

# ウェアラブル手首力覚提示装置 SPIDAR-W の開発

永井一樹<sup>†1</sup> 田上想馬<sup>†1</sup> 赤羽克仁<sup>†1</sup> 佐藤誠<sup>†1</sup>

近年、HMDの発達に伴い、VR世界の映像を目の前に映し出すことであたかも自分がVR世界の中にいるかのような感覚を与えることが可能になった。そのため、HMDを利用してジェットコースターのようにVR空間を高速で移動したり、VR空間中の家を自由に散策したりといったことがリアルに再現されるようになった。そこで我々は、HMDの映像に加え、力覚提示装置を併用することで、視覚と力覚の二つの感覚を利用してより高度なVR世界とのインタラクションを実現するための研究を行った。ユーザが自然にVR世界に干渉するためには、力覚提示装置がユーザの動作を制限しないウェアラブルな装置であることが望ましい。本研究では、HMDを装着したユーザの両手に力覚を与えることで、「VR空間内の仮想物体を両手でつかむ動作」を実現するウェアラブル力覚提示装置”SPIDAR-W”の開発を行う。

## A Development of Wearable Wrist Haptic Device "SPIDAR-W"

Kazuki NAGAI<sup>†1</sup> Soma TANOUE<sup>†1</sup>  
Katsuhito AKAHANE<sup>†1</sup> Makoto SATO<sup>†1</sup>

In recent years, we can get a sense as if exist in the VR world by projecting a picture of the VR world in front of user's eye. Therefore, we can reproduce a virtual experience such as riding a roller coaster and searching in a virtual house realistically. In addition to a picture of HMD, using sense of vision and force emanating from haptic device, we can interact with VR world more highly. So that a user interacts an object of the VR world naturally, it is desirable that haptic device is wearable device which does not limit the movement of the user. In this paper, we develop wearable wrist haptic device "SPIDAR-W" which realize movement of catch a virtual object with both hands by giving both hands force of the user wearing HMD.

### 1. はじめに

#### 1.1 研究背景

近年、HMDの発達により、VR世界の映像を装着者の目の前に映し出すことで、あたかも自分自身がVR世界の中に入り込んでいるかのような感覚をもたら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。そのため、HMDを利用してジェットコースターを体験したり、仮想の家の中を自由に探索したりといった仮想体験をリアルに再現することができる。



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ではユーザの腕に付けるジョイスティックタイプの装置[1]や、歯付きベルトを利用した携帯型の力覚提示装置[2]が開発されたが、それらの装置では仮想壁に指先で触れることや、VR物体を指先でつまむといった指先による動作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[3]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

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

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。

## 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 物体を両手を使って持ち上げる・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。

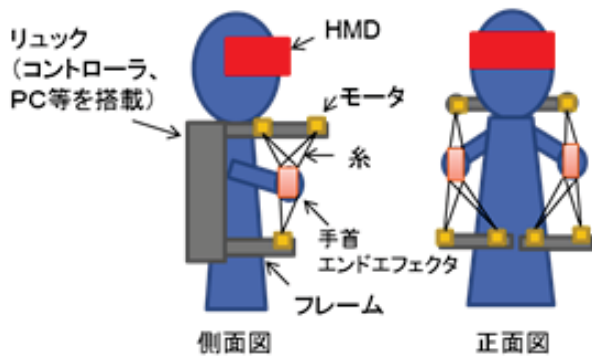


図2 ウェアラブル手首力覚提示デバイス概要図  
Figure2 Overview of wearable wrist haptic device

### 2.2 手首力覚提示用エンドエフェクタの設計

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。

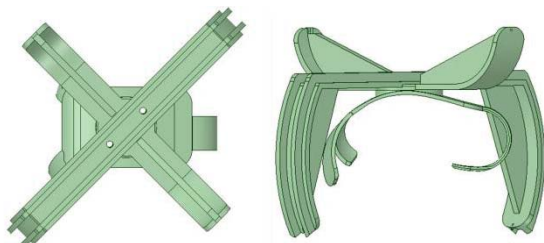


図3 手首力覚提示エンドエフェクタ

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 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、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十分な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4、図5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。

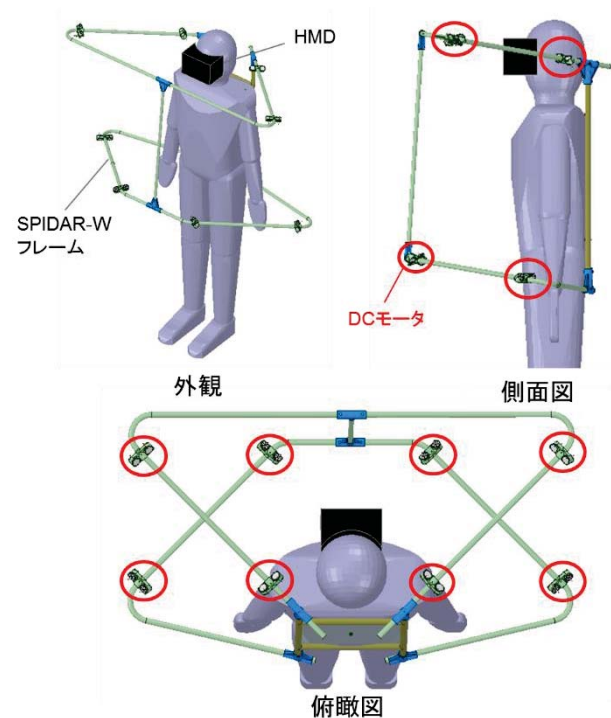


図4 SPIDAR-W フレーム全体図  
Figure4 SPIDAR-W frame general view

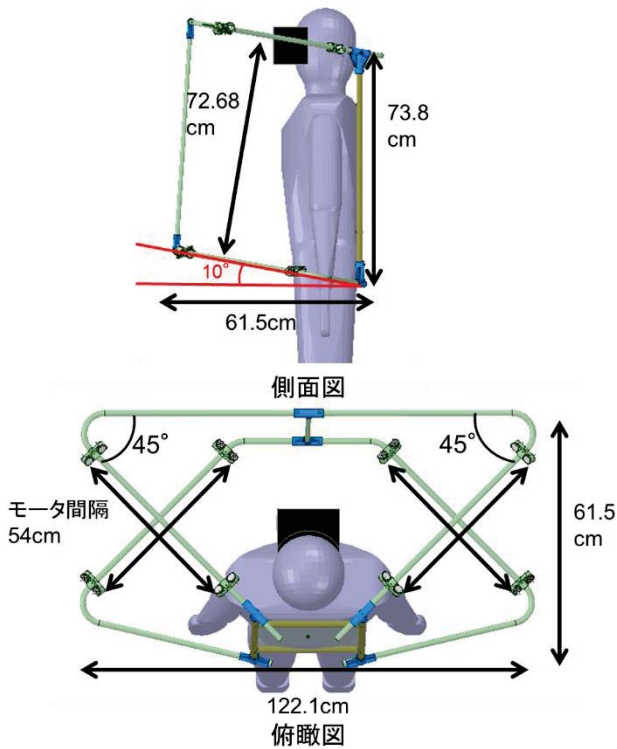


図5 フレーム寸法  
Figure5 Frame dimensions

## 2.4 モータの配置

SPIDAR システムでは糸の張力を用いて力覚を提示するため、力覚を与えたい範囲がモータに囲まれている必要がある。今回力覚を与える部位は手の甲であり、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。モータの具体的な配置を表 1,2 に示す。

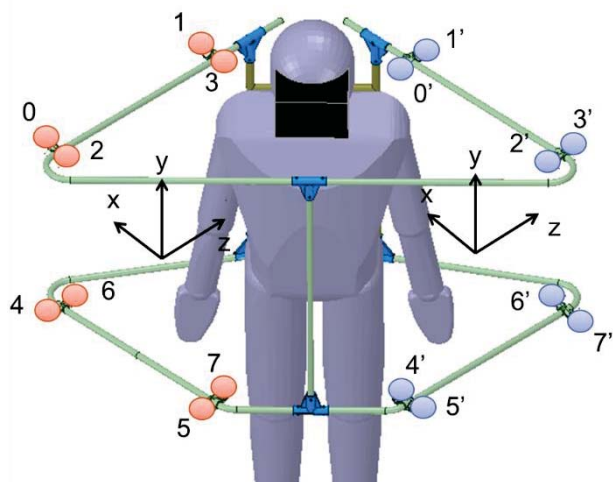


図6 モータ配置  
Figure6 Motor placement

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

## 2.5 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7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。

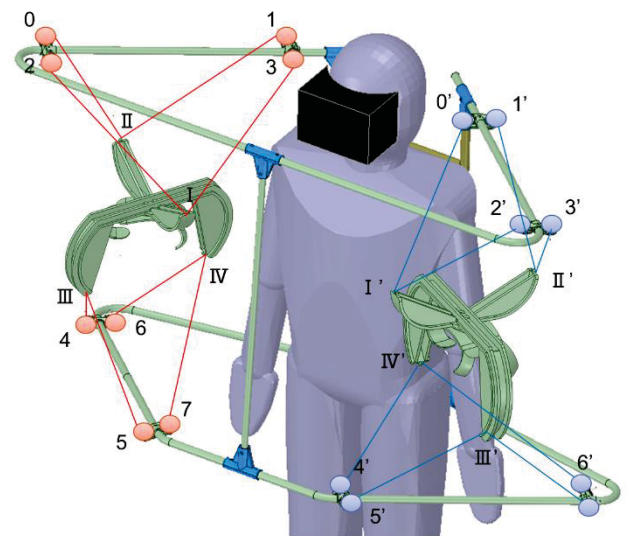


図7 糸の出口と糸の取り付けの関係  
Figure7 Exit of the thread and relations of the installation of the thread

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'

## 2.6 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 8 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を使って操作する。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 8 SPIDAR-W 全景

Figure8 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 9 に示す。変更後のデバイスの名称は「SPIDAR-W Ver.2」とする。



図 9 SPIDAR-W Ver.2 全景

Figure9 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 10 に示す。

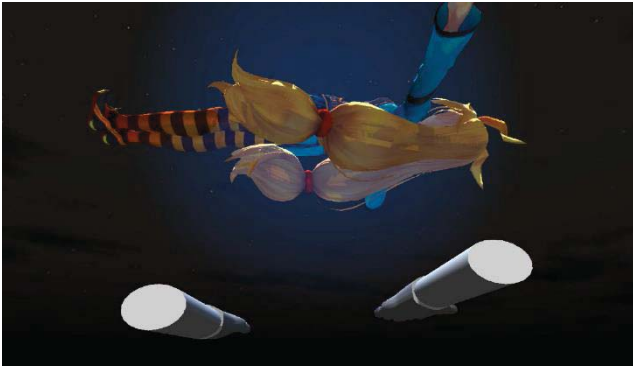


図 10 アプリケーション画面  
Figure10 A image of application

### 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 11, デモ展示の様子を示した写真を図 12 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.

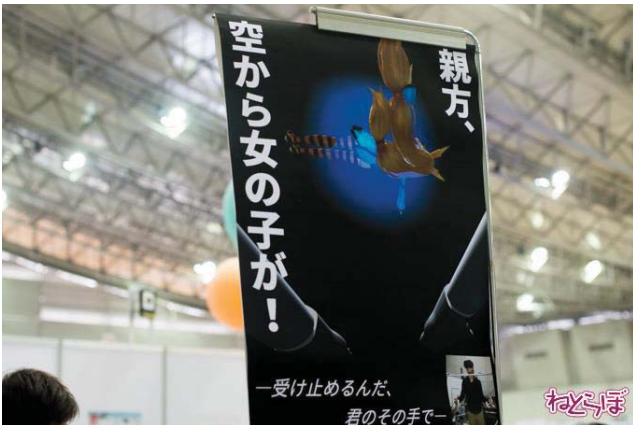


図 11 ニコニコ超会議で使用したポスター  
(出典：ねとらぼ[8])

Figure11 A poster used in the niconico-chokaigi



図 12 ニコニコ超会議でのデモ展示  
(出典：ねとらぼ[8])

Figure12 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 がぶつかっ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

本研究では仮想世界とのインタラクションの質を向上させるために, 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.

今後の課題として, ハード面では, 使用したアルミパイプそのものの剛性が弱く, 時間の経過と共に歪みが生じてしまったため, アルミ以上に剛性が高く, かつ軽量な素材をフレームに採用するといったアプローチが必要である. また, フレーム形状により手の操作範囲が制限されないように, デバイス全体の設計を再考しなければならない. システム面では, HMD を装着すると現実世界の手の位置がわからない, 両手を使用するため制御用 PC の操作が出来ないといった問題のため, 現在このデバイスのキャリブレーションはユーザ自身で行うことが出来ていない. そのため, HMD を装着したユーザ自身が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.

## 参考文献

- 1) 岩田 洋夫, 中川 博憲: 着用型力覚帰還ジョイスティック, 映像情報メディア学会技術報告 22(28), 15-18, 1998-06-01
- 2) 中山 功一, LIU Juan, 安藤 広志: 歯付ベルトにより小型軽量化した携帯型力覚デバイス, 情報処理学会シンポジウム論文集 2011 pp.645-646
- 3) 佐藤 誠, 平田 幸弘, 河原 由弘: 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
- 4) 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.

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>