

I-22 VR アバターを用いた屋外温熱環境の仮想体験に関する研究

Research on virtual experience of outdoor thermal environment by using VR avatar

尾上拓也¹・矢吹信喜²・吉田伸治³・福田知弘⁴

Takuya ONOUE, Nobuyoshi YABUKI, Shinji YOSHIDA, and Tomohiro FUKUDA

抄録:快適な温熱環境を実現するために、都市空間の温熱環境に与える影響を定量的に評価・予測し、設計に反映する取り組みがなされている。しかしながら、現在の温熱環境の解析結果は、平面図及び断面図のような2次元表示のものが多く、立体的な温熱環境の分布が把握しにくい。また、動作性（視点場の切り替え）や没入感（その空間を体験しているような感覚）を伴った手法は見当たらない。そのような表現手法では、一部の専門家しか理解ができず、非専門家との相互理解・合意形成の達成が難しくなる場合がある。そこで本研究では、VR空間上のアバター（VRアバター）に空間を体験させ、その周囲の温熱環境を可視化することで、立体的かつ体感的な可視化手法を開発し、大学のキャンパスを例として適応を試みた。

Abstract: Urban thermal environment closely relates to human's amenity. Therefore, the thermal environment should be simulated or evaluated during the planning of design process and various studies has been done to indicate the converted temperature based on the air temperature, humidity, wind, shadows, emitted heat, etc. However, the result of such simulation is represented on 2D dimension or still computer graphics. Then, in this research, a new visualization technique was proposed with by Virtual Reality (VR) avatar. VR Avatar Thermal Environment (VRATE) system was developed and validated by applying it to a university campus.

キーワード: 屋外温熱環境, アバター, バーチャルリアリティ, 可視化, 仮想体験

Keywords: Outdoor Thermal Environment, Avatar, Virtual Reality, Visualization, Virtual Experience

1. はじめに

近年、ヒートアイランド現象等の都市の温熱環境の悪化が指摘されており、温熱環境の改善が求められている。快適な温熱環境の実現のために、緑地空間の整備¹⁾、通風性の確保²⁾等が挙げられるが、今日では都市構成物の温熱環境に与える影響を定量的に評価・予測し、様々な場合の温熱環境の検討が可能となっている³⁾。また、都市空間のような公共空間の設計には、市民、事業者、行政、ランドスケープデザイナーなどの多くの利害関係者がおり、相互理解・合意形成に基づいて設計が行われている⁴⁾。しかしながら、温熱環境の解析結果は、平面図及び断面図のような2次元表示のものが多く、立体的な温熱環境の分布が把握しにくい。また、3次元上で可視化が行われているものであっても、動作性（視点場の切り替え）や没入感（その空間を体験しているような感覚）を伴った手法は見当たらない。現状のような表現では、都市や温熱環境の知識のある専門家には理解ができて、それらの知識のない非専門家には容易に理解がしにくい。そのた

め、専門家と非専門家との相互理解・合意形成の達成が難しくなる場合がある。一方で近年は、3次元空間をVR (Virtual Reality) により表現することが設計においても実施され始めている。CAVE等の没入感シミュレータを用いた景観評価や熱を発生させるVR機器を用いた評価も存在するが、実装に大きなスペースを要する点や特殊な機器を要する点から、容易に実装が行えない場合も在り得る。そこで、簡易的に没入感を得る手法として、アバターを用いた仮想体験が注目され始めている。アバターを用いる手法は、一般的なPC上で簡単に実装でき、容易にVR空間への没入感が得られる。今日では、インターネット⁵⁾・防災⁶⁾・教育⁷⁾等の様々な分野においてアバターを使用し始めている。我々は、VR空間をアバターに体験させ、自らはアバターを通して体験感を得ることができると考えた。

そこで本研究では、VR空間上のアバター（VRアバター）に3次元空間の温熱環境を歩行しながら体験させ、VRアバターの周囲の温熱環境を可視化することで、立体性・動作性・没入感を伴った可視化手法の確立を目的とした。

1 : 学生会員 大阪大学大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻

2 : 正会員 大阪大学大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 教授 Ph.D.

(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 矢吹研究室, Tel : 06-6879-7660, E-mail : yabuki@see.eng.osaka-u.ac.jp)

3 : 非会員 福井大学大学院工学研究科 建築建設工学専攻 准教授 博 (工)

4 : 正会員 大阪大学大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 准教授 博 (工)

2. 既往の研究

(1) 屋外温熱環境の体感指標

体感指標とは人間の暑さ、寒さの感覚（温冷感覚）を表す指標であり、従来、空調分野や気象分野で研究が進められている。しかし、体感指標の多くは、屋内温熱環境を基準としており、屋外温熱環境においては屋内の指標を屋外に適応しているものが多い。ここでは、屋外温熱環境指標として、ミスナール体感温度、SET*、MRTを挙げる。

a) ミスナール体感温度⁸⁾

ミスナール体感温度では、気温から湿度及び風の影響を考慮して計算を行う。公式が比較的簡易で短時間に算出が可能であるが、放射熱の影響が加味されていないという問題も存在する。

$$T = 37 - (37 - t) / (0.68 - 0.0014h + 1/A) - 0.29t(1 - h/100) \quad (2.1)$$

$$A = 1.76 + 1.4v^{0.75} \quad (2.2)$$

ここで、

T : 体感温度 [°C]

t : 気温 [°C]

h : 相対湿度 [%]

v : 風速 [m/s]

b) SET* (Standard new Effective Temperature)⁹⁾

SET*は、気温・湿度・放射熱・着衣量含めた複合的な体感指標である。しばしば温熱環境の快適性の指標とされているが、気温が高くなるほど精度が落ちるなどの問題点があるため、屋外温熱環境への適応を疑問視する声も存在する。

$$\begin{aligned} C + R + Esk \\ = Fcls \cdot fcls \cdot hs \cdot (tsk - SET^*) \\ + w \cdot LR \cdot Fpcls \cdot hcs \cdot (Psk, s - 0.5PSET^*, s) \end{aligned} \quad (2.3)$$

ここで、

C : 皮膚からの対流熱伝達 [W/m²・sec・K]

R : 皮膚からの伝導熱損失 [W/m²・sec]

Esk : 皮膚からの蒸発熱損失 [W/m²・sec]

$Fcls$: 衣服による被覆率 [-]

$fcls$: 衣服の熱伝達抵抗 [m²・K/W]

hs : 総括熱伝達率 [W/m²・K]

tsk : 平均皮膚温度 [°C]

SET^* : 標準有効温度 [°C]

w : 皮膚濡れ面積率 [-]

LR : ルイス数 [°C/kPa]

$Fpcls$: 皮膚の露出率 [-]

hcs : 対流熱伝達率 [W/m²・K]

Psk, s : 皮膚温度に対する飽和蒸気圧 [kPa]

$PSET^*, s$: 温度 SET*での飽和蒸気圧 [kPa]

c) MRT (Mean Radiant Temperature)¹⁰⁾

MRTは、平均放射温度と訳され、実際の不均一な放射場において、人間が周囲環境と放射熱交換を行うのと同量の熱量を求め、それを温度換算したものである。周囲との形態係数と温度から算出される。

$$MPT = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^n Fi Tsi^4} - 273 \quad (2.4)$$

ここで、

Fi : 周囲各面の形態係数 [-]

Tsi : 周囲各面の温度 [°C]

(2) 風に関する指標

風に関する指標として、ビューフォート風力階級¹¹⁾がある。風力階級とは、風速を目測するとき、その強弱を表す段階である。地物・海波などの動きで風速を0~12の13階級に分け、数が大きいほど風速が大きいことを示している。気象庁はビューフォート風力階級を基に日本における風速の指針を定めている¹¹⁾。

(3) 屋外温熱環境予測手法

屋外温熱環境予測手法は、現在に至るまで多くの研究がなされている。予測手法は、対象とする外部空間のスケールによって大別され¹²⁾、都市全体のようなマクロのスケールにおける予測手法と街区のようなマイクロなスケールの予測手法が存在する。マクロのスケールにおいては、村上¹³⁾が、都市気候モデル(Mellor-Yamada型大気乱流モデル)を用いて風速分布、温度分布の算出を行っている。また、マイクロのスケールにおいては、山村¹²⁾や吉田¹⁴⁾により数メートルから数センチ単位で熱収支を計算する手法が提案されている。数ある研究の中でも、吉田¹⁴⁾の解析モデルは、樹木が屋外温熱環境に及ぼす効果(樹木の流体力学的影響・樹木による放射減衰・樹木からの潜熱発生を含む熱収支の影響)を考慮に入れている点で、より精度の高い解析を行えると考えられる。よって本研究では、吉田¹⁴⁾の解析モデルを用い、解析を行った。また、以下に吉田¹⁴⁾の解析モデルについての概要を述べる。吉田¹⁴⁾は、改良 $k - \epsilon$ モデルや樹木モデルを構築し、市街空間などのマイクロなスケールにおける温熱環境予測手法を開発した。このシステムでは、まず、気温や太陽高度などの入力により境界条件を設定し、放射計算を実行する。次に、放射計算により得られた地表面や壁面表面の温度分布等を新たに境界条件として追加することにより、対流・放射・湿気輸送連成シミュレーションを行う。このシミュレーションにより、風速、温度、湿度、MRTの空間分布の算出し、これに人体の着衣量、代謝量を仮定することによりSET*の空間分布を計算する。

(4) 温熱環境の可視化

前節のような手法で得られた温熱環境情報は、数値デ

ータとして表現されるため、人間には理解が難しい。そのため、数値情報を可視化することによって、人間の理解度を向上させている¹⁵⁾。ここでは、既往の可視化手法を、二次元的手法、三次元的手法、四次元的手法の三種類に大別し、各々概説する。

a) 二次元的手法

温熱環境の分布を、二次元平面を基本として可視化するものである。スカラー量は、等値線を用いてコンタ図に、ベクトル量は矢印を用いてベクトル図に表されることが一般的にされている¹⁴⁾。

b) 三次元的手法

三次元的手法には、サーフェスレンダリング、ボリュームレンダリングなどがある。サーフェスレンダリングとは、前述の二次元的手法を三次元の面に投影させた表現である。オブジェクト表面にレンダリングを行うもの¹²⁾や、三次元空間の一部を平面や断面で映し出すもの¹⁵⁾がある。一方、ボリュームレンダリングとは、ボクセルと呼ばれる三次元的な画素を生成し、直接三次元空間にレンダリングを行う¹⁶⁾。そのため、サーフェスレンダリングでは不向きな表面が定義できない物体の表現や、物体内部の再現が可能である。

c) 四次元的手法

四次元的手法では、三次元的手法に動的な表現を付加したものである。例えば、時系列に従って温度の変化を表現することや、風の動きをパーティクル（小粒子）のアニメーションで表すなどが行われている¹⁷⁾。そのため、温熱環境の変化を動的に評価するのに適している。

(5) VR 技術とアバター

アバターとは、一般的にはVRやWebなどの仮想空間内においてユーザの分身として振舞う人物のことである。アバターは、従来コンピュータゲームやインターネットなどのエンターテインメントの分野で用いられてきた。学術的には、アバターによる効果は仮想空間への没入感の増大という側面から評価されている。谷塚ら⁶⁾は、地下空間の火災状況を作り、アバターを用いて訓練ができるシステムを開発している。

3. VR アバターによる屋外温熱環境システム(VRATE System)

(1) システムの概要と開発環境

a) システムの概要

本研究で開発したVRアバターによる屋外温熱環境システム：VR Avatar Thermal Environment System（以下VRATE System）は、VRアバターの周囲の温熱環境を可視化することにより、立体的かつ体感的な温熱環境の評価を行うものである。温熱環境解析そのものは吉田ら¹⁴⁾の温熱解析手法を用いて別個に行い、その結果をテキストファイルなどの形式で入手する。一方、3DCADソフトウェアを用いて、建物群やその周辺のモデルを作成し、VRソフトウェアにデータを出力させる。VRソフトウェア内に、温熱環境解析出力ファイルを読み込み、VRアバター周囲の温熱環境を表示させる。ユーザは、VRアバターを移動させることにより、設計空間の環境

を疑似体験することができる。

図-1にVRATE Systemのインターフェースデザインを示す。ここでは、画面にVR空間及びVRアバターが表示され、体感指標（ミスナール体感温度・MRT・SET*）及び風の可視化が行われる。画面右下には、可視化手法を選択するメニューバーがあり、ユーザが可視化手法を選択できる。画面左側には、「上空から見たVRアバターの位置情報」と、選択した地点の「風に関する情報」、「体感指標に関する情報」、「日時及び気温・湿度情報」が提示される。

b) システムの開発環境

VRATE Systemの対象となる建築物のモデリングに際し、Autodesk社の商用3DCGモデリングソフトウェア3ds Max（以下、3ds Max）を用いた。また、VRATE Systemの開発に際しては、Dassault Systems社の商用VRソフトウェア3DVIA Virtools 5.0（以下、Virtools 5.0）を用いた。Virtools 5.0は建築・環境デザインのみならず、ゲームアプリケーションなどリアルタイムシミュレーション全般を行うための開発環境であり、GPUの進歩に対応する形で年々改良がなされている。また、開発者がより簡単で、直感的なプログラミングを行えるように、「Behavior Building Block（以下BB）」と呼ばれる様々な機能を有するライブラリが存在し、それらを組み合わせることでプログラミングが可能となっている。

(2) 対象敷地とその温熱環境解析

本研究では、対象敷地を福井大学文京キャンパスとし、解析の入力条件は岸らの既往研究¹⁸⁾と同様の条件で行った。また、解析結果の一部を表-1に示す。解析結果には、各地点の座標(x, y, z)とその地点の気温・風速ベクトル・相対湿度・MRT・SET*が記載されている。

(3) 対象敷地及びVRアバターの制作

福井大学文京キャンパスの一部を対象にして3次元モデルを作成した。図-2に3次元モデルをVRソフトVirtools 5.0によりコンピュータの画面上に表現した様子を示す。吉田らの温熱環境解析手法では、影による放射場への影響も計算に含まれていることから、入力条件の太陽高度に合わせた光源を置き、影の再現も行った。影は通常、光源からの光が直接当たらない場所においても、反射光によってある程度の明るさを持っている。VRでは影の中においても完全な暗闇にならないように、反射光や環境光を設定することが可能である。これらの光を適切に設定し、影の中の光や物体表面に生じる陰の再現も行った。

また、VRアバターの制作は、Virtools 5.0のリソースを参考に行った。VRアバターの動作としては、歩行、方向転換、静止の3つを用意し、PCのキーボードの操作で簡易に行えるようにした。

(4) 温熱環境の可視化

a) 可視化手法

VRATE Systemで行う可視化は、①サーモボックスによる可視化、②パーティクルによる可視化、③両者の併用による可視化の三種類である。図-3に各々の可視化の様子及び可視化に用いる物体（サーモボックス、あるいはパーティクル発発生オブジェクト）の配置図を示す。



図-1 VRATE System のインターフェースデザイン



図-2 福井大学文京キャンパスのVRモデル



図-4 可視化フロー

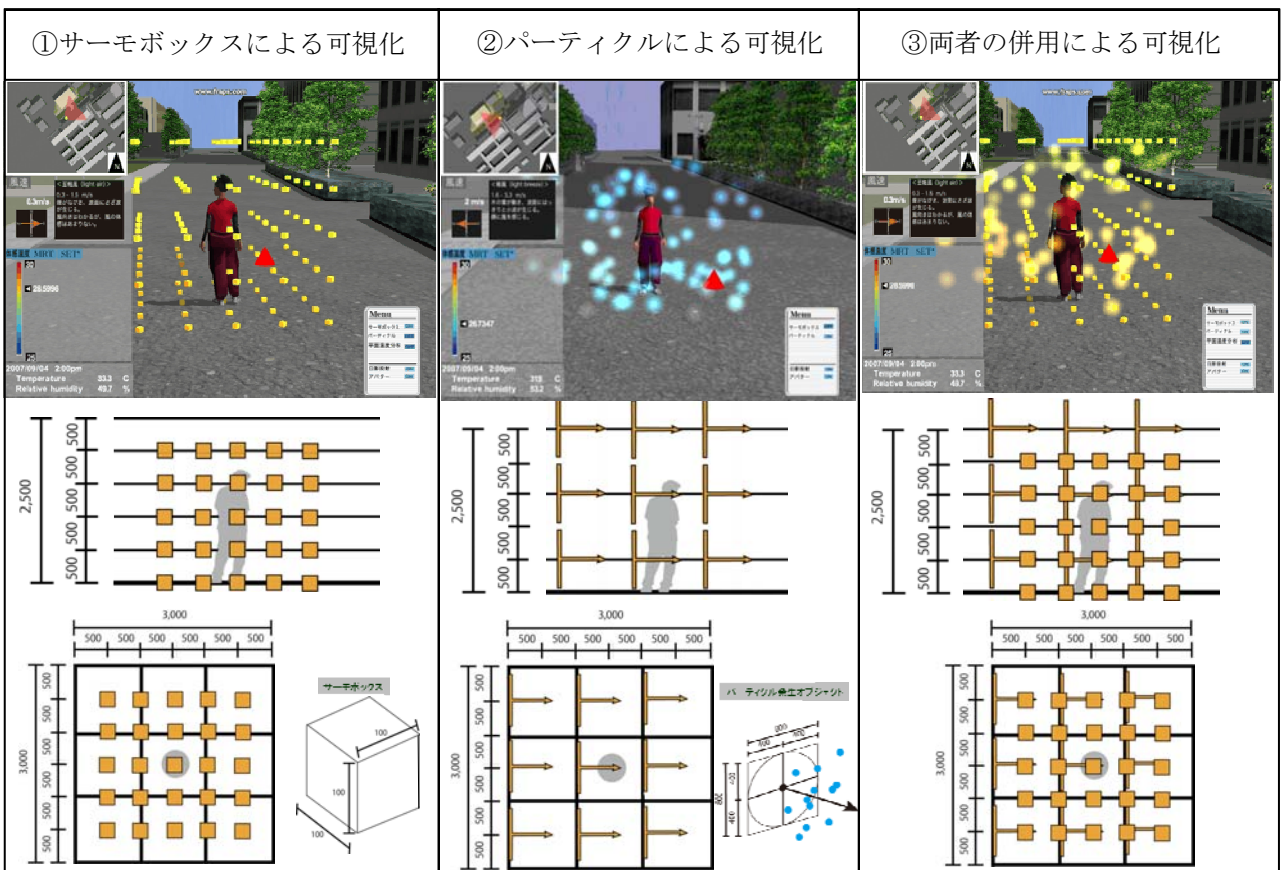


図-3 システムの可視化の様子とその配置図

表-1 温熱環境の解析結果の一部

x	y	z	U	V	W	気温	絶対湿度g/kg	相対湿度%
125	125	0.4	0.55346	-3.31449		-0.00108	32.34472	15.32141
125	125	1.3	0.57147	-3.44757		-0.00349	31.78682	15.28639
125	125	2.4	0.58006	-3.52058		-0.00641	31.60491	15.26245
125	125	3.7	0.58692	-3.58497		-0.00981	31.49765	15.24082
125	125	5.2	0.59329	-3.64976		-0.01385	31.41944	15.2199
125	125	7	0.59971	-3.72128		-0.01814	31.3532	15.19832
125	125	8.5	0.60432	-3.7801		-0.02179	31.31073	15.18227
125	125	9.5	0.60708	-3.81753		-0.02415	31.28634	15.17251
125	125	11	0.61079	-3.87153		-0.02756	31.25431	15.15907
125	125	13.5	0.61595	-3.95906		-0.03295	31.21051	15.13924
125	125	16.5	0.6207	-4.06164		-0.03889	31.16952	15.11899
125	125	19.5	0.62436	-4.18032		-0.04415	31.1373	15.102
125	125	22.5	0.62724	-4.25521		-0.04876	31.11143	15.08753
125	125	26	0.63001	-4.36041		-0.05328	31.08717	15.07313
125	125	30.5	0.6329	-4.48853		-0.05799	31.06335	15.05793
125	125	34.5	0.63506	-4.59748		-0.0614	31.04768	15.04702
125	125	37.5	0.63666	-4.67486		-0.06337	31.03815	15.04007
125	125	40.5	0.63824	-4.74926		-0.06498	31.03034	15.03403
125	125	45	0.64069	-4.85442		-0.06672	31.02102	15.02639
125	125	49.5	0.64315	-4.95595		-0.06807	31.01435	15.02042
125	125	52.75	0.64502	-5.02576		-0.06885	31.01046	15.01678
125	125	56.25	0.6471	-5.09884		-0.06904	31.00718	15.01353
125	125	61.5	0.65037	-5.20189		-0.06915	31.00351	15.00951

表-2 被験者の専門性

項目	人数
都市工学	8
建築工学	5
熱工学	7
情報工学	5
気象学	6
生態生理学	2
該当なし	11

注) 専門知識は複数回答可能にしたため、同一人物が複数回答している場合がある

① サーモボックスによる可視化

サーモボックスとは、VR アバター周囲に配置された一辺 100mm の立方体のことである。サーモボックスは、VR アバターを中心として 500mm 間隔に置かれ、一辺 2,000mm の立方体内の温熱環境を表す。サーモボックスは、体感指標の値により表面の色が変化し、値が高ければ赤に、低ければ青に近づく。

② パーティクルによる可視化

パーティクルとは、VR アバター周囲から発生する小粒子のことである。パーティクルは、パーティクル発生オブジェクトから発生する。パーティクル発生オブジェクトは、VR アバター周囲 1,000mm 間隔に配置されているが、VR 空間上には表示されない。発生したパーティクルは、サーモボックスと同様にパーティクルの色で体感指標の高低を表し、パーティクルの運動(速さと方向)で風の情報を表す。

③ 両者の併用による可視化

前述の①と②を併用した可視化方法である。サーモボックス及びパーティクル発生オブジェクトの配置は、①と②を重ねたものになっている。ここでは、体感指標は、サーモボックス及びパーティクルの色、風の情報は、パーティクルの運動で表している。

b) 可視化フロー

可視化は、図-4 に示す流れで行われる。まず、VR モデルの位置座標を取得する。次に、VRATE System に読み込んだ温熱環境出力ファイルから、VR モデルの位置座標と最も近い座標点の温熱環境情報を取り出す。そして、パーティクルによる可視化では、はじめに風向の反映を行う。風向の情報を取得すると、パーティクル発生オブジェクトがその方向に向きを変える。その後、体感指標の値とそれに対応する色のパーティクルを、風速と同じ速さで発生させる。サーモボックスの場合も、はじめにサーモボックスの現在位置を取得し、同様な過程を通じて体感指標のみ可視化を行う。

c) 画面の表示内容

VRATE System の画面には、可視化によって表される体感指標の詳細な数値情報や意味等が表示される。

① VR アバターと選択した地点

可視化が行われている範囲をマウスでクリックすると、赤い円錐が現れ、その地点の風や体感指標の情報が画面上に表示される。

② 体感指標に関する情報

体感温度・MRT・SET*の数値情報及び色の対応の様子が示されている。また、MRT 及び SET*に関しては、2.(1)の既往研究を基に作成した指標の強さを表す文章が記載される。体感指標の大きさをよりわかりやすくユーザに伝えられる。

③ 風に関する情報

風速が数値、風向が矢印として表示される。また風も体感指標と同様に、2.(2)の既往研究を基に作成した指標の強さを表す文章が記載される。

4. システムの検証及び温熱環境に関する意識調査

(1) 可視化手法の適性に関する検証

a) 検証方法

本検証では、被験者に開発システムのキャプチャ映像を提示した後に、アンケート手法により、システムの可視化手法による VR 空間の温熱環境の理解しやすさの度合いについて、五段階評価を実施した。被験者は、本研究室の学生 9 名 (20-24 歳)、本学外国語学部の学生 1 名 (21 歳)、研究室秘書 1 名 (30 代)、塾講師 5 名 (25-30 歳)、舞楽指導者 4 名 (55-65 歳) の計 20 名であり、基本的には著者の知人とした。被験者は、専門知識別には表-2 のようになった。五段階評価においては、5 を最も高い得点としている。キャプチャ映像は、3.(4)の三種類の可視化手法を用いたシステムの様子が、それぞれ映す視点と VR アバターの歩行範囲を変えて二パターンずつ用意されている。一つ目のパターンは、地面から 2.0m の高さを保ちながら VR アバターを表示したものである。このルートは、アスファルトの路面、建物の影、樹木の木陰を VR アバターが通過するため、VR アバターの体感温度の変化が起こりやすくなっている。一方、二つ目のパターンは、鳥瞰的な視点から VR アバターを表示したものである。このルートでは、スタート地点では風力 2 の西風が吹いているが、ゴールに近づくにつれ

て風力4の北風に変化する。アンケートでは、これらの変化を見せ、VRアバターがどのような温熱環境にさらされているのかをユーザが容易に理解できたか調査を実施した。アンケート項目としては、「1. 体感指標がわかりやすいか」、「2. 風の様子が変わりやすいか」、「3. 空間構成物（樹木・芝生など）と温熱環境の関連性がわかりやすいか」、「4. 日照・日影と温熱環境の関連性がわかりやすいか」、「5. 建物の美観は評価しやすいか」を用意した。

b) 検証結果

被験者の五段階評価の平均値を図-5、図-6示す。全体の平均値は図-5で表され、表-2で専門知識に何も該当しなかった人物のみを対象にした平均値を図-6に表した。可視化手法の適正に関しては、図-5、図-6ともにほとんどの項目において平均が4以上の高い評価を得ることができた。また、図-5と図-6の比較により、非専門家の方が、屋外の温熱環境をより容易に理解していることも示唆される。個々の可視化表現に関しては、サーモボックスは、専門知識の有無を問わずわかりやすいと評価されている。これは、ボックスの位置がVRアバターから一定であるため、立体的な熱の広がりや理解しやすいと判断されたのではないかと考えられる。しかしながら、風の表現に関しては、低い評価となった。これは、サーモボックスの可視化において、風に関しては画面上の数値データのみでの表示に留まったためであると考えられる。一方で、パーティクルを用

いた風の表現はサーモボックスの評価を大きく上回り、パーティクルによる風の表現は立体的な風環境を示すのに有効であると考えられる。しかしながら、被験者の意見の中には、「パーティクルの動きがわかりにくい」や「形が不適」など、表現に関しては依然として課題点が残る結果となっている。また、サーモボックスとパーティクルを併用した可視化では、いずれの項目においても高い評価を受けており、三種類の可視化の中では、もっとも有効な温熱環境の表現手法であると言える。しかし、併用によって可視化される物体が多くなり、複雑に見えてしまうため、逆にわかりにくいと感じる人もいた。また、パーティクルやボックスの数が増えることで、「周囲環境の様子がわかりにくい」という意見もあった。以上から、この三種類の中では、サーモボックスとパーティクルを併用した可視化がもっとも適切であると言えるが、個数やパーティクルの可視化手法に改良を加えて、更にわかりやすい可視化にできるように開発を進める必要がある。

(2) システムの操作性に関する検証

a) 検証方法

4. (1) a) と同様の被験者にシステムの使用方法を説明し、その後5分前後システムを自由に利用してもらい、再びアンケートによる評価を実施した。被験者は、VRアバターの操作（歩行・方向転換）、カメラの操作（ズーム・回転）及び可視化手法の切り替えの方法の説明を受けた後、その機能を実際に操作した。

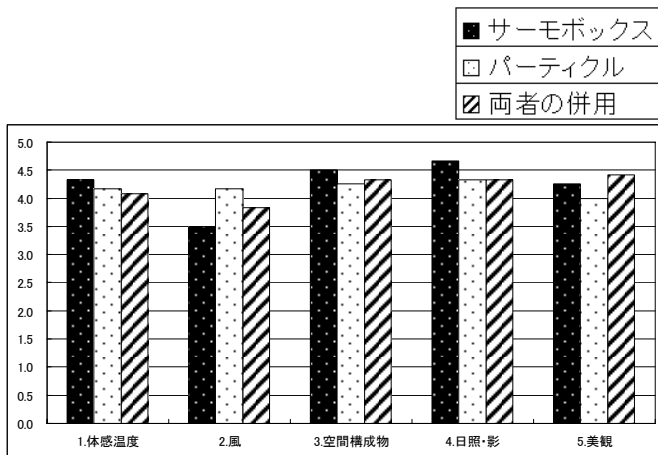


図-5 可視化手法別五段階評価(全被験者)

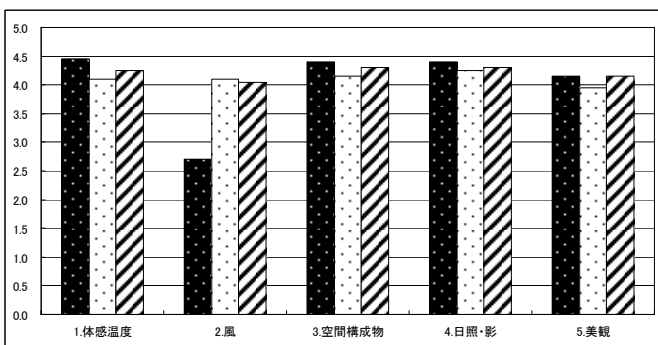


図-6 可視化手法別五段階評価 (専門知識: 「該当なし」 選択者)

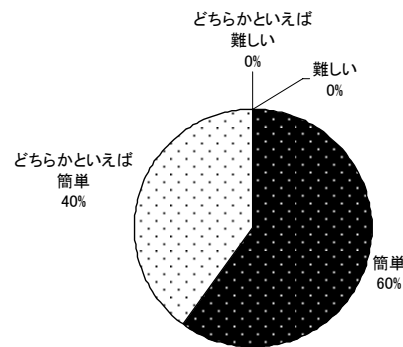


図-7 VRアバターの操作の簡易性

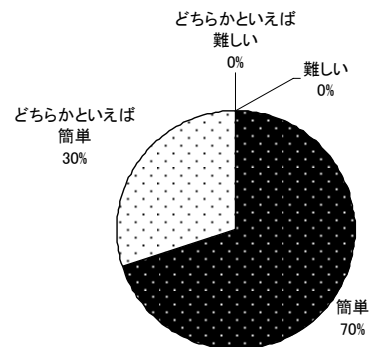


図-8 視点の切り替えの簡易性

b) 検証結果

アンケートの結果を図-7、図-8に示す。図-7、図-8ともに、操作が「簡単」を選んだ人が過半数であり、「どちらかといえば難しい」、「難しい」と回答する被験者はいなかった。よって、操作性に関しては大きな課題点はないと考えられる。VR アバターの操作及び画面の表示の切り替えは、キーボードとマウスのみを用いて行え、PCの専門知識がなくても容易に行うことができる。

一方で、被験者からは、操作の改善点に関する意見も存在した。VR アバターは、現在の移動は歩行のみしかできないため、長距離の移動の際に時間がかかる。その改善のために、VR アバターに走る機能を加える、または選択地点に瞬間的に移動できるような機能を付け加える必要がある。また、マウスで一括して操作が行えればより便利ではないかという指摘もあった。

(3) 都市の温熱環境への意識調査

a) 検証方法

都市の温熱環境への意識の実態を探るため、4.(1)a)と同様の被験者に都市の温熱環境への関心についてのアンケート調査を行った。アンケート項目は、「都市の温熱環境や設計のワークショップやセミナーに参加したいか」、「設計に温熱環境への考慮をすべきか」を用意した。

b) 検証結果

アンケートの結果を図-9、図-10に示す。これらを見ると、「都市の温熱環境や設計のワークショップや

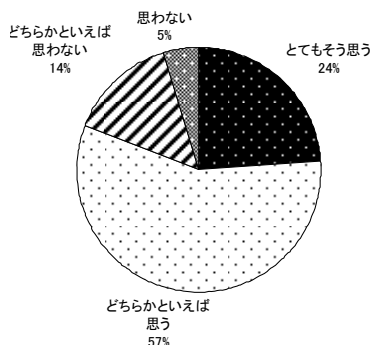


図-9 都市の温熱環境に関するワークショップなどに参加したいか

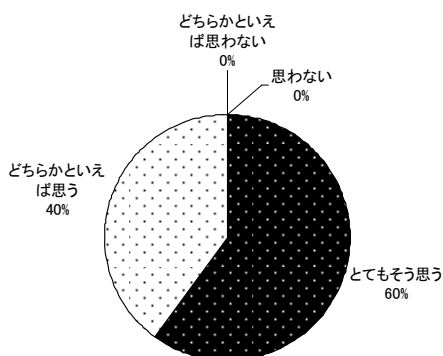


図-10 温熱環境に配慮した都市設計がなされるべきか

セミナーに参加したいか」、「設計に温熱環境への考慮をすべきか」の両質問ともに、「とてもそう思う」「どちらかといえば思う」を選ぶ人が多く、被験者の温熱環境への関心の高さが伺えた。ここから、今後のまちづくりにおいて、温熱環境に関しても積極的にワークショップを図るべきであると考えられる。またその際に、VRATE System は、専門知識のない人々へ温熱環境の理解を促進させる有効な手段ではないかと考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 既往の温熱環境解析手法から得られた解析結果を用い、VR アバター周囲の温熱環境を立体的かつ体感的に表示する新しい可視化システムの開発を行った。
- 3次元のVR空間において立体的な温熱環境の評価が可能であることが確認された。
- ユーザが容易にVRアバターを操作し、VR空間の温熱環境を体感できることが示唆された。
- 特に、都市や建築、温熱環境に関する知識のない利用者の温熱環境への理解度が高く、非専門家への相互理解・合意形成を図る上で有効な手段であることが確認された。

今後の課題としては、風の動きがわかりにくいなどの意見も存在したため、今後も可視化手法について改良を加えていく必要がある。本研究では、シミュレーションで得られた温熱指標を可視化することに留まっているが、今後はアバターに運動代謝や人体生理活動を加味させることで、より現実に近い体感予測をすることができる。また、アバターを用いて温熱負荷を最小にする経路を探索することも可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 鈴木弘孝：建築物緑化の温熱環境改善効果に関する既往研究レビュー，日本緑化工学会誌，第34巻，第2号，pp.355-362，2008年
- 2) 吉野正敏，福岡義隆：「環境気候学」，東京大学出版会，2003年
- 3) 神山健二，佐々木亮治，河野俊樹，足永靖信，成田健二，植松康：屋外熱環境の実務設計支援システムの開発とその適用，日本建築学会技術報告集，第17号，pp.283-286，2003年6月
- 4) 福田知弘，長濱龍一郎：まちづくり支援VRシステム，松下電工技報，第77号，pp.63-68，2002年3月
- 5) Second Life，<<http://secondlife.com/>>，(入手2010.8.18)
- 6) 谷塚俊輔，中西英之，石田亨，阿部伸之，山田常圭：建物火災を対象とした疑似体験型マルチエージェントシミュレータの開発，第19回人工知能学会全国大会論文集，3B1-04，2005年
- 7) 西川悟史，山下淳，葛岡英明，加藤浩：タンジブル地球儀システムを利用した天文学習カリキュラムの検討，電子情報通信学会技術研究報告(教育工学)，第108巻，第88号，pp.57-62，2008.6.
- 8) Andre Missenard：Temperature effective d'une，

- atmosphere. Temperature resultant d'un milieu, Chauffage et Industrie XII (137/138) , pp.148-153 /491-498 / 552-557, 1931.
- 9) A. Pharo Gagge, Jan A. J. Stolwijk, Yasunobu Nishi : An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, ASHRAE Transactions, Vol.77, No.1, pp.247-262, 1971.
 - 10) Povl Ole Fanger : Assessment of man's thermal comfort in practice, British Journal of Industrial Medicine, Vol.30, No.4, pp.313-324, 1973.
 - 11) 気象庁：気象等の知識 風, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/kaze.html>, (入手 2010.2.7)
 - 12) 山村真司, 梅干野晃, 浅輪貴史：建築外部空間デザインの設計支援を目的とした熱放射環境の予測手法の開発, 日本建築学会計画系論文集, 第 554 号, pp.85-92, 2002 年 2 月
 - 13) 村上周三, 持田灯：関東地方における土地利用状況の変化と流れ場・温度場の関係 Mellor-Yamada 型の都市気候モデルによる局地気象解析, 日本建築学会計画系論文集, 第 491 号, pp.31-39, 1997 年 1 月
 - 14) 吉田伸治, 村上周三, 持田灯, 大岡龍三, 富永禎秀, 金相進：対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析に基づく緑化効果の分析, 日本建築学会計画系論文集, 第 529 号, pp.77-84, 2003 年 3 月
 - 15) 空気調和・衛生工学学会：「建築環境と可視化情報実験・シミュレーション・バーチャルリアリティ」, 理工図書株式会社, 1995 年 6 月
 - 16) 俵丈展, 小野謙二：複数の伝達関数を用いた流体シミュレーションのボリュームレンダリング, 第 22 回数値流体力学シンポジウム, J7-1, 2008 年 12 月
 - 17) 株式会社環境シミュレーション：南大井マンション風環境解析, <http://www.env-simulation.com/jp/wy_gal/img/ana_2_2_4.html>, (入手 2010.2.9)
 - 18) 岸由紀子, 吉田伸治：連成 CFD 数値解析に基づく非定常・不均一な屋外温熱環境の評価, 日本建築学会北陸支部研究報告集, 第 52 号, pp.263-266, 2009 年 7 月

(2010.5.28 受付)