建築内部空間における光・視環境を考慮した開放感の定量評価研究（その1）： HMD による VR を用いた無窓空間における開放感評価の妥当性検証 QUANTIFICATION OF SPACIOUSNESS OF INTERIORS CONSIDERING LIGHTING AND VISUAL ENVIRONMENT (PART 1) : VERIFICATION OF SPACIOUSNESS EVALUATION USING VIRTUAL REALITY WITH HEAD MOUNTED DISPLAY IN CLOSED INTERIOR SPACES

山本 竜也^{*1}, 三宅 博行^{*2}, 山口 秀樹^{*3}, 吉澤 望^{*4}
*Tatsuya YAMAMOTO, Hiroyuki MIYAKE, Hideki YAMAGUCHI,
and Nozomu YOSHIZAWA*

VR technology development has lifted restrictions in environmental psychology experiment. To verify the reliability of using VR in experiments in our research: quantification of spaciousness, we examined if there's differences between VR space and real space as a reference stimulus in ME method experiments. Major findings are as follows: 1) General luminance balance could be roughly realized in VR, even though the luminance of light emitting parts exceeded the system's output limit. 2) There were no significant differences in the spaciousness evaluation results, except for few cases where the light source parts affected luminance distribution.

Keywords : *Spaciousness, Head Mounted Display (HMD), Virtual Reality (VR), Spatial perception, Psychological evaluation*
開放感, HMD, VR, 空間知覚, 心理評価

1. はじめに

1.1 研究背景：開放感について

建築物の省エネルギー性能の向上が求められる一方で、働き方改革に伴う生産性向上や健康経営が求められるようになった。そのため、設計段階から建築環境の生理的・心理的品質を定量的に評価できる手法が必要となる。光・視環境の側面において、建築空間が利用者の快適性、知的生産性、健康などに影響を与える要素の一つとして開放感が考えられる。乾ら¹⁾²⁾³⁾は、開放感を「ある空間において、人間が視覚を通して受け取る空間の大きさの感じであり、いいかえれば、その空間の視知覚的な容積感である」と定義した。そして模型実験の結果、天空輝度、室内作業面平均照度、室容積、窓の立体角投射率を変数として開放感を予測する式を導出した。内田⁴⁾は、開放感は空間の見かけの容積によって説明できると考察した。そしてスケールモデルおよび実物大モデルによる実験により、見かけの容積は実容積だけでなく、平面の面積や形状、さらには壁・床・天井各面の立体角等によっても影響を受けるという結果を得た。初見ら⁵⁾⁶⁾は、実大空間での実験により、物理的な容積が等しくプロポーシヨンの異なる空間同士の比較をした場合、より床面積の狭い

（縦長の）空間のほうが大きく知覚されるという結果を得た。三宅ら⁷⁾は実大空間での実験により、同じ空間における開放感であっても、平均照度だけではない光環境の要素、つまり輝度や空間内の光の偏在によっても変化することを示した。

本研究では、「開放感」の定義は乾らによるものを踏襲していくが、建築設計で利用できる技術が発達し複雑なデータ処理が可能になった現在、大きさや形状の異なる空間を対象として、輝度分布の偏在を始めとする光・視環境に関する多様な要素を考慮した、より包括的な開放感予測式の構築を行う。

1.2 研究目的：バーチャルリアリティを利用した開放感評価

開放感の研究では、空間を被験者に体感させ、その評価を数値化していくことが多い。しかし、実際に複数の空間を準備するには大きなコストがかかる上、離れた場所にある複数の空間を自由に移動して比較させることには困難を伴う場合もある。そのため、既往の研究では現実空間の代用として縮尺模型や写真、CGなどを提示して被験者に評価させる方法が多くとられてきた。

近年のバーチャルリアリティ（以下、VRと称す）の技術発達に伴

¹⁾ ㈱日本設計（当時 東京理科大学理工学研究科建築学専攻 修士課程）

²⁾ Arup, 東京理科大学理工学研究科建築学専攻 博士課程

³⁾ 国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部 主任研究官・博士（工学）

⁴⁾ 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士（工学）

NIHON SEKKEI, Inc.

(Grad. Student, Dept. of Architecture, Tokyo University of Science)
Arup, Doctoral Course, Dept. of Architecture, Tokyo University of Science

Senior Researcher, Building Dept., National Institute for Land and Infrastructure Management, MLIT, Dr.Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Tokyo University of Science, Dr.Eng.

い、二次元媒体（写真、平面映像）に比べてより現実に近い空間体験が可能となった。ただし VR 空間に対する知覚や印象が、実空間に対するものと同様とみなせるかはそれぞれのシステムごとに検証する必要がある。吉澤ら⁸⁾の研究では、大スクリーンに立体視映像を投影する呈示システムを用いた被験者実験により、VR 空間は高さ・幅の再現性はあるが奥行き感がやや狭く感じられる傾向にあるという結果を得ている。大倉ら⁹⁾は傾斜型投影ディスプレイシステムを用いて空間の大きさ別に実空間と VR 空間の印象比較を行っている。横井ら¹⁰⁾は大型スクリーンに呈示した VR 空間における心理的影響の評価分析を行っている。小野ら¹¹⁾は VR の呈示装置の違いによる現実感、没入感、設計ツールとしての有効性の検証を行っている。Pedro J.ら¹²⁾は数種類のヘッドマウントディスプレイ（以下、HMD と称す）を用いて、それぞれに対して色の知覚、影、表面のテクスチャ、リアリティを実空間と VR 空間で比較調査を行い、臨場感と色の再現度の高い相関や、質の向上には材料の質感などが重要な要素となるという結果を得ている。

VR を呈示する装置の中でも HMD は、頭部運動トラッキングによる動きに応じた全方向の空間呈示、両眼視差の再現などが可能になっている上、小型で民生用としても発売されているため、従来の巨大なスクリーンによる大掛かりな VR に比べて簡易に用意できる。

つまり、開放感評価のための実験でマグニチュード推定法(以下、ME 法と称す)における基準刺激として HMD による VR を用いることができるのであれば、基準空間のデータを格納した HMD を評価したい空間に持っていけば比較実験を行うことができ、運搬、設営、保管などのコストを削減することができる上、距離的に離れた空間同士を間接的に比較することも現実的に可能となる。

本研究は建築内部空間における光・視環境を考慮した開放感の定量評価が目的だが、まず本論文ではその第一段階として HMD による VR を利用することの妥当性検証を行うため、ME 法を用いた実験の基準刺激としてそれぞれ実空間と HMD による VR を用いた場合を比較した結果を報告する。

なお本論文は、2019 年度日本建築学会大会（関東）¹³⁾にて発表報告した内容に、実験数を追加して新たな分析結果を加え作成したものである。

2. 本研究で使用する VR について

本研究では VR 空間を呈示する HMD として汎用性の高い Oculus Quest を使用した。持ち運びが容易なスタンドアローン型（提示時に PC との接続や周辺へのセンサ設置が不要）である事、比較的高い解像度と周辺視野にも映像を提示できる広い視野角がある事、左右のディスプレイに視差のある映像を呈示することによる立体視を実装している事などの特徴を持つ。そのほか、Oculus Quest の主な仕様を Table1 に示す¹⁴⁾。

Table1 Oculus Quest specifications

Display	Resolution (one eye)	1440×1600 pixels
	Refresh rate	72 Hz/second
	Panel type	OEL
Viewing angle	100 degrees	
Interpupillary distance	Adjustable	
Default SDK Color Space	Rec.2020 gamut, 2.2 gamma, D65 white point	
Supported Android Version	Android 7	
Motion sensing (main part)	6DoF	
Memory	4GB	

3. HMD による VR を用いた開放感評価における妥当性検証のための被験者実験

開放感評価において、VR 空間を基準刺激として用いることの妥当性を検証するために、6 カ所の建物を使用して被験者実験を行った。対象空間の容積は最小 36.3m³～最大 1,656.6m³、被験者の観察位置での鉛直面照度で 30lx～720lx であり、開口部はブラインドを閉じるなどして視線と日光を遮蔽して、人工照明のみの空間とした。Table2 に示すように対象ごとに実験 I～実験 VI の番号を割り当てた。実験 I は被験者位置での眼前照度はほぼ等しく、容積の異なる 3 つの空間に対して実空間と VR 空間の比較検証を行った。実験 II・実験 III・実験 IV・実験 V は容積や用途の異なる空間において、それぞれ眼前照度を 2～5 水準用意し比較検証を行った。実験 VI は相互作用を検証するために容積 2 水準、眼前照度 3 水準を用意して比較検証を行った。各被験者実験に用いた空間の容積・照明設定・被験者数・実験期間などを Table2 にまとめて示す。なお、今回の一連の被験者実験では評価に際して広がり感^{準 1)}という語を用いた。

Table2 Characteristics of each experimental space

	Experiment I			Experiment II	Experiment III	Experiment IV	Experiment V	Experiment VI	
	Small lecture room	Medium lecture room	Large lecture room	Auditorium	Living room	Small space	Medium space	Divisible space	
Size	W6,400×D9,900×H3,950 mm	W9,600×D15,000×H3,950 mm	W16,000×D15,000×H3,950 mm	W17,500×D21,815×H5,525 mm (Longest side)	W3,640×D6,370×H2,400 mm	W2,910×D4,500×H2,770 mm	W6,500×D9,730×H2,670 mm	W5,070×D5,380×H2,600 mm	W5,070×D11,450×H2,600 mm
Volume	250.3 m ³	568.8 m ³	948.0 m ³	1,656.6 m ³	55.6 m ³	36.3 m ³	168.9 m ³	70.9 m ³	150.9 m ³
Illuminance setting value in front of the eye	Not dimmable			30lx / 60lx / 120lx	30lx / 120lx / 360lx	60lx / 120lx / 240lx	30lx / 60lx / 240lx / 480lx / 720lx	30lx / 60lx / 120lx	30lx / 60lx / 120lx
Orientation of Main window	North	South	South	-	South	East	West	East	
Reflectance: Ceiling/Wall/Floor	40% / 33% / 10%	40% / 33% / 10%	40% / 33% / 10%	77% / 34% / 6%	80% / 78% / 20%	81% / 86% / 30%	59% / 73% / 17%	85% / 23% / 11%	
Reflectance: Desks/Chairs	84% / 13%	84% / 13%	40% / 27%	-	18% / 13%	-	-	-	
Number of Desks/Chairs	20 / 58	46 / 138	72 / 214	- / 203	2 / 4	-	-	-	
Number of Subjects	12 (men:5, women:7)			14 (men:10, women:4)	12 (men:9, women:3)	19 (men:13, women:6)	19 (men:14, women:5)	17 (men:9, women:8)	
Period for the Experiment	Jan. 5,6,9, 2020			Oct. 4,9,10, 2020	Sep. 26, 2020	Sep. 1,3,4,5,7,8,10, 11,12, 2020	Sep. 1,2,7,8,12, 2020	Oct. 22,23,26, 2020	

3.1 実験 I

3.1.1 実験 I：実験空間の概要

1) 実空間の概要：実験 I は、大学の講義室のうち容積の異なる 3 室 (Table2: Small/Medium/Large lecture room) を使用して実験を行った。各講義室の幅と奥行きは異なるが高さは 3,950mm で一定であった。講義室は室内全体に机と椅子が配置され、観察位置から見て正面に窓とブラインド、右側に黒板、左側に吸音板の壁、デッキ現しの天井で構成されていた。机上面の色が大規模講義室はライトグレー (xy 値: 0.3236, 0.3348)、小・中規模講義室はブラウン (xy 値: 0.416, 0.3882) と色合いが異なっていたため、後者の天井に白紙 (xy 値: 0.3144, 0.3299) を貼ることで見た目の差を小さくした。照明器具は黒板灯のみ消灯し、その他の調光不可のベースライトを全点灯した状態で実験を行った。室の移動に伴い廊下を歩く実験条件があり、被験者に極端な空間の明暗を感じさせないようにするため、廊下に設置されている照明も全点灯して実験を行った。ブラインドは閉めて実験を行ったが、隙間から日光が入らないように日没後から実験を開始した。実験空間の詳細を Fig.1 に、評価対象とした空間の画像を Photo1 に示す。照明器具の詳細を Table3 に示す。

Fig.1 Plan of lecture rooms and evaluation positions in Exp.I

Photo1 Fisheye photos of real space in Exp.I

Table3 Specifications of luminaires in Exp.I

Mark (in Fig.1)	Model	CCT	Luminous Flux per Luminaire	Power consumption	Number
	NFL40H-5K x2	5,000 K	2,260 lm	15.0 W	Small: 12 Medium: 24 Large: 40

2) VR 空間の概要：VR 空間作成フローを Fig.2 に示す。本研究では 3D CAD ソフトウェアの Rhinoceros 6 でモデル形状を作成し、3D 制作プラットフォームの Unreal Engine 4 で照明計算をして、完成した VR 空間を VR デバイスである Oculus Quest に表示した。

Fig.2 VR space creation flow

はじめに VR で再現する実空間において距離計などを用いて寸法を測定し、分光測色計 CM-700d (測定条件：2 度視野、受光条件：SCI 方式) を用いて物体表面の反射率と色度を測定した。また、空間の輝度分布も評価位置 (複数ある場合は中央の位置) の床上 1,500mm に三脚を用いて輝度測定システム (機材：Baumer カメラ TXG13c + FUJIFILM 魚眼レンズ FE185C046HA-1、プログラム：独立行政法人建築研究所 L-CEPT) を固定して測定した。

つぎに物体の実寸法をもとに Rhinoceros 6 で三次元モデルを作成した。三次元モデルは Unreal Studio の Datasmith を介して 3dm 形式で Unreal Engine 4(ver. 4.22.3)にインポートし、照明および物体表面に関する設定をした。照明は実空間で使用されている機器の ies データを取得して配光設定した。色温度は、HMD のディスプレイに表示される空間を見て微調整し、減衰半径は 1000.0 に設定した。物体表面の物理的性質に関する設定値は、初期設定値である鏡面性 0.5、粗さ 0.5、光沢 0.0 で設定した。物体表面の色は、分光測色計で測定した Yxy 値をもとに sRGB 値を算出して Unreal Studio 上の RGB 値として当てはめた後、照明計算をして HMD のディスプレイに表示し、VR 空間の輝度と事前に測定した実空間の輝度の差が小さくなるように Unreal Studio 上の V 値 (明度) の調整を繰り返し行い、V 値と連動して変化した RGB 値を最終的な設定値とした。光源部分だけ上記の設定に加えて、発光色の設定値を 100 とした。VR 空間は HMD の右レンズ前方に実空間で用いたものと同じ輝度測定システムを固定し、周囲を暗幕で覆って測定した。

最後に床・壁・天井など主要な箇所の輝度および全体の輝度バランスが実空間と VR 空間との間で大きな差がないことを、輝度分布画像により確認した。ただし、この作業を行うにあたって、本 HMD のディスプレイで出力することのできる最大輝度を調べたところ約 100cd/m² が出力限界であったため、その値を超える箇所は、V 値を 100 に設定するなどの処理を行い、可能な限り実空間の輝度との差を小さくした。光源部分は、上記の設定値に加えて、発光色の値を 100 に設定することで HMD のディスプレイ上で再現可能な最大輝度で呈示されるようにした。最終的に VR 空間として採用した輝度分布の比較画像の例を Fig.3 に示す。また、例として中規模講義室を再現した VR 空間のレンダリング結果を Fig.4 に示す。

Fig.3 Comparison of luminance distribution between real space and VR space

Fig.4 VR rendering of the medium lecture room

3.1.2 実験Ⅰ：実験条件

容積 3 水準、呈示空間 2 水準（実空間、VR 空間）の計 6 組の基準刺激に対して、容積 3 水準、呈示空間 1 水準（実空間）の計 3 組を比較刺激とし、同一組の比較は実験条件に含めず、各対について比較検証した。また、実験Ⅰでは実空間同士を比較する際、実空間内で異なる評価場所間を移動する行為が必然的に必要となる。これは VR 空間と実空間を比較する際は必要としない行為である。そこで、この行為が開放感評価に影響を与える程度を検証するために、VR 空間と実空間を比較する条件においても Table4 の●で示す 6 条件では、実空間同士の比較をする際と同様、実空間内で異なる評価場所間を移動する行為をさせた^{注2)}。呈示順は実施毎にランダムとした。基準刺激と比較刺激の組み合わせを Table4 に示す。

Table4 Experimental conditions in Exp.I

			Comparative stimulus		
			Real space		
			Large lecture room	Medium lecture room	Small lecture room
Standard stimulus	Real space	Large lecture room	-	○	○
		Medium lecture room	○	-	○
		Small lecture room	○	○	-
	VR space	Large lecture room	○	○, ●	○, ●
		Medium lecture room	○, ●	○	○, ●
		Small lecture room	○, ●	○, ●	○

○: Without movement, ●: With movement

3.1.3 実験Ⅰ：評価方法

実空間を観察・評価する際は、窓面と正対するように廊下側の壁を背に立ってもらった。その状態で体と頭の向きを固定し、眼球のみを動かして良いとした^{注3)}。評価位置・評価方向を Fig.1 の×,→に示す。VR 空間を観察する際も、実空間を観察・評価する場合と同じ評価位置・評価方向で、HMD を装着してもらった。移動を伴う条件の被験者の経路は、Fig.1 の---- に示す。評価尺度は既往研究¹⁾を参考に Stevens のベキ法則が成立するとして ME 法を採用した。

まず、実験者は広がり感の定義や実験の手順などについて被験者に説明して、その間に対象とする空間の照明環境に順応してもらった。また、事前に HMD のヘッドバンドと瞳孔間距離を呈示刺激が見やすいように調整してもらった。基準刺激→比較刺激が実空間→実空間、VR 空間→実空間となる条件から 1 つずつランダムに選定し、被験者に評価練習をしてもらった後、本実験に移行した。評価フローを Fig.5 に示す。被験者にはまず基準刺激を 20 秒間観察してもらい、20 秒経過した際の開放感を記憶してもらおう。続いて実験者が比較刺激を準備する。条件変更中や移動中の空間の情報が評価に影響することを抑えるため、被験者には明暗のみが分かる半透明の厚手の透写紙でレンズ部を覆ったメガネをかけ、目は開けて待機してもらおう。移動を伴う条件は、実験者が基準刺激となる空間から比較刺激となる空間まで被験者を引率した。比較刺激に変更ができたら実験者は被験者にメガネを外すよう合図し、比較刺激を 20 秒間観察してもらおう。20 秒経過した際の比較刺激が記憶した基準刺激を基準値 100 とした場合にどの程度であるか正の数値で回答してもらおう。これを実験条件数繰り返す。実験Ⅰは 1 人ずつ実施した。

Fig.5 Subject evaluation flow

3.2 実験Ⅱ

3.2.1 実験Ⅱ：実験空間の概要

実験Ⅱは、大学の講堂（Table2: Auditorium）で実施した。窓面はなく、空間内には客席が 203 席あった。照明器具はダウンライトとアジャスタブルダウンライトを合わせて 3 種類使用した。照明器具の詳細を Table5 に、実験空間の詳細を Fig.6 に、評価対象とした空間の画像を Photo2 に示す。

実空間と比較を行う VR 空間の作成は 3.1.1 の 2)と同様の手順で行い、3 段階の眼前照度に対応する VR 空間を作成した。Fig.7 に VR 空間のレンダリング結果の例を示す。

Fig.6 Plan of auditorium and evaluation positions in Exp.II

Photo2 Fisheye photo of the auditorium in Exp.II

Fig.7 VR rendering of the auditorium in Exp.II

Table5 Specifications of luminaires in Exp.II

Mark (in Fig.6)	Model	CCT	Luminous Flux per Luminaire	Power consumption	Number
○	NNQ35625LD9	3,000 K	1,510 lm	15.9 W	5
●	NNQ35635LD9	3,000 K	2,905 lm	33.7 W	34
▲	NNQ35645LD9	3,000 K	2,380 lm	28.7 W	14

3.2.2 実験Ⅱ：実験条件

眼前鉛直面照度 3 水準、呈示空間 2 水準（実空間,VR 空間）の計 6 組の基準刺激に対して、眼前鉛直面照度 3 水準、呈示空間 1 水準（実空間）の計 3 組を比較刺激として、同一組の比較は実験条件に含めず、各対について比較検証した。呈示順はランダムになるように作成した。基準刺激と比較刺激の組み合わせを Table6 に示す。ただし、Table6 で VR 空間の眼前鉛直面照度の欄に示された値は、便宜上、それぞれの VR 空間を再現する際に参照した実空間での眼前鉛直面照度を示しており、HMD を装着した際にそれぞれの VR 空間から受ける眼前鉛直面照度を示しているわけではないことに留意する必要がある（以下、Table 8/10/12/14 でも同様）。

Table6 Experimental conditions in Exp.II				Comparative stimulus		
				Real space		
				Vertical illuminance in front of the eyes		
				30 lx	60 lx	120 lx
Standard stimulus	Real space	Vertical illuminance in front of the eyes	30 lx	-	○	○
			60 lx	○	-	○
			120 lx	○	○	-
	VR space	Vertical illuminance in front of the eyes	30 lx	○	○	○
			60 lx	○	○	○
			120 lx	○	○	○

3.2.3 実験Ⅱ：評価方法

被験者ごとに視点高さが 1,500mm になるように椅子の高さを調整して、常に椅子に座った状態で実空間および VR 空間の観察・評価をしてもらった。評価方向は空間の長辺方向として、体の向きを固定し、首は自由に動かして観察して良いとした。実験Ⅱの被験者の評価位置・評価方向をそれぞれ Fig.6 の×,→ に示す。

評価は、3.1.3 に示す実験Ⅰの手順と同様に行ったが、実験Ⅱでは移動を伴う実験条件はなく、Fig.6 に示すように横並びに 1,000mm 間隔で評価位置を設定し、3 人一組で実施した。

3.3 実験Ⅲ

3.3.1 実験Ⅲ：実験空間の概要

実験Ⅲは、個人住宅のリビング空間（Table2: Living room）で実施した。窓面はシャッターとカーテンを閉めることにより日光を完全に遮蔽した。照明器具はリニア形の LED の照明ダクト付ベースライトを仮設で設置した。実験空間の詳細を Fig.8 に、照明器具の詳細を Table7 に、評価対象とした空間の画像を Photo3 に示す。

実空間と比較を行う VR 空間の作成は 3.1.1 の 2)と同様の手順で行い、3 段階の照明条件に対応する VR 空間を作成した。Fig.9 に VR 空間のレンダリング結果の例を示す。

3.3.2 実験Ⅲ：実験条件

眼前鉛直面照度 3 水準、呈示空間 2 水準（実空間,VR 空間）の計 6 組の基準刺激に対して、眼前鉛直面照度 3 水準、呈示空間 1 水準（実空間）の計 3 組を比較刺激として、同一組の比較は実験条件に含めず、各対について比較検証した。呈示順はランダムになるように作成した。基準刺激と比較刺激の組み合わせを Table8 に示す。

Fig.8 Plan of the living room and evaluation positions in Exp.III

Photo3 Fisheye photo of the living room in Exp.III

Fig.9 VR rendering of the living room Exp.III

Table7 Specifications of luminaires in Exp.III

Mark (in Fig.8)	Model	CCT	Luminous Flux per Luminaire	Power consumption	Number
□	XLX450NJWT RZ9	4,000 K	4,260 lm	32.3 W	2

Table8 Experimental conditions in Exp.III

				Comparative stimulus		
				Real space		
				Vertical illuminance in front of the eyes		
Standard stimulus	Real space	Vertical illuminance in front of the eyes	30 lx	-	○	○
			120 lx	○	-	○
			360 lx	○	○	-
	VR space	Vertical illuminance in front of the eyes	30 lx	○	○	○
			120 lx	○	○	○
			360 lx	○	○	○

3.3.3 実験Ⅲ：評価方法

評価姿勢は 3.2.3 に示した実験Ⅱと同様であり、実験Ⅲにおける被験者の評価位置・評価方向をそれぞれ Fig.8 の×,→に示す。

評価は 3.1.3 に示した実験Ⅰの手順と同様に行ったが、実験Ⅲでは移動を伴う実験条件はなく、Fig.8 に示すように横並びに 1,000mm 間隔で評価位置を設定し、2 人一組で実施した。

3.4 実験Ⅳ

3.4.1 実験Ⅳ：実験空間の概要

実験Ⅳは、大学の小部屋（Table2: Small space）で実施した。窓面はガラスにアルミホイルを貼り、日光を完全に遮蔽したうえで白紙を貼り、壁の輝度バランスを調整した。家具は空間内に配置しなかった。照明器具はリニア型の LED の照明ダクト付ベースライトを使用した。実験空間の詳細を Fig.10 に、照明器具の詳細を Table9 に、評価対象とした空間の画像を Photo4 に示す。

実空間と比較を行う VR 空間の作成は 3.1.1 の 2)と同様の手順で行い、3 段階の眼前鉛直面照度に対応する VR 空間を作成した。Fig.11 に VR 空間のレンダリング結果の例を示す。

Fig.10 Plan of small space and evaluation position in Exp.IV

Photo4 Fisheye photo of the small space in Exp.IV

Fig.11 VR rendering of the small space in Exp.IV

Table9 Specifications of luminaires in Exp.IV

Mark (in Fig.10)	Model	CCT	Luminous Flux per Luminaire	Power consumption	Number
	XLX450NJWT RZ9	4,000 K	4,260 lm	32.3 W	2

3.4.2 実験 IV：実験条件

眼前鉛直面照度 3 水準、呈示空間 2 水準（実空間,VR 空間）の計 6 組の基準刺激に対して、眼前鉛直面照度 3 水準、呈示空間 1 水準（実空間）の計 3 組を比較刺激とした。照明設定変更時に被験者がメガネを掛ける行為が開放感評価に影響を与える可能性を検証する目的で、実験 IV において同一照明設定の実空間を比較する実験条件も含めて^{注4)}、各対について比較検証した。同一刺激の比較による呈示順序は実施ごとにランダムになるように作成した。基準刺激と比較刺激の組み合わせを Table10 に示す。

Table10 Experimental conditions in Exp.IV

				Comparative stimulus		
				Real space		
				Vertical illuminance in front of the eyes		
				60 lx	120 lx	240 lx
Standard stimulus	Real space	Vertical illuminance in front of the eyes	60 lx	○	○	○
			120 lx	○	○	○
			240 lx	○	○	○
	VR space	Vertical illuminance in front of the eyes	60 lx	○	○	○
			120 lx	○	○	○
			240 lx	○	○	○

3.4.3 実験 IV：評価方法

評価姿勢は 3.2.3 に示した実験 II と同様であり、実験 IV における被験者の評価位置・評価方向をそれぞれ Fig.10 の X, → に示す。評価は 3.1.3 に示した実験 I の手順と同様に行ったが、実験 IV では移動を伴う実験条件はなく、1 人ずつ実施した。同一照明設定の実空間を比較する場合も呈示刺激変更時にメガネをかけてもらい、一度照明環境を変更した後もとの眼前鉛直面照度に戻した。

3.5 実験 V

3.5.1 実験 V：実験空間の概要

実験 V は、大学の中部屋（Table2: Medium space）で実施した。窓面はガラスにアルミホイルを貼り、星光を完全に遮蔽してブラインドを閉じた。家具は空間内に配置しなかった。照明器具は長方形のベースライトと、ダウンライトを使用した。実験空間の詳細を Fig.12 に、照明器具の詳細を Table11 に、評価対象とした空間の画像を Photo5 に示す。

実空間と比較を行う VR 空間の作成は 3.1.1 の 2) と同様の手順で行い、2 段階の眼前鉛直面照度に対応する VR 空間を作成した。Fig.13 に VR 空間のレンダリング結果の例を示す。

Fig.12 Plan of medium space and evaluation positions in Exp.V

Photo5 Fisheye photo of the medium space in Exp.V

Fig.13 VR rendering of the medium space Exp.V

Table11 Specifications of luminaires in Exp.V

Mark (in Fig.12)	Model	CCT	Luminous Flux per Luminaire	Power consumption	Number
	FHR-41407M- PH9	5,000 K	4,600 lm	46.0 W	20
	LEDD-66008ML- LD1	2,700 K	270 lm	7.4 W	8

3.5.2 実験 V：実験条件

眼前鉛直面照度 2 水準、呈示空間 2 水準（実空間,VR 空間）の計 4 組の基準刺激に対して、眼前鉛直面照度 5 水準、呈示空間 1 水準（実空間）の計 5 組を比較刺激として、同一組の比較は実験条件に含めず、各対について検証を行った。眼前鉛直面照度 30lx,60lx の条件ではダウンライトを使用し、眼前鉛直面照度 240lx,480lx,720lx の条件ではベースライトを使用して照明設定を行った。呈示順序は実施ごとにランダムになるように作成した。基準刺激と比較刺激の組み合わせを Table12 に示す。

3.5.3 実験Ⅴ：評価方法

評価姿勢は 3.2.3 に示した実験Ⅱと同様であり、実験Ⅴにおける被験者の評価位置・評価方向をそれぞれ Fig.12 のX、→に示す。

評価は 3.1.3 に示した実験Ⅰの手順と同様に行ったが、実験Ⅴでは移動を伴う実験条件はなく、Fig.12 に示すように横並びに 1,000mm 間隔で評価位置を設定し、2 人一組で実施した。

Table12 Experimental conditions in Exp.V

				Comparative stimulus				
				Real space				
				Vertical illuminance in front of the eyes				
				30 lx	60 lx	240 lx	480lx	720lx
Standard stimulus	Real space	Vertical illuminance in front of the eyes	240 lx	○	○	-	○	○
			480 lx	○	○	○	-	○
	VR space	Vertical illuminance in front of the eyes	240 lx	○	○	○	○	○
			480 lx	○	○	○	○	○

3.6 実験Ⅵ

3.6.1 実験Ⅵ：実験空間の概要

実験Ⅵは、国立研究開発法人建築研究所の建築環境実験棟の模擬オフィス（Table2: Divisible space）で実施した。窓面はロールスクリーンとブラインドを閉めた上、カーテンで四方を囲い、昼光は完全に遮蔽した。家具は空間内に配置しなかった。室中央には空間を仕切るためのパーティションカーテンを設置した。照明器具は天井埋め込み型の長方形の LED ベースライトを使用した。実験空間の詳細を Fig.14 に示し、照明器具の詳細を Table13 に示す。評価対象とした空間の画像を Photo6 に示す。

実空間と比較を行う VR 空間の作成は 3.1.1 の 2)と同様の手順で行い、室中央で仕切った空間と仕切らない空間に対して各 3 段階の眼前鉛直面照度に対応する VR 空間を作成した。Fig.15 に VR 空間のレンダリング結果の例を示す。

Fig.14 Plan of divisible space and evaluation positions in Exp.VI

Table13 Specifications of luminaires in Exp.VI

Mark (in Fig.14)	Model	CCT	Luminous Flux per Luminaire	Power consumption	Number
□CL	XLX460V/ENC-RZ9	5,000 K	6,680 lm	46.3 W	12

With partition (Smaller space)

Without partition (Larger space)

Photo6 Fisheye photos of the divisible space in Exp.VI

With partition (Smaller space)

Without partition (Larger space)

Fig.15 VR renderings of the divisible space in Exp.VI

3.6.2 実験Ⅵ：実験条件

眼前鉛直面照度 3 水準、容積 2 水準、呈示空間 2 水準（実空間,VR 空間）の計 12 組の基準刺激に対して、眼前鉛直面照度 3 水準、容積 2 水準、呈示空間 1 水準（実空間）の計 6 組を比較刺激として同一組の比較は実験条件に含めず、各対について検証を行った。呈示順序は実施ごとにランダムとした。基準刺激と比較刺激の組み合わせを Table14 に示す。

Table14 Experimental conditions in Exp.VI

				Comparative stimulus					
				Smaller room			Larger room		
				Real space			Real space		
				Vertical illuminance in front of the eyes			Vertical illuminance in front of the eyes		
Standard stimulus	Smaller room	Real space	Vertical illuminance in front of the eyes	30 lx	60 lx	120 lx	30 lx	60 lx	120 lx
				-	○	○	○	○	○
				○	-	○	○	○	○
		VR space	Vertical illuminance in front of the eyes	○	○	-	○	○	○
				○	○	○	○	○	○
				○	○	○	○	○	○
	Larger room	Real space	Vertical illuminance in front of the eyes	○	○	○	-	○	○
				○	○	○	○	-	○
				○	○	○	○	○	-
		VR space	Vertical illuminance in front of the eyes	○	○	○	○	○	○
				○	○	○	○	○	○
				○	○	○	○	○	○

3.6.3 実験Ⅵ：評価フロー

評価姿勢は 3.2.3 に示した実験Ⅱと同様であり、実験Ⅵにおける被験者の評価位置・評価方向をそれぞれ Fig.14 のX、→に示す。

評価は 3.1.3 に示した実験Ⅰの手順と同様に行った。実験Ⅵでは移動を伴う実験条件はなく、Fig.14 に示すように横並びに 1,000mm 間隔で評価位置を設定し、2 人一組で実施した。

4. 結果

4.1 VR空間の再現性

作成したVR空間が、光環境としての見地から、実空間をどの程度よく再現することができていたかを検証するため、実験I~VIで用いた実空間とVR空間を測定した輝度の比較を行った。光源部分を含めて算出した平均輝度の実空間とVR空間の比較をFig.16に、光源部分を含めずに算出した平均輝度の実空間とVR空間の比較を、Fig.17に示す。横軸は、VR空間を作成した実験I~VIの各実験条件を示している。第一縦軸は算術平均輝度で、棒グラフが対応している。また、第二縦軸は(実空間の算術平均輝度－VR空間の算術平均輝度)÷(実空間の算術平均輝度)より算出した相対誤差を示しており、折れ線グラフが対応している。輝度分布の取得は実空間とVR空間ともに3.1.1の2)と同様の手順で行った。実空間の測定範囲に対してVR空間の測定可能範囲が狭かったため、実空間の平均輝度には、VR空間の測定可能範囲にあわせて範囲を絞った後に算出した。

Fig.16 Average luminance(antilogarithm) and relative error including light source

Fig.17 Average luminance(antilogarithm) and relative error excluding light source

光源部分を含めて算出した平均輝度は、すべての条件において実空間のほうがVR空間よりも大きかった。相対誤差も約0.4~0.9と、全体的に差が大きいことが分かる。VR空間の場合は光源部分を含めずに算出した平均輝度は光源部分を含めて算出した平均輝度と大きな差がないのに対し、実空間の場合は光源部分を含めずに算出した平均輝度は光源部分を含めて算出した平均輝度よりも小さくなっている。さらに光源を含めない平均輝度について、条件ごとに実空間とVR空間を比較すると光源を含めた場合よりも小さくなり、相対誤差の値は約0.0~0.25と小さくなっている^{注5)}。VR空間作成誤差とは別に、実験Vの眼前照度480lxなどは壁面輝度が100cd/m²を超えていたため相対誤差が比較的大きい。以上より、VR空間に

おける輝度の再現性について、Oculusの出力限界である100cd/m²を超えるような高輝度部分、主に照明光源の再現はできないが、そのほかの床・壁・天井などの主要な箇所を含む全体的な輝度バランスはおおよそ再現することができていたといえる。

4.2 被験者の評価結果

基準刺激が実空間の場合とVR空間の場合で開放感評価が異なるかを検証するため、各被験者の開放感の評価値から箱ひげ図Fig.18を作成した。縦軸は開放感の評価値を常用対数で示した。つまり、本研究で用いたME法の基準値100は常用対数では2.0として示されている。横軸は各実験の各条件を示しているが、基準刺激の眼前照度と比較刺激の眼前照度がともに同じものをペアとし、左側に灰色塗りで基準刺激が実空間の場合の箱ひげ図を、右側に白塗りで基準刺激がVR空間の場合の箱ひげ図となるように並べた。例えば、実験IIのグラフで一番左のペアでは、左は基準刺激が実空間で眼前照度30lxのもの、右は基準刺激がVR空間で眼前照度が30lxのものであり、比較刺激はともに実空間で眼前照度が60lxのものである。箱ひげ図は(第一四分位数・1.5×四分位範囲)と(第三四分位数+1.5×四分位範囲)の範囲に収まらない値を外れ値として記号○、○で個別に表示している。ただし、四分位数は中央値を排除して計算している。最大値と最小値は外れ値を除いたデータ内の最大値と最小値であり、それぞれひげの上端・下端がそれらを示している。平均値は×マークの交点で示されている。

各ペアに対して、母集団での正規性および等分散性を考慮したうえでWilcoxon検定あるいはWelchのt検定を行った。この検定には各ペアそれぞれ箱ひげ図上の外れ値も含めた全被験者評価値を用いた。基準刺激と比較刺激間で容積が変化する実験Iおよび実験VIに着目すると、評価値の個人差は比較的大きくなる傾向にあるがペア同士での平均値に大きな差がなく、その24ペアに対して有意差検定をしても帰無仮説「差はない」を棄却するものはないため、容積の変化に関しては基準刺激としてVR空間を用いることは有用であると考えられる。基準刺激と比較刺激間で光環境のみが変化する実験II、実験III、実験IV、実験Vおよび実験VIでは、評価値の個人差は比較的小さく、全体的にはペア同士は同じような傾向を示しており、41ペアに対して有意差検定を行った。有意水準5%で帰無仮説を棄却したものは実験IIIのうちの3ペア、呈示する眼前鉛直面照度が基準刺激→比較刺激で120lx→30lx、30lx→360lx、30lx→120lxとなる条件であり、それぞれp値は0.0006、0.022、0.036となったが、その他のペアに関しては帰無仮説は棄却されなかった。以上より、実験IIIの3ペアを除き、基準刺激→比較刺激で眼前鉛直面照度が同じ条件のVR空間→実空間、実空間→実空間のペア間には開放感の評価値に有意差がないと結論付けることができる。

実験IIIにおいて有意差があるという結果になったペアが存在した理由としてFig.16とFig.17からも読み取れるように、他の実験と比べて光源部分の影響が大きいために空間全体としての輝度の再現性が低く、相対誤差も大きかったからであると考えられる。特に、120lx→30lxのように被験者評価値が2.0前後で分かれた条件について精査すると、光源部分を含めた30lxの実空間の平均輝度(17.1cd/m²)が光源部分の影響により、光源部分を含めた120lxのVR空間の平均輝度(8.2cd/m²)よりも大きく、二倍以上^{注6)}となっていた。

5. 総括

本研究では HMD として Oculus Quest を採用し、全般照明方式の無窓の室内空間を対象として HMD による VR を用いた開放感評価の妥当性を検証するため、VR 空間作成と被験者実験を行った結果、以下の結果を得た。HMD を用いて VR 空間を提示する場合、HMD のディスプレイの出力限界である輝度約 100cd/m^2 以上の箇所は再現できなかった。今回の実験の場合は輝度 100cd/m^2 を超えたのは主に照明器具の光源部分である。しかし、VR 空間の輝度分布を実空間の輝度分布と照らし合わせながら照明および物体表面に関する設定を調整すれば、VR 空間と実空間の光源部分を除いた平均輝度の相対誤差が小さくなることから、 100cd/m^2 を超える部分を除いて、全体的な輝度バランスはおおよそ対象とする実空間の輝度分布を再現することが可能であったと言える。ある実空間とそれを

再現した VR 空間を基準刺激とし、それぞれに対してある実空間を同一の比較刺激として、被験者実験により ME 法で開放感評価をしてもらった結果、その 65 ペアに対して有意水準 5% の有意差検定をすると帰無仮説を棄却しない条件は 62 ペアであった。有意差のある条件が 3 ペア存在はしたが、それらは HMD による VR では再現することの困難な光源部分の影響が大きいためであると考えられ、輝度の再現性に極端な問題が発生しない条件であれば、VR 空間を開放感評価の基準刺激として使用することはおおよそ可能であると考えられる。今後は様々な形状や光・視環境を有する空間に対して包括的な開放感予測式の構築のために研究を進めていく。VR 空間を基準刺激として用いることによって、サイズや構成の異なる空間をたとえ離れていても間接的に比較することができるようになるため、開放感を同一の評価軸で予測していくことが可能となろう。

Fig.18 Box plot for each experiment

謝辞

実験に際しまして、東京理科大学理工学研究科建築学専攻吉澤研究室岡田雅大氏に多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

本研究は JSPS 科学研究費（基盤研究(C)No.19K04737）の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Inui, M., Miyata, T. and Watanabe, K.: EVALUATION OF SPACIOUSNESS (1), Transactions of the Architectural Institute of Japan, No. 192, pp. 49-55, 1972. 2 (in Japanese)
乾正雄, 宮田紀元, 渡辺圭子: 開放感に関する研究・1 (視環境における開放感の位置づけ, 予備実験), 日本建築学会論文報告集, 第 192 号, pp. 49-55, 1972. 2
- 2) Inui, M., Miyata, T. and Watanabe, K.: EVALUATION OF SPACIOUSNESS (2), Transactions of the Architectural Institute of Japan, No. 193, pp. 51-57, 1972. 3 (in Japanese)
乾正雄, 宮田紀元, 渡辺圭子: 開放感に関する研究・2 (人工空間による模型実験), 日本建築学会論文報告集, 第 193 号, pp. 51-57, 1972. 3
- 3) Inui, M., Miyata, T. and Watanabe, K.: EVALUATION OF SPACIOUSNESS (3), Transactions of the Architectural Institute of Japan, No. 194, pp. 39-44, 1972. 4 (in Japanese)
乾正雄, 宮田紀元, 渡辺圭子: 開放感に関する研究・3 (自然空間による実験, 現場実験, 許容限度), 日本建築学会論文報告集, 第 194 号, pp. 39-44, 1972. 4
- 4) Uchida, S.: AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE SENSE OF VISUALLY-CLOSED SPACES (Part-1), Transactions of the Architectural Institute of Japan, No. 282, pp. 113-122, 1979. 8 (in Japanese)
内田茂: 閉空間に対する感覚量に関する実験的研究(1), 日本建築学会論文報告集, 第 282 号, pp. 113-122, 1979. 8
- 5) Komiyama, A., Hashimoto, K., Hatsumi, M. and Takahashi, T.: EXPERIMENTAL STUDY ON EVALUATION OF VOLUME AND SPACIOUSNESS OF INTERIOR SPACE Fundamental study for spatial planning based on volume (Part1), Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ), No. 496, pp. 119-124, 1997. 6 (in Japanese)
込山敦司, 橋本都子, 初見学, 高橋鷹志: 室空間の容積と印象評価に関する実験的研究・容積を指標とした空間計画のための基礎研究 (その 1) -, 日本建築学会計画系論文集, 第 496 号, pp. 119-124, 1997. 6
- 6) Komiyama, A., Hashimoto, K., Hatsumi, M. and Takahashi, T.: EXPERIMENTAL STUDY ON EVALUATION OF VOLUME AND SPACIOUSNESS OF INTERIOR SPACE Fundamental study for spatial planning based on volume (Part2), Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ), No. 508, pp. 99-104, 1998. 6 (in Japanese)
橋本都子, 込山敦司, 初見学, 高橋鷹志: 室空間の容積と印象評価に関する実験的研究・容積を指標とした空間計画のための基礎研究 (その 2) -, 日本建築学会計画系論文集, 第 508 号, pp. 99-104, 1998. 6
- 7) Miyake, H., Yamamoto, T., Yamaguchi, H. and Yoshizawa, N.: EFFECTS OF LIGHTING ON PERCEPTION OF SPACIOUSNESS, Proceedings of the 29th CIE SESSION, pp. 1454-1462, 2019. 5
- 8) Yoshizawa, N., Inamoto, J., Hirate, K., Oyama, Y. and Ono, K.: A STUDY ON THE REPRODUCTION OF THE ACTUAL SPACE ON THE VIRTUAL SIMULATION SYSTEM FOR THE RESIDENTIAL ENVIRONMENT The evaluation on brightness, space and length perception and a sense of reality, Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ), No. 550, pp. 87-93, 2001. 12 (in Japanese)
吉沢望, 稲本淳平, 平手小太郎, 大山能永, 小野浩史: パーチャルリアリティを用いた住環境提示システムにおける実空間再現性の検討, 日本建築学会計画系論文集, 第 550 号, pp. 87-93, 2001. 12
- 9) Ohkura, M., Komatsu, Y., Shimada, Y., Shibata, T., Nakayama, S., Aoto, T. and Watanabe, Y.: COMPARISON OF THE IMPRESSION OF

SPACES IN INCLINED PROJECTION DISPLAY SYSTEM The difference of the experimental results between virtual environment and real environment, Journal of Japan Society of Kansei Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 45-51, 2006. 5 (in Japanese)

大倉典子, 小松由枝, 嶋田裕希, 柴田卓巳, 中山慎一郎, 青砥哲朗, 渡辺洋子: 傾斜型投影ディスプレイシステムにおける空間の印象の比較 実環境とバーチャル環境との実験結果の差異, 日本感性工学研究論文集, 第 6 巻, 第 2 号, pp.45-51, 2006. 5

- 10) Yokoi, A. and Saito, M.: A STUDY OF EVALUATION ON PSYCHOLOGICAL EFFECTS OF VIRTUAL REALITY IN A RESIDENTIAL ENVIRONMENT, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 78, No. 683, pp. 1-7, 2013. 1 (in Japanese)

横井梓, 齋藤美穂: VR 空間における心理的影響の評価に関する検討 大型スクリーンを用いた居住空間シミュレーションにおける VR 空間の感性評価, 日本建築学会環境系論文集, 第 78 巻, 第 683 号, pp. 1-7, 2013. 1

- 11) Ono, K., Aoshima, C., Morikawa, Y., Yoshizawa, N. and Hirate, K.: VERIFYING THE REALITY, THE IMMERSION AND THE EFFICIENCY OF A DESIGNING TOOL ACCORDING TO DIFFERENT PRESENTATION EQUIPMENT A study on the reproduction of the actual space on the virtual simulation system for the residential environment design Part 2, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), No. 583, pp. 57-63, 2004. 9 (in Japanese)

提示装置の違いによる現実感・没入感・設計ツールとしての有効性の検証 -バーチャルリアリティを用いた住環境提示システムにおける実空間再現性の検討 その 2-, 日本建築学会環境系論文集, 第 583 号, pp. 57-63, 2004. 9

- 12) Pedro, J., Maria, I. and Angel, L.: Correlation between perception of color, shadows, and surface textures and the realism of a scene in virtual reality, Journal of the Optical Society of America A, Vol. 35, No. 4, 2018. 4

- 13) Yamamoto, T., Miyake, H., Yamaguchi, H. and Yoshizawa, N.: Feasibility Study of Spaciousness Experient using Virtual Reality with Head Mount Display, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-I, pp. 537-540, 2020. 7 (in Japanese)

山本竜也, 三宅博行, 山口秀樹, 吉澤望: HMD 型 VR 装置を用いた室内空間における広がり感評価の妥当性検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-I, pp. 537-540, 2020. 7

- 14) <https://developer.oculus.com/design/oculus-device-specs/> (accessed 2020. 1. 2)

注

- 注1) 今回の実験は開口を遮蔽した空間のみで行ったが、被験者が「開放感」という語を日常語としてのそれと混同してしまう事を避けるため設問には「広がり感」を使用し、1 章に記載した「開放感」と同じ定義を実験開始時に説明した。
- 注2) 実験 I において、室の移動が開放感評価にもたらす影響を検証したが検定の結果、有意差はなかったため、解析では他条件と統一する目的で基準刺激を VR 空間、比較刺激を実空間とした条件に関しては呈示刺激変更間に移動を伴わない条件の被験者評価を採用した。
- 注3) 多くの被験者にとって頭の固定は難しく、実際には頭を動かしながら観察をしていた。
- 注4) Fig.18 : Experiment IV から読み取れるように、同一の照度設定の実空間を比較した場合は、照明設定時に被験者がメガネを掛けても両者の評価に有意差は認められなかった。そのため以下の分析はメガネを掛ける行為は開放感評価に影響は与えなかったものとみなして分析を進める。
- 注5) 実験 V の眼前照度 480lx など、条件によっては、光源以外の場所で壁面等が 100cd/m² を超える箇所が存在していたために、相対誤差が比較的大きく実空間の方が平均輝度（光源を除く）が若干高くなっている。
- 注6) 参考文献 7) に示されているように、空間の明るさが開放感に影響が及ぼしていた可能性があるが、詳細な検討は今後の課題とする。なお、基準刺激をある VR 空間とし、比較刺激をその VR 空間が再現した実空間の眼前鉛直面照度設定より一段階小さい眼前鉛直面照度設定の実空間とした場合、(比較刺激の平均輝度) ÷ (基準刺激の平均輝度) の値は、他の条件の組み合わせでは 1.5 以下に収まっていた。

QUANTIFICATION OF SPACIOUSNESS OF INTERIORS CONSIDERING LIGHTING AND
VISUAL ENVIRONMENT (PART 1) :
VERIFICATION OF SPACIOUSNESS EVALUATION USING VIRTUAL REALITY WITH HEAD
MOUNTED DISPLAY IN CLOSED INTERIOR SPACES

Tatsuya YAMAMOTO^{*1}, *Hiroyuki MIYAKE*^{*2}, *Hideki YAMAGUCHI*^{*3},
and Nozomu YOSHIZAWA^{*4}

^{*1} NIHON SEKKEL, Inc.(Grad. Student, Dept. of Architecture, Tokyo University of Science)

^{*2} Arup, Doctoral Course, Dept. of Architecture, Tokyo University of Science

^{*3} Senior Researcher, Building Dept., National Institute for Land and Infrastructure Management, MLIT, Dr.Eng.

^{*4} Prof., Dept. of Architecture, Tokyo University of Science, Dr.Eng.

While improvements in the energy-saving performance of buildings are required, productivity improvements and health management are also getting more necessary due to work style reforms. This trend demands the development of new methods which enable us to quantitatively assess the physiological and psychological quality of the built environment from the design stage. In terms of the light and visual environment, spaciousness is one of the factors that affect the comfort, intellectual productivity, and health of users of interiors.

In this research, definition of "spaciousness" by Inui will be used, but the purpose of this study was to propose a comprehensive quantitative spaciousness evaluation index of the interiors, including spaces of different sizes and shapes, considering various factors related to light and visual environment.

In recent years, technological developments have made complex data processing possible and expanded the range of experiment methods. VR technology is one of them, and there are many merits of using it in promoting spaciousness evaluation, such as to virtually compare spaces that are separated from each other by a great distance. This research aims to verify the validity of using VR with HMDs for spaciousness evaluation, through subject experiments in six real spaces with different volumes and usages. Volumes ranged from a minimum of 35 m³ to a maximum of 1,969 m³, and vertical illuminance ranged from 30 lx to 720 lx at the subject's observation position. Openings were blocked from line of sight and daylight was shut off by closing the blinds. VR spaces with several lighting environments for each space were reproduced. In experiments using ME method, we compared and verified the cases where the real space and the VR space were used as the reference stimulus for the comparative stimulus of the real space. Major findings are as follows:

1) In order to verify how well the VR space could reproduce the real space from the point of view of the optical environment, we compared the luminance of the targeted real space and the VR space, and found that high-luminance parts could not be reproduced on HMD: Oculus Quest, which has an output limit of approximately 100 cd/m² or higher in luminance. However, the overall luminance balance, including main parts such as the floor, walls, and ceiling, could be well reproduced on VR display.

2) There were no statistically significant differences (5% level) in 62 pairs among 65 pairs. As to the remaining 3 pairs, the light source had a large effect on the reproducibility of luminance and the relative error from the real space was relatively large. In particular, when the subject's evaluations were divided around 2.0, as in Experiment III, where the reference stimulus was 120lx and the comparative stimulus was 30lx, a reversal phenomenon occurs in which the average luminance of the real space of 30 lx including the light source is larger than that of the VR space of 120 lx including the light source due to the influence of the large light source. In conclusion, it is approximately possible to use the VR space, which does not cause luminance problems, as a reference stimulus for spaciousness evaluation.

(2020 年 11 月 10 日原稿受理, 2021 年 1 月 27 日採用決定)