

# 頭部-上半身部位に対する風覚実験についての評価

小坂 崇之<sup>†</sup> 宮下 芳明<sup>††</sup> 服部 進実<sup>†††</sup>

本稿では、仮想現実感の拡張を目指す手法の1つとして没入型三次元風覚ディスプレイを開発し、頭部-上半身部位に対する風覚について評価実験を行った。ドーム状の骨組みに配置した25個のプロアファンのうち、どこから風が出力されているかを問う正答率と、風が来たことを知覚する反応時間について、3種の風速を用いて計測した。その結果、左右に比べて前後の正答率が低く、仰角が45度以上のところでは反応時間が遅いなど、空間方向的に不均一な風覚が行われていることが明らかになった。

## Experiment and its Evaluation for Wind Sensation of Upper Half of the Body

TAKAYUKI KOSAKA,<sup>†</sup> HOMEI MIYASHITA<sup>††</sup> and SHIMMI HATTORI<sup>†††</sup>

In this paper, we developed an immersive 3D wind display as a method for extending virtual reality. We conducted an experiment to examine wind sensation of human using this system. In the experiment, examinees answer which blower fan has sent a wind from 25 fans allocated in the spherical dome frame; also we checked their reaction interval. Their percentage of questions in back and forth are lower than that in ether side, and there exists latency when the wind came from over 45 degree at angle of elevation, that is, wind sensation of human is spatially-heterogeneous.

### 1. 従来研究

今日、バーチャルリアリティ (VR) 技術が発達し、コンピュータによる仮想環境がより高い現実感を持ったものへと進歩している。特に近年は、視聴覚だけでなく触覚から味覚まで様々な感覚呈示環境について研究開発がさかんである<sup>1)-3)</sup>。本稿でもこのような仮想現実感の拡張を目指す手法の1つとして、没入型三次元風覚ディスプレイを開発し、頭部-上半身部位への風覚を解明すべく評価実験を行った。

風覚とは文字どおり風を感じる感覚のことであるが、生理学においてこの感覚が定義されているわけではない。ただしVR研究においては、しばしばこの用語が用いられており、小木らは「触圧覚、温覚、冷覚等が複合された広い意味での触覚の一種」としている<sup>4)</sup>。このうえで小木らは、多方向から手に風を当てる二次

元風覚ディスプレイを開発し、科学技術データを感覚によって呈示するデータ・センシュアライゼーションの効果について評価実験を行っている。結果として、大きさと方向という2つのパラメータでベクトル量を表現できる有利さや、風覚を視聴覚と統合したシステムで用いると知覚精度が高まることが発見されている。一方で橋本らは指先への風覚呈示を行う風覚ディスプレイを開発しており、人差し指の絶対閾値、弁別域、方向弁別域といった知覚特性を調べる実験を行っている<sup>5)</sup>。

鈴木らは風圧を用いた力覚呈示システム (風インタフェースシステム) を開発している。ここではノズルから空気を噴出し、ユーザが持つ風受容器にその風を当てることで力を伝達している<sup>6)</sup>。また、井上らは、センサで検出した手の距離に基づいた送風を行うことによって仮想物体と接触したときの感覚呈示を試みている<sup>7)</sup>。嗅覚呈示デバイスとして開発されている機器においても、ポンプ<sup>8)</sup> や空気砲<sup>9)</sup> を用いて風によって匂い伝達を行っているものが多く、風の制御とVRに関連する先行研究ととらえることができる。

このように、風覚ディスプレイおよびそれに類するデバイスの研究はいくつか行われているが、それらの

<sup>†</sup> 金沢工業高等専門学校  
Kanazawa Technology College

<sup>††</sup> 明治大学  
Meiji University

<sup>†††</sup> 金沢工業大学  
Kanazawa Institute of Technology

機器は手や指などに限られ、方位についても二次元から二次元の情報呈示にとどまっているのが現状である。しかし、VR やゲームにおいて人が歩く・走るといった動作を行ったときに発生する向かい風、海辺などの地理条件に応じた環境風、嵐のような天気の実験といったコンテンツを想定するのであれば当然、指や手に当たる風だけではなく全身への風の再現が必要になると考えられる。また、ロケットの上昇や崖からの落下など、上下方向からの風によってその現実感が高まる状況も存在する。こうした理由に加え、VR における視聴覚デバイスにおいては三次元の呈示がもはやあたりまえとなっている現状から、それらとの親和性が高いデバイスとして、風覚についても同様に全身に風を感じることができる三次元呈示システムが求められていると考えられる。

VR における視覚機器には、ヘッドマウントディスプレイのようにその機器を身につける装着型のものと、CAVE<sup>10)</sup> のような没入型のものがある。全身への風覚呈示についても、ファンをユーザが装着するようなタイプと、全天周型ドームに設置されたファンからユーザに向かって風を送るタイプ両方のシステムデザインが考えられる。本稿では装着や着脱の煩雑さや拘束感を考慮し、後者の没入型を選択している。鈴木らも、装着型インタフェースでは利用者が自由に身動きすることが困難であることから無拘束性 (Untethered) を重要視すべきであると論じている<sup>6)</sup>。全方向から風覚を呈示する没入型のシステムは、その発想こそ珍しいもの、実装を行ったうえで風覚呈示について実験調査を行った例はいまだに存在しないのが現状である。

## 2. 没入型三次元風覚ディスプレイ

### 2.1 システム概要

著者らはこれまで、プロアファンを円状型に配置した没入型の風覚ディスプレイを開発し、発表やデモを行ってきた<sup>11)~13)</sup>。第14回国際学生対抗バーチャルリアリティコンテンツにおいてはテレビゲームの臨場感を高めるデバイスとして設計し、浜辺や吹雪といった環境風や走るときの向かい風を再現するデモを行ってきた<sup>14)</sup>(図1)。

本稿ではこのシステムを球状なシステムへと発展させ(図2)、没入型三次元風覚ディスプレイを構築している。

没入型三次元風覚ディスプレイにおけるプロアファンの配置を図3に示す。半径が0.8mのアルミ製骨組みのドームにおいて、頭頂部から見下ろした際、45度



図1 没入型二次元風覚ディスプレイのデモ風景  
Fig. 1 Demonstration of immersive 2D Wind Display.



図2 没入型三次元風覚ディスプレイの外観  
Fig. 2 Immersive 3D Wind Display appearance.

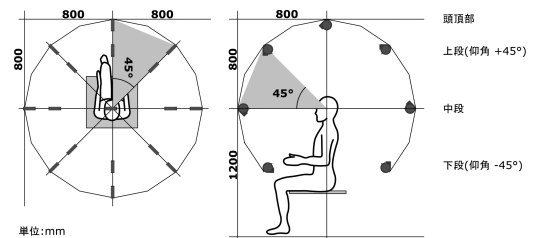


図3 プロアファンの配置  
Fig. 3 Distribution of blower fans.

ずつ8方向の位置で、中段(耳の高さ)、上段(仰角45度)、下段(仰角-45度)に設置した。これらに頭頂部のプロアファンを加えることで、計25方向からの風覚呈示を可能にしている。

システムで使用するプロアファン(日本サーボ製DC遠心プロアFB BLOWER IIFBDC24H4CS)は、24Vで最大風量0.75 m<sup>3</sup>/minの風を出力する。これをモータドライバ(東芝製DCモータ用フルブリッジドライバTA7291P)に接続し、100段階のパルス幅

表 1 異なる PWM 信号における遅延  
Table 1 Latency at different PWM signals.

PWM値	100	70	40
風速(m/s)	1.3	1.05	0.73
①回転開始までの時間(s)	0.13	0.14	0.39
②回転開始から中心到着までの時間(s)	0.73	0.79	1.38
③通電から中心到着までの時間(s)	0.86	0.93	1.77
中心到着時の初速(m/s)	1.10	0.95	0.58
安定速度(m/s)	1.3	1.05	0.73

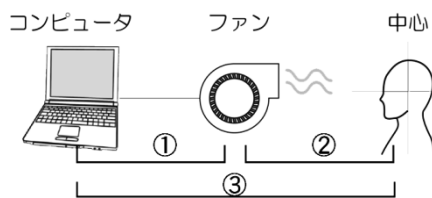


図 4 レイテンシの詳細

Fig. 4 Details of the latency.

変調 (PWM) で風速を制御している。これら 25 セットのユニットを Km2Net 社 USB-IO を 4 台用いてコントロールしている。なお、ドームのサイズは、このプロアファンで風速 1.3 m/s を出力できる最長の範囲が 80 cm であったことに由来している。これにより、ある程度のバリエーションを持つ風速を呈示できるようにした。

## 2.2 精度評価

### 2.2.1 風速制御の精度

PWM 信号とドーム中心における風速の関係を求めるべく熱式風速計を用いて測定したところ、おおよそ平均  $V$  (m/s) =  $0.0167 \times \text{PWM 値} + 0.467$  の線形近似が可能であった。ただし、PWM 信号が 9 以下のところでは、摩擦によりプロアファンが回転を開始しなかった。橋本らによる風覚ディスプレイ<sup>5)</sup>においても、本システムと同様に 100 段階の PWM 制御に用いて小型 DC ファンを回転させているが、風速 0.2 m/s 以下の信号で回転が開始されないために実質的な分解能が 80 段階となっている。本システムでは実質 91 段階の分解能となっている。

### 2.2.2 初速とレイテンシ

表 1 は、PWM 信号 100, 70, 40 の設定 (それぞれ安定風速 1.30, 1.05, 0.73 m/s) において、通電から回転開始までの遅延時間 (図 4-①)、およびその回転開始からドーム中心に風が到達するまでの時間 (図 4-②) を計測し 10 回平均を求めたものである。このように、通電を行ってから風がユーザに到達するまでには 1 秒

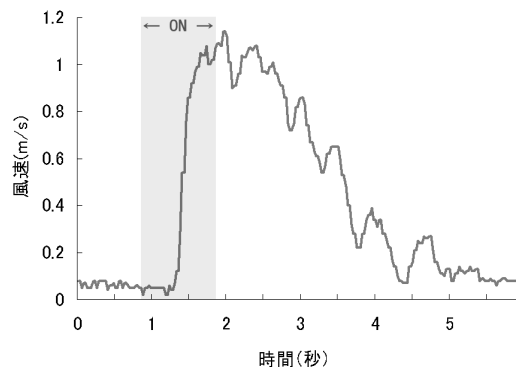


図 5 リリース部分の検証

Fig. 5 Release waveform of the output wind.

前後の遅延があり、当然ながら風速によっても異なるということが出来る (図 4-③)。また、ここから計算される初期風速は、プロアファンが安定状態となったときの風速より若干遅いということが分かる。

### 2.2.3 リリース

図 5 は、PWM 信号を 100 で 1 秒間プロアファンを回転させたのち停止させたときの風速計の変化である。このように、PWM 信号を 0 にしてもプロアファンは惰性で止まらず、リリースが大幅に伸びていることが見てとれる。ただし、計測に使用した熱式風速計はセンサの放熱に若干時間を必要とする。なお、この風速計の有効範囲の下限は 0.1 m/s であり、センサを完全密閉した状態でも 0.05 ~ 0.07 m/s の出力が行われてしまう。よって、この図において計測されている 0.1 m/s 未満の風については意味をなしていないことに注意されたい。

ブレーキ機能を搭載したプロアファンに換装すれば、このリリースの伸びを抑えられる可能性がある。リリース部分の精度も必要なコンテンツ再生を念頭におくのであれば、こうした制御も考慮すべきであると考えられる。

## 3. ユーザ評価

### 3.1 実験目的

1 章で述べたように、これまで風覚については手や指に対して調査が行われているものの、頭部-上半身部位についての風覚に関しては、いまだその調査がなされていない。人間の風覚にはどれだけの空間解像度があるのか、認識の分布は均一なのか、風速によって認識度に影響はあるのか、服装・髪型・性差など個人によつての差異はあるのか、これらの疑問についての答えは依然として出ていない。そこで、ここでは実装した没入型三次元風覚ディスプレイを用い、ユーザの

風覚について評価を行い、風覚呈示デバイス設計の基礎となる知見を導く。

認知科学における感覚特性評価については、橋本らのように刺激に対する絶対域や弁別域を測定する方法<sup>5)</sup>もある。しかし、頭部-上半身部位への三次元的な風の呈示実験は先行研究がなく、たとえば「上から吹き下ろしてくる特異な風に対して正しく反応できるものなのか」「風が吹き付けていることになかなか気づかないような事例はないのか」といったことすら解明されていない。そこで本稿ではまず、各方向に対する風覚をどれだけ正しく答えることができるかという正答率を測定することにした。また後者のようなケースを確認するため、反応にかかる時間も計測することにした。この反応時間については、被験者が刺激を知覚してから、それを判断し、運動に至るまでの時間が含まれてしまうため、個人差が大きくなることも予想される。しかしそれでも、没入型三次元風覚ディスプレイを用いたVRアプリケーションやゲームなどのコンテンツ開発を念頭におくのであれば確認しておくべき評価項目であると考えた次第である。

### 3.2 実験方法

実験に際し、まず被験者はゲーム用コントローラを持ち、ドーム中心に頭部がくるように座る。ドーム中央に設置された椅子は上下可動式で、実験に際しては中段の左右のプロアファンが耳の高さにくるように調整した。また頭部の位置（特に前後位置）がずれたと思われるときは適宜被験者の姿勢を修正した。実験プログラムは、被験者に目を閉じることを促す合図音を発した後、ランダムな間隔をあけて風を呈示する。被験者は風を感じた瞬間にコントローラのボタンを押すようインストラクションされている。2.2.2項で計測したレイテンシをもとに、風がユーザに最初に到達する時間を推定し、その時間からユーザがボタンを押すまでの時間を「反応時間」として算出する。

次に被験者は目を開けて、感じた風がどのプロアファンからきたものであるかと思うかを番号で答える。プロアファンにはあらかじめ識別するための番号を振っている。回答が実際に用いたプロアファンと一致していたかどうかを「正答率」として算出する。呈示する風はPWM信号（風速 m/s）にして100（1.3）、70（1.05）、40（0.73）の3種の風速を用い、それらの風速を25個のプロアファンについてランダムにシャッフルした順序で行ってもらった。このように計75回の反応を取得するタスクを1セットとし、これを3セット行った。被験時間はおよそ1時間程度かかる。被験者は20代から30代前半にわたる14名であり、長袖・

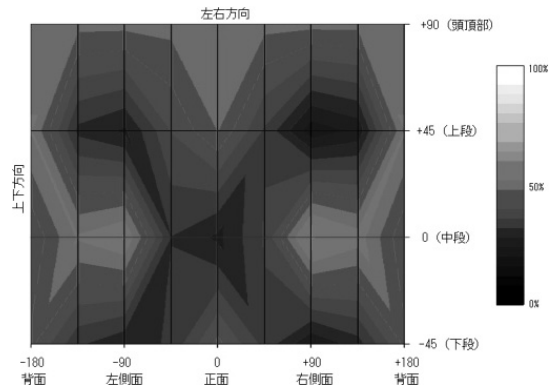


図6 各方位における平均正答率の分布（展開図）

Fig. 6 Average percentage of questions answered correctly at each direction (development).

脱帽で被験を行った。うち、女性は2名であり、両名とも肩に掛かる程度の髪型であった。坊主のヘアスタイル（男性2名）の被験者に参加してもらっている。また眼鏡の着用者は4名（男性）であった。

予備実験の段階ではどの方向についても8割近い正答率が得られていたが、正答のプロアファンが惰性で動いて完全に止まっていないことがあり、それを視覚によって発見するケースや、回転音が聞こえてしまうケースが懸念されたので、以下のような工夫を行った。まず、NRR値33という高性能な遮音性能を持つ耳栓を被験者に着用させた（実験プログラムが発する合図の音はその分大音量に設定した）。また、被験者が風を知覚しボタンを押したと同時に、全25個のプロアファンを0.5秒だけ回転させるようにした。これにより、被験者が目を開けた直後にどこを見回しても全プロアファンが惰性で動いている状態となり、視覚情報に基づいて判断できなくなった。ただし、すべてのプロアファンを回転させることによって生じた風も被験者に知覚されるケースがあった。このため、ボタンを押したときに知覚していた風の方向を記憶からたどって答えるようインストラクションを行った。

### 3.3 実験結果

#### 3.3.1 方位における正答率

上述のような視聴覚情報を取り去る工夫の影響で正答率は大きく低下し、平均で39%となった。また、方向性による正答率の違いも顕著なものとなった。図6は球面状にある各プロアファンの位置をメルカトル図法の要領で展開し、その平均正答率を濃淡表示したものであり、明度が高い箇所ほど正答率が高いことを示している。縦軸は仰角を表しており、下から仰角-45度（下段）、0度（中段）、+45度（上段）、そして頭頂部となっている（緯度に相当）。横軸は正面を

表 2 各ファンにおける正誤答率 (%) PWM 信号 100

Table 2 Average percentage of questions answered correctly at each fans (PWM signal = 100).

		被験者が回答したファン																										
		下段								中段								上段								頭頂部		
		0	45	90	135	180	225	270	315	0	45	90	135	180	225	270	315	0	45	90	135	180	225	270	315			
提示したファン	下段	0	56	5					2	17									10	45	90	135	180	225	270	315	3	7
		45	19	47	2						5	14							2	7					2			2
		90		1	13	2						5	41	5						10	24							
		135			17	24							5	45							10							
		180				12	41							10	33								2	2				
		225						38	2						2	43	2						2	2				
		270						2	43	1						3	38	1						2		10		
		315							2	22	1						3	45								7	17	2
		中段	0	5							10	31						7	17	14								10
45	5		14	2						3	37	3							5	26							5	
90	2										6	65	3						5	19								
135				2	5							19	61							7	7							
180					5	19	1						5	47	1						7	7			2	21		
225						2	21							2	44	3							5	22				
上段	0									3									58	3			3	3		3	27	
	45									1	6	2							19	37	5			5			26	
	90			2							2	13	1							50	12	6	2				11	
	135			2							5	7	7							15	27	22	11				4	
	180				3								1	13								2	52	8			21	
頭頂部	225	2													5				2				14	33	12	17	14	
	270					2	2								5	41	5						2	7	26	10		
	315																5	15					5	6	54	15		
	22																		22				6		6	20	46	

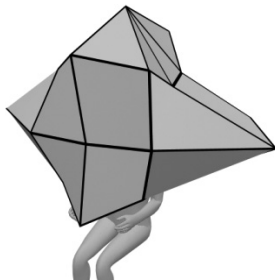


図 7 各方位における平均正答率の分布 (3D 表示)

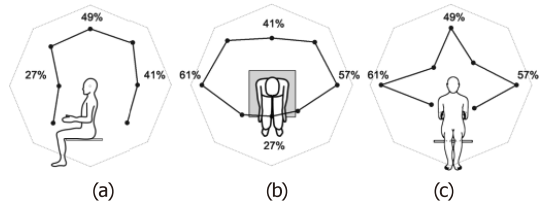
Fig. 7 Average percentage of questions answered correctly at each direction (3D).

0 度とした水平方向の角度表記で、+90 度が右側面、-90 度が左側面、±180 度が背面となっている (経度に相当)。これを 3D 表示したものが図 7 である。3D 空間上で回転させて動画にしたものは以下の URL で参照されたい。

(<http://www.kanazawa-it.ac.jp/kosaka/wmv/001.wmv>)

このグラフを見ると、正答率に関しては左右対称だけでなく上下対称ともいえる分布になっている。上段と下段の傾向が類似しており、そこでは側面での正答率が低く、正面での正答率がやや高いことがうかがえる。しかし、中段ではまったく逆の様相を呈しており、側面での正答率が高く、正面での正答率が低くなっている。

図 8 (a), (b), (c) は、それぞれ側面・上面・正面から見た各方向の断面部での正答率である。正面・背



(外側輪郭は正答率 70%を示す)

図 8 断面部での平均正答率 (%)

Fig. 8 Average percentage of questions answered correctly at each cross-sectional diagram.

面の正答率が低く、なおかつ背面での 41%に対し正面では 27%とさらに低いため、上から見た図 8 (b) では重心が後退した楕円形状となった。このように前後面が側面よりも正答率が低い傾向は全被験者に見られた (3%水準で有意)。また正面のプロアファン動作時の誤答を調べると、隣接するプロアファンや頭頂部のプロアファンが回答されていた。正面からの風は顔や耳にも広く当たるため、こうした誤答を誘発しているのではないかと考えられる。図 8 (c) の断面で見ると、右上・右下・左上・左下斜め方向の正答率が正面部分と同様 20%台に落ち込んでいる。

表 2 は PWM 信号 100 において、各ファンにおける正誤答率を示したものである。横軸が提示したファン、縦軸が提示したファンに対して被験者が回答したファンの割合である。隣接する左右のファンへの誤答率より上下へのファンへの誤答率が高いという結果になった。このことから左右よりも上下に対して風覚が

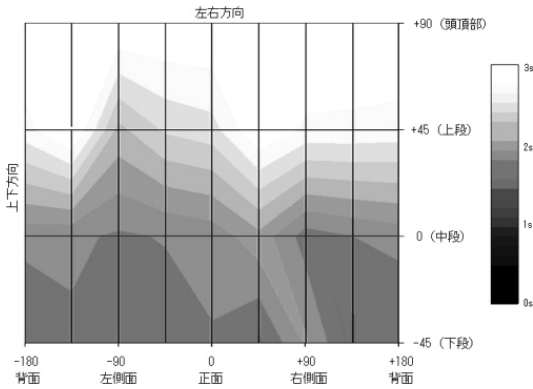


図 9 各方位における平均反応時間の分布 (展開図)

Fig. 9 Average time for answering at each direction (development).

低いといえるのではないかと考えられる。

集計後、データを被験者に見せたところ、「風がどこからくるか吹いてくるか分からないので全周囲に意識を向けるべきだが、なんとなく意識が後ろ側に向いていた」という内観が得られた。そもそも全周囲に均等に意識を向けるというインストラクション自体が難しいことだったのかもしれない。いずれにせよ、どの方向においても7割を超える正答率が得られることはなかった。これにより頭部-上半身部位は非常に風覚に対する空間分解能が低いということが出来る。小木らが行った実験<sup>4)</sup>では、固定した手の風覚において19.28度の誤差平均となっているが、本実験での誤差はこれを上回っている。ただしこの小木らの実験では、手を回転させることを許可すると誤差が大幅に減ることを確認している。本実験では風を呈示しているときの姿勢を固定してもらっていたが、これが自由に動けるような条件であれば、正答率も上昇すると予想される。

3.3.2 方位における反応時間

図9は図6と同様な表示方法で反応時間を表したものである。反応時間が長いほど明度が高い。明るい箇所ほど「風覚に対する応答が鈍い」ことになる。3D表示したものが図10である。3D空間上で回転させて動画にしたものは以下のURLで参照されたい。

(<http://wwwr.kanazawa-it.ac.jp/kosaka/wmv/002.wmv>)

まず、全体として上段・頭頂部のプロアファンについて平均反応時間が長いという傾向がみられる。風が来たということに気づくのに3秒近くもかかり、風覚に対する応答が鈍いといえる。その差は中段と比較すると1秒以上異なっている。髪型の影響を予想し個別のデータを検証したが、この傾向は坊主のヘアスタイルの2名を含むどの被験者にもみられており、5%水

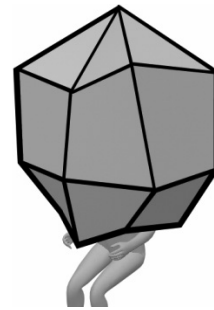


図 10 各方位における平均反応時間の分布 (3D 表示)  
Fig. 10 Average time for answering at each direction (3D).

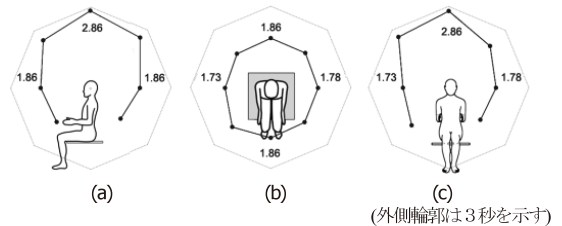


図 11 断面部での平均反応時間 (秒)  
Fig. 11 Average time for answering at each cross-sectional diagram.

表 3 風速による正答率・反応時間への影響

Table 3 Influence of wind speed to the percentage of questions answered correctly and the time for answering at each direction.

PWM 値	100	70	40
風速(m/s)	1.3	1.05	0.73
平均正答率(%)	41	40	35**
平均反応時間(秒)	2.0	1.8	2.5*

\*は1%水準で有意、\*\*は3%水準で有意

準で有意であった。

図11(a), (b), (c)は、それぞれ側面・上面・正面から見た各方向の断面部での反応時間を示している。変位が大きいほど風覚に対する応答が鈍いことを意味する点に注意されたい。この図からも、上段の反応時間が低いことが見てとれる。また図11(b)を見ると、正答率の場合のグラフとは異なり、それなりに均等なものとなっている。

3.3.3 風速変化による影響

これまで各方位について議論を行ってきたが、今度は実験に用いた3種の風速について比較を行った。

表3は、PWM信号(風速 m/s)100(1.3), 70(1.05), 40(0.73)の3種の風速について、正答率・反応時間を平均したものである。なお、風速が遅いほど、プロアファンが回転を始めるまでの時間、および

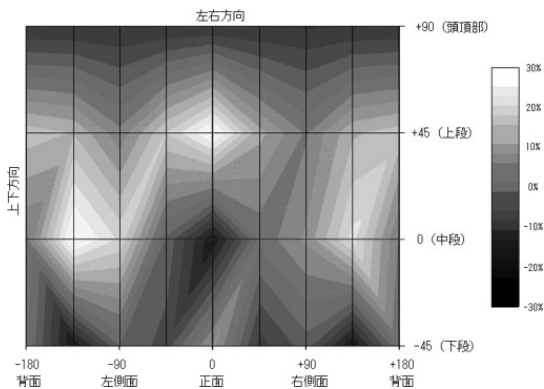


図 12 風速の正答率への影響（展開図）

Fig. 12 Influence of wind speed to the percentage of questions answered correctly at each direction (development).

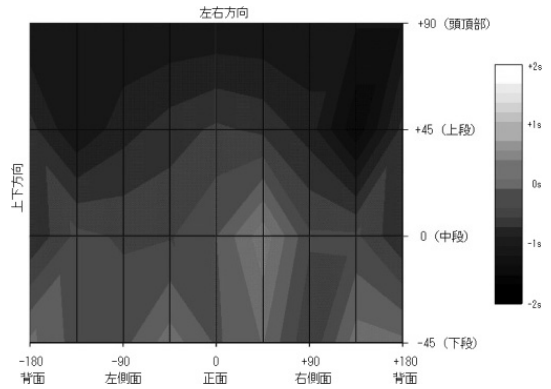


図 14 風速の反応時間への影響（展開図）

Fig. 14 Influence of wind speed to the time for answering at each direction (development).

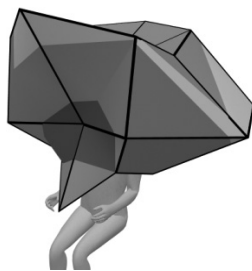


図 13 風速の正答率への影響（3D 表示）

Fig. 13 Influence of wind speed to the percentage of questions answered correctly at each direction (3D).

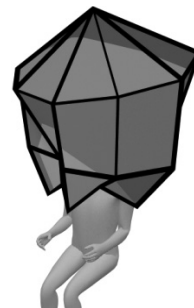


図 15 風速の反応時間への影響（3D 表示）

Fig. 15 Influence of wind speed to the time for answering at each direction (3D).

風がユーザに到達するまでの時間に遅延が発生することを 2.2.2 項で述べたが、本稿における「反応時間」は計測値からこの遅延時間を引いたものであるため、相互比較が可能となっている。

表 3 を見ると、正答率についても反応時間についても、PWM 信号 40 と 70, 100 の間に有意な差が出ており、風速が下がると正答率も反応時間も低下する傾向があるといえる。では、実際にどのような方位が風速の影響を受けるのだろうか。図 12 と図 13, 図 14 と図 15 は、それぞれ正答率, 反応時間において、PWM 信号 100 のときのものから PWM 信号 40 のときのものを用いた差を表示したものである。

図 12 において明るい領域は、風速が上がると評価が向上する方位、逆に暗いところは風速が上がると評価が減少する方位である。つまり上段中央および側面については風速が上がると正答率がより向上している。特に上段中央においては 27%も正答率が上がっている。逆に正面では、「風速が上がると正答率が下がる」という傾向があり、その正答率の減少量は 14%であった。この結果は「正面からの風が額や耳にも広く当た

ると誤答を誘発する」という前述の仮説を裏付けていると考えられる。3D 動画化したものは以下の URL で参照されたい。

(<http://www.kanazawa-it.ac.jp/kosaka/wmv/003.wmv>)

図 14 において、明るいところは風速の上昇によって反応時間が増大する部分、暗いところは反応時間が減少する部分である。上段・頭頂部の暗い領域は風速が下がるほど、反応するのに時間がかかることを意味する。その増加量は頭頂部で 1.2 秒、上段平均で 0.9 秒であった。3D 動画化したものは以下の URL で参照されたい。

(<http://www.kanazawa-it.ac.jp/kosaka/wmv/004.wmv>)

以上の分析について主要な事柄をまとめると、正答率については左右や頭頂部が比較的高く、正面・背面および斜め方向が低いなど分布が不均一であった。また反応時間については特に上段について時間がかかる傾向があった。このように全体として正答率が低く、空間的に不均一な特性となっていることから、少なく

ともこの風覚ディスプレイをデータ・センシュアライゼーションといった用途で用いるには向いていないということがいえる。また、被験者における男女差、眼鏡の有無、髪型による影響を確認することはできなかった。Weinsteinによれば、皮膚への圧刺激呈示の実験で、女子の閾値がほとんどすべての部位で男子より有意に低いことが確認されている<sup>15)</sup>ので、被験者数を増やせば差異が現れる箇所が出てくるのかもしれない。

#### 4. おわりに

本稿では、没入型三次元風覚ディスプレイを開発し、頭部-上半身部位に対する風覚について評価実験を行った。その結果、左右に比べて前後の正答率が低く、仰角が45度以上では反応時間が遅いなど、空間方位的に不均一な風の知覚が行われていることが見受けられた。この現象を検証し、原因を解明するためにはさらなる追加実験を行う必要があると考えている。そこで今後は、橋本らが行った人差し指に対する絶対閾値・弁別域・方向弁別域といった知覚特性を調べる実験の方法論を利用して、頭部-上半身部位におけるこれらの特性評価を行い、比較検討を行っていきたいと考えている。さらに、こうした不均一な知覚は、小木らが行った手における風覚の実験<sup>4)</sup>の延長ととらえれば、システム内での拘束を解くことによって大幅に緩和されることが期待される。没入型を採用した本システムにおいては、無拘束で動くことができることにこそメリットがあり、この点も追加実験で明らかにしていきたい。

また今後は、同時に没入型三次元風覚ディスプレイを用いたアプリケーションの開発を行っていきたい。筆者らが現時点で考えているアプリケーションは以下のとおりである。視聴覚機器において、テレビとビデオカメラ、スピーカとマイクのように出力と入力対になって存在する。没入型三次元風覚ディスプレイにおいても、実世界の風情報（風向だけでなく高さのある風）を記録するためのデバイスとして風覚カメラが必要になってくる。風覚カメラとビデオカメラを併設して撮影することにより、映像とその場の風情報を記録することが可能になる。実世界の映像と風を記録し、ディスプレイで映像を再生し、没入型三次元風覚ディスプレイで風を再現することにより、より臨場感のあるコンテンツを作成できる。また、それらをアーカイブ化することにより、世界各地の映像と風情報を同時に体験できるデジタルアーカイブコンテンツとしての可能性が広がるのではないかと我々は考えている。浜

岡原子力館新エネルギーホール<sup>16)</sup>で展示されているウインドジェネレータというシステムは、風力発電所の風車が回り始める風速を体で体験できるシステムがある。また富士山レーダードーム<sup>17)</sup>にある体験コーナーでは、富士山頂の過酷な環境を体験できたり、山頂で実際使用していた観測機器を使って気象観測を疑似体験したりすることができるが、いずれも1次元の風にとどまっており、吹き荒れる風、吹き上げる風、吹き下ろす風といった環境を再現することはできていない。こうしたところに三次元風覚ディスプレイを導入することにより、さらに再現度の高い体験を提供できるのではないかと考えている。

また、インタラクティブコンテンツにも応用が可能であると考えられる。我々はプロアファンを円状型に配置した二次元の風覚ディスプレイと組み合わせたゲームをIVRCなどに展示している。没入型三次元風覚ディスプレイを用いることにより、従来の二次元の風に加え、高さのある風を再現することが可能になる。将来的には温風や冷風、霧や雪などの多彩な風覚表現ができるようにしていきたいと考えている。

本システムはCAVE<sup>10)</sup>のような没入型VR装置に比べるとサイズが小さく、内部で少し歩いたり、パーティクルグローブなどの入力インタフェースを動かしたりするようなVRアプリケーションを実現するためには、より巨大なシステムを構築する必要があると考えられる。その場合は、より強力なファンが必要になるだけでなく、遅延と安定性についてさらに厳格な検証が必要になる（ただし、高性能なファンを用いると、信号を送信してから実際に風を呈示するまでの遅延が短くなるので、逆に現状より性能が向上することも考えられる）。現在、最大風速が5m/sとより強力なファンを用いてより巨大化させたシステムを構築している。このシステムを用いて実験する際には、そうした点に問題がないかあらためて検証する必要があると考えている。

#### 参 考 文 献

- 1) 安藤英由樹, 渡邊淳司, 雨宮智浩, 前田太郎: Embossed Touch: なぞり動作における触覚を利用した触覚提示装置, インタラクシオン 2006, pp.27-28 (2006).
- 2) Nakamura, N. and Fukui, Y.: Development of Human Navigation System "HapticNavi" using GyroCube, 15th Triennial Congress of the International Ergonomics Association 2003, pp.352-355 (2003).
- 3) 上村尚弘, 森谷哲朗, 矢野博明, 岩田洋夫: 食



- 感呈示装置の開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.8, No.4, pp.399-406 (2003).
- 4) 小木哲郎, 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, Vol.2, pp.13-18 (1993).
  - 5) 橋本 渉, 今枝良司: 人間の指先における微風の知覚特性に関する研究, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol.8, No.3, pp.35-40 (2006).
  - 6) 鈴木由里子, 小林 稔, 石橋 聡: 無拘束なインタフェースを目指した風圧による力覚提示方式, 信学会論文誌, Vol.43, No.12, pp.3643-3652 (2002).
  - 7) 井上 陽, 加藤清敬: 次世代マルチメディアによる遠隔制御システム, 情報処理学会第 64 回全国大会, No.4, pp.689-693 (2002).
  - 8) Yanagida, Y.: Projection Based Oldfactory Display with Nose Tracking, *Proc. IEEE VR*, pp.43-50 (2004).
  - 9) 廣瀬通孝, 谷川智洋, 石田健亮: 嗅覚ディスプレイに関する研究, 日本バーチャルリアリティ学会第 2 回大会論文集, pp.155-158 (1997).
  - 10) Cruz-Neira, C., Sandin, D.J. and DeFanti, T.A.: Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, *Proc. COMPUTER GRAPHICS, Annual Conference Series*, pp.135-142 (1993).
  - 11) 小坂崇之, 服部進実: Wind-Surround System, 情報処理学会インタラクション 2006 論文集, pp.187-188 (2006).
  - 12) 小坂崇之, 服部進実: Wind-Surround System を用いた VR コンテンツの試作, 信学技報 ITS2005, No.59, pp.71-76 (2006).
  - 13) 小坂崇之, 平山 亮, 服部進実: 全方位型 Wind-Surround System, 情報処理学会 EC2006, pp.83-84 (2006).
  - 14) 小坂崇之: KITAKAZE, IVRC2006, 日本科学未来館, 9月16日-17日 (2006).
  - 15) 大山 正, 今井省吾, 和気典二: 新編感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房 (1994).
  - 16) 浜岡原子力館新エネルギーホール (オンライン).

入手先 <<http://www.chuden.co.jp/hamaoka-pr/guide/energy.html>> (参照 2007-07-13)

- 17) 富士山レーダードーム (オンライン). 入手先 <<http://www.mfi.or.jp/dome/>> (参照 2007-07-13)

(平成 19 年 4 月 2 日受付)

(平成 19 年 9 月 3 日採録)



小坂 崇之 (正会員)

2007 年金沢工業大学大学院工学研究科博士後期課程単位取得退学。2003 年金沢工業大学情報処理サービスセンター助手を経て, 2007 年より金沢工業高等専門学校国際コミュニケーション情報工学科講師, 現在に至る。バーチャルリアリティ, 風覚提示に関する研究に従事。



宮下 芳明 (正会員)

2006 年北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士後期課程修了。同大学科学技術開発戦略センター研究員を経て, 2007 年より明治大学理工学部情報科学科専任講師, 現在に至る。デジタルコンテンツに関する研究に従事。博士 (知識科学)。



服部 進実 (正会員)

1964 年東北大学工学部電子工学科卒業。同年富士通 (株) に入社。1989 年金沢工業大学情報工学科教授。同大学大学院工学研究科教授, 現在に至る。情報ネットワーク, ユビキタスコンピューティング, ネットワーク社会学の研究に従事。工学博士。