VR 空間における高さ知覚の特性把握に基づく VR 酔いの低減仮説の検証
—VR 建築理論に向けた空間デザインの基礎研究—

Verification of the hypothesis for VR sickness reduction based on the characteristics of height perception in virtual reality space
—A research on space design for virtual rearity architectural theory—

○村上　雅也 [*1]，小池田　樹 [*2]，横田　芙実子 [*1]，神長　伸幸 [*3]，山田　悟史 [*4]
Masaya Murakami[*1], Itsuki Koikeda[*2], Fumiko Yokota[*3], Nobuyuki Jintyo[*4] and Satoshi Yamada[*5]

*1 立命館大学　理工学研究科　環境都市専攻　博士課程前期
Undergraduate,Dept of Architecture and Urban Design, Ritsumeikan Univ.
*2 立命館大学　理工学部　建築都市デザイン学科
Undergraduate,Dept of Architecture and Urban Design, Ritsumeikan Univ.
*3 ミイダス株式会社 HR サイエンス研究所
Midas Co., LTD
*4 立命館大学　理工学部建築都市デザイン学科　任期制講師・博士（工学）
Lecture, Dept, of Architecture and Urban Design, Ritsumeikan Univ., Dr. Eng.

キーワード： VR, VR 酔い，建築理論，VR 建築
Keywords: Virtual reality ; VR sickness ; Architectural theory ;Virtual reality architecture

1. はじめに

VR 技術は，没入感ある体験ができる技術として広く認知されている。契機は HMD デバイスの発展と VR 空間の制作技術の普及である。価格・技能の両面の制作コストが下がったことにより，多種多様な分野で“没入感”を利用した実験や体験が頻繁に行われている。建築分野では，BIM/CG で作った設計段階の建築物を仮想空間で体験するという例が挙げられる。これは現実空間での体験に近い空間体験を得ることで，印象やサイズ感を検討することを目的としている。また設計業務従事者による活用だけでなく，モデルルームの代替や，クライアントに対するプレゼン方法としても一般的に広まりつつある。また一般の人々は，ゲームを通じて VR を体験する人が増えるなど，幅広い層の人々が VR を体感することが容易になっている。HMD を用いた VR は既に普及段階といえる。

一方で課題もある。VR 空間に対応した設計理論の未成熟である。例えば，VR 空間におけるパーソナルスペースは現実空間とは異なるため，VR 版として寸法体系を再構築する必要がある。寸法体系を一例に，快適な VR 空間を設計するための指針は，VR 空間の設計と普及に有用である。本研究はこのような高まる社会的背景と課題に応える VR 版建築理論の構築を目指す基礎研究である。

2. 研究対象の着想に至った経緯，既往研究，研究目的

本研究は VR 空間における高さの知覚に着目する。VR 空間を体験した際の感想には「ふわふわしている，浮遊感がある」といった例が多い。筆者らが制作した VR カフェにおいても，アバターの目線を利用者の目線に合わせて設定したにも拘わらず「床や机からの高さ感覚に違和感があり浮遊感がある」といった意見が挙げられた。またカメラの高さを僅かに低くするだけでも机の大きさが急に大きく感じたり，その逆の意見も挙げられた。これは「VR 空間における高さの知覚は現実空間と異なる」という仮説を示唆している。つまり，現実空間と VR 空間の知覚対象の寸法が同じであっても，現実空間とは異なる高さを認知する可能性である。また，VR 空間での物体の高さの変更と寸法知覚の変化は，現実空間での高さ変更による寸法知覚の変化より大きいという可能性でもある。

これらの空間知覚の相違について筆者ら [1)] は先行研究を行っている。本研究は先行研究で得た知見と仮説に基づいている。得られた知見は「現実空間と VR 空間における視覚的・身体的な人の高さ感覚の誤差の度合い」である。実験には，現実空間と類似な VR 空間に作り，昇降型デスクを用いることにより，様々な高さ水準を設け，視覚的・身体的な高さの知覚を把握する方法を採用した。誤差を図 1 に示す。現実空間と VR 空間の視覚的な高さ知覚の誤差は，座位約 6cm，立位約 8cm であった。この誤差は本研究の仮説である「VR 空間における高さ知覚の誤差を補正すると高さ知覚が現実空間に近似する」という検証の補正値に採用している。次に 2 つ目の仮説である。先行研究の実験はテクスチャの精度が低度のみで実験を行った。テクスチャ精度は，VR 空間において現実感を向上させるために重要なものである。また人は寸法を知覚する際に周囲のテクスチャを物差しとして認知する。この観点から二つ目の仮説を「テクスチャの精度により現実感を向上させせると高さ知覚は現実空間に近似する」とした。

次に VR 酔いについてである。VR 酔いの原因として先行研究で示されている「感覚不一致説」[注1)] を本研究とし

日本建築学会情報システム技術委員会
第43回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集，288-291，2020年12月，オンライン
Proceedings of the 43rd Symposium on Computer Technology of Information,
Systems and Applications，AIJ，288-291，Dec.，2020，Online

て解釈したのが3つ目及び4つ目の仮説である。それは「テクスチャ精度の向上により，筆者らが先行研究で把握した誤差が補正される，及びVR酔いが低減される」という仮説である。テクスチャ精度が現実感とVR酔いに与える影響に関する既往研究には藤木ら[2]の研究がある。藤木らは建物が立ち並ぶ街路を意図したコンテンツのモデリング・テクスチャ精度を低レベルから高レベルにすることによる現実感，VR酔いへの影響（より複雑・テクスチャ精度を高めることはVR酔いを促進してしまう）を示唆している。なおVR酔いは新しい感覚であるためその計測方法に関する先行研究も多い。中川ら[3]は現状のVR酔いの研究，またそれに関連する研究から，VR酔いの起こる原因，酔いの不快度指数における体の反応などがまとめられている。また，三浦ら[4]，北崎ら[5]は注視点を用いて眼振のサッカード，SSQ[注2]を用いてVR酔いの低減を評価している。また，加藤ら[6]はVR酔いの影響で生体心理信号（心電図，呼吸，体温，唾液）に変化がどのように起こるのかをSSQと関連性を用いて評価している。

以上のことから本研究は，①テクスチャの精度と誤差の補正による高さ知覚の変化の把握，②テクスチャの精度と誤差の補正によるVR酔いの低減効果の検証，以上の4つの仮説検証を研究目的とする。

3. 実験手法

本研究では，空間知覚の対象を机の天板とした。また本研究では，VR酔いの評価方法は客観的評価としてSSQ，生化学的な指標として鼓膜温[注3]，眼振サッカード[注4]の測定を採用した。これらは，既往研究でも指標としてよく用いられていたものである。

それぞれの意図と実験概要を下記に示す。

3.1. 実験1：テクスチャ精度，補正空間の誤差（図2, 3, 4）

人の空間知覚は視覚に拠るところが大きく，没入感も同様である。そこで実験1として，現実空間とVR空間における高さの空間知覚の差，またテクスチャ精度による誤差の度合いの変化，誤差の補正による高さ感覚のずれの補正について検証を行った。。

◆実験内容：現実世界とVR空間内において同一の高さの机に対してそれぞれ高さを回答して貰う実験である。

◆実験空間：フリーアドレスのオフィスを想定した現実空間（R）と類似な空間をテクスチャ低（TL）・高（TH）のVR空間として作成した。それぞれの実験空間を図2, 3, 4に示す。また補正空間（C）として座位時，高さを約6cm，立位時約8cm上昇させた空間を作成。

◆机の高さ水準：一般的な机及びスタンディングデスクの高さを参照し，座位，立位ともに「65cm, 70cm, 75cm, 80cm, 90cm, 95cm, 100cm, 105cm」とした。なお机は水準間をスムーズ移動可能な白い昇降デスクを用意した。天板の大きさは「1400 × 700」である。

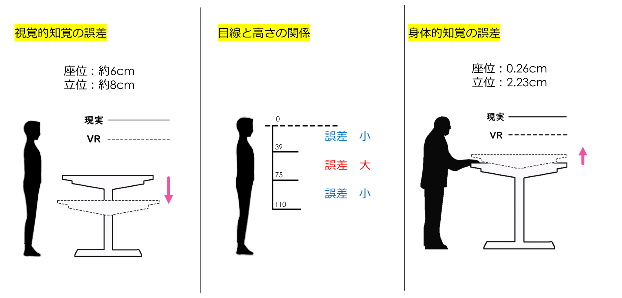

Figure. 1 Last experiment Summary

Figure. 2 Real-life experimental space (experiment 1)

Figure. 3 Low texture level

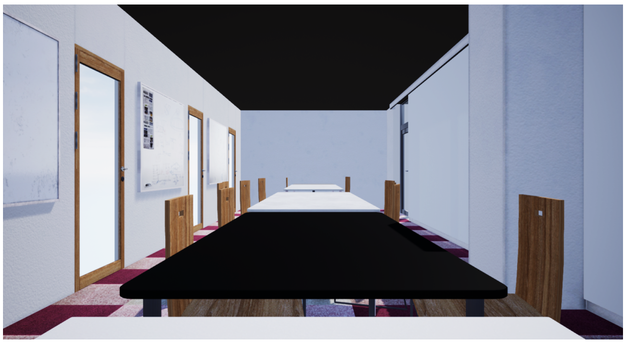

Figure. 4 High texture level

◆テクスチャ精度：低はベースカラーと写真のテクスチャのみ。高はそこにノーマルマップや汚れ，SSS, AOなど様々な処理を行ったものである。

◆実験手順：

ステップ①：被験者の座位と立位の目線の高さを計測。

ステップ②：座位・立位いずれの姿勢にて現実空間での

測定を開始する。
ステップ③：ランダムに机の高さを提示し回答を得る。
ステップ④:同じ姿勢においてテクスチャ低，テクスチャ高，補正空間の実験を行う。
ステップ⑤：別の高さに設定し②～④を繰り返す。
ステップ⑤：実施していない姿勢においても同様に行う。
以上を 30 分以内で実施。

3.2. 実験２：テクスチャ精度，補正による VR 酔いの低減

VR 酔いは，様々な体験から記憶されてきた感覚情報による組み合わせと実際に体験している感覚情報とが比較され，ずれが起きることで生じる。そこで実験２として，テクスチャ精度を上げ現実感を上昇させた空間，また実際に誤差の値分だけ机の高さを補正した空間（テクスチャ低）を用意し，VR 酔いが低減するのか検証することにした。

◆実験内容：実験空間ごとに SSQ，鼓膜温，眼振サッカードを測定し VR 酔いの度合いを測定する実験

◆実験空間：テクスチャ低（TL），高（TH）の空間。実験空間に補正を行った机を置いた VR 空間（C）

◆実験手順：

ステップ①：各実験空間の実験開始前に鼓膜温を測定。SSQ の実施。10 秒間注視点を眺めてもらう。
ステップ②：ランダムに空間を提示し二分間見回してもらう。（座位補正空間では座位のみ，立位補正空間では立位のみ，それ以外の空間ではどの姿勢をとってよいものとした）
ステップ④：VR 空間の実験終了後に鼓膜温を測定。SSQ の実施。10 秒間注視点を眺めてもらう。
ステップ⑤：ヒアリング調査（休憩２分間）
ステップ⑥：同様のことを別の空間でも行う。

以上を 30 分以内で実施した。なおどちらもモデリングソフトは Maya2018，ゲームエンジンは Unreal Engine 4.24.3，HMD は oculus rift，テクスチャ生成には Substance Painter を使用。

4. 実験結果と考察

本稿では実験１を８名，実験２を７名の大学生・大学院生を対象に実験を行った。両者の結果を下記にしめす。

4.1. テクスチャ精度，補正空間の誤差

各高さ水準におけるテクスチャ精度低，高及び座位補正，立位補正空間における全被験者の回答値と現実空間での回答値のプロットを図 5,6 に平均値を図 7,8 に示す。

平均値についてテクスチャ低をみてみると，座位，立位どちらにおいても現実空間での回答値と比較すると低くなる傾向があることが分かる。これは前回の実験と同じ傾向の結果となっている。またテクスチャ高についてみてみると座位時では現実空間での回答値よりも低い，高いなどの傾向は見られず，立位時においては現実空間での回答値よりも高い傾向になっていることが分かる。またテクスチャ精度低と高を比較してみると座位時，立位時どちらにおいてもテクスチャ精度高の方が低よりも回答値が高くなっており，机の高さを高く知覚している

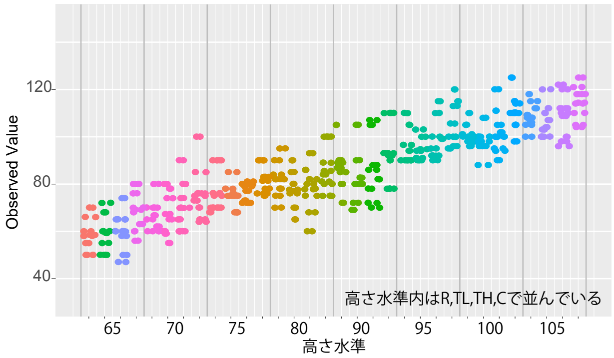

Figure. 5 Answer value when sitting Plot

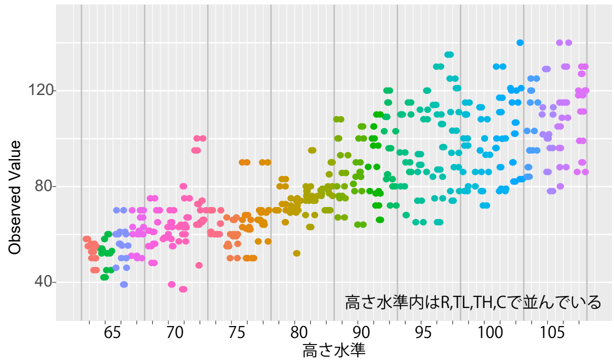

Figure. 6 Answer value when standing Plot

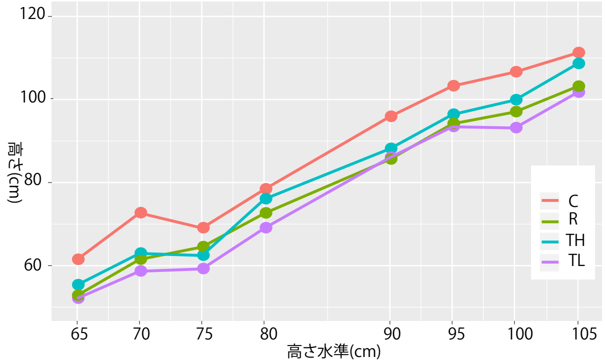

Figure. 7 Answer value in each space / real space sitting average

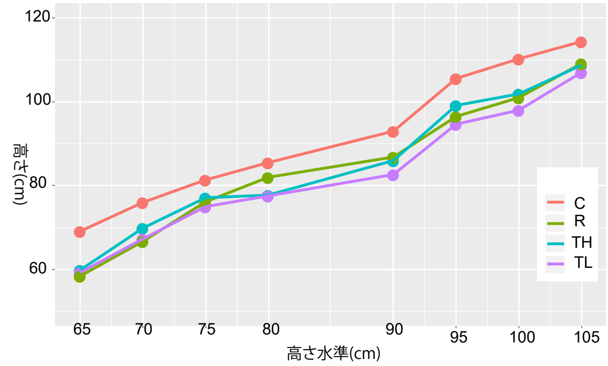

Figure. 8 Answer value in each space / real space standing average

ことが分かった。このことから，テクスチャ精度が人の高さ感覚に大きな影響を与えていることが分かる。

また，座位補正，立位補正の空間での回答値はどちらの姿勢においても現実空間での回答値よりも大きく上回っており，補正が芳しくいっていないことが分かる。これの原因として，研究対象の着想に至った経緯で述べたようにカメラの高さの位置をわずかに動かしただけでもより大きな効果があるように感じられたように，高さの知覚対象を誤差分高くしたが，それよりも効果として大きくなったなどが考えられる。

4.2 テクスチャ精度，補正による VR 酔いの低減

各空間の個人，また全員の平均の SSQ の回答値の点数の昇降またその差の度合いを各トータルスコア（以後 TS），気持ち悪さ（N），目の疲れ（O），ふらつき感（D）の要素ごとに表 1，2 に示す。

表 1 より，テクスチャ精度に関わらず，TS または D の点数が上昇しやすい傾向にあることが分かる。また，テクスチャ低とテクスチャ高において，各個人の TS は，テクスチャ高の方が点数が上昇した人は多くなっている。つまり，テクスチャ精度が高い方が精度が低い場合よりも，より酔いやすくなる傾向があるといえる。

また補正空間についてみてみると，テクスチャ低の TS の平均の上昇値と比べ，TS の平均値の上昇値の方がより大きくなっていることが分かる。また各個人で見ても補正空間の方が TS の点数が上昇している人が多くなっている。これらから，高さ実験の結果と同様に補正が芳しくないということが分かる。また補正空間の各要素ごとを見ると，座位補正，立位補正どちらにおいても D のポイントが高くなっていることが分かる。また補正空間において O の要素もテクスチャ低の空間と比較してポイントの上昇値が高くなっていることも分かった。また，鼓膜温に関して，各個人個人によって温度が下がったり，上昇したりと一貫した傾向がなく，眼振サッカードに関しても傾向は見受けられなかった。

5. まとめと今後の展望

検証した結果を下記にまとめる。

・テクスチャ精度，補正空間の誤差

テクスチャ精度は人の高さ知覚に大きな影響を与え，テクスチャ精度を高くすると，テクスチャ精度が低いときよりも回答値が高い傾向がある。つまり，テクスチャ精度を高くすると，現実に近しくなる。また，各補正空間において，どちらの空間も，現実空間での回答値よりも大きく上回っており，補正が芳しくいかなかった。

・テクスチャ精度，補正による VR 酔いの低減

テクスチャ精度にかかわらず，TS・D の点数が上昇しやすい傾向にある。またテクスチャ精度が高くなると，TS の点数が高くなる傾向にあり，テクスチャ精度が低い場合より酔いやすい傾向があることが分かった。

また補正空間では，未補正のテクスチャ精度が低い空間よりも TS の点数が高くなったことから，高さ実験と同じように補正が芳しくいっていないことが分かる。また，補正空間に関して，D の点数が上昇しただけでなく，O の点数も上昇しやすい傾向にあることが分かった。

・今後の展望

改善点として，被験者の数が少ないことが挙げられる。今後は被験者の数を増やし，各空間と現実空間での回答値の誤差の値を割り出すことや，また SSQ の精度を高めていきたい。

Table.1 SSQ Low and high texture level

	座位補正				立位補正			
	TS	N	O	D	TS	N	O	D
A	33.7	28.6	45.5	69.6	-9.5	-9.5	-7.6	0.0
B	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.2	27.8
C	15.0	9.5	30.3	0.0	0.0	0.0	15.2	0.0
D	15.0	0.0	30.3	27.8	28.6	28.6	37.9	41.8
E	7.5	9.5	7.6	13.9	9.5	9.5	30.3	13.9
F	3.7	0.0	0.0	13.9	9.5	9.5	7.6	0.0
G	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.2	0.0
平均	10.7	6.8	16.2	17.9	5.5	5.5	16.2	11.9

Table.2 SSQ sitting and standing correction

	テクスチャ低				テクスチャ 高			
	TS	N	O	D	TS	N	O	D
A	33.7	19.1	37.9	97.4	-22.4	-19.1	-22.7	-41.8
B	-7.5	-9.5	0.0	0.0	3.7	0.0	0.0	13.8
C	3.7	0.0	7.58	13.9	15.0	9.5	30.3	0.0
D	0.0	0.0	-7.58	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
E	18.7	0.0	15.16	41.8	3.7	0.0	0.0	13.9
F	-11.2	-9.5	-30.32	0.0	11.2	19.1	15.2	13.9
G	-3.7	0.0	-7.58	0.0	3.7	0.0	7.6	13.9
平均	4.8	0.0	2.2	21.9	2.1	1.4	4.3	2.0

［注釈］

注 1）過去の様々な体験から記憶されてきた感覚情報による組み合わせと実際に体験している感覚情報とが比較され，感覚のずれいわゆる感覚の不一致が起きた場合，記憶によって予期されていたものと違う組み合わせの感覚情報が入力されるため，酔いが引き起こされるというもの

注 2）シミュレータ酔いに有効と考えられる 16 の主観的評価項目を抽出したもの

注 3）鼓膜温度計を使用し，実験前後に温度を測る

注 4）pupil labs を使用。pupil capture にて注視点計測を行った。

［参考文献］

1）村上雅也：現実と VR 空間における高さに対する空間知覚の比較 -VR 建築理論に向けた空間デザインの基礎研究- 立命館大学理工学部　2019 年度　卒業研究

2）藤木卓，市村幸子，寺嶋浩介，小清水貴子：VR コンテンツの精度が現実感と酔いに与える影響　日本教育工学論文誌　36（Suppl.），73-76，2012

3）中川千鶴，大須賀美恵子：VE 酔い研究および関連分野における研究の現状　TVRSJ Vol.3 No.2，1998

4）三浦直樹，氏家弘裕，大倉典子，木村昌臣：特定方向への視線の維持が VR 酔いに与える影響　第 24 回日本バーチャルリアリティー学会大会論文集　2019 年 9 月

5）北崎充晃，中野智亮：眼球運動の適切制御による映像酔いの低減　TVRSJ Vol.15 pp.17-26，2010

6）加藤幸洋，榊原瞳，石崎千穂，河合敦夫，井須尚紀：動揺病の影響による生体整理信号の変化　FIT2013　第 12 回情報科学技術フォーラム

7）山田悟史，北本英里子，神長伸之，及川清昭：没入型仮想空間における空間知覚の研究-パーソナルスペースの検討を想定した距離の知覚と心理評価を対象として-，日本建築学会　技術報告論文集，第 58 号，pp1303-pp1307，2018.10，日本建築学会