

VR空間で全周から風を感じる為の送風機の配置の検討

伊藤 巨輝^{1,a)} 小野 龍一^{1,b)} 羽田 久一^{2,c)}

概要: 近年, VR環境におけるマルチモーダルなインタラクションの研究が盛んである. VR環境において視覚や聴覚のみで現実感を演出する事よりも, 加えて触覚や嗅覚を利用した方が現実感の向上は容易である. そこで我々は風がもたらす触覚に着目し, 風覚でVR体験中における現実感の向上を目的とする研究を行った. 我々は以前の実験で風向きを誤認識する角度があることがわかった. この角度を応用し, 送風機による送風と風が流れている映像を視聴させる事で, 被験者の感じる風向を錯覚させ被験者の周囲全てに送風機を配置しなくても少ない数で全方向から感じれる配置があると予想し, 実験を行った. 実験の結果, 風向を錯覚する4つの角度に送風機を配置する事で, VRの映像の向きと送風機の風向が異なっているにも関わらず, 全周からの風による触覚刺激をもたらす事が判明した.

キーワード: VR, マルチモーダル, 触覚, 錯覚

1. はじめに

VR環境において臨場感を演出する場合, 視覚と聴覚のみに訴えるよりも, 味覚や嗅覚, 触覚といったマルチモーダルな感覚を利用した方が臨場感を向上させやすい. 我々の過去の研究 [1] ではHMDを装着した被験者に風が流れる映像と送風機からの風を提示し, 風向知覚特性の測定を行ったところ, 風向を誤認識する角度が存在すると判明した.

そこで我々は, VRを体験する被験者に風を当てる事でうける触覚刺激と風向を誤認識する角度に着目し, 被験者が全周から風を感じる為に必要な風源の数と知覚するのに最適な配置を調査する. 本項ではVRを体験する被験者に向けた風覚刺激による臨場感向上の為に, 上記の風向を誤認識する角度から送風を行い, HMDには前後左右斜めから風が流れる映像を提示する.

このとき, 表示される映像と被験者が受ける風の向きが異なっているにも関わらず, 映像と同じ方向から送風される様に錯覚すると仮定する. 被験者に全周から風の刺激を受けていると錯覚させるのに必要な, 風源の数を把握する為, 調査を行なった.

2. 関連研究

2.1 風を用いたVRデバイスの研究

風を触覚刺激としてユーザーに提示するために, HMDに付随するウェアラブルデバイスとして開発されたシステムを挙げる. Michael Rietzler ら [2] は, 頭部全体をカバーするように風を出力するノズルが取り付けられたデバイスによって没入感と娯楽性, 現実感を高めるシステムを開発した. リアルタイムにコンテンツ内の風によるアニメーションやエフェクトを現実的に再現し, VRにおける没入感の増強度は, 風の影響を強く受けるということを示した. Nimesha Ranasinghe ら [3] は, HMD下部から被験者の顔正面に風が当たるように取り付けられた2つの送風機と, 頸部にペルチェ素子を設置する事でVR体験に風と熱の刺激を与えるデバイスを開発した. このシステムを用いることで, 実空間における風や熱を感じるのと同様の刺激をVR空間で体験する事が可能であり, HMD単体のVR体験よりも刺激があった方が優位であると示した. Jaeyeon Lee ら [4] は皮膚に密着した風の刺激は不快感に繋がると考え, 送風機による風刺激を与える非接触の触覚提示装置を開発した. クリップと小型の送風機を用いたデバイスを服に掛け, 風を与える事で, 皮膚に密着して刺激を与えるデバイスと同等の精度を持つ事を示した. Cardin Sylvain ら [5] は, 無人航空機の遠隔操縦において, 風をパイロットに直接提示することで飛行操縦を支援するシステムを開発した. このシステムでは頭部を囲むようにHMD

¹ 東京工科大学大学院 メディアサイエンス専攻
Tokyo University of Technology

² 東京工科大学 メディア学部
Tokyo University of Technology

a) g31180033a@edu.teu.ac.jp

b) g311800628@edu.teu.ac.jp

c) hadahskz@edu.teu.ac.jp

に取り付けられた8つの送風機を用い、操縦する機体が受ける風を地上にいるパイロットに提示するものである。これまでは視覚情報のみで判断していた風の情報をパイロットが直接体で感覚的に受け取ることで、遠隔操縦に必要な情報を補完している。実際に製品として開発されているデバイスとして、FEEL-REAL[9]のようなデバイスも存在する。これはHMDに取り付ける形で頭部正面に装着するデバイスであり、冷風と温風を出すエアフローや匂いを出す為のカートリッジが備わっている。Daniel Harleyら[6]は、従来のVRシステムの開発者はVR体験に視覚や聴覚以外の刺激を組み込む際に、実空間での体験を無視してセンサーやデバイスに頼っていると考えている。そこで、他の研究に挙げられるデバイスや機器を用いずに、自然の風や日光、砂に触れる皮膚の感触といった実空間での体験とVRコンテンツを組み合わせた実験を行なったところ、センサーやデバイスを用いての体験と変わらない体験を与える結果となった。

これらの関連研究では、風を用いる上で風源の配置や風速分布に関することはあまり考慮されておらず、人が風を感じる際の風覚特性の点から見ると根拠が明確な風限配置ではない。

2.2 風覚の知覚特性に関する研究

この章では、風が吹いている方向を人が判断する際の特性について調査した研究を挙げる。中野ら[7]は、VRでの風覚利用において風向や風源の位置や適切な送風角度を求めため、頭部正面から頭部背面にかけての風向知覚特性を調査している。これは頭部に向けて角度の異なる風を送り、風向を知覚可能な範囲を求め実験である。指向性が高く局所的に当たる風と、環境風に近い均一な風の2種類の風で実験を行なった結果、頭部へ局所的に当たる風は正面に比べて背面の方が知覚できる角度が広く、風覚が鈍いが、環境風に近い風では差はない事を示しており、側面に関しては、後ろ髪の影響により正面と背面に比べてさらに鈍く、風向を判断し難いという結果を示している。

小坂ら[8]は、VRにおける現実感の拡張を目指す方法として没入型の三次元風覚ディスプレイを開発し、頭部から上半身に対する風覚について評価実験を行なっている。実験は上半身を覆うドーム状に配置したプロア送風機から送風を行い、どの送風機から送風が行われているかの正答率と、風を知覚するまでの反応時間の計測を行った。その結果、左右からの送風に比べて前後からの送風に対する正答率が低く、傾斜が45度以上の送風機からの送風に対する反応が遅いという、空間方位的に不均一な風覚が行われている事が明らかになった。これらの風向知覚特性を測る研究は、HMDを装着せず目を閉じての実験である為、視覚と聴覚による刺激を同時に与える多感覚刺激への影響は不鮮明である。そこで、風の刺激に加えてHMDによる視覚

刺激と、イヤフォンによる聴覚刺激を含めた多感覚刺激を与える事で、被験者の没入感が増強され、上記の結果との違いが鮮明になるのではないかと考える。また、HMDをつけている状態とつけていない状態では、主に顔前面において風の刺激を受ける範囲が異なるために、これもまた結果に違いが出ると考える。

我々の以前の研究[1]は、HMDを装着した被験者の前面、側面、背面から送風機による送風を行い、被験者と送風機の距離を保った状態で角度をずらしていき、どこまで送風による角度のずれを認識できるか、風向知覚特性を調べる実験を行なった。その結果、被験者の全周に風向知覚を錯覚する一定の角度が存在していると判明した。

これらの関連研究から、VRにおいて風の触覚刺激を用いたシステム開発は没入感を高めるのに有効であり、視覚・聴覚情報を含めたHMD装着時に人間が風を感じ取る風覚の調査が必要になる。

3. 頭部への送風により風向錯覚をもたらす配置の提案

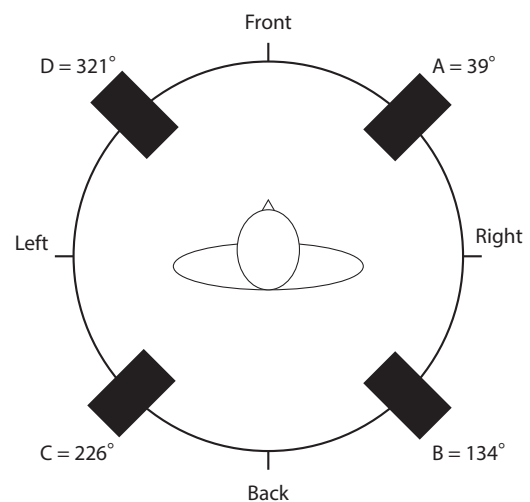


図1 風向を錯覚する角度での送風機の配置

図1のようにHMDを装着した被験者の正面を0度として時計回りに39度、134度、226度、321度の位置に送風機を配置する。上記の角度は、以前の我々の研究[1]で判明した、図2の風向知覚特性の範囲から算出した。図2におけるaからdの斜線が重なる範囲は、被験者が1方向からの送風で2つの方向から送風が行われると錯覚した角度である。本研究では斜線が重なる範囲の中央の角度に送風機を配置した。図1の角度に配置した送風機から被験者へ送風を行い、HMDには被験者に向けて風が吹き付ける映像と音を提示する。これにより、被験者に吹き付ける風向きと、HMDに表示した映像の風向きが異なるにも関わらず、被験者がHMDに表示した方向から風が吹いていると

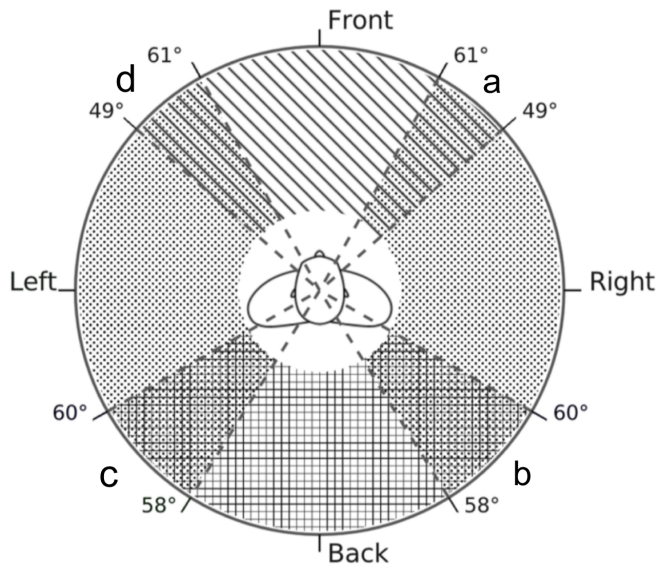


図 2 風向知覚特性の範囲

錯覚を起こす事について、検証を行う。

実験では4台の送風機を用いて実験を行う。風向の錯覚に際して図1のAとC, BとDといった被験者を挟んだ位置にある2台の送風機を用いる事で、前後左右から風が吹いていると、風向を錯覚させる事が可能ではという推測がある。そこでまず、2台の送風機で被験者に風を当て、風向知覚における前後左右の違和感の有無を見極める。その後、4台の送風機による送風と、HMDには前後左右に加えて斜めから風が流れる映像を提示する事で、被験者に風向を錯覚させる事の可否を検証する。

4. 送風機制御と VR 環境の実装

4.1 VR 環境の構築

本研究ではHMDにはHTC Viveを使用し、HMDに表示するコンテンツの実装にはゲームエンジンであるUnityを用いた。図3は実験に用いたVR空間である。ビルが立ち並ぶ空間を風が流れる事で送風機からの風が映像に違和感なく溶け込む様になっている。風の表現は1万のパーティクルを用いて表現し角度を変更する事で被験者に向かって全方向から風を流せるようにした。

4.2 送風機の制御

送風機はIRIS OHYAMAのPCF-HD15-Wを用いた。マイコンにArduinoUNO、送風機を制御する為にソリッドステート・リレーのAQG22105を用いた。送風機の風量をPCから調節するのにTouchDesignerから送信されるDMXを用いた。DMXインターフェイスにはENTTECのDMX-USB PROを用いた。図4は実験で行われている送風機の制御までの通信の流れである。Unity上でパーティクルの角度を変更するとOpenSound ControlによりTouchDesignerに角度情報が送信されるようになっている。

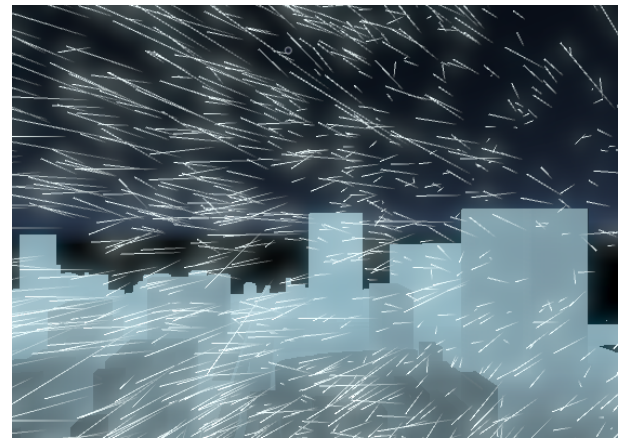


図 3 被験者に提示する VR 映像

TouchDesignerでは角度情報から、どの送風機で風を流すのかを制御しており、風量の情報をDMX信号でArduinoに対して送信を行っている。ArduinoはTouchDesignerからの信号に応じて送風機へ流す電力をPWM方式で制御した、

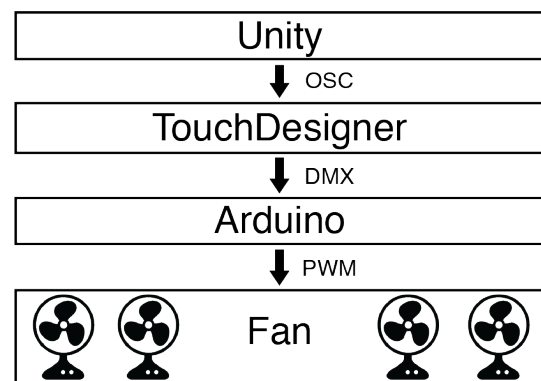


図 4 通信の流れ

5. 実験

図5は実験の様子である。HMDとイヤフォンを装着した被験者に対して、送風機による送風を行う。実験ではHMDに映し出された映像(図3)と被験者が受ける風を同時に提示し、角度毎に違和感の有無を調査する。これにより、送風機を2台もしくは4台用いる事で映像と同じ方向から風が来ると錯覚させる事が可能であるかを導き出す。

また、HMDに表示した錯覚を試みる角度は、被験者の正面を0度として時計回りに45度毎に回転した角度であり、実験の前提条件として被験者が受ける環境風の強さの標準は、ビューフォート風力階級において人が顔に風を感じるとされる軽風(風速1.8m/s)を使用した。送風機と被験者との距離は1.7メートルであるが、これは使用した送風機で軽風を感じられる距離である。被験者には送風機による風と、HMDに映し出された映像との間に違和感が生じているかについて質問した。送風機を2台用いた実験で

は、前後左右で風向錯覚させられるかが推測である為に、違和感の有無を2択で判断させ、4台の送風機を用いた実験では、違和感の有無を4段階で評価した。

5.1 実験手順

以下は実験の手順である。

- (1) 被験者は、送風機の中央に配置した椅子(図1)に座りHMDを装着する。(図5)
- (2) 被験者には耳に付けたイヤフォンから実験の手順について説明を行う。
- (3) 実験手順についての説明の後に被験者は目を瞑り、HMDには風が流れる映像(図3)とイヤフォンには音を出力する。そして、映像の向きに適した風を被験者に向けて送風する。
- (4) イヤフォンから目を開ける指示を被験者に向けて行う。送風機からの風を受けた被験者に、実際の風とHMDに表示された映像との間に違和感を感じるかについて質問した。
- (5) 一つの角度での問答を行なった後に、次の角度に移行する。
- (6) 2台と4台での送風機による実験を行なった後、映像と風の刺激を最も違和感無く感じる事が出来たパターンについて質問した。



図5 実際の実験風景

5.2 2台の送風機を用いた実験

送風機を2台使用した実験は、図1の角度に配置した送風機のうちAとC、BとD、といった被験者を挟む2台の送風機で行う。AとCの送風機で前後左右の風向を錯覚させる場合は、前方と右側を図1のAからの送風で錯覚させ、後方と左側を図1のCに配置した送風機で行う。

5.3 4台の送風機を用いた実験

4台の送風機を使用した実験では、図1の位置に配置し

たAからDの送風機を全て用いて行う。被験者の前後左右における風向錯覚は、錯覚を試みる向きの両側の送風機を同時に制御する事で行う。正面から送風が行われると錯覚させるには、図1のAとDの位置にある送風機を制御する事で行う。また、被験者の斜めの位置から送風が行われていると錯覚させるには、風が流れる向きに最も近い角度にあたる送風機を制御する事で、被験者に向けて風向錯覚を試みた。これにより、2台での送風を行う場合と比較し、前後左右への送風を錯覚させる為に

5.4 実験結果

本項では11名の学生に対して、HMDを装着させた状態で風が流れる映像を提示し、送風機によって映像の風向きと異なる角度からの送風を行った。その結果、映像の向きと送風の角度が異なっているにも関わらず、HMDに表示された映像の方向から風が来ていると、被験者を錯覚させるのに必要な送風機の台数は4台となった。実験結果として、映像と風における違和感の合計を記したグラフを図6と図7、図8に記す。

図6と図7は送風機2台での角度毎の違和感の有無を表し、図8では送風機4台での角度毎の違和感の有無を明示する。

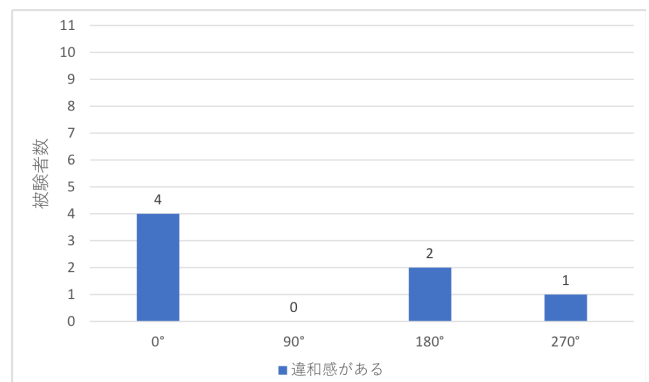


図6 AとCの送風機で違和感を覚えた被験者の数

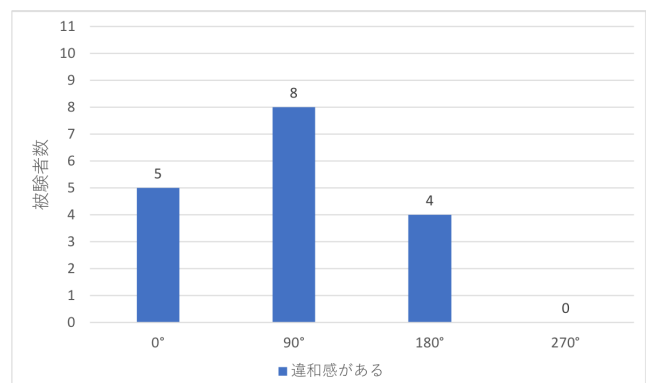


図7 BとDの送風機で違和感を覚えた被験者の数

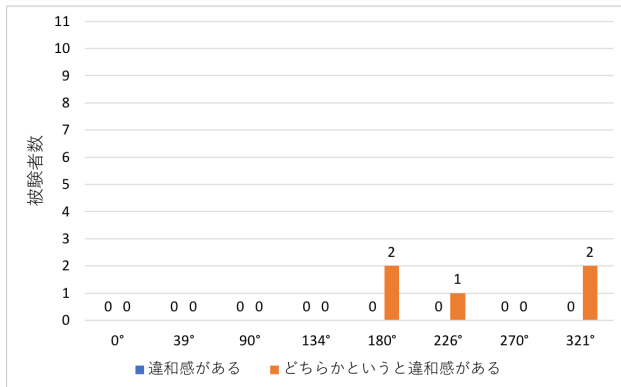


図 8 送風機 4 台の実験で違和感を挙げた被験者の数

6. 考察

送風機を 2 台使用した実験では、図 6 と図 7 の結果となった。2 台使用しての実験では A と C, B と D の両方の場合において、映像に対して風を錯覚させる事は難しく、送風機からの送風と HMD に表示される映像との角度の差が最も少ない場合を除いて、平均 4 人が違和感を挙げる結果となった。特記する点として、被験者の過半数が図 1 の B から送風を行い、右から風が流れる映像を提示した際に実験を行なった被験者の 11 人中 8 人が違和感を挙げる結果なり、A からの送風では右から風が流れていると実験を行なった被験者全員が錯覚している。この事から、頭部後方の風に対する感受性が頭部前方よりも優れていると言える。

図 8 の結果から、4 台の送風機を使用した実験において、1 台もしくは 2 台の送風機から被験者に対して送風を行なったところ、大半の被験者が実験を行なった全ての角度において、HMD に表示された向きと同じ方向から実際に送風が行われていると錯覚する結果となった。このことから、前後左右斜めから風が吹いている映像を視聴させながら、送風機からは映像で表示された方向とは異なる向きから送風を行なったとしても、被験者は映像の方向から送風されていると錯覚する事が判明した。

以上の結果から、被験者を錯覚させる為に必要な送風機の最低数は 4 台であると考察できる。

7. おわりに

本研究では、風向知覚を錯覚させるのに必要な送風機の配置を検討する為に、HMD を装着した被験者に、2 台と 4 台の送風機から風の刺激を与える事で、風向きを錯覚させる事は可能か、検証した。実験では、2 台と 4 台の送風機を使用して被験者の頭部に向けて送風を行った。送風機の配置は風向を錯覚する角度である。被験者の正面を 0 度として時計回りに 39 度、134 度、226 度、321 度に配置した。送風機を 2 台使用する場合は 39 度と 226 度、134 度と 321 度のように被験者を挟む位置に送風機を配置して実験

を行った。送風機を 2 台用いる実験では HMD に前後左右から風が流れる映像を提示し、1 台の送風機で 2 方向からの風向錯覚を試みた。4 台用いる実験では前後左右に加え、斜めから風が流れる映像を提示し、斜めから風が流れる映像には、映像の向きに最も近い送風機から送風を行い、前後左右であれば風が流れる向きの両端の送風機を同時に駆動する事で、風向錯覚を試みた。その結果、4 台の送風機で実験を行なった場合に、HMD に表示された風向きと送風機の風向きが異なっているにも関わらず、映像の方向から実際に送風が行われていると、11 人中 9 人が錯覚した。このことから、全周からの風による触覚刺激をもたらすことが、風向を錯覚する角度に配置した 4 台の送風機のみで行える事が判明した。

参考文献

- [1] 齊藤佑祈, 室崎之典, 小野龍一, 中野亜希人, 羽田久一: ヘッドマウントディスプレイを装着した状態での風向知覚特性の測定 (2017).
- [2] Rietzler, M., Plaumann, K., Kränzle, T., Erath, M., Stahl, A. and Rukzio, E.: VaiR: Simulating 3D Airflows in Virtual Reality, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 5669–5677 (online), DOI: 10.1145/3025453.3026009 (2017).
- [3] Ranasinghe, N., Jain, P., Karwita, S., Tolley, D. and Do, E. Y.-L.: Ambiotherm: Enhancing Sense of Presence in Virtual Reality by Simulating Real-World Environmental Conditions, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 1731–1742 (online), DOI: 10.1145/3025453.3025723 (2017).
- [4] Lee, J.: Wind Tactor: An Airflow-based Wearable Tactile Display, *Adjunct Publication of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 91–94 (online), DOI: 10.1145/3131785.3131838 (2017).
- [5] Cardin, S., Thalmann, D. and Vexo, F.: Head Mounted Wind, *proceeding of the 20th annual conference on Computer Animation and Social Agents (CASA2007)*, pp. 101–108 (online), available from (<http://infoscience.epfl.ch/record/104359>) (2007).
- [6] Harley, D., Verni, A., Willis, M., Ng, A., Bozzo, L. and Mazalek, A.: Sensory VR: Smelling, Touching, and Eating Virtual Reality, *Proceedings of the Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '18, New York, NY, USA, ACM, pp. 386–397 (online), DOI: 10.1145/3173225.3173241 (2018).
- [7] Nakano, T., Saji, S., Yoshioka, Y., Kawachi, Y. and Yanagida, Y.: Measurement of Property of Wind Direction Perception at the Frontal Region of Head Using a Single Fan (Special Issue: Psychology, Measurement of Brain Function and VR) (2013).
- [8] Miyashita, H., Kosaka, T. and Hattori, S.: Development of Contents for Immersive 3D Wind Display (2007).