 世界の物体に干渉するためには、力覚提示装置がユーザの操作を制限しないようなポータブルな装置であることが望ましい。ポータブル力覚提示装置の先行研究として、ユーザが背中に背負って使用する HapticGEAR[1]が挙げられるが、これは並進 3 自由度の力覚提示のみを実現している。本研究では、VR 物体に干渉することができる範囲を広げるため、ユーザの両手に並進 3 自由度、回転 3 自由度の 6 自由度の力覚を与えることで「VR 物体を両手で掴む動作」を実現することができるウェアラブルな両手力覚提示装置“SPIDAR-W”の開発を行う。

1.2 ワイヤ駆動型力覚提示システム”SPIDAR”

SPIDAR[2]は位置、姿勢計測機能と力覚提示機能を持つデバイスである。モータとエンドエフェクタをワイヤで接続したデバイス構造をしている。ワイヤの本数や配置によって様々な構造を構成することができるため、ワークスペースを任意に変化させ、幅広い用途への対応が可能となっている。本研究では、SPIDAR を利用して両手首に力覚を提示するシステムを構築する。以降、本研究での開発デバイスの名称を“SPIDAR-W (Wearable)”とする。

^{†1} 東京工業大学 精密工学研究所
Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology

2. ウェアラブル手首力覚提示デバイス”SPIDAR-W”の開発

2.1 システム構成

提案システムの概略を図2に示す。デバイスをウェアラブルにするため、デバイス全体をユーザの背中に背負って操作する形の力覚提示デバイスを提案する。背中に背負ったデバイスの両肩と腰の位置からフレームを伸ばし、そのフレームを土台としてモータを手首を囲むように設置する。モータからワイヤを伸ばして手首に装着した力覚提示用エンドエフェクタに取り付ける。取り付けた両手それぞれ8本のワイヤの張力を制御することで両手に6自由度の力覚を提示し、VR物体を両手で持ち上げる・回転させるといった動作を実現する。VR世界の計算を行うPCやモータ制御用のコントローラ等は、背面に収納スペースを設けることで持ち運びを可能にする。

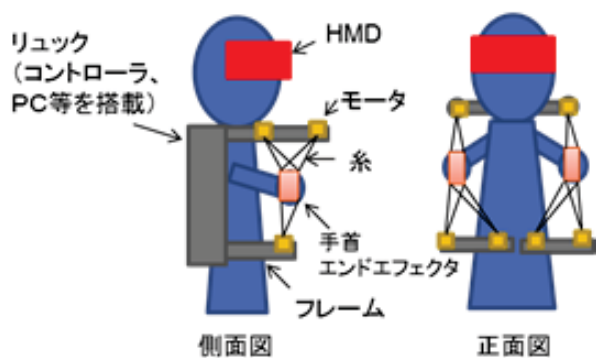


図2 ウェアラブル手首力覚提示デバイス概要図
Figure2 Overview of wearable wrist haptic device

2.2 手首力覚提示用エンドエフェクタの設計

次に、手首に力覚を提示するためのエンドエフェクタについて説明する。設計した手首力覚提示エンドエフェクタを図3に示す。

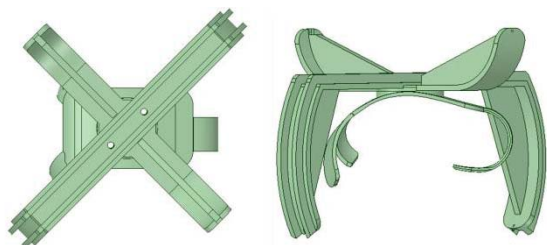


図3 手首力覚提示エンドエフェクタ
Figure3 End effector for wrist haptic display

エンドエフェクタの大きさについては、指や手首など、手の可動部に被さらず、手の甲に十分なトルクを与えることのできる最低限のサイズとなっている。エンドエフェクタ

の固定方法は、手首にトルクを出すためにエンドエフェクタに爪をつけ、手のひらに掛けることのできる形になっており、爪の反対側からベルトを回り込ませて固定することで拘束感を出している。ワイヤを取り付ける先端部分を上下に伸ばした形状になっており、フレームからエンドエフェクタに伸ばした複数のワイヤ同士がデバイス操作時に互いに干渉しないような構造になっている。

2.3 確保すべき力覚提示領域

力覚提示領域については、VR空間中の箱を両手で挟んで持ち上げるという動作を問題なく行うことができるような領域を確保する。AIST人体寸法データベースより、人間の壁面・握り軸（肘から握り拳までの長さ）の寸法が平均31.83cmであり、肩幅が平均43.28cmである[3]。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[4]。以上の人体寸法をもとに、人間の前腕の可動範囲を計算する。座標系を肩に水平方向にx軸、体から前方にy軸、鉛直方向にz軸とし、人間の背面・肩の位置を原点とした。前腕の上下の屈曲角は両手の作業において上から100°の範囲が有効であると仮定し、前腕と手の可動範囲を計算すると、 $-49.21 < x < 49.21$, $0 < y < 31.83$, $-4.05 < z < -52.62$ (cm)を満たす領域、つまり98.42cm×31.83cm×48.57cmの領域となった。可動領域を図4に示す。この領域をカバーできるような力覚提示領域を確保するようにモータ配置を行うことができるフレームの設計を行うこととした。

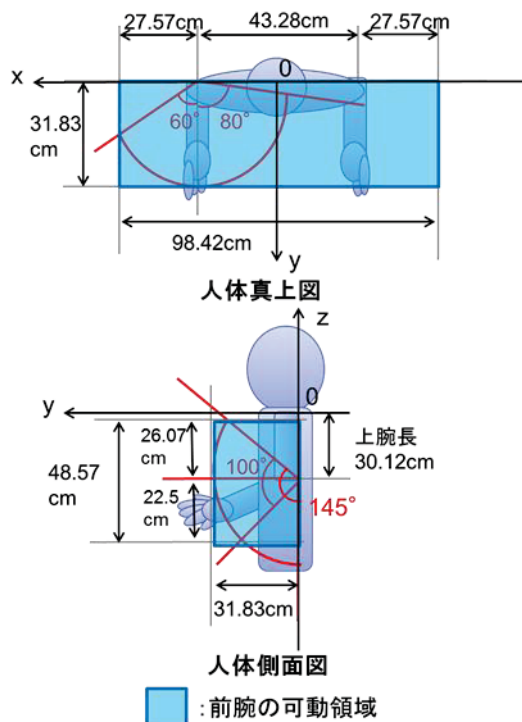


図4 人間の前腕の可動範囲

Figure4 The movable range of the human forearm

2.4 フレームの設計

デバイス全体を背中に背負うため、ユーザに負担がか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、本研究においてフレーム材料には比較的軽量なアルミパイプを選択した。また、左右の手にそれぞれ SPIDAR システムを構成するために、それぞれの手を囲むように DC モータを 8×2 の計 16 個設置し、そこからエンドエフェクタにワイヤを取り付けた。そのため、フレームと糸が操作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、仮想物体の操作をする際に前述の力覚提示領域を確保することも重要である。以上の事を踏まえて設計した SPIDAR-W のフレームを図 5、図 6 に示す。上下のフレームを真上方向に 10° 傾けることにより、デバイスをユーザが装着する際に、フレームの下から潜り込みやすいようにしている。

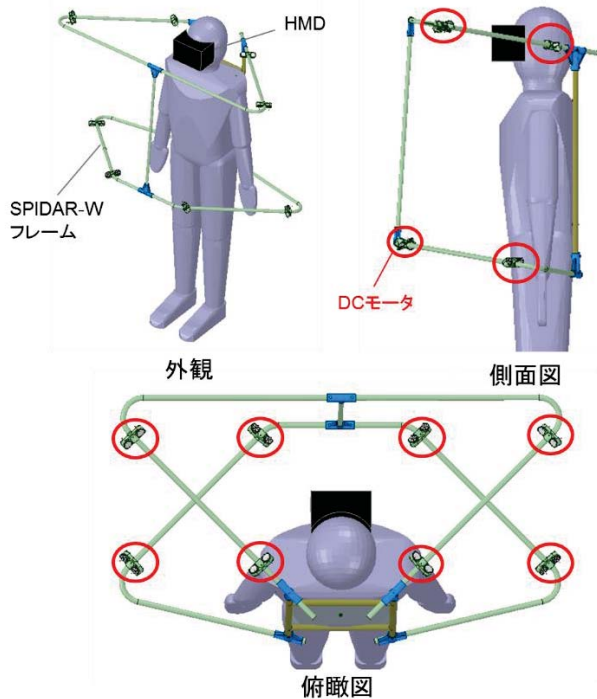


図 5 SPIDAR-W フレーム全体図
Figure5 SPIDAR-W frame general view

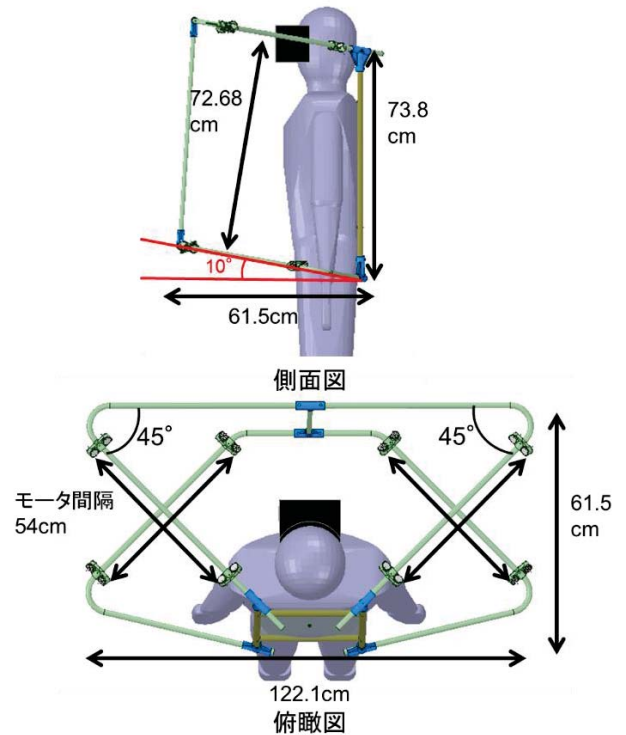


図 6 フレーム寸法
Figure6 Frame dimensions

2.5 SPIDAR-W の力覚提示領域

SPIDAR システムでは糸の張力を用いて力覚を提示するため、モータに囲まれている範囲が 6 自由度の力覚提示領域となる。したがって、本研究で設計したデバイスが、全方位からの力覚を表現することのできる領域は、図 7 中の赤枠で囲まれた部分である。フレームが 10° 上方向に傾いた形状をしているため、 $38.18\text{cm} \times 38.18\text{cm} \times 72.68\text{cm}$ の立方体が 10° 傾いた領域が力覚を完全に表現できる空間である。ユーザの中心付近である $-21.32 < x < 21.32$ の領域がその領域から外れているが、 $-21.32 < x < 21.32$ の空間では限定された方向の力を表現することができ、外側方向の力は提示することが可能である。本研究においては、「VR の物体を両手で掴んだり回転させたりする」動作を実現できれば良いため、ユーザの中心付近である $-21.32 < x < 21.32$ の領域も力覚提示可能な領域として扱うことができる。以上より、有効な力覚提示領域を図 8 に示す。

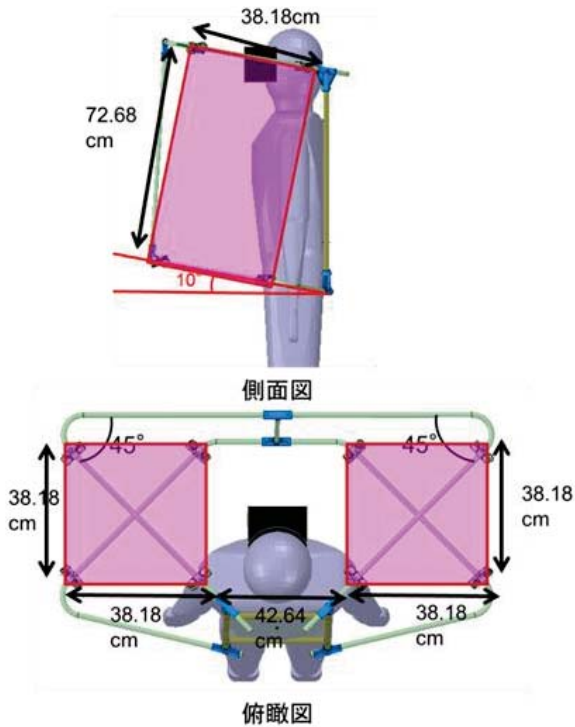


図7 SPIDAR-W の6自由度力覚提示領域
Figure7 6DoF haptic area of SPIDAR-W

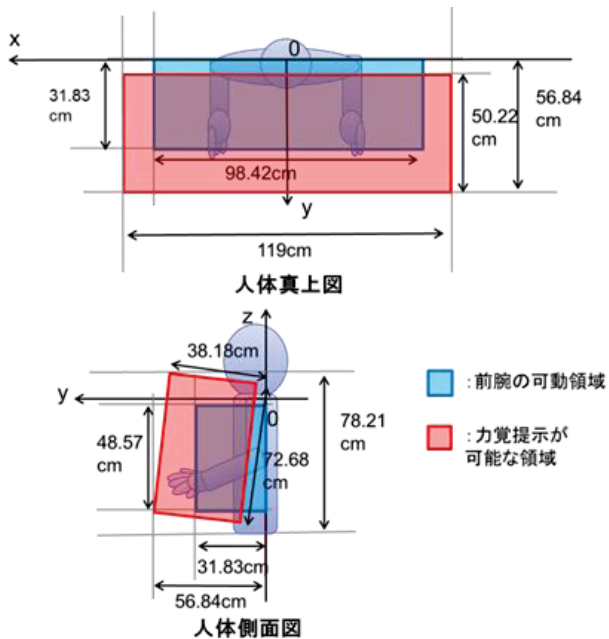


図8 SPIDAR-W の有効な力覚提示領域
Figure8 Effective haptic presentation area of SPIDAR-W

2.6 モータの配置

本研究ではエンドエフェクタを介し、手の甲に力覚を与える。そのため、手の甲の可動範囲を囲み、糸ができるだけ干渉せず、かつフレーム形状を冗長にしないようなモータ配置を考える必要がある。モータ配置図を図9に、モータの具体的な配置を表1,2に示す。

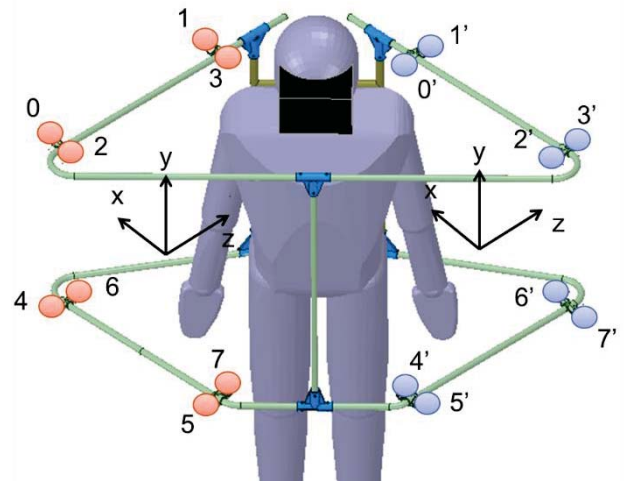


図9 モータ配置
Figure6 Motor placement

表1 右手モータの位置

Table1 Position of the motor of the right hand

モータ番号	x [cm]	y [cm]	z [cm]
0	1.9	36.34	1.9
1	1.9	36.34	-1.9
2	-1.9	36.34	1.9
3	-1.9	36.34	-1.9
4	27	-36.34	28.75
5	-27	-36.34	28.75
6	27	-36.34	-28.75
7	-27	-36.34	-28.75

表2 左手モータの位置

Table2 Position of the motor of the left hand

モータ番号	x [cm]	y [cm]	z [cm]
0'	27	36.34	-1.9
1'	27	36.34	1.9
2'	-27	36.34	-1.9
3'	-27	36.34	1.9
4'	1.9	-36.34	-27
5'	-1.9	-36.34	-27
6'	1.9	-36.34	27
7'	-1.9	-36.34	27

2.7 糸の取り付け

エンドエフェクタに並進3自由度、回転3自由度の力覚を与えられるように、フレームに配置されたモータから糸を張る。エンドエフェクタの糸の取り付け口は4点存在する。モータとエンドエフェクタの糸のつながり方は図10のようになる。それぞれのモータとエンドエフェクタの糸の出口の組み合わせを表3に示す。

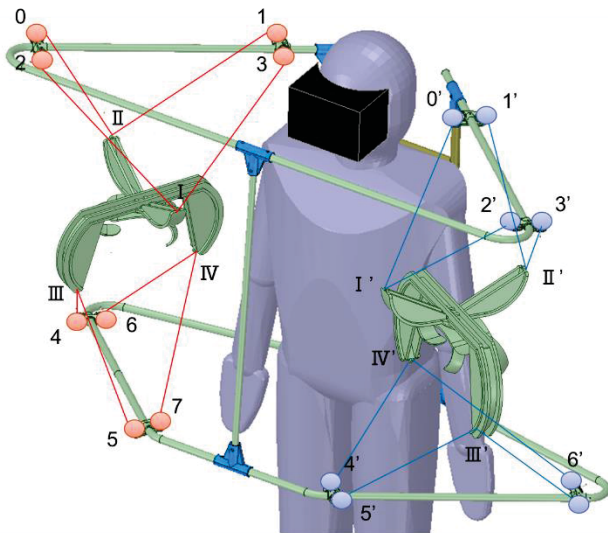


図10 糸の出口と糸の取り付けの関係

Figure10 Exit of the thread and relations of the installation of the thread

表3 モータとエンドエフェクタの組み合わせ

Table3 Combination of motor and end effector

エンドエフェクタ		モータ番号	
右手	I	2	3
	II	0	1
	III	4	5
	IV	6	7
左手	I'	0'	2'
	II'	1'	3'
	III'	5'	7'
	IV'	4'	6'

2.8 デバイス全体図

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、両手に手首力覚提示用エンドエフェクタを装着する。ユーザの頭部に装着された HMD (Oculus Rift DK2[5]) よりユーザの目の前に VR 世界を提示し、その中の仮想物体を両手で操作する。仮想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返され、ユーザが仮想物体に触ったり動かしたりした感覚を得ることができる。



図11 SPIDAR-W 全景

Figure11 A full view of SPIDAR-W

3. ニコニコ超会議への SPIDAR-W のデモ出展

3.1 概要

開発した SPIDAR-W を広く一般の人に体験する機会を設けるため、幕張メッセで行われたニコニコ超会議 2015 において同デバイスのデモ展示を行った。デモ展示は、Oculus Rift など HMD を使用した VR 文化の発展を目指す NPO 法人 OcuFes[6]が主催する VR コンテンツ展示ブース内で行った。本章ではデモ展示のために変更したフレームの形状と、デモコンテンツ、展示の様子について記述する。

3.2 デバイス形状の変更

2章で設計したフレームは、上下方向の剛性が弱い設計になったため、力覚提示の際にフレームのたわみが生じ、モータ位置の誤差により提示力が正しく与えられない恐れがあった。また、出展者に割り当てられた展示スペースに対して、フレームの横幅が広がる形状は適していなかった。そのため、フレームの横幅をコンパクトにし、なおかつフレームの上下間をアルミパイプで接続する形状に変更した。フレームは直線のアルミパイプと樹脂製の継手で構成し、2章で設計したフレームで必要だった手作業でのアルミパイプ折り曲げ作業を排除した。エンドエフェクタ部に関しては、デバイス装着時間短縮のために、手のひらにベルトを回して固定する機構を採用しなかった。代わりに、ユーザがカプセル部分を把持して操作するグリップを取り付けた。以上の変更点を元に作成したデバイスの全体像を図12に示す。変更後のデバイスの名称は“SPIDAR-W Ver.2”とする。

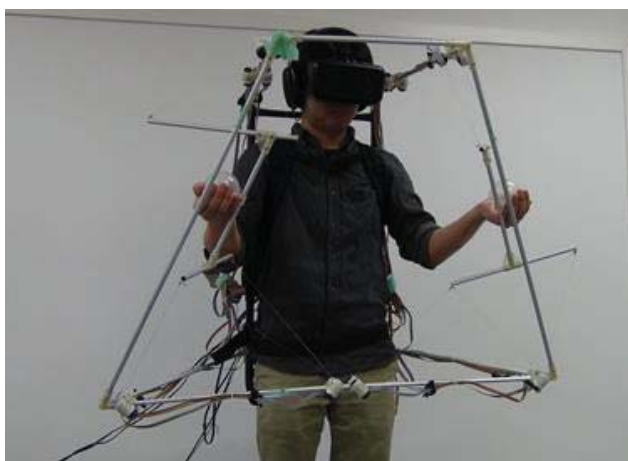


図 12 SPIDAR-W Ver.2 全景
Figure12 A full view of SPIDAR-W Ver.2

3.3 デモコンテンツ内容

ニコニコ超会議のデモコンテンツとして、「空から落ちてくる少女を受け止める」というアプリケーションを作成した。少女のモデルにはユニティ・テクノロジーズ・ジャパン合同会社より配布されている「ユニティちゃん[7]」のキャラクターモデルを使用した。このコンテンツは「天空の城ラピュタ」の1シーンの再現を目的としている。体験者はグリップを動かすことでVR空間上の腕を操作し、落下する少女を受け止めようと試みる。VR空間上の腕と少女が接触したタイミングでデバイスから力覚が提示されるため、体験者は自らが少女を受け止めたかのような体験ができる、といったコンテンツである。また、受け止めに成功した後にユニティちゃんの顔の方向を向くと、彼女からお礼の言葉を聞くことができるといった、聴覚を使用する要素も取り入れている。このことにより、視覚・聴覚・力覚を使用するマルチモーダルな没入型VRコンテンツとなった。作成したアプリケーションの画面を図13に示す。



図 13 アプリケーション画面
Figure13 A image of application

3.4 ニコニコ超会議の様子

ニコニコ超会議で使用したポスターを図14、デモ展示の様子を示した写真を図15に示す。写真はねとらぼのweb記事[8]にあるものを引用した。



図 14 ニコニコ超会議で使用したポスター
(出典：ねとらぼ[8])

Figure14 A poster used in the niconico-chokaigi



図 15 ニコニコ超会議でのデモ展示
(出典：ねとらぼ[8])

Figure15 Demonstration at the niconico-chokaigi

展示期間は2日間、体験者は約120人であった。体験者の感想として、「腕にズッシリとした感じがあった」「操作がわかりやすかった」といった感想があった。一方、「うまく受け止めるのが難しかった」「少女が想像していたよりも軽かった」といった良くない印象の回答もあった。また、体験者によってはフレームとHMDが干渉してしまう場合があった。そのため、フレーム上部を広く設計することで干渉を回避する必要がある。今回の展示では力覚提示デバイスやHMDの使用自体が初めての体験者も多く、専門知識を有していない人からの意見を得られる有意義なデモ展示であった。

4. おわりに

4.1 まとめ

本研究では没入型 VR 環境において、力覚フィードバックを伴ったインタラクションを実現するために、HMD の併用を前提としたユーザ装着型の手首力覚提示デバイスを開発した。このデバイスでは、力覚提示デバイスの土台となるフレームを装着した状態で、ユーザの自由な両手操作と手首への力覚提示を実現した。そのために効率的なモータ配置とフレーム形状とを検討し、SPIDAR-W の設計を行った。昨今の目覚ましい HMD の発展により、仮想現実の世界を体験するという技術に注目が集まっているため、HMD と力覚提示デバイスを同時に使用して、視覚・力覚的に仮想世界に没入することができるデバイスを開発する意義は十分にあると考えている。

4.2 今後の課題

本研究では VR 空間内を自由に動き回りつつ、VR 物体に触れることを実現するためのウェアラブル力覚提示デバイスを設計・開発したが、VR 世界を自由に動き回るためのユーザの実世界の移動を VR 世界に反映させる位置・姿勢計測システムが実装されなかった。ユーザの位置・姿勢を VR 世界に反映させることによる振り向き動作・移動を実現することができれば、よりリアルな VR 世界への没入が可能になることが考えられる。ハード面では、HMD の可動範囲を検証し、フレームとの干渉が起らないように設計を見直す必要がある。また、本研究で SPIDAR-W のフレーム作成に使用したアルミパイプの剛性が弱く、時間の経過と共に歪みが生じてしまった。そのため、アルミ以上に剛性が高く、かつ軽量の素材をフレームに採用するといった改良が必要である。

参考文献

- 1) M. Hirose, K. Hirota, T. Ogi, H. Yano, N. Kakei, M. Saito, and M. Nakashige, "HapticGEAR: the Development of a Wearable Force Display System for Immersive Projection Displays. Proc. IEEE VR, (2001).
- 2) 佐藤 誠, 平田 幸弘, 川原田 弘: 空間インタフェース装置 SPIDAR の提案, 電子情報通信学会論文誌 Vol.J74-D-2, No.7, pp.887-894, (1991)
- 3) 河内まき子, 持丸正明: AIST 人体寸法データベース, 産業技術総合研究所デジタルヒューマン工学研究センター, <https://www.dh.aist.go.jp/database/91-92/>, 2014 年 11 月 24 日参照
- 4) 「関節可動域表示ならびに測定法」, 日本整形外科学会・日本リハビリテーション医学会 (1995 年) 日本整形外科学会雑誌 69, 240-250,(1995).
- 5) Oculus VR
<https://www.oculus.com/ja/>
- 6) Oculus Festival in Japan
<http://www.ocufes.jp/>

7) UNITY-CHAN OFFICIAL WEBSITE

<http://unity-chan.com/>

8) ねとらぼ:「親方, 空から女の子が!」HMD とズッシリ装置で VR 体験

<http://nlab.itmedia.co.jp/nl/articles/1504/25/news053.html>