

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

齊藤 佑祈^{1,a)} 室崎 之典¹ 小野 龍一¹ 中野 亜希人¹ 羽田 久一^{1,b)}

概要：環境風を再現するための風源配置に関する研究で風向知覚特性の測定がされていた。しかし、多感覚刺激による情報提示がないため、HMD 装着時と同じ結果になるかが疑問が残る。そこで本研究では HMD を装着し、風向が認識できる映像と音像が把握できる風の音をユーザーが視聴した状態で、実際に風向知覚にどのような影響を与えるか実験した。実験として環境風を再現するファンを用いて、ユーザーに周囲 360° から頭部と体に風を当て、どこまで角度のずれを認識できるかという手法で風向知覚特性を調べる実験を行なった。通常状態の時は、正面と背面の風向知覚には差がなく、側面の風向知覚が最も鈍いという結果だったが、多感覚刺激を与えると側面と背面の風向知覚に差がなくなり、正面の風向知覚が最も敏感になった。結果的に多感覚刺激を与えることで、正面と側面の風向知覚が鋭敏になることがわかった。

Measurement of wind direction perception characteristics with head mounted display

SAITO YUKI^{1,a)} MUROSAKI YUKINORI¹ ONO RYUICHI¹ NAKANO AKITO¹ HADA HISAKAZU^{1,b)}

Abstract: Wind direction perception characteristic was measured in the recent study about wind source arrangement to reproduce natural wind. However, since there is no research with the multisensory stimulation, there remains doubt as to whether it will be the same result as when the Head Mounted Display(HMD) is worn. In this research, we investigate the effect of wind direction perception is actually affected by the user wearing the HMD and the sound of the wind that can recognize the wind direction. To investigate wind direction perception characteristics, we used a fan to hit the head against the body from the surrounding 360°. Furthermore, we investigate how much the angle deviation can be recognized by the user. From the recent research of the normal state, there was no difference in the perception of the wind direction on the rear side, which was the result that the perception of the wind direction on the side was the dullest. On the other hand, when multisensory stimulation was given, there was no difference in the perception of the wind direction on the side and the back, and the wind direction perception of the front became the most sensitive. As a result, we found that the wind direction perception of the front and sides becomes sharp when a multisensory stimulation is given.

1. はじめに

近年、VR の発展が盛んになりヘッドマウントディスプレイ (以下 HMD) とコントローラーの位置トラッキングが正確に行える様になった。それに伴い、仮想空間内での歩行が可能になった。VR の分野では VR 空間内での没入感

を高めることが重要視されており、実際に VR 空間において、体験者に多感覚刺激を与えることで VR 空間内での没入感が増すことがわかっている [1]。体験者に多感覚刺激を与える方法として、視覚と聴覚に加えて触覚に刺激を与える様々な方法が提案されている。例えば、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 [2] やスピーカーからの振動を用いて触覚効果を生み出すデバイス [3] などがある。これらのデバイスはユーザーの動きが拘束されるため、仮想空間内での自由度が下がってしまう。そこで

¹ 東京工科大学 メディア学部
Tokyo University of Technology School of Media Science

a) m0114181cf@edu.teu.ac.jp

b) hadahskz@edu.teu.ac.jp

注目されているのが、風を用いた触覚デバイスである。風は非接触で触覚刺激を与えることができるため、ユーザーの動きが拘束されにくい。実際にヘッドマウントディスプレイに装着し、風を提示できるデバイスとして、VaiR[1]や Ambiotherm[4] などがある。これらのデバイスは風源を 45 度間隔で配置したり、頭部前面のみに配置しているものが多い。そのため、人の知覚特性に基づいて風を提示しているのかは疑問が残る。そこで風を触覚刺激に用いる場合にユーザーに対して正確な風向を提示するため、風が当たった時の感覚である「風覚」の知覚特性を測定した研究 [5], [6], [7] がある。しかし、この測定では HMD や聴覚刺激を用いず測定を行なっていたため、多感覚刺激を与えた場合と測定結果に違いが出るのではないかと予想した。そこで本研究では HMD を装着し、風向が認識できる映像と音像が把握できる風の音をユーザーに与えた状態で、風による触覚刺激を与えることで実際に風向知覚にどのような影響を与えるか調査する。

2. 関連研究

本章では VR において風を触覚刺激に用いた先行研究を紹介する。

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、前述した 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まず挙げる。Cardin Sylvain らの”Head Mounted Wind” [8] 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 に取り付けられた 8 つのファンを用い、操縦する機体を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。これにより視覚情報でしか判断しえなかった風の情報を直接体で感覚的に受け取ることで、操縦に必要な情報を補完している。

Michael Rietzler らの VaiR[1] は、頭部全て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、リアリズム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することで、VR における没入感の増強度合は、風の影響を強く受けるということが示された。

Nimesha Ranasinghe らの Ambiotherm[4] は、風と熱による触覚刺激を用いてヴァーチャル環境の刺激を実際に知覚させるというシステムである。デバイスは、HMD 下部に顔正面に風が当たるように取り付けられた 2 つのファンと、うなじ部分に装着する熱を与えるペルティエ素子を用いたものである。このシステムを用いることで、ヴァーチャル環境での風や温度を直接触覚で体感することで没入

感が高められることが示された。

実際に製品として開発されている例として、FEEL-REAL[9] のようなデバイスも存在する。これは HMD の上にかぶせるような形で頭部正面に装着するデバイスで、冷風と温風を出すエアフローやミストなどが備わっている。

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。そこで次に、風を感じる特性に関する先行研究を紹介する。

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された研究を挙げる。中野らは、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るため、頭部の正面 [5]、側面 [6]、及び背面 [7] においての風向知覚特性を調査している。これは頭部に角度の異なる風を送り、風向を知覚できる範囲を求める実験である。指向性の高い局所的に当たる風と、環境風に近い均一な風の 2 つで実験を行なった結果、局所的な風で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、均一な風では差はないと示されている。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、風向を判断しづらいという結果を示している。

これらの風向知覚特性の研究は、HMD を装着せず目を瞑った状態での実験のため、多感覚刺激による影響がどう出るかはわからない。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状態での実験では、没入感が増強され、結果に違いが出るのではないかと考えられる。また、HMD をつけていない状態とつけていない状態では風が接触する範囲が異なるため、これもまた結果に違いが出ると考えられる。

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ためには肝要である。そのため、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. 多感覚刺激を用いた風覚の調査

私たちは多感覚刺激によりユーザーのコンテンツに対する没入感が増すことで、外部刺激に鈍感になるのではないかと予想した。そして、この影響はユーザーの風向知覚が鈍くなることにつながり、触覚に対する風の提示の手法が通常時と VR 体験時で違いが出てくる。また、実際に HMD を装着することによっても、顔の大部分が覆われてしまい、風の認知が困難になるため、同様の結果になると考えた。本研究では HMD を装着し、風向が認識できる映像と音像が把握できる風の音をユーザーが視聴した状態で、風による触覚刺激を与えることで実際に風向知覚にど



図 1 実際の実験風景

Fig. 1 Experimental situation.

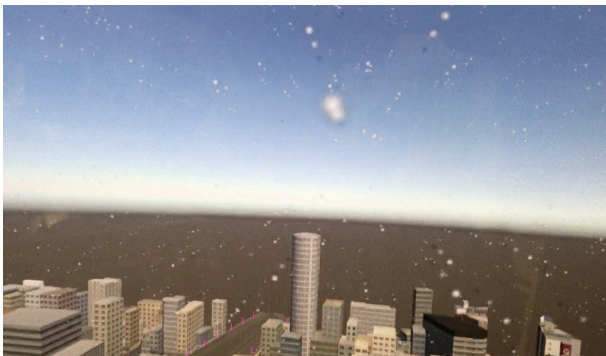


図 2 HMD で被験者に提示する映像

Fig. 2 Images to be shown to subjects using HMD.

のような影響を与えるか調査する。ユーザーの風向知覚のずれが許容される範囲を知るために環境風を再現するファンを用いて、ユーザーの前面、側面、背面の 3 方向から頭部に風を当て、どこまで風向の角度のずれを認識できるかという手法で風向知覚特性を測定する実験を行う。

4. 実験手法

被験者は図 1 のように HMD とイヤフォンを装着する。

HMD 内では図 2 のように空間内に大量のパーティクルが一方向へ流れている映像を提示し、風向を認識できるようにした。また、イヤフォンでは風源の方向に風の音源を配置することでステレオ音像が把握できるようになっている。そして被験者にはマイクを通して、見えている映像と実際に当たる風に、角度のギャップを感じたら挙手するようにと指示をする。ここで余計な先入観を与えないために、被験者に与える情報は最小限にとどめている。正確なデータを取るため各被験者には初めに 2 回程度の実験練習を行ってから本実験に移るようにする。

本実験では、被験者に対し 0 度の角度に初期位置として風源を配置し、ファンとの距離を一定に保ったまま徐々に角度を左右にずらしていく。そして、被験者が挙手した時点の角度を計測していく。本研究では頭部に対して正面、側面、背面の 3 方向からの測定を行う。側面に関しては、

表 1 本システムと先行研究での環境風の風速分布の比較

Table 1 Comparison of wind speed distribution of environment wind in our system and previous research.

風速分布の間隔	10cm	5cm	0cm	5cm	10cm
ファンのみ	2.1	2.6	2.8	2.5	1.9
本システム (m/s)	1.8	1.9	1.9	1.9	1.8
先行研究 (m/s)	1.8	1.8	1.9	1.9	1.8

左右対称なため左片方だけの測定とする。3 方向の各方向につき、被験者から見て右側にずれるプラス方向、左側にずれるマイナス方向の 2 つの角度を測る。側面以外は頭部の形状が左右対称なため、左右の角度を平均したものを結果データとする。この測定を各方向で左右 10 回ずつ行う。途中、1 つの方向が終わるたびに、集中力低下を防ぐため 5 分程度のインターバルを設ける。右と左をランダムに提示すると、左右の提示数に偏りが出た場合、次来的方向を予測してしまい、信頼性のあるデータが取れないという研究報告 [10] があった。それ考慮し、右側を行なった後に左側を行うというように分離して行うことで被験者の予測によるデータのばらつきを回避させた。実験終了後には、風向を判断する要因となったものは何かというアンケートをそれぞれ回答してもらう。次に、どのように風をあてて角度を測定するかを述べる。

5. 送風システムの概要

VR におけるヴァーチャル環境での風は主に環境風が汎用性があり状況制限が少ないため、ファンの風を環境風に近づけるようにした。均一な環境風を再現する先行研究 [11] より風速分布を参考にし、均一になるよう風速を設定した。その際、複数のファンを使う場合ファンの個体差が出るため、精密に配置、出力調整しなければならなくなる。そのため、本研究では単発ファンを用いた。風速の均一化を図るため、コアンダ効果を利用し、図 1 のようにファンの正面に球体を設置することでより広い範囲に均一な風を送ることに成功した。表 1 は、本システムと先行研究での環境風の風速分布を比較したものである。

ファンの中心を 0cm として、ファンから 1m 離れた地点において、水平方向に中心から 5cm 間隔で風速を測定したものである。ファンとボールの距離によって、風速分布が変わるため、先行研究 [11] の風速分布と比較し、同じ環境風を再現できる位置で図 3 のようにファンとボールを設置した。

ファンを用いた実験の手法は図 4 の通りである。可動式ラックにファンを積み、被験者は指定した立ち位置に設置した足場に立つ。ラック中央から被験者の足場に一直線になるように紐を貼り、一定の距離を保ちながら同一弧状を通るようにし、被験者を中心に徐々に風を当てる角度を変えていく。可動式ラックにファンを積んだ実験装置は図 5

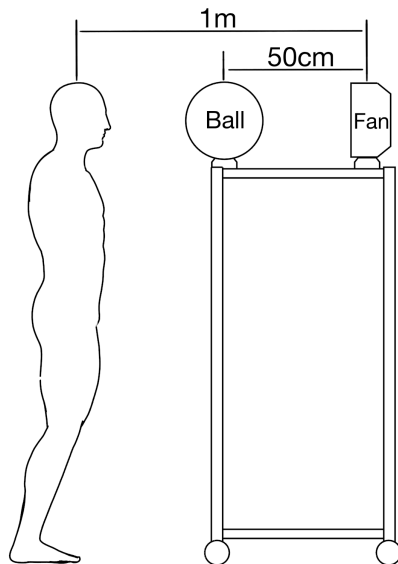


図 3 実験装置の配置の詳細

Fig. 3 Detailed arrangement of experimental equipment.

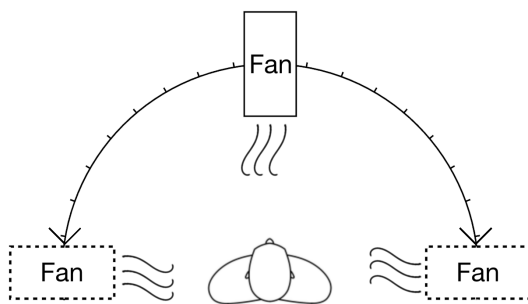


図 4 実験手法の概要図

Fig. 4 Outline of experiment method.

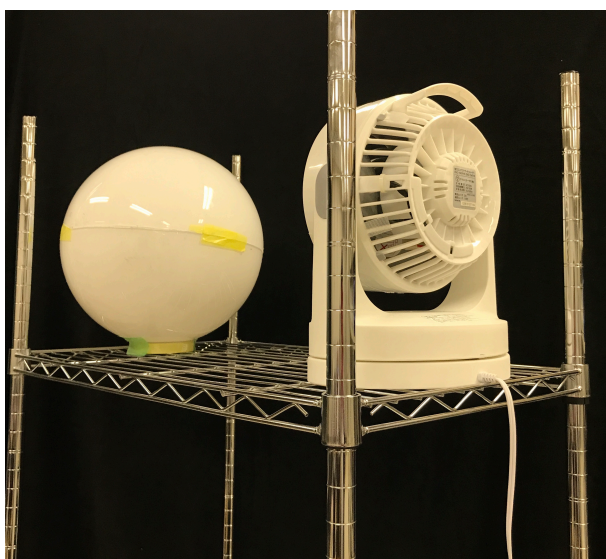


図 5 風を送風する実験装置

Fig. 5 Experimental equipment for blowing wind.

である。

表 2 風向の許容認知角度

Table 2 Acceptable recognition angle of wind direction.

被験者	前面	側面 (前側)	側面 (後側)	背面
1	± 58°	62°	59°	± 73°
2	± 51°	68°	48°	± 51°
3	± 59°	71°	64°	± 73°
4	± 51°	74°	71°	± 81°
5	± 54°	44°	56°	± 78°
6	± 51°	55°	59°	± 52°
7	± 43°	75°	63°	± 49°
8	± 33°	43°	58°	± 64°
9	± 62°	77°	51°	± 47°
10	± 46°	56°	64°	± 61°
11	± 28°	45°	48°	± 35°
平均値	± 51°	62°	59°	± 63°

紐を一直線に貼ることで、ラックが移動しても風の中心が常に被験者に向くようにすることができる。角度の測り方は、床にあらかじめ弧状に角度をマークしておき、それを基準に測定する。またラックは高さが自由に変えることができるため、被験者の身長によってその都度変えて頭部中心に影の中心が来るよう設定している。

6. 実験結果

実験した 11 名の風向知覚の角度を平均したものの結果を各方向ごとに表 2 に記す。

実験した計 11 名の結果を平均した値で図にまとめると図 6、図 7、図 8 のようになる。それぞれの図で塗りつぶされている範囲がその方向からの風向だと認知した範囲になっている。

7. 考察

表 2 の結果から、求められた平均値とそれぞれの被験者の結果を比べると、やや個人差があることがわかる。この原因は、それぞれの髪型の影響だと考えられる。今回の被験者には髪を刈り上げている人やロングヘアの人など様々な人がいた。実験後のアンケートを見ると、髪を刈り上げていた被験者 7 と被験者 9 が背面からの風が最も風向を判断しやすかったと解答していた。表 2 の被験者 7 と被験者 9 の結果を見ると、他の被験者と比べて背面の認知角度が小さくなっている。このことから、髪型が風向の認知に影響を与えている可能性があることがわかる。

また、測定された各々の認知角度には統計上で意味のある差、つまり有意差があるのかを知るために統計検定を用いて調査した。表 3 には統計検定を用いて求められた有意確率を表記している。統計検定の結果、5 % 水準で頭部前面は側面と背面の認知角度との有意差があることがわかった。そのため、頭部前面の認知角度は側面と背面に比べて感覚が敏感であるということがわかる。また、側面と背面

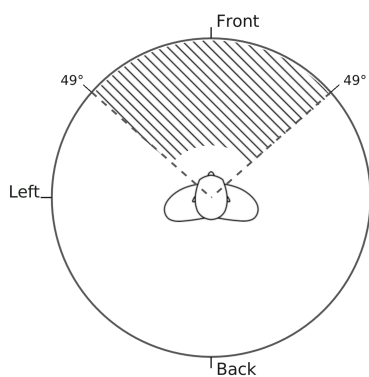


図 6 頭部前面における風向の許容認知角度

Fig. 6 Acceptable perceived angle of wind direction at the front of the head.

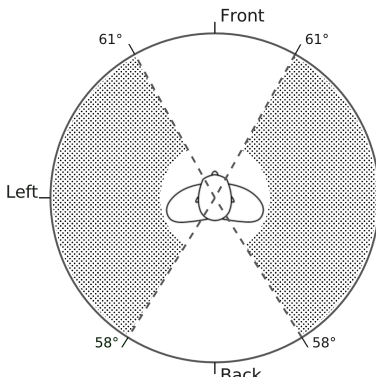


図 7 頭部側面における風向の許容認知角度

Fig. 7 Allowable cognitive angle of wind direction on the side of the head.

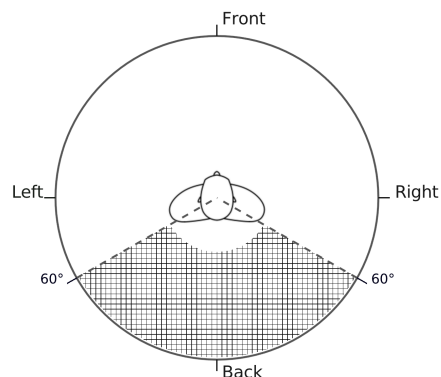


図 8 頭部背面における風向の許容認知角度

Fig. 8 Acceptable perceived angle of wind direction at the back of the head.

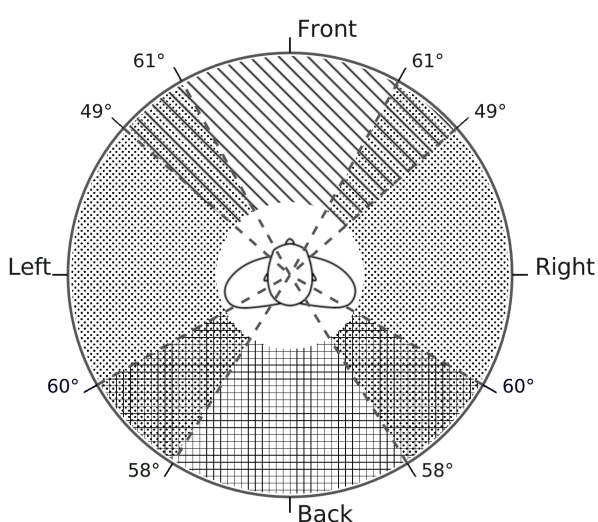


図 9 頭部の風向知覚特性

Fig. 9 Perception characteristic of wind direction of head.

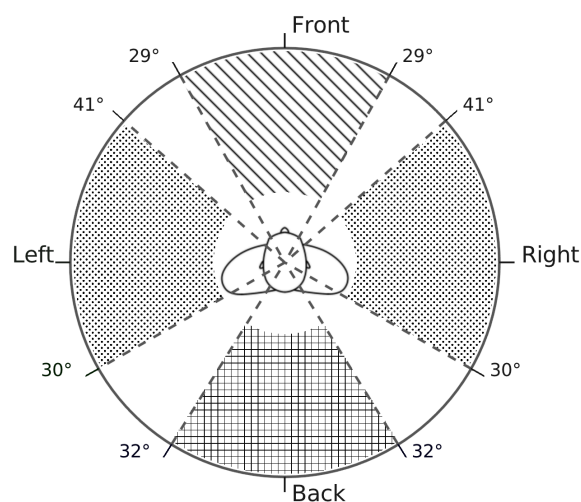


図 10 デッドスペースを除いた頭部の風向知覚特性

Fig. 10 Perception characteristics of the wind direction of the head excluding dead space.

の認知角度は統計検定の結果、有意差がないということがわかった。このことから、我々のHMDを用いた多感覚刺激を与えた状態で実験を行うと、中野らの研究 [5], [6], [7] で得られた、環境風における正面と背面の風向知覚には差がないという結果と違った結果になることがわかる。さらに全方向において、風向知覚が大幅に鈍くなっていることも判明した。この理由として考えられるのは、多感覚刺激を与えたことで、VR空間への没入感が増し、現実空間の風と仮想空間の風の違いが曖昧になってしまったためだと考えられる。また、HMDを顔の前面に装着した際に物理的な要因で正面の認知角度が最も鈍くなるのではないかと予想していたが、正面の知覚が最も敏感だった。この理由は、HMDにより顔の前面の当たる部分が限定されるため、判断箇所が狭いほど注意が向いたため敏感になったと思われる。実験後に行なったアンケートの結果にも、風が当たる部分が少ないと、その当たる部分に集中力が増し判断し

表 3 統計検定を用いて求めた有意確率

Table 3 Significance probability obtained using statistical test.

	前面	側面 (前側)	側面 (後側)	背面
前面	—	0.026	0.024	0.046
側面 (前側)	0.026	—	0.542	0.934
側面 (後側)	0.024	0.542	—	0.650
背面	0.046	0.934	0.650	—

やすかったとコメントをしている人もいた。

また、実験の結果で得られた、各方向の風向知覚特性のグラフを重ねると図 9 のようになる。重なっている範囲は、2つの風向感覚にも感じ取れてしまうということになり、重なっている範囲に直接風を当てると感覚が曖昧なデッドスペースになってしまう。つまり、各々の方向から風を当てる場合に、確実にその方向からの風だと認識させるための、最も適した風の提示の許容範囲は重なった部分を取り除いた範囲になる。デッドスペースを取り除いたグ

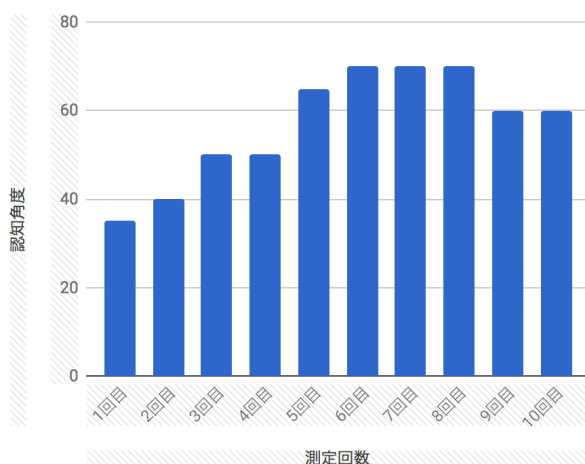


図 11 測定回数の経過と認知角度の関係

Fig. 11 Relationship between elapsed number of measurements and cognitive angle.

ラフを図 10 に示す。

図 10 の範囲内に各々の方向からの風を提示することで、感覚が曖昧なデッドスペースを除いた許容範囲内に収まるため、確実に風向を認識させる場合に最も適している。しかし、今回の実験方法のように、測定する方向から風を少しずつずらす測定方法を用いると、図 9 の重なっている範囲は、それぞれの風向認知の許容範囲になる。そのため、VR コンテンツなどで風源が動く風をユーザーに提示する場合は図 9 の範囲内が最も適した提示範囲となる。

被験者 1 の頭部前面の実験を行った時の測定回数の経過と認知角度の関係のグラフを図 11 にまとめる。図 11 を見ると実験の測定回数を重ねるたびに認知角度が増加している。認知角度が増加しているということは、感覚が鈍くなっていることを示している。この原因は、実験の測定回数を重ねることで時間経過と共に、被験者の集中力が低下したためだと考えられる。時間経過による認知角度の増加傾向は、被験者 1 の頭部前面だけではなく、その他の方向や他の被験者にも同じような傾向が見られた。このことから、人の風向知覚は時間経過と共に鈍くなるといえる。

8. まとめ

本研究では、HMD を装着し、風向が認識できる映像と音像が把握できる風の音をユーザーが視聴した状態で、風による触覚刺激を与えることで実際に風向知覚にどのような影響があるのか実験した。実験としてユーザーの風向知覚のずれが許容される範囲を知るために環境風を再現するファンを用いて、ユーザーの前面、側面、背面の 3 方向から頭部に風を当て、どこまで風向の角度のずれを認識できるかという手法で風向知覚特性を測定する実験を行った。その結果は、正面の風向知覚が最も敏感であり、側面と背面の風向知覚には違いは見られなかった。この理由は、HMD により顔の前面の当たる部分が限定されるため、判

断箇所が狭いほど注意が向いたため敏感になったと考えられる。また、各方向の認知角度の重なっている範囲は、2 つの風向感覚にも感じ取れてしまうということになり、重なっている範囲に直接風を当てると感覚が曖昧なデッドスペースになってしまう。デッドスペースを取り除いた範囲内に各々の方向からの風を提示することで、感覚が敏感な範囲内に収まるため、確実に風向を認識させる場合に最も適していることがわかった。しかし、今回の実験方法のように、風源が動く風をユーザーに提示する場合は、重なっている範囲も風向認知の許容範囲内となる。さらに、実験の測定回数を重ねるたびに被験者の認知角度が増加している傾向があることがわかった。この原因として考えられることは、実験の測定回数を重ねることで時間経過と共に、被験者の集中力の低下である。このことから、人の風向知覚は時間経過と共に鈍くなるといえる。

今回の実験で、多感覚刺激を用いた際の風向知覚特性は通常状態の人の風向知覚特性と違った結果になることが判明した。通常状態の時は、正面と背面の風向知覚には差がなく、側面の風向知覚が最も鈍いという結果だったが、多感覚刺激を与えると側面と背面の風向知覚に差がなくなり、正面の風向知覚が最も敏感になった。つまり、多感覚刺激を与えることで、正面と側面の風向知覚が鋭敏になることがわかった。

参考文献

- [1] Michael Rietzler, Katrin Plaumann, Taras Kraenzle, Marcel Erath, Alexander Stahl, Enrico Rukzio : *VaiR: Simulating 3D Airflows in Virtual Reality*, CHI 2017, May 611, 2017, Denver, CO, USA.
- [2] 永井 一樹, 田上 想馬, 赤羽 克仁, 佐藤 誠 : 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, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2015 論文集 p.365-371.
- [3] Ali Israr, Zachary Schwemler, John Mars, Brian Krainer : *VR360HD: A VR360° player with enhanced haptic feedback*, The ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST) 2016
- [4] Nimesha Ranasinghe, Pravar Jain, Shienny Karwita, David Tolley, Ellen Yi-Luen Do : *Ambiotherm: Enhancing Sense of Presence in Virtual Reality by Simulating Real-World Environmental Conditions*, CHI 2017, May 611, 2017, Denver, CO, USA.
- [5] 中野 拓哉, 佐治 翔太, 吉岡 有哉, 河地 祐樹, 柳田 康幸 : 単発のファンを用いた人の頭部前面における風向知覚特性の測定, 日本バーチャリアリティ学会論文誌 Vol.18(2013)No.1 p.37-44.
- [6] 中野 拓哉, 柳田 康幸 : 人の頭部側面における風向知覚特性の測定, 電子情報通信学会技術研究報告: 信学技報 115(245), 123-126, 2015-10-08.
- [7] 中野 拓哉, 柳田 康幸 : 人の頭部背面における風向知覚特性の測定, 電子情報通信学会技術研究報告: 信学技報 116(245), 93-96, 2016-10-13.
- [8] Cardin Sylvain, halmann Daniel, Vexo Frederic : *Head Mounted Wind*, proceeding of the 20th annual conference on Computer Animation and Social Agents (CASA2007) p.101-108.

- [9] FEELREAL, Inc. : *FEELREAL VR Mask & NIRVANA VR Helmet*, 入手先 [〈http://feelreal.com〉](http://feelreal.com) (2017).
- [10] 中野 拓哉, 佐治 翔太, 柳田 康幸 : 頭部前面における風覚の水平角分解能の測定—心理物理学測定法を用いた丁度可知差異の計測—, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告 Vol.16(2011)CS-3 p.51-52.
- [11] 中野 拓哉, 吉岡 有哉, 佐藤 佑二, 柳田 康幸 : 頭部に対する均一な風提示を目的とした風源の構成と風速分布の測定, 電子情報通信学会技術研究報告 Vol.112(2012), 112, p.123-124.
- [12] ADORES, Inc : *VR PARK TOKYO*, 入手先 [〈http://www.adores.jp/vrpark/〉](http://www.adores.jp/vrpark/)(2017).
- [13] GORE-TEX : *CROSSOVER-SKY WALK*, 入手先 [〈http://gore-tex-x-over.jp〉](http://gore-tex-x-over.jp)(2015).
- [14] 株式会社コーエーテクモウェア : *VR SENSE*, 入手先 [〈https://www.gamecity.ne.jp/vrsense/〉](https://www.gamecity.ne.jp/vrsense/)(2017).