

# 空傘散歩: 風力を受けた傘を表現した VR 空中遊覧システム

山口 修平<sup>1,a)</sup> 井上 悠香<sup>1,b)</sup> 佐々木 嵩也<sup>1,c)</sup> 鈴木 元<sup>1,d)</sup> 廣川 七海<sup>1,e)</sup> 宮田 一乗<sup>1,f)</sup>

**概要:** 傘を用いた空中移動や軟着陸のシーンは多くの映画やアニメで使用されてきた。その理由として、傘は日常的なアイテムであり、風を感じる親しみやすい道具であることが挙げられる。しかし、実際に傘で空を飛ぶのは不可能である。そこで、本研究では VR アプリケーション「空傘散歩」を開発し、傘で空を飛ぶ体験を仮想空間で表現し、空中を遊覧できるシステムを開発した。本研究の目的は、傘で空を移動、軟着陸するリアリティある楽しさを体験者に提供することである。

## 1. はじめに

傘を使って空中を移動したり軟着陸するシーンは多くのアニメや映画で用いられてきた。このシーンが広く用いられる理由の一つとして、日常的なアイテムである傘が風力を受ける体験は親しみやすく、空を飛ぶ想像がしやすいことが挙げられる。本稿では現実では体験不可能な傘による空中遊覧を、VR 空間内で実現したシステム「空傘散歩」を提案する。提案システムでは、傘が風で煽られる力を傘に取り付けた糸の張力を用いて再現した。体験者が風向に合わせて傘を操作することで空中を遊覧することが可能である。

空傘散歩のプロトタイプは Interverse Virtual Reality Challenge (IVRC) の SeedStage で展示を行った。本稿ではプロトタイプの評価実験の結果を受けて、力覚装置と風覚装置の改良を行ったシステムについて述べる。ここで、プロトタイプに対する改良点は、1) 風覚提示装置をネックファンからエアブローを使用した機構に変更したこと、2) 張力提示機構を右前、左前、右後、左後の計 4 機から右前、左前の計 2 機にしたことである。

## 2. 関連研究

### 2.1 仮想空間における空中の移動

空を自由に飛ぶことは古来から多くの人々が抱く夢の一つであり [1], VR 技術を利用してこれを擬似的に叶えようとする試みが行われてきた。エンターテインメント VR 業

界ではワシになってゲームの世界を飛び回ることができる「Eagle Flight」[2] や大砲マシンから発射され未来の東京を飛び回る「TOKYO 弾丸フライト」[3] など VR コンテンツは数多く生み出されてきた。これらの体験は、触覚フィードバックを組み合わせることで、よりリアルな飛行感覚を提供する。例えば、「Virtual Rope Slider」[4] や「Spider Hero」[5] は、物理的な引っ張り力を再現し、ユーザーが仮想空間での移動をよりリアルに感じるようにできる。また、「Groveling on the Wall」[6] は、重力の錯覚を利用して、VR 空間内での壁を登る体験を提供する。これにより、体験者は実際には不可能な動きを VR 空間内で体験できる。これらの VR アプリケーションには自己運動感覚 (ベクシオン) が用いられることが多い。自己運動感覚は、視覚的な刺激が移動感覚を生み出す現象で、視界に動く景色が表示されると、ユーザーは実際には動いていないにもかかわらず移動しているように感じる。この感覚は、VR 空間での移動体験をよりリアルにするために広く利用されている。

### 2.2 風覚ディスプレイによる方向提示

VR において、風や空気流による触覚提示は、非接触で感覚を提示し、視覚や聴覚と組み合わせることで、ユーザーの没入感を高めることができる。風に当たった際の手触りを「風覚」といい、これは触圧覚、温覚、冷覚などが複合された広義の触覚の一形態とされている [7]。映像、風、音を同時に流す手法は、アミューズメントパークや映画館で既に実践されている。また、VR における風を用いた研究も盛んに行われており、多感覚刺激提示の一環として「風覚ディスプレイ」の開発が進められている。

風覚ディスプレイの一例として、ドーム上に 25 個のブローファンを設置した没入型三次元風覚ディスプレイがあ

<sup>1</sup> 北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術専攻

a) s2310167@jaist.ac.jp

b) s2210017@jaist.ac.jp

c) s2310060@jaist.ac.jp

d) s2310078@jaist.ac.jp

e) s2310138@jaist.ac.jp

f) miyata@jaist.ac.jp

る [8]. このデバイスでは、ユーザーの周囲に多数の風源を配置し、さまざまな方向からの風を提示している. 空間方位における風覚の認識に関する研究では、左右に比べて前後の風覚認識の正答率が低いことが明らかにされた. 小島らの研究では、頭部への局所的な風の提示により、耳周辺が風を特に敏感に感じる事が確認されている [9].

### 2.3 関連研究との比較

本研究の特徴は複数方向の力覚提示によって傘の煽られ感を演出したことである. 複数方向への力覚提示デバイスとしては「SPIDAR-G」[10]があるが、これはモータ制御であるため強い力を加えるとハードウェアやユーザ自身に負担をかける可能性がある. 安全性を鑑みた結果、「SpiderHero」[5]の張力提示機構を採用した. 「SpiderHero」[5]では一方向のみの力覚提示であるが、我々はこの張力提示機構を複数配置し、ゲーム内の風向きと傘の向きによって制御することで様々な方向から風に煽られる感覚を実現した.

### 3. 体験シナリオ

空傘散歩は、仮想空間で傘を用いて風に乗り空中を移動できる VR 作品である. 体験中、仮想空間の映像と実空間上の力覚装置と風覚装置が同期している. 実空間で風覚装置から風向を感じることができ、傘を風向方向に傾けることで、力覚装置により傘が風向方向に引っ張られ仮想空間で身体が風向方向に移動する. 体験シナリオのイメージは図 1 であり、手順を以下に示す.

- 1) 体験者は椅子に座り、足を浮かせ、HMD を装着し、傘の持ち手を握る.
- 2) 風覚提示装置により体験者は風向を感じ、傘を風向に沿うように傾ける.
- 3) 傘の向きと風向が一致した場合、仮想空間では風向方向に身体が移動する. 実空間では力覚提示装置が傘を引っ張る. 実空間での牽引により、VR 空間での浮遊感を演出する. 傘の向きを図 2 のように Unity 上の x-z 平面に投影し風の方向との内積が 0.6 以上である場合一致としている. この値は、筆者らが実際に体験し、違和感なく操作できる感度として設定した.

2 から 3 の操作を繰り返し、体験者は進行したい方向に風向に傘に沿うように傾斜することで進行方向を選択し、傘を使って空中を散歩することができる. 傘の向きと風向が一致しない場合、VR 空間で等速に 1m/s で落下する. また、このとき力覚提示装置は作動しない. 風覚装置と視覚情報から風向を認識する時間を考慮し、ランダムな風向変化の間隔は 20 秒間とする. なお、体験時間は、長時間の VR 体験による VR 酔いを考慮し 3 分に設定した.

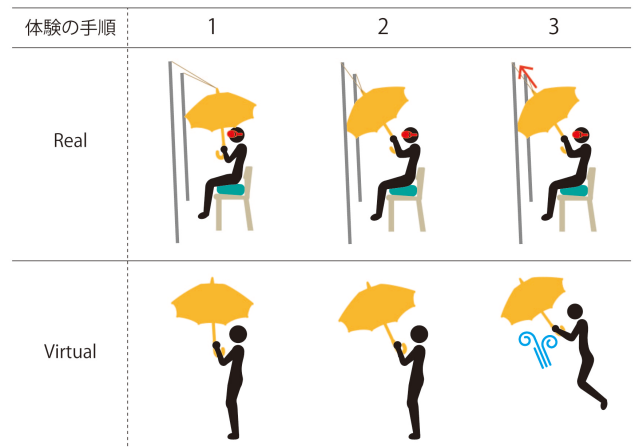


図 1 体験シナリオ

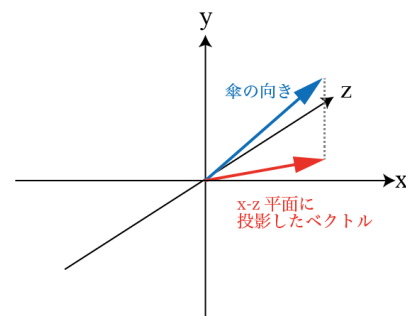


図 2 傘の向きを x-z 平面に投影したベクトル

### 4. システム設計と実装

本システムは、力覚提示装置、風覚提示装置と映像システムで構成される. 全体構成とシステムレイアウトを図 3 に表す. 力覚提示装置は傘の向きの 3 次元ベクトルを入力とする. 力覚提示装置は二つの張力提示機構が存在し、傘の向きの 3 次元ベクトルに応じて動作する. 風覚提示装置では VR 映像の風向と同期し PC から信号が送られ各エアブローを制御する.

#### 4.1 力覚提示装置

力覚提示装置を図 4 に示す. この装置は、風に煽られる傘の挙動を表現し、体験者に傘によって持ち上げられる感覚を提供する. 傘が風向に沿って傾斜した場合には、傘が風力によって持ち上がる感覚を提示する. 一方で、傘の向きと風向が一致しない場合、仮想空間で等速に 1m/s で落下していく. 体験者は風向を選択し進行したい方向の風に煽られるように傘を傾け、進行方向を選択する.

傘の紐を引っ張るためのメカニズムとして、Ishibashi ら [5] の掃除機を用いた張力提示システムを参考にした. 制御方法を説明する. 掃除機は常に動作させておき、図 4 の開閉式キャップによって各パイプの圧力を制御する. 開閉式キャップはサーボモータで制御し、開閉式キャップが

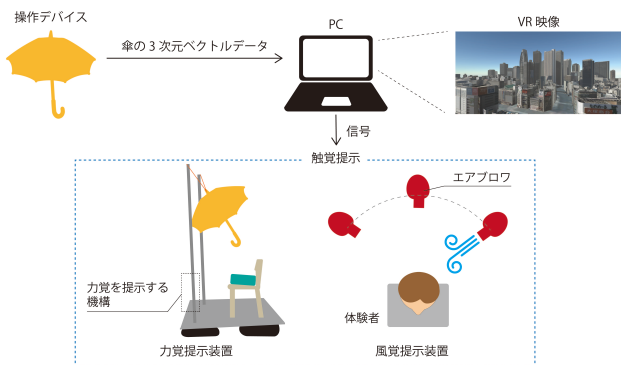


図 3 (上図) システムの全体構成と (下図) システムレイアウト

閉まることでパイプ内が減圧し、パイプ内のキャップが吸い上げられ、糸が引っ張られることで張力を提示する。開閉キャップの開閉はサーボモータを使用し 0/1 で制御する。この機構を前方 2 つのパイプに設置する。空気圧による張力提示を行うことで傘を持ち上げる力が線形的な張力提示ではなく張力に弾力を持たせることができる。傘の受け骨には 6 軸ジャイロ・加速度センサを搭載した M5 スタックを装着し傘のピッチとロールの回転角を測定する。ヨー軸の回転角は天井に取り付けられたカメラを使い AR マーカーの位置をもとに測定する。図 5 のように基準となるマーカーをカメラの撮影範囲内の任意の位置に配置し、4 つの測定用マーカーを傘の上面に貼り付ける。基準マーカーから見た 4 つの測定用マーカーの移動量を求め、その平均値をもとに回転角を測定する。測定した 3 つの回転角を PC に送信し実空間と仮想空間での傘の向きを同期させる。Unity 上で傘の向きが風の方向と一致するかを判定し、一致した場合、Arduino を通じてサーボモータを開閉することでパイプを減圧し張力を発生させる。また、ゴムタイヤを台座の下に設置し、台座を不安定にすることで浮遊感を演出した。

#### 4.2 風覚提示装置

風覚提示装置では被験者の後方に設置した 3 台のエアブ

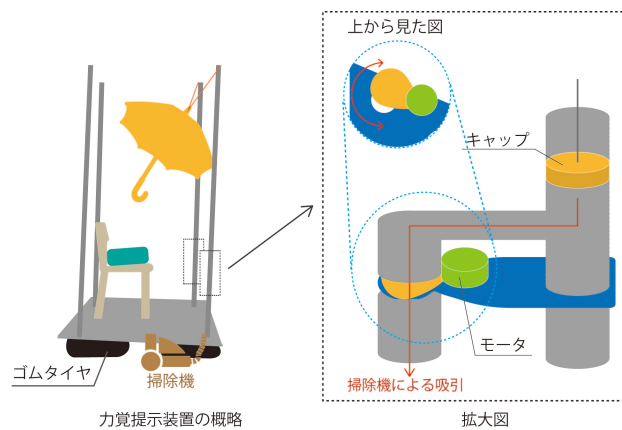


図 4 力覚提示装置

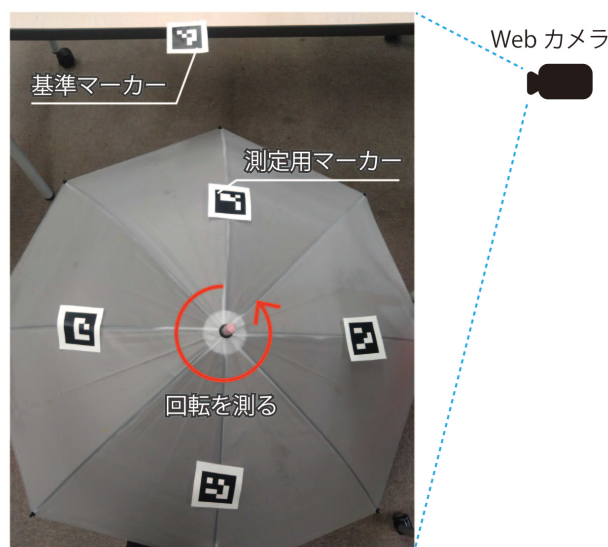


図 5 AR マーカーの回転取得

ロワの ON/OFF を制御することで前、右斜め前、左斜め前、3 つの風向を提示する (図 6)。

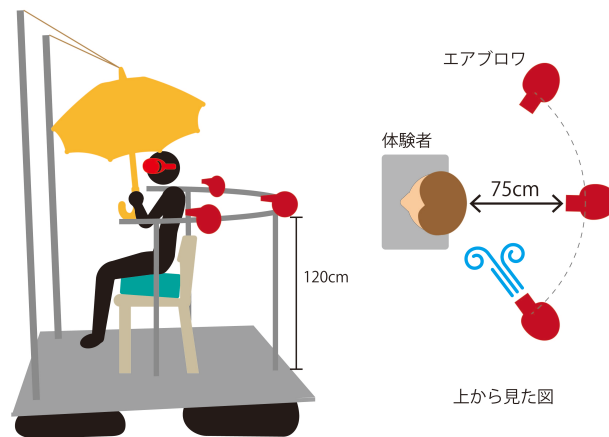


図 6 風覚提示装置

### 4.3 映像システム

空傘散歩の環境は国土交通省が提供する 3D 都市モデルである Plateau[3] を Unity 上で使用し新宿の環境を作成した(図 7)。体験者は新宿駅の 100m 上から体験を開始する。なお環境内では、350m を超えると風によって持ち上がる垂直の移動方向を制限する。これは、これ以上上昇しすぎると地面や周囲の環境が視界から遠ざかりすぎて体験者の進行感が失われるためである。視覚による風向の提示は図 8 のようなエフェクト表現を用いた。

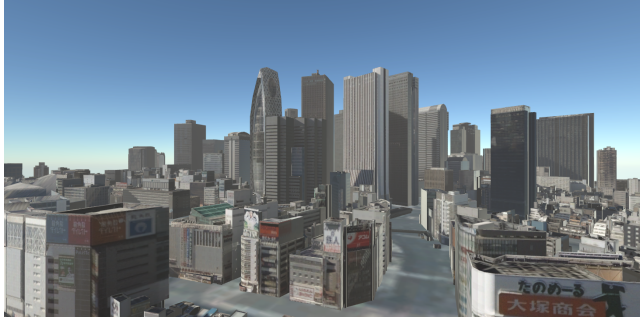


図 7 仮想空間の環境

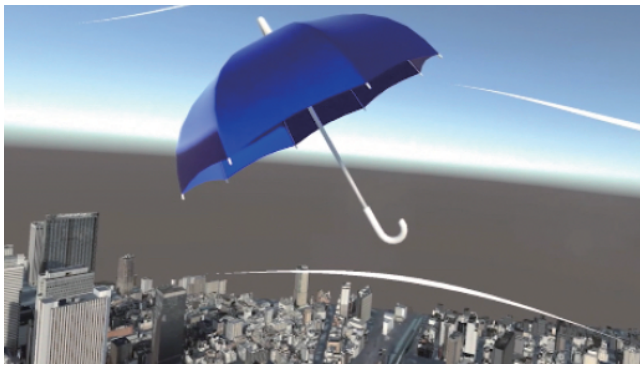


図 8 視覚による風向のエフェクト

## 5. プロトタイプ実験

### 5.1 プロトタイプ実験の概要

2023 年 9 月 12~15 日に開催された Interverse Virtual Reality Challenge (IVRC) の SeedStage でプロトタイプの空傘散歩を展示し体験者 48 人に本システムの操作感を評価するために、アンケート調査を行った。実機の写真を図 9 に示す。また、体験中の様子は図 10 のようになる。

本稿で製作した空傘散歩の装置の違いは大きく 2 つある。1 つ目は風覚提示の方法である。プロトタイプで使用した風覚提示装置はネックファンの左右に位置する送風口を上下に分割しその上にアクリル板を設置した。これを 4 つの送風口それぞれに取り付けサーボモータを用いて開閉制御することで風の感覚を提示した(図 11)。2 つ目は力覚提示装置についてである。力覚提示の方向を前後左右の 4 つの方向で実装した。また、傘の回転反映には AR マーカを

使わず 6 軸センサのみでローとピッチ軸のみを使用した。

体験シナリオは概ね本稿で書かれているものと同じであるが、ステッピングモータの動作時間を考慮して、体験者は風向きを感じ 3 秒間傘の方向と風向きを一致させることで力覚提示装置が作動する仕組みになっていた。



図 9 プロトタイプの実機の写真

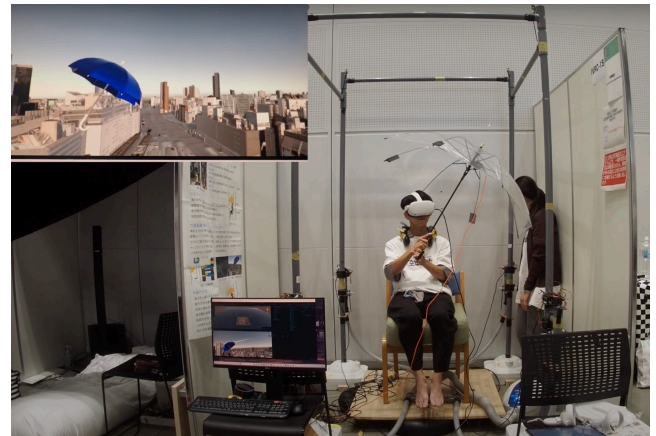


図 10 IVRC での体験中の様子

### 5.2 プロトタイプ実験のアンケート調査と考察

IVRC の評価実験を行った。回答者数は 48 名であり(男性 39 名、女性 8 名その他 1 名)でありアンケート内容は 7 段階評価(最大 7、最小 1)で 7 項目と自由記述で課題点などを調査した。質問項目を表 1 に、評価結果を表 2 に示す。

1)VR 上での風の方向感知：平均値が高く、分散が低いことから、参加者は VR 上で風の方向を感知しやすいと感じたことがわかる。これは VR 環境のリアルさや没入感の高さを示唆している。

表 1 アンケートの項目

No	質問内容
1	VR 上で視覚で風が吹いている方向がわかりましたか？
2	風覚提示装置の風から、どの方向に風が吹いているかがわかりましたか？
3	VR 上で風が吹いている方向に傘が煽られる感覚を感じましたか？
4	傘が煽られる強さは適切でしたか？
5	VR 上の映像と、装置によって風に煽られている感覚とのズレはありましたか？
6	風向が変化する時間間隔は適切でしたか？
7	傘が煽られた時に VR 上で進む速度は適切でしたか？



図 11 プロトタイプで使用した風覚提示装置

表 2 アンケートの結果

No	1	2	3	4	5	6	7
平均	6.23	4.47	6.0	5.15	4.98	4.10	4.77
分散	1.07	2.97	0.98	2.55	2.49	1.11	1.20

2) 風覚提示装置による風の方向感知：平均値が中程度で分散が高いことから、参加者の間で風覚提示装置による風の方向感知の評価にはばらつきがあったことがわかる。

3) VR 上での傘の煽られる感覚：この項目も高い平均値と低い分散を示しており、多くの参加者が VR 内で傘が風によって煽られる感覚をリアルに感じ取ったことがわかる。

4) 傘の煽られる強さの適切さ：平均値はやや高いが、分散が比較的高いことから、傘の煽られる強さについての感じ方には個人差があったことが示される。

5) VR 映像と風の感覚のズレ：平均値が中程度で分散が高いことから、VR 映像と風の感覚との間にズレを感じた参加者がいることがわかる。これは、VR 体験の一部で同期が取れていない可能性を示唆している。

6) 風向の変化の時間間隔：平均値が最も低く、分散がやや高いことから、風向の変化のタイミングについては改善の余地があると考えられる。

7) 傘が煽られた時の VR 上での進行速度：平均値は中程度で、分散は比較的低いことから、多くの参加者が傘が煽られた時の進行速度を適切と感じたと考えられる。

プロトタイプで指摘された課題点には、傘の張力が小さいことによる「引っ張る感覚が不足していた」という問題や、プロトタイプでヨー軸の正確な検出ができなかった

め「傘を傾ける動作が不自然」と感じるユーザーの違和感が挙げられている。さらに、操作の理解に時間がかかることや、「チュートリアルがあればより理解しやすかった」という指摘もあった。

これらの課題に対応するため、本稿では操作するパイプの本数を 4 本から 2 本に減少させ、張力を増加させた。これにより、操作可能な方向を前、後、右、左の 4 方向から前、右斜め前、左斜め前の前方 3 方向に絞り込み、操作の明瞭さを向上させた。また、プロトタイプでの 9 軸センサによるヨー軸のドリフト問題を解決するため、今回は天井に取り付けた AR マーカーを利用してヨー方向の回転を実装した。操作可能な方向を前方に限定し、アンケートで分散が大きかった風覚提示装置の方向提示の改善を図る一環として、エアブローを使用し風の方向感覚の提示を向上を狙う。

また、本体験の良かった点についてインタビューしたところ、「傘に煽られる感じがした」「そらをとんでいる感じがした」「臨場感が高かった」という意見があがった。

## 6. まとめ

本稿では、傘で空を飛ぶ体験を仮想空間で表現し、空中を遊覧できる VR アプリケーションである「空傘散歩」を開発した。傘によって持ち上げられる感覚を示す力覚提示装置、風向を提示する風覚提示装置、空中の VR 映像を組み合わせて、傘を使って空を飛んでいる体験をつくりあげた。プロトタイプ実験では、臨場感や空を飛んでいる感覚を提供できた。アンケート結果から力覚提示装置は傘に煽られる感覚を表現できたことが示唆された。しかし、このプロトタイプ実験から、傘を引っ張る力が弱いことが明らかになった。また、風覚提示装置による風向提示について、風向きを感じ方には個人差が見られた。

これらの課題に対処するために本稿では、力覚提示装置の方向提示を前方向のみに絞り、エアブローを用いた風覚提示に変更し、より分かり易い風向の提示を図った。

今後の展望として、体験者にさらにリアリティのある浮遊感を提供したい。傘が引っ張られる際に同時に台座を傾けることでより空中を漂っている感覚を得られることを期待している。また、多くの人に体験してもらう機会を設け、傘で空を移動、軟着陸するリアリティある楽しさを提供していきたい。

## 参考文献

- [1] 野口. 飛ぶ一人はなぜ空にあこがれるのか. 講談社, 1991.
- [2] Eagle Flight, Ubisoft Montreal Studio, [https://store.steampowered.com/app/408250/Eagle\\_Flight/?l=japanese](https://store.steampowered.com/app/408250/Eagle_Flight/?l=japanese) (参照 2023/12/20 参照).
- [3] TOKYO 弾丸フライト, 株式会社ハシラス, <https://hashilus.co.jp/attractions/tokyo-bullet-flight/> (参照 2023/12/20 参照).
- [4] Tatsuya Kodera, Naoto Tani, Jun Morita, Naoya Maeda, Kazuna Tsuboi, Motoko Kanegae, Yukiko Shinozuka, Sho Shimamura, Kadoki Kubo, Yusuke Nakayama, Jaejun Lee, Maxime Pruneau, Hideo Saito and Maki Sugimoto: Virtual Rope Slider, Virtual Reality International Conference 2014, Apr. 9-13, 2014.
- [5] Ken Ishibashi, Toni Da Luz, Remy Eynard, Naoki Kita, Nan Jiang, Hiroshi Segi, Keisuke Terada, Kyohei Fujita, and Kazunori Miyata: Spider hero: a VR application using pulling force feedback system. In Proceedings of the 8th International Conference on Virtual Reality Continuum and its Applications in Industry (VRCAI '09). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 197-202, 2009. <https://doi.org/10.1145/1670252.1670294>
- [6] Kaede Ueno, Naoto Yoshida, and Tomoko Yonezawa: Groveling on the wall: interactive VR attraction using gravity illusion. In SIGGRAPH ASIA 2016 Posters (SA '16). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 6, 1-2, 2016. <https://doi.org/10.1145/3005274.3005304>
- [7] 小木 哲朗, 廣瀬 通孝: 科学技術データ提示における多感覚の統合効果, 日本機械学会論文集 C 編, 1995, 61 巻, 584 号, p. 1586-1592, 公開日 2008/02/26, Online ISSN 1884-8354, Print ISSN 0387-5024, <https://doi.org/10.1299/kikaic.61.1586>
- [8] 小坂 崇之, 宮下 芳明, 服部 進実: 没入型三次元風覚ディスプレイの開発と評価, インタラクシオン 2007 論文集, pp105 - 112, 2007.
- [9] 小島雄一郎, 橋本悠希, 梶本裕之: 皮膚を局所的に刺激するウェアラブル風覚提示デバイスの基礎的検討; 日本バーチャルリアリティ学会第 13 回大会論文集, pp. 465 - 468, 2008.
- [10] 金 時学, 長谷川 晶一, 小池 康晴, 佐藤 誠: 7 自由度力覚ディスプレイ SPIDAR-G の提案, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 2002, 7 巻, 3 号, p. 403-412,