

建築設計教育におけるVRの活用可能性の検証と
適用方法の提案

Verification of virtual reality's application in architectural design
education and proposing new utilization scenarios

2024年

侯 寧

1章. 序論	
1-1. 研究背景・目的	1
1-2. 既往研究と本研究の位置づけ	3
1-3. 本研究の構成	7
2章. スケール感の学習効果に基づいたVRの実空間代替可能性検証	
2-1. 序	8
2-2. 屋内空間を対象とした実空間とVR空間の実験概要	8
2-2-1. 実験手順	
2-2-2. VR空間の呈示装置	
2-2-3. 被験者概要	
2-3. 実空間とVR空間とのトレーニング効果の比較	14
2-3-1. トレーニング状況の比較	
2-3-2. トレーニング前後での「試験空間」における指定箇所長さに対する回答状況	
2-3-3. 誤差率によるトレーニング効果の比較	
2-4. 結語	20
3章. 空間規模と学生の建築経験を考慮したスケール感学習におけるVRの適用方法の提案	
3-1. 序	22
3-2. 屋内外空間を対象としたVR空間実験概要	22
3-2-1. 実験手順	
3-2-2. 屋外空間の実験装置と実験空間の設定	
3-2-3. 被験者概要	
3-3. 学年間の比較による空間規模がスケール感のトレーニング効果に及ぼす影響	28
3-3-1. 屋内空間における学年間のトレーニング効果比較	
3-3-2. 屋外空間における学年間のトレーニング効果比較	
3-3-3. 屋内外のトレーニング効果比較によるVRの適用方法の提案	
3-4. 結語	38
4章. 不適切箇所の指摘手法に基づいた各設計内容におけるVRの適用方法の提案	
4-1. 序	40
4-2. インタビュー調査と実験の準備	41
4-2-1. 設計に関する不適切箇所の把握	
4-2-2. 不適切箇所を含む設計案の作成と呈示方法	
4-2-3. 選定した不適切箇所の調整と予想される実験結果	
4-2-4. 設定した不適切箇所以外に被験者が指摘した内容について	
4-3. 実験概要	50
4-3-1. 実験手順	
4-3-2. 被験者概要	
4-4. ツールそれぞれの指摘結果の比較によるVRの適用効果確認	52
4-4-1. 設定した不適切箇所に対する指摘結果による各ツールの効果	
4-4-2. 不適切箇所以外の指摘を用いた実験結果の検証及び各ツールの特性分析	
4-5. 結語	66
5章. 結論	69
参考文献	73

第 1 章

序論

1.1 研究背景・目的

近年、建築空間の呈示技術は日々進んでいる。最近主流となっている没入型のHMD(Head Mounted Display)によるVR(Virtual Reality, 仮想空間中を自由に移動しながら体験できる技術)では、従来の平/立面図や模型等による呈示ツールと比較して、現実と同等なスケールでの空間体験が可能となり、空間情報の把握も容易となることから、専門的な知識の乏しい者でも、短時間のVR体験で、設計図面に表している情報に対する理解が深められるものと期待される。

この利点を利用して、「設計実務」の領域において、設計依頼者に設計内容を説明するための補助ツールとして活用されるようになってきている。また、従来用いられてきた手法である写真、CG画像、実空間などを使用して空間の環境評価を行うことの代替として[1-7]、VRが建築に関する様々な分野で活用され、研究が多く展開されている。さらに、近年建築教育の場合において、設計途中で未完成の空間であっても、現実と同等なスケールで体験可能といったVRの利点に基づき、VR体験用の実験室を設置することなど、VRを教材、設計支援ツールとして活用している大学等も増えてきつつある。

建築教育においては、専門度が必要となる建築系学生がVRの使用者になるため、空間評価に比べ、寸法や空間配置など、詳細な空間情報を精確に把握することがより重要と考えられる。しかしながら、VRによって建築空間を呈示する場合、人が感じている距離が実際よりも近い傾向が、一部の研究において確認されている[8,9,10]。また、S. Aydinら[11]はVRの設計教育への導入にあたって、VRを設計ツールとして適用する際、複雑な空間情報や操作方法が難しいことが、学生の学習効果に負の影響を及ぼす可能性がある」と主張している。現状では「実際の教育現場でVRを幅広く活用することは未だ困難がある」と多くの研究者に指摘されている[12,13]。以上より、VRを教材・設計支援ツールとして活用する可能性があるものの、具体的な活用策は現状十分には検討されていないため、設計教育の場面においてVRを普及することは未だ困難があるものと考えられる。

また、VRなど、情報システム技術を用いて設計中の問題を解決することについて、【構造面】において安全性と経済性、【設備面】において快適性と経済性(省エネルギーなど)それぞれが検討の中心となっているのに対して、【計画面】においては「使いやすさ」「開放性」「面積効率」「スムーズな動線」など、検討すべき項目が多く存在し、「問題を定式化するのが難しい」と専門家に指摘されている。これより、特に、建築設計・計画に関する知識を学生に指導する場面において、VRを導入することにより、具体的にどのような問題点を解決できるかや、どのような指標を用いてVRの使用効果を評価するかについて、さらに検証する必要があるものと考えられる。

以上のような背景から、本研究では、先端的技術であるVR技術の、設計教育への適用の有効性を検証し、将来新たな教材、設計支援ツールとして具体的な活用策を提案することを目指した。

また、教育分野において、学生は作業記憶容量が未だ不十分な学習の初期において、難しい知識を習得するのは困難であるため[14,15]、学生の知識や経験などの成長に応じて、常に適切な難易度の課題を与えること[15,16]や、課題の難易度に応じて適切な教育指導方法を策定すること[17,18]によって、より高い教育効果が求められることは一般的と考えられる。

以上の課題難易度の観点から建築教育の発展をみると、従来の建築講義・演習では、紙媒体の資料やスライド・建物見学、二次元図面(以降、2D)などを用いて建築に関する知識を習得させており、平面的な情報から空間をイメージする能力が必要であった。これに対して、技術の進歩に従い、三次元コンピュータ支援設計(以降、3DCAD)といった従来の2DをPC画面上で三次元化する技術を設計教育へ適用することによって、設計初心者である建築系学生であっても、3DCADを使用することによって、空間をより直観的に理解しやすくなっており、設計課題や知識の学習難易度が低減できているものといえる。さらに、現実と同等なスケールで体験可能な新技術であるVRを導入することによって、これまでの2Dや3DCADを使用する場合の学習難易度をさらに調節・改善することが可能と考えられる。これに基づいて、学習段階の異なるそれぞれの学生に最適なツールを使用して指導することによって、教育効果がさらに向上できることが期待される。

なお、難しい課題・知識を学生に理解させる場合、学生に予め多くの練習や予備知識が必要であるのに対して、相対的に簡単な課題・知識ほど、授業プログラムのより早い段階で学生に指導することで良い効果の得られる傾向がこれまでの多くの教育研究[14,15]で確認されている。これらを参照すると、建築に関する基礎知識のある高学年と、ない低学年との学習効果を比較することを通して、建築に関するそれぞれの課題・知識の難易度が解明されるのに併せて、より適切なVRの適用場面・方法が提案できるものと考えられる。

以上のような観点から、本研究では、建築に関する授業プログラムにおける設計課題それぞれにおいて、VRを教材・設計支援ツールとして学生を指導する際の、学年が異なる学生それぞれの知識に対する理解度(難易度)と、従来の教育手法を用いる場合のそれとを定量的に比較して、最適な適用時点や活用方法を明らかにする。

建築設計教育においては、設計コンセプトの創出、計画の合理性、設計案を表現する際の美的なセンスなど、いろいろな側面の学習課題が存在している。本研究は、設計知識、課題などの学習難易度に応じて、VRの最適な適用方法を検討することを目標としたため、上述した様々な学習課題から研究対象を選定するにあたって、学習難易度が異なると予想される課題を優先的に研究対象として選定した。

具体的には、多くの大学の授業プログラムにおいて、最初は住宅設計、学年が上がるに従って大規模な複合施設に至るように、設計課題の規模は「小」から「大」へと進んでいくのが一般的であり[19,20]、空間規模が課題難易度に大きく影響することと予想される。そこで、本研究はまず、学生の空間の大きさ(規模感)に対する理解・把握能力、即ち「スケール感」に着目する。スケール感を養うためには、一般に多くの空間・建物で見学や実測をしなければならないが、それには、多大な時間や労力が必要となる。VRを実際の空間の代替手法として捉え、VRの利用に

よって現地に赴かなくても様々な空間の体験を可能とすることにより、スケール感をより効率的に養うことが期待される。そこで、本研究はまず、VRを用いてスケール感を学習する効果として、建築設計においてVRを実空間の代替ツールとして使用する際、空間内にある事物の寸法といった詳細な空間情報が正確に認識されるか否かを検証する。続いて、学生にスケール感をより効率的に習得させることを意図し、学生の学年や対象空間の規模の異なることが、VRを適用する際の学習効果に及ぼす影響を把握し、VRの最適な適用時点と活用方法を明らかにする。さらに、建築設計におけるスケール感といった相対的に単純な課題を検討した上で、数種類の設計内容が存在する実際の設計場面において、それぞれの設計内容に関する知識の学習難易度も異なる予想されることから、VRと、2Dや3DCADを適用する際の、それぞれの設計知識の学習難易度を定量的に比較し、教育効果を改善するための、よりの確なVRの適用方法を提案する。

以上より、建築設計教育における、①基礎的な設計能力であるスケール感の学習を始めとし、②設計段階における知識を学生に習得させる際の、建築設計教育における教材・設計支援ツールとしたVRの適用方法、以上の2点に着目して、VRの最適な適用方法を明らかにすることを本研究の目的とする。

1.2 既往研究と本研究の位置づけ

本研究に関連する既往の研究は、I. 教育及び建築教育に関する研究、II. VRの応用に関する研究、III. 建築教育におけるVRの応用に関する研究に大別される。ここでは、これらの研究状況を概説し、本研究の位置づけを行う。

I. 教育及び建築教育に関する研究

教育及び建築教育に関する研究として、(i)で、様々な教育に関する研究事例と、それらの着眼点と、採用された学習効果の評価方法を、(ii)で、建築設計教育の場面において、より効果的な教育方法を提案する研究を、それぞれ網羅的に把握し、整理する。

(i)に該当するの研究について、例えば、長松ら[15,21]は、学生に与えた「部品を分類する」「プログラミングにおける誤り発見」などの課題の、完成に至るまでかかった時間を通して、学生の学習効果・習熟度を評価する方法と、課題の難易度に応じた指導方針を提案した。瀧沢[16]は、ラッキー・パズルをもちいてシルエットを作成する課題を実施し、学生の課題に対する評価を分析することによって、課題の難易度が教育効果や学習意欲に及ぼす影響を明らかにした。山本ら[17]は、運動学習の場面において、課題の難易度に応じて、適切な教示方法を与えることによって、学習効果の改善を確認した。鈴木ら[18]は、難易度それぞれの問題作成に多大な労力がかかる現状を改善するため、深層学習を用いて難易度調整可能な読解問題の生成技術を提案し、読解問題の正答率や、回答者の問題の難易度に対する評価に基づいて、提案した技術の有効性を

検証した。

以上、教育効果の向上にあたって、難易度を考慮して適切な指導や課題を与えることの重要性が示されている。また、問題解決までの時間、テスト成績、指導者の採点や評価などを通して、学生の学習成果や習熟度を評価する研究が多い傾向にあることが把握できる。

(ii)については、従来から、建築設計教育の場面において、より効果的な教育方法を提案することが常に研究者らに追求されている。秋田ら[22-24]は、学生が立体構成や住宅設計など初期段階の設計課題に取り組んでいる際、スケッチ描画、資料収集などそれぞれの内容に関する学習量と成績との関連性を分析することや、設計教員を対象したインタビュー調査を実施することにより、学生の設計学習に有効な学習方法を明らかにした。和田ら[25]は、設計製図課題に取り組んでいる途中の学生に、実空間での空間体験により設計知識を呈示することにより、設計能力の向上効果を確認した。山野ら[20]は、パターン・ランゲージの教材を用いた指導方法を提案し、住宅設計課題に適用することにより、学生の学習効果が改善されることを確認した。松本ら[26]は、学生が設計製図をする際に、空間をイメージした順番を分析し、設計能力の向上には「部分発想」だけでなく「全体発想」の思考プロセスの力を身につけることの重要性を検証した。

2000年前後から、二次元図面や実空間を用いた学生指導のみならず、3DCADやCGなど、従来の二次元的な空間情報を可視化する技術の活用事例も増えている。下川ら[27]は、大学の建築系授業「空間メディア」への、3DCAD・CG技術の導入を試行し、3DCAD・CGの学生の空間イメージ表現技術の教育手法としての有効性を明らかにした。高木ら[28]は、学生の設計案を3Dモデル化するプロセスにおける空間イメージの内容を分析することによって、学生が3Dモデルを作成する際、空間のシーケンスや生活するシーンをイメージしやすくなることを述べた。

さらに、近年増えつつあるのは没入型のHMDにより呈示するVR技術の応用で、大倉ら[29]は、設計演習授業の講評会でVRを使用することより、学生の空間認識能力の向上や、モデリングのミスを減らし、より精緻なモデルを作成可能とするなどの効果を確認した。S. Aydinら[11]は、VRをツールとして設計授業への導入を試行し、UEQ(交互体験の成功度を評価する方法)評価法[30,31]を用いて、学生の授業に対する評価を求めた。

以上より、情報システム技術の発展に従って、教育効果や学習効率を追求するため、新たな指導方法が多く提案されてきている現状が把握できる。

II. VRの応用に関する研究

VRの応用に関する研究は、(i)写真、360°パノラマ画像など伝統的な空間呈示手段や、実空間との比較によって、VR技術の有効性を検証する研究、(ii)実際の建築環境の代替手段としてVR技術を応用する研究に分けられる。

(i)に該当する研究として、脇田ら[32]は、一度の撮影で360°のパノラマ画像を撮影することができる「全天球画像」をこれにより呈示し、屋内空間の心理的評価の代替可能性を検討しており、Higuera-Trujilloら[4]も、写真、360°パノラマ画像、VRの三者間の比較を行っている。これらのい

ずれにおいても、多くの既往研究[5,6,7]と対応し、従来から用いられてきた手法である写真やCG画像などよりも、VRの方が実空間の代替性が高いことが示されている。

一方、それらに対して、山田ら[9]のVRにおける空間知覚に関する研究や、川角ら[33]の仮想空間と実空間とを比較した研究においては、人が感じている距離が実際よりも短い傾向が確認されている。

(ii)に該当する、VRの実空間の代替性を有する点を利用して、実際の建築環境の代替手段として活用した研究は多く挙げられる。

例えば、T.Hong [34]らは、VR空間を用いた太陽光パターンの形状や開口部の大きさが被験者の知覚に及ぼす影響を調査した。Fedaa Abd-Alhamid [35]らは、仮想環境(Virtual Environment)を用いた視点位置が知覚に及ぼす影響を評価した。J. Li [36]らは、VR空間によって地下室空間を評価した。Z. Jin [37]らはVRを用いた部屋の設計における風水の考慮の有無が心理・生理に及ぼす影響を検討した。石田ら[38]は、VRを用いて未完成の設計案を空間確認する場合に、設計に関する知識のない者でも身体による実際の感覚に基づき、設計案の合理性や問題点についての検討過程に参加できることを検証した。

以上より、実空間と若干異なる部分が存在するものの、実空間の代替手法として、VRを様々な場面で適用され、空間の評価に活用されることが日々主流となっている現状が把握できる。

III. 建築教育におけるVRの応用に関する研究

建築教育におけるVR技術の応用に関する研究はまだ多くはないが、(i)建築設計の基礎的能力の一つとした、「スケール感」の学習の場面において、VRの有効性を検証する研究、(ii)実際の設計教育において、VRを教材、設計支援ツールとして応用する研究に分けられる。

(i)に該当する研究として、馬淵ら[39]は、VRを用いて屋外空間を対象にスケール感のトレーニング実験を行ったが、被験者数の少ないことや、トレーニング方法が長さの計測のみのため、学習量が少ないことなどの問題点が存在している。C. Hansol[40]も、VRでのスケール感の学習可能性を検討したが、実空間との学習効果の比較は行なわれていない。

(ii)に該当する研究としては、下川、小林ら[41-43]は、設計製図の授業において、複数の学生がVR空間で実物大の設計案作品を体験しながら設計成果を発表することを試行し、発表後の学生同士の会話内容に基づいてVRの適用効果を分析した結果、発表内容に対する「疑問」が普段のスライドを用いた発表より少なくなる傾向を確認した。矢野ら[44]は、VRによる建築教育教材を制作して、教育効果をアンケートで評価し、普段の講義よりもVR教材を用いた場合、知識に対する理解度が高いことを明らかにした。Ahmadら[45]は、VR空間を実空間の代用として「構造」に関する知識を例として学生に指導することを試行し、VRが「構造」以外の建築コースにも適用可能と主張した。Antoniettaら[46,47]は、建築設計の教育にVRを使用して対照実験を行った結果より、「学生は建築空間と敷地の間の関係性をより容易に把握できるようになった」と結論づけた。

上述した研究から、設計案や設計に関する知識がより容易に理解されることを追求し、従来から教育場面で使用されている教材や設計支援ツールに加え、VRが積極的に活用されている現状にあることが把握できる。

IV. 本研究の位置づけ

以上、本研究に関連する、I. 教育及び建築教育に関する研究、II. VRの応用に関する研究、III. 建築教育におけるVRの応用に関する研究、についてこれまでの研究成果を概括した。

以降ではそれらをふまえ、本研究の特徴及び位置づけを明確する。

はじめに、I. (i)で述べた既往研究から、教育効果の向上にあたって、難易度を考慮して適切な指導や課題を与えることの重要性を示した。また、知識に対する理解・習熟度の違いに従い、同じ課題であっても学生が感じる難易度はそれぞれ異なるものと予想される。しかしながら、従来の建築教育に関する研究(I. (ii)とIII.)においては、この点に対する考慮が未だ不十分であると考えられる。これより、本研究での、学年それぞれにおけるVRの適用効果を比較検討することは有意義と考えている。

また、I. (ii)で述べた既往研究から、情報システム技術の発展に従って、教育効果や学習効率を追求するため、新たな指導方法が多く提案されている現状が把握できた。しかしながら、現在PC画面によって呈示する3DCAD技術は、既にほとんどの大学の設計教育で活用されているのに対して、近年主流となりつつある、実物大の仮想空間を体験可能な没入型VR技術を、積極的に使用している大学は未だ少数である。これは、設計教育の場面において具体的な活用策が十分に明確化されていないことが原因の一つであると考えられる。そこで、本研究において、建築の教材・支援ツールとしてのVR技術の建築教育場面への適用方針を明らかにすることは、有意義と考えている。

また、II. で述べた既往研究においては、実空間と若干異なる部分が存在するものの、実空間の代替手法として、VRを様々な場面で適用して空間を評価する研究が日々増えている現状にあることが読み取れる。しかしながら、一般的な空間に対する心理評価に比べ、寸法を把握するより高い精度を要する建築教育への応用について、VRで呈示する建築空間が、どの程度の信頼性を有するかについての検討は未だ不十分である。本研究で、教材・支援ツールとして適用されるVR技術の不確定性を是正することは、有意義と考えている。

III. で述べた既往研究においては、VR空間の適用によって、従来の教育場面で使用している教材や設計支援ツールよりも、設計案や知識がより容易に理解できるようになっていることが把握できた。しかしながら、建築設計の初期から完成に至るまでの設計プロセスにおいて、数種類の設計内容が存在し、必ずしも全ての設計内容において、従来からよく用いられる2Dや3DCADなどのツールと比較して、VRの導入による高い教育効果が得られるとは言いがたい。これより、

本研究での設計に関する知識習得への適用効果を各設計内容において詳細に検証することは、新規性を有するものと考えられる。

さらに、III. とI. (i) で述べた既往研究においては、問題解決までの時間、テスト成績、指導者の採点や評価などを通して、学生の学習成果や習熟度を評価することが多い。しかしながら、建築設計において、学生の設計に関する知識の把握状況と学習成果を表している設計作品では、多方面の設計要素や設計者の主観的な考えが含まれているため、様々な側面の設計知識に対する理解度をそれぞれ客観的、定量的に評価するにあたって、従来の評価方法をそのまま適用するのは困難があるものと予想される。即ち、客観性を有する指標を用いてVRの適用効果をより詳細に評価する手法については、ほぼ検討されていないことが推察される。そこで、新たな客観性を有する評価指標を考案するという点において、本研究は従来の研究に無い新たな視点を有している。

1.3 本研究の構成

本研究の研究計画を論文の構成に即して述べると以下のとおりである

まず、第1章においては、本研究の背景と目的について述べると共に、本研究と関連する既往の研究について概観し、本研究の位置づけを行う。さらに、本研究の研究計画を示す。

第2章では、建築教育において、空間の呈示ツールとしてVRの信頼性を、実空間、VR空間それぞれでのスケール感のトレーニング実験を通して検証する。

第3章では、屋内、屋外空間それぞれでのスケール感のトレーニング実験を通して、VRを用いる場合、空間規模の異なることがスケール感のトレーニング効果にどのような影響を及ぼすかを明らかにすると共に、建築の学習経験の異なる各学年それぞれを対象とした場合のトレーニング効果を検証する。

第4章では、建築設計教育に使用する教材・設計支援ツールの適用効果を定量的に把握するため、「不適切な箇所を探索する」課題の遂行による評価方法を提案する。従って、新しい技術であるVRと、伝統的な教材・設計支援ツールである二次元図面や3DCADのそれぞれについて、各設計内容における教育効果の優劣を検討する。

最後に、第5章では、第2章から第4章までの結果をふまえ、本研究の総括を行い、それをもって結論とする。

第 2 章

スケール感の学習効果に基づいたVRの
実空間代替可能性検証

2-1. 序

序章において、近年、建築教育の場合において、現実と同等なスケールで体験可能といったVRの利点に基づき、VRを教育支援ツールとして活用している事例が増えてきつつあるが、建築設計においてVRを実空間の代替ツールとして使用する際、空間内にある事物の寸法といった詳細な空間情報が利用者に正確的に認識される否かの検証は未だ不十分であることを述べた。

そこで、本章では、学生の空間の大きさ（規模感）に対する理解・把握能力、即ち「スケール感」に着目し、VR空間でも実空間と同様の訓練を行うことにより、同程度の学習効果を獲得することが可能か否かを検討し、VRの有用性を検証することを目的とする。すなわち、没入型のVR空間を呈示するヘッドマウントディスプレイ（以降、HMD）を用いて、実空間とVR空間それぞれの学習実験で得られたデータを比較することとした。

2-2. 屋内空間を対象とした実空間とVR空間の実験概要

VR空間での学習体験による効果を実空間と比較するため、試験空間における各部の長さの回答→実空間またはVR空間におけるトレーニング→再度、試験空間における各部の長さの回答、という流れ[48]で実験を計画した(Figure 2-1)。すなわち、スケール感を養うためのトレーニングをさせる過程で、VR空間を使用するグループ(以降、「VR空間」と)、実空間を使用するグループ(以降、「実空間」と)に被験者を二分し、両グループの学習効果を比較することとした。実験は、2019年12月2日から12月19日の間に一人ずつ行い、実験時間は全体で40分から1時間程度であった。

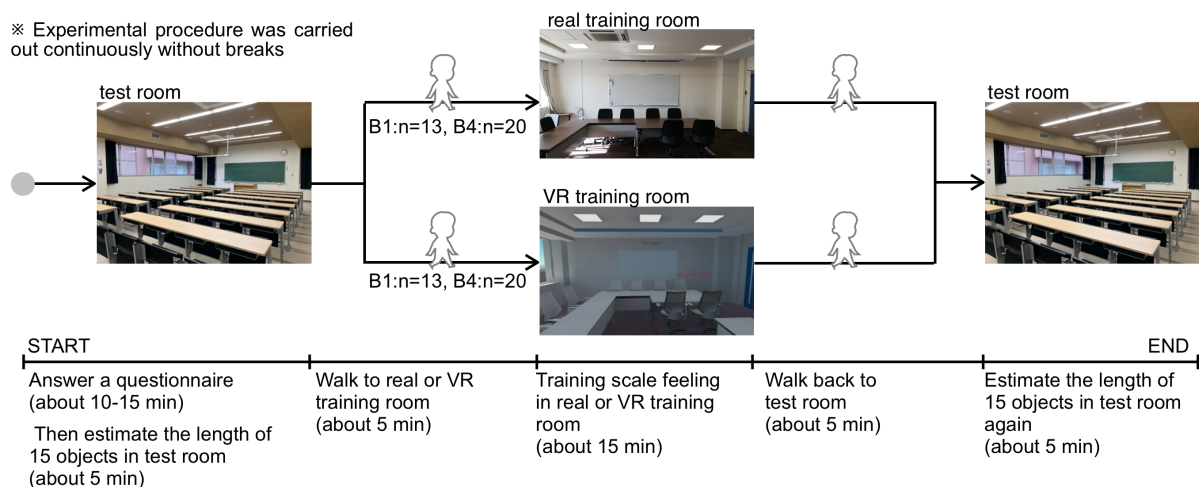


Figure 2-1 Experimental procedure

2-2-1. 実験手順

実験は、まず、被験者自身について尋ねるフェイスシート (Table 2-1) を記入させた。

Table 2-1 Questionnaire contents

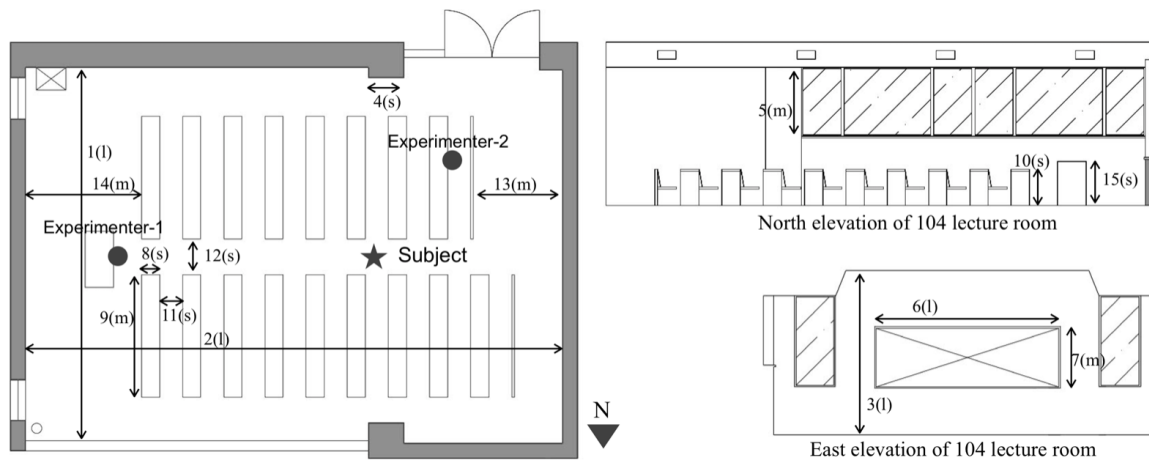
No.	items
A	Basic contents such as height and eyesight
B	Awareness and experience about the length and dimensions of things
C	Knowledge of the size of common things
D	Experience, hobbies and special skills
E	Awareness and experience about VR (Virtual Reality)
F	Personality

続いて、被験者の元々のスケール感がどの程度かを把握するために、試験空間 (広島大学工学部104講義室) で実験者が口頭で指定する15箇所の長さを被験者に1箇所ずつ1mm単位で回答させた。また、15箇所の長さの回答後、回答時の長さの推定に関する考え方について選択及び自由記述で記入させた。なお、実空間で被験者に長さを回答させる際には、実験者は回答箇所をレーザーポインタによって指示しながら、口頭の説明により補った。加えて、被験者の観察と判断に影響しないよう、実験者はできるだけ被験者の両側や背後などの視野範囲外に位置して回答を記録した。また、実験前の教示において、被験者には自身や実験者の身体、歩幅などと比べて回答しないよう求めた。

試験空間の平/立面図と写真、長さを回答させる15箇所をFigure 2-2, Table 2-2それぞれに示す。被験者は実験者1の方を向いて実験手順の説明を受け、そのまま立ち位置は変えずに、指定した箇所それぞれについて身体の向きを自由に変えながら長さを回答した。また、回答順序が結果に影響することのないよう、被験者ごとにランダムに回答させた。

次に、スケール感を養うためのトレーニングを行わせたが、この過程で被験者は実空間とVR空間のいずれかに分かれる。トレーニングの方法としては、試験空間とは別の空間 (広島大学工学部A2棟626号室) で、実験者が指定する箇所の長さを被験者に回答させるものとしたが、実験者はその値が実際の値と比べて大か小かのみを伝え、それを受けて被験者には、再び考え直した値を回答させることとした。被験者には1箇所につき5回まで回答機会を与え、5回目までに正答できなかった場合は実際の値を教示した。これを複数箇所で繰り返すことで、被験者は自分に元々あったスケール感と実際のズレを確認することができ、スケール感を養うことができると考えた。トレーニング空間と長さを回答させる15箇所をFigure 2-3, Table 2-3それぞれに示す。ここで回答箇所を示す番号については、試験空間とトレーニング空間を区別するため、前者では (番号+アルファベット)、後者では (アルファベット+番号) と表記した。

なお、トレーニング空間では、自身の歩幅や身体の一部等と比較しないことを条件に、実空間の場合、最初は部屋の東北側の出入り口で、実験者がトレーニングの手順を説明した後、被験者



Note: (s) (m) (l) denote “length of object in 1~900mm as a small scale”, “length of object in 901~2700mm medium scale” and “length of object larger than 2700mm as a large scale” in test room.



Figure 2-2 Layout and photos of test room. (Hiroshima University, School of Engineering A2-104 lecture room)

Table 2-2 Length of objects in test room (indoor)

No.	objects	length (mm)
1(l)	Room width	7300
2(l)	Room depth	10500
3(l)	Room height	3200
4(s)	Column width	700
5(m)	Window height	1350
6(l)	Blackboard length	3600
7(m)	Blackboard height	1200
8(s)	Desk width	355
9(m)	Desk length	2400
10(s)	Desk height	725
11(s)	Distance between desks	450
12(s)	Passage between desks	700
13(m)	Chair to wall	1750
14(m)	Desk to blackboard	2230
15(s)	Teacher desk height	860

Note: (s), (m) and (l) denote “length of object in 1~900mm as a small scale”, “length of object in 901~2700mm medium scale” and “length of object larger than 2700mm as a large scale” in test room.

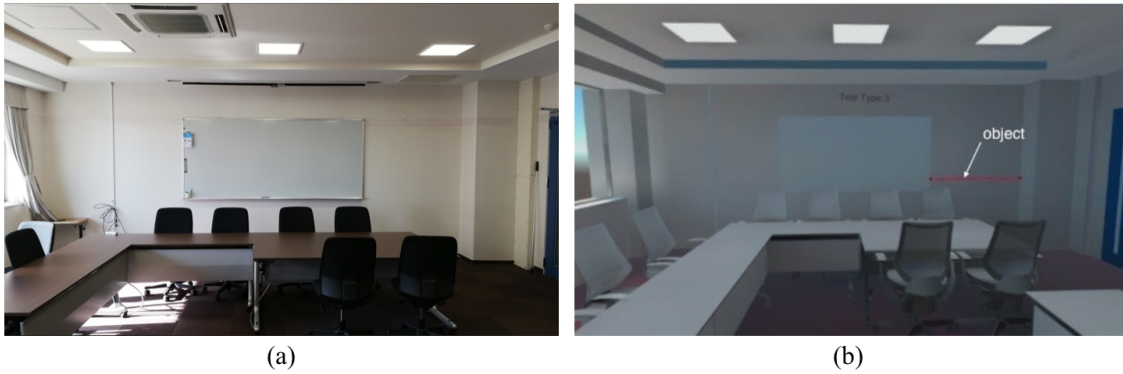
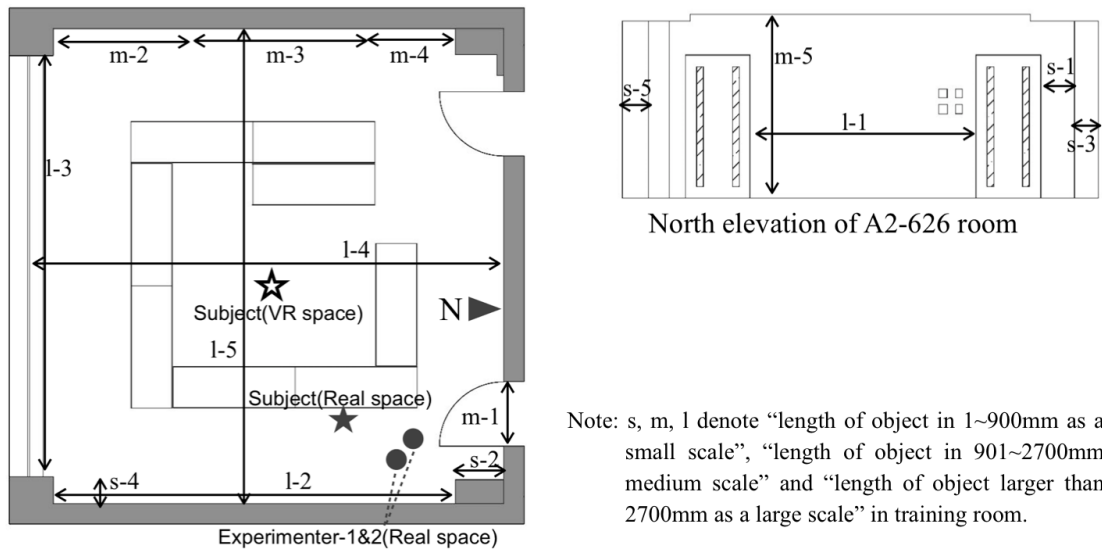


Figure 2-3 Layout and photos of training room: (a) Real space; (b) VR space. (Hiroshima University, School of Engineering A2-626 meeting room)

Table 2-3 Length of objects in training room (indoor)

No.	objects	length (mm)
s-1	Wall length 1	500
s-2	Wall length 2	715
s-3	Wall length 3	350
s-4	Wall length 4	400
s-5	Wall length 5	390
m-1	Door width	950
m-2	Wall length 6	2000
m-3	Whiteboard width	2700
m-4	Wall length 7	1500
m-5	Room height	2700
l-1	Wall length 8	3320
l-2	Wall length 9	6200
l-3	Window width	6200
l-4	Room width	7000
l-5	Room length	7000

Note: s, m and l denote “length of object in 1~900mm as a small scale”, “length of object in 901~2700mm medium scale” and “length of object larger than 2700mm as a large scale” in training room.

は空間内を自由に移動しながら、トレーニングを行った。一方、VR空間の場合はそれとはやや異なり、最初は部屋の中央に位置して、トレーニングの手順の説明を受けた。その際、最初の身体の向きは被験者それぞれランダムに設定した。その後は、実空間と同様に空間内の自由な移動を認めた。また、トレーニング空間でも、試験空間と同様に回答箇所は被験者ごとにランダムな順序で尋ねた。

また、VR空間では、実際のトレーニング空間と同じモデルを構築し、HMDにより呈示した。被験者の観察する映像は、被験者の頭部および身体の動きに追従して変化するものとし、被験者がVR空間内で移動しても十分に余裕のある大空間(広島大学工学部大会議室)で実施した。なお、VR空間での回答箇所の指定においては、被験者が観察している画像内にそれと分かるように赤いラインで表示されるようにした。

トレーニング終了後、再度、試験空間に戻り、実験者が指定する最初と同一の15箇所について回答させた。トレーニング前と後の試験空間の指定箇所に対する回答を比較することにより、トレーニングの効果を確認し、実空間とVR空間を体験した被験者間で差がなければ、VR空間であってもスケール感を養うことができると考えた。また、最初と同様、試験空間における15箇所の長さの回答後、回答時の長さの推定に関する考え方について選択及び自由記述で記入させ、トレーニング前後の変化についても把握した。最後に、トレーニングによって、スケール感の向上効果に関する印象についてを被験者に記入させた。

なお、試験空間とトレーニング空間の回答箇所の設定について、実際の長さが0mmから900mm、901mmから2700mm、2701mm以上の箇所を「小スケール」「中スケール」「大スケール」としてそれぞれ定義する。また、本実験は建築空間の設計者を対象とするため、箇所の選定は、これまでの判断既往研究でよく用いられた「視点から対象物までの距離」[9,49-53]「stake(柱)間の間隔」[54,55]といった実験を実施するために用意した箇所ではなく、実際の空間内に存在しているものの長さや空間の距離などを主として設定した。

2-2-2. VR空間の呈示装置

VRにより室内空間を呈示する機材としては、Oculus社製のHMD(商品名:Oculus quest)を使用した。HMDに内蔵されたディスプレイは解像度2880×1600pixel(片眼1440×1600pixel)[56,57]、視野範囲94°(横方向)×94°(縦方向)であり、両眼視差をふまえた各眼用の画像が左右のディスプレイに呈示される。また、見る映像と身体の動きとが合わないことが酔い感の生じる原因の一つになるという観点から[58]、前後上下左右の動きに対応するようになっており、被験者の現実空間と同じ視点高さでの自由な移動にVR画像も追従する。また、VR空間のモデリングには Robert McNeel & Associates 社製の3次元CADソフトウェア(商品名:Rhinoceros)を使用し、実空間のように屋内の柱や窓・扉などの開口部のみならず、天井面の照明器具、机、椅子、黒板などの什器についても再現した。

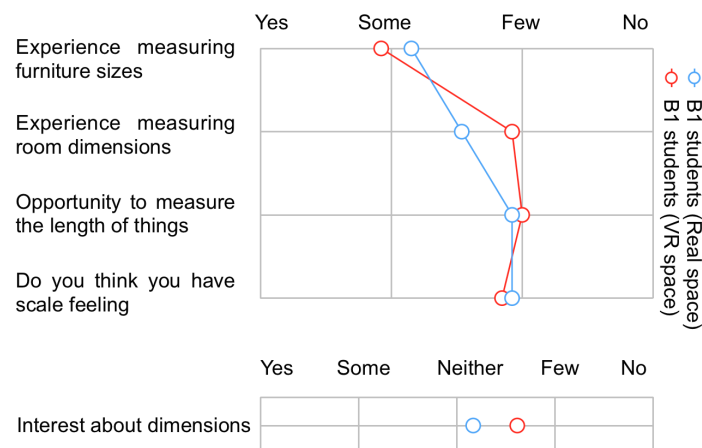
2-2-3. 被験者概要

被験者はいずれも広島大学工学部第四類に所属する学生としたが、設計製図で習得した基準寸法などが実験結果に影響することのないよう、建築設計等に関する学習経験がなく、スケール感に乏しいことが予想される1年生に限定した。被験者数は実空間、VR空間いずれも13名で、前者には女性4名を含むが、他は男性である (Table 2-4)。

Table 2-4 Number of subject

Grade	Date	Training space	Number (M/F)
B1	2019.12.2~2019.12.19	real space	13 (9/4)
		VR space	13 (13/0)

両グループ間の学習効果を比較する前提として、実空間とVR空間の被験者本来のスケール感や、スケールに関する知識について確認する必要があるものと考え、被験者のものの長さに関する意識・経験についての質問に対する回答結果をFigure 2-4に示す。これより、いずれのグループも平均的には概ね実際の値に近い回答となっていることがわかる。また、回答項目ずつt検定を行い、その結果、有意水準10%を下回る項目がないことから、グループ間で有意差のないことが読み取れる。したがって、実空間、VR空間それぞれの被験者グループ間に、もともとのスケールに関する知識の差はほとんどなく、実験結果の解釈にあたってそれらを積極的に考慮する必要のないことが確認できる。



Note: * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. p denote “ p value” of t -test.

Figure 2-4 Awareness and experience about the length and dimensions of things

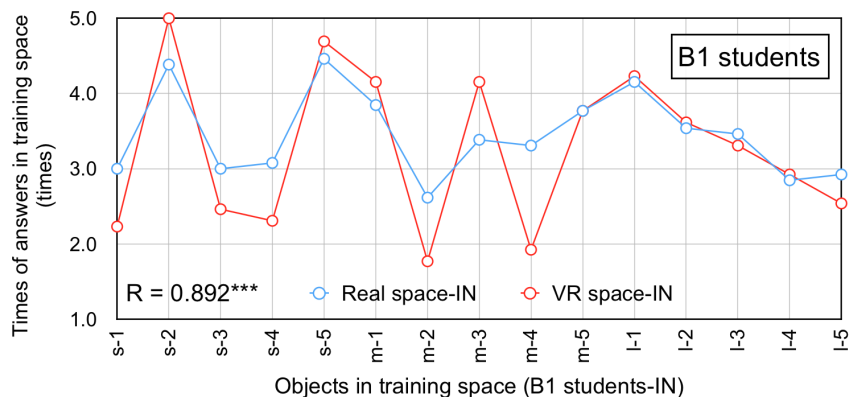
2-3. 実空間とVR空間とのトレーニング効果の比較

2-3-1. トレーニング状況の比較

続いて、本項では、異なるトレーニング手法において、実際に被験者が行った学習の内容が同一か否かについて、「回答回数」「回答時間」の各観点から、両グループのトレーニング状況を比較する。

① 回答回数

トレーニング空間で長さを尋ねた15箇所において、正答までに必要な回答回数の平均値を、VR空間、実空間ごとにFigure 2-5に示す。これより、実際の値に端数のあるs-2やs-5, l-1においては回答回数が多く、単純な値をとるm-2やm-4で少ない共通した傾向が両者ともにみられる。相関係数の値も高いことから、トレーニング手法に関わらず、両グループに共通した傾向のあることがわかる。一方、*t*-検定の結果をみるなら、差異が大きい箇所も幾つか存在するが、一方の空間がもう一方の空間と比べて常に多くの回答回数が必要となるといった傾向は確認できないことから、この結果から両グループ間の違いを積極的に解釈する必要はないものと考えられる。



Note: * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. p denote “ p value” of t -test.

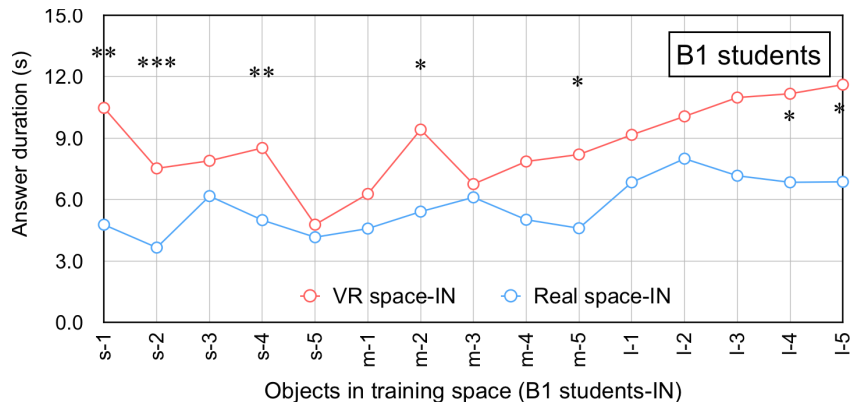
Figure 2-5 Times of answers in training room

② 回答時間

実験者が長さを質問してから、被験者が回答するまでに要した時間を記録し、1箇所につき5回までの複数回のやりとりにおける平均値を「平均回答時間」として求め、さらに15箇所それぞれについて、グループ別に13人の平均値を求めた。結果をFigure 2-6に示す。これより、いずれの箇所でも、VR空間の方が実空間より長いことがわかり、その中で、約半数の箇所に有意差のあることが確認できる。

フェイスシートの「VR経験の有無」の結果をみるなら、VR空間では半数以上の被験者に経験がないことから、新しい技術を体験しながら、さらにスケール感について学習するには、普段の実空間での学習と比べ、慣れるまでにより長い時間がかかるものと予想される。

以上、本項の結果をまとめると、トレーニング手法間の回答状況の比較により、回答にかかる時間には多少の差異があるものの、正答までの回答回数について両グループに共通した傾向のあることがわかる。これより、実空間、VR空間ともに被験者は同レベルのトレーニングを受けたものと考えられる。



Note: * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. p denote “ p value” of t -test.

Figure 2-6 Answer duration(s) in training room

2-3-2. トレーニング前後での「試験空間」における指定箇所長さに対する回答状況

試験空間におけるトレーニング前後における回答箇所ごとの回答値による箱ひげ図、平均値と標準偏差をFigure 2-7, Table 2-5をそれぞれに示す。箱ひげ図において、濃い灰色がトレーニング前、薄い灰色がトレーニング後の回答分布である。縦軸に四角枠を付した数値は、箇所ごとの実際の長さを示している。

四分位範囲と標準偏差の値から、トレーニング前の散らばりより、トレーニング後の散らばりが小となる箇所は、実空間とVR空間それぞれ13と11箇所と多数に上がることがわかる。これより、いずれの空間でも学習効果があり、さらに回答が正答に接近する傾向も類似するといえる。これは、Gibsonら[48]が主張しているスケール感のトレーニング効果は標準偏差の減少によって示されるということと対応している。ただし、箇所によってはトレーニング前後で標準偏差が変わらない場合もみられる。すなわち、実空間での「5(m).窓の高さ」や「8(s).机の幅(短辺)」, VR空間での「10(s).机の高さ」などのように、トレーニング前の回答の散らばりが元々小さいため、トレーニング後の標準偏差が大幅に改善されていない箇所が、両グループに共通して確認される。しかしながら、上述した箇所は、トレーニングによる散らばりの減少は見られないが、トレーニング前の散らばりがもともと小さいため、トレーニング効果が明確に現れていない可能性があることに加えて、散らばりが逆に大となる傾向もみられないことから、必ずしも学習効果がないとは言えない。一方、「13(m).椅子から壁」では、実空間では標準偏差が減少しているのに対して、VR空間ではトレーニング後の回答の散らばりが大となり、トレーニングがあまり効果的とは言えない。

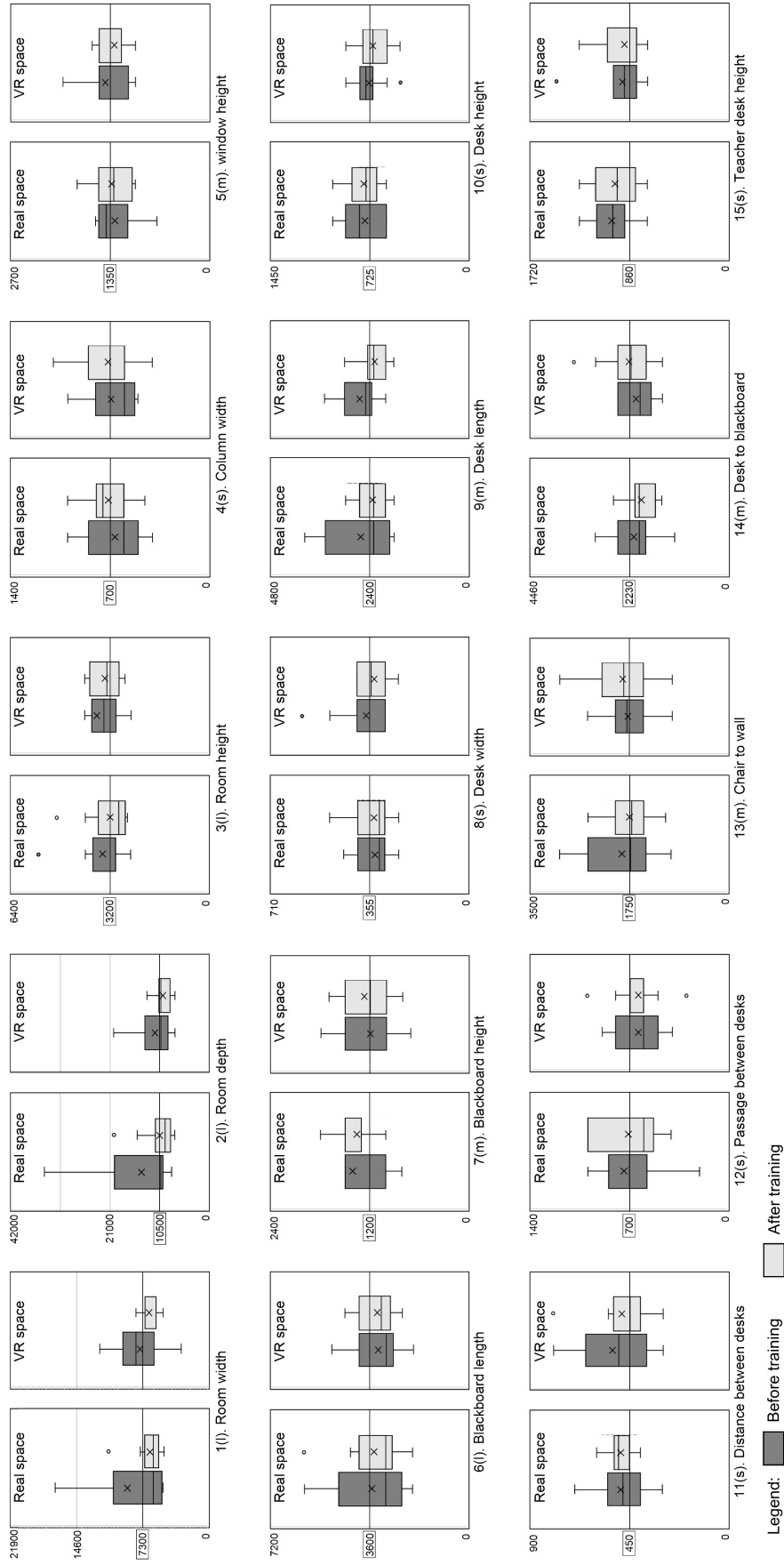


Figure 2-7 Answers before and after training in test space

Table 2-5 Mean and standard deviation of answer value in each objects (indoor)

objects	correct values	B1 students' answer values									
		real space					VR space				
		before		after		“+/-”of SD	before		after		“+/-”of SD
		mean	SD	mean	SD		mean	SD	mean	SD	
1(l)	7300	8908	5696	6415	1532	-	7615	2305	6562	916	-
2(l)	10500	14122	7457	10169	3512	-	11231	3512	9654	1680	-
3(l)	3200	3408	741	3169	643	-	3615	1055	3369	465	-
4(s)	700	661	203	708	150	-	688	162	712	181	+
5(m)	1350	1273	271	1325	247	-	1415	282	1292	194	-
6(l)	3600	3495	1226	3415	1011	-	3308	867	3331	622	-
7(m)	1200	1400	725	1350	204	-	1192	295	1269	278	-
8(s)	355	336	59	340	68	+	369	91	340	49	-
9(m)	2400	2609	778	2323	353	-	2631	423	2262	310	-
10(s)	725	758	152	765	114	-	735	99	700	106	+
11(s)	450	487	115	488	56	-	531	165	488	148	-
12(s)	700	734	292	707	229	-	638	160	640	154	-
13(m)	1750	1886	572	1738	334	-	1785	353	1881	553	+
14(m)	2230	2125	504	1946	330	-	2092	385	2246	531	+
15(s)	860	1012	171	984	190	+	923	189	900	165	-

Note: All figures are in millimeters unit.; “+” and “-” denote SD value after training is large or smaller than SD before training.

以上より、実空間、VR空間間で全般的には類似性が認められ、多くの箇所では実空間、VR空間共に学習効果が期待できるものの、「13(m).椅子から壁」のような両グループ間で差異のある箇所も少数存在することがわかる。

2-3-3. 誤差率によるトレーニング効果の比較

回答された値と実際の値との違いを検討する際、その差の絶対値を回答の誤差として算出した。誤差と実際の値との関係についてをFigure 2-8に示す。ここで、「実空間」と「VR空間」、トレーニング前後のいずれでも、回答誤差と実際の値との間に正の相関関係があり、長い箇所に対

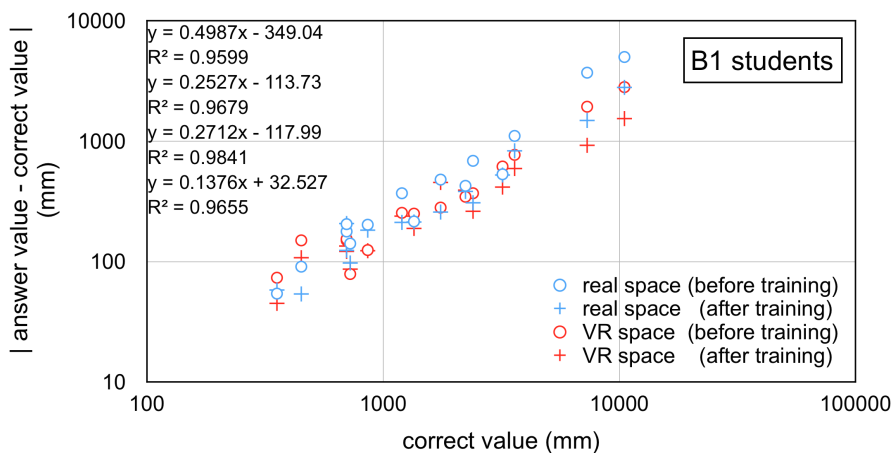


Figure 2-8 Correlation between absolute values of answer inaccuracy and correct values in test room

する回答の誤差は短い箇所の誤差より大となる傾向がみられ、箇所間で大きな差異の存在することがわかる。これより、誤差の大きさは、実際の長さの大小に影響されるものと推察される。この傾向は、これまでの多くの既往研究[48,54,55]においても確認される。

箇所の実際の長さによる影響を避けることを意図し、Levinら[54]は「(回答値-実際の値)/実際の値」, Lamptonら[55]は「回答値/実際の値」それぞれの計算結果を「percent error」として、それを用いて誤差を評価した。ただし、先行研究で用いられた指標のメトリクスを配慮すると、例えば、回答値が実際の値の0.5倍と1.5倍の被験者双方が存在する場合、「percent error」の計算結果は-0.5と0.5、被験者間「percent error」の平均値は0となり、誤差の量が十分正確に反映されるものとはいえない。

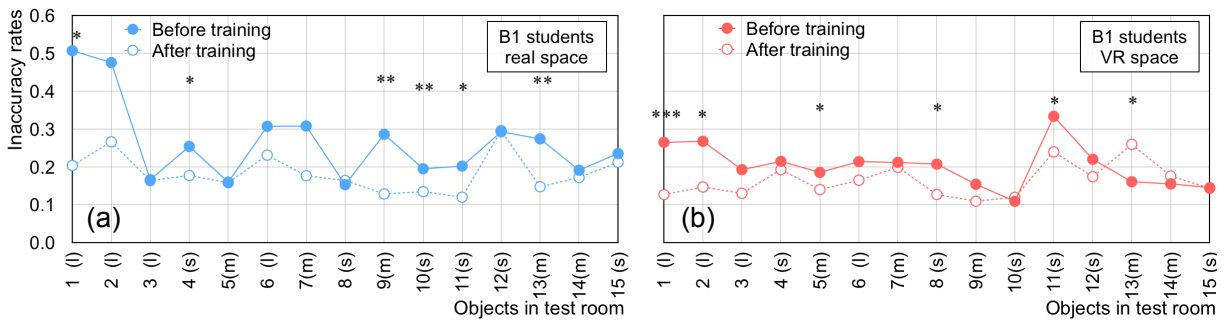
そこで、箇所の実際の長さや、回答が実際の値より大か小かにかかわらず、実際の値にどれだけ接近したかを定量的に比較するため、Levinら[54]ら使用している「percent error」の絶対値を計算した結果を「誤差率」と定義し、スケール感を評価するための新たな指標(式1)として採用した。

$$\text{inaccuracy rate} = \frac{|\text{answer value} - \text{correct value}|}{\text{correct value}} \quad \dots (1)$$

① 箇所ごとの誤差率による比較

Figure 2-9に、実空間とVR空間それぞれの、トレーニング前後の誤差率の被験者13人の平均値を、試験空間で回答させた15箇所ごとに示す。

これより、実空間では、トレーニング後の誤差率がトレーニング前のそれより減少したのが9



Note: * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. p denote “ p value” of t -test.

Figure 2-9 Inaccuracy rates before and after training: (a) real space, (b) VR space

箇所、両者がほぼ同程度で推移し、誤差率の増減が±3%以内に収まるのが6箇所となる。一方、VR空間でも、トレーニング後の誤差率が減少したのが9箇所、ほぼ同程度が5箇所、増加したのが1箇所になる。したがって、実空間、VR空間ともに、トレーニング後に誤差率が減少しており、ほぼ同様の学習効果が得られていることが改めて確認できる。

箇所ごとの結果をより詳細にみると、実空間の「1(l). 部屋の幅」「2(l). 部屋の奥行き」

「9(m). 机の長辺」, VR空間の「1(l). 部屋の幅」「2(l). 部屋の奥行き」など, 当初の誤差率が大きい箇所では, 他の箇所と比較してトレーニングによって誤差率の減少がより顕著であることが確認される。

上述した現象をより明確に把握するため, 被験者13人の誤差率の平均値に基づく, 15箇所をサンプルとした, トレーニング前の誤差率と, 誤差率の増減(トレーニング後の誤差率をトレーニング前のそれで引いた結果)との関連を, 両者の相関係数を含め, グループごとにFigure 2-10に示す。実空間とVR空間の両者とも, 相関係数0.7以上の関連が認められ, 当初の誤差率が大きいほど, その減少も大になることがわかる。すなわち, もともと誤差率の大きい箇所では, トレーニングは効果的であるが, 逆にもともと誤差率の小さい箇所では効果があまりないと言える。

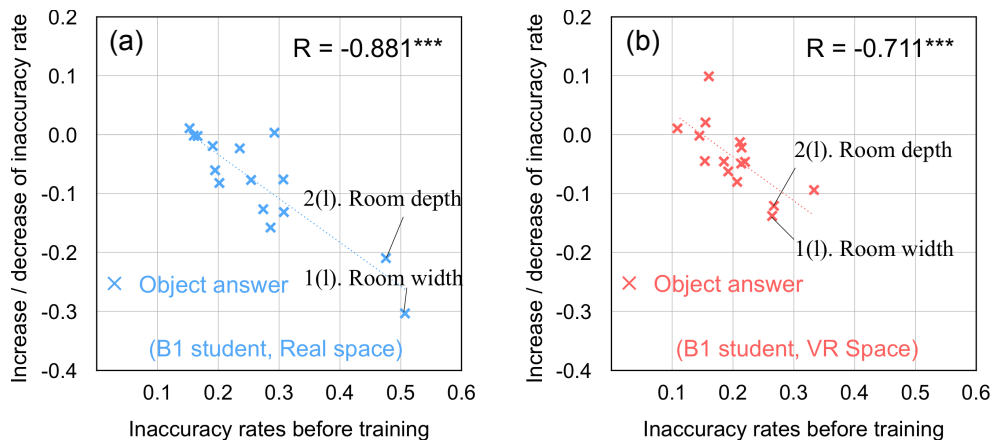
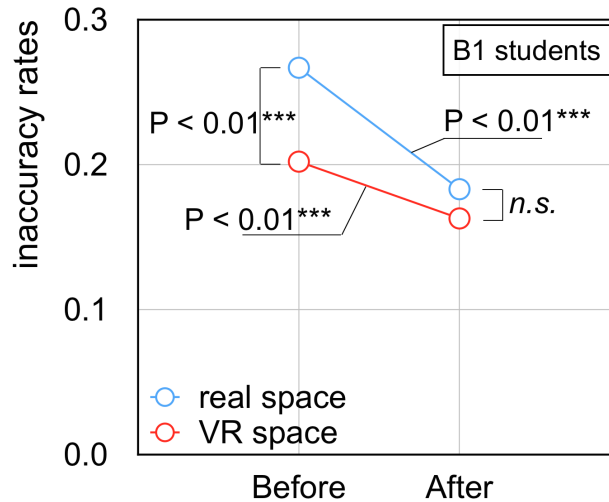


Figure 2-10 Correlation between inaccuracy rates before training and increase / decrease in inaccuracy rate in test room: (a) real space, (b) VR space

② 誤差率の総平均による比較

ここで, 実空間, VR空間におけるトレーニング前と後の被験者数×15箇所の誤差率総平均(全195回答)の*t*-検定結果をFigure 2-11に示す。トレーニング前後の*t*-検定結果をみると, 両グループとも1%の有意差がみられ, 明確な向上傾向が認められる。また, トレーニング前においては, 実空間とVR空間との間で有意差が確認されるものの, トレーニング後では両者の間に有意差のないものがある。これより, VR空間でのトレーニングでも, 実空間と同様にスケール感が養われることが確認できる。



Note: * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. p denote “ p value” of t -test.

Figure 2-11 Inaccuracy rates before and after training (mean of all objects)

2-4. 結語

本章では、スケール感のトレーニング実験を通して、建築教育の場面において、実空間の代替としてVRによる呈示建築空間に使用する場合、寸法が正確に把握できるか否かを検証した。

具体的には、実空間、VR空間両グループそれぞれでトレーニングする際の状況を比較した結果、実空間、VR空間両グループに一部共通した傾向のあることを示したが、VRという新しい技術を体験しながらスケール感を学習する際、長さを判断するにあたって、実空間と比較して若干長い思考時間の要することを把握した。

スケール感の学習効果について、被験者間の標準偏差や誤差率が減少した回答箇所数からみるなら、両グループとも積極的な効果の得られていることが確認できた。また、もともと誤差率の大きい箇所では、トレーニングは効果的であるが、逆にもともと誤差率の小さい箇所では効果があまりない傾向が、両グループとも存在することが把握できた。

実空間、VR空間のトレーニング前後の誤差率を比較すると、トレーニング前において実空間とVR空間との間で、当初のスケール感が異なるにもかかわらず、トレーニングによって概ね同等程度になっていることが確認された。

これらの結果から、大学の建築設計教育において、実空間の代替としてVRによる呈示を建築空間に使用する場合、寸法といった空間情報が正確に把握できるか否かの観点から、実空間の代替性を有することを示した。

次章では、大学における建築分野の学生のスケール感を養成することにあたって、空間規模の異なることがVR空間を用いたスケール感のトレーニング効果に影響を及ぼすことを明らかにすると共に、建築の学習経験の異なる各学年それぞれに対して、VR空間の適用方針を提案することを目標として検討を進める。

第 3 章

空間規模と学生の建築経験を考慮したスケール感
学習におけるVRの適用方法の提案

3-1. 序

前章では、屋内空間を対象とし、スケール感のトレーニング実験を通して、建築教育の場面において、実空間の代替としてVRによって呈示する建築空間を使用する場合、寸法が正確に把握できるか否かを検証した。

本章では、スケール感の学習にあたって、VRのよりの確な適用方法を明らかにするため、前章と同じスケール感に着目して、学生の学年や対象空間の規模の異なることが、VRを適用する際の学習効果に及ぼす影響を把握し、VRの最適な適用時点と活用方法を明らかにする。

そのため、広島大学工学部の建築分野に所属する学生のうち、専門教育の経験が全くなく、スケール感の乏しいことが想定される1年生(以降, 1年生)のほか、十分な学習経験を有する4年生以上の学生(以降, 4年生)を被験者として、2章と同様の試験→トレーニング→再試験, といったトレーニング実験をVR空間でそれぞれ実施した。また、空間規模が大きいほど、学習難易度が高いことが予想され、そこで、空間の規模がトレーニング効果に及ぼす影響を検討するため、屋内よりも規模が大きな屋外空間を対象にした実験も行った。

なお、参考として、実空間を対象としたトレーニング実験も併せて実施するが、試験空間、トレーニング空間間の移動負担を配慮し、屋外空間実験のトレーニングはVR空間のみで行うこととした。

3-2. 屋内外空間を対象としたVR空間実験概要

3-2-1. 実験手順

屋内空間の場合、4年生対象の実験は、前章で述べた1年生を被験者とした実験と全く同様な手順で行ったため、以下、屋外空間実験の手順を主として述べる。

実験においては、まず、被験者自身について尋ねるフェイスシートを記入させた後に、次の

※ Experimental procedure was carried with no interruptions or breaks

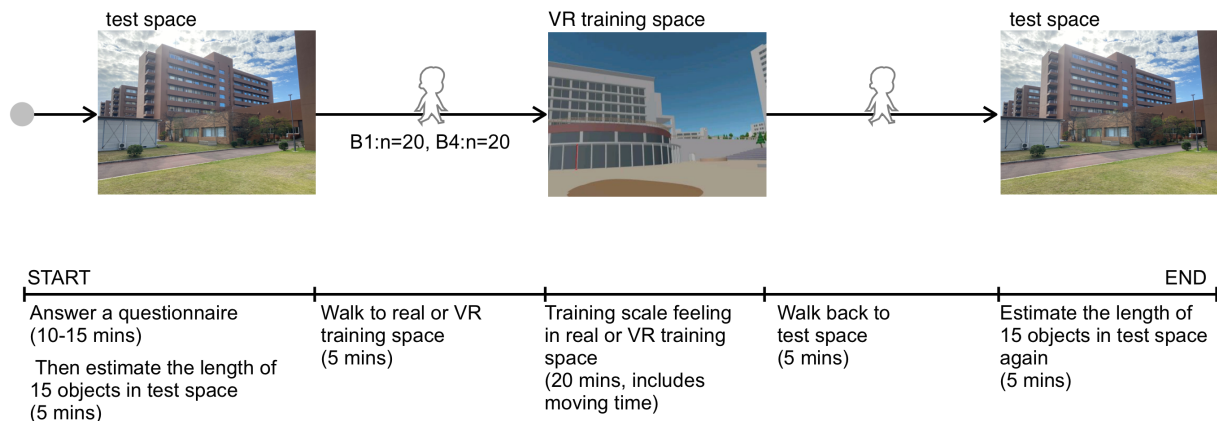


Figure 3-1 Experimental procedure (outdoor)

①~③を実施した(概念図をFigure 3-1に示す)。以降, 各段階について詳述する。

①: 被験者の元々のスケール感がどの程度かを把握するために, 試験空間(広島大学工学部A1棟周辺とC3棟周辺, 東図書館周辺の計3地点)に実験者が被験者を誘導し, 口頭で指定する15箇所の長さを1箇所ずつ回答させた。試験空間の立ち位置と, 長さを回答させる15箇所をFigure 3-2, Figure 3-3, Table 3-1に示す。被験者はまず実験者の方向を向いて実験手順の説明を受けた。次に, 地面に示した5m×5mの範囲内から, 実験者が指定した箇所それぞれについて長さを回答した。また, 回答順序が結果に影響することのないよう, 被験者ごとにランダムに回答させた。

②: VR空間においてスケール感を養うためのトレーニングを行わせた。試験空間と共通した特徴を持つものの, 全く異なる空間(広島工業大学キャンパスに基づいて作成したVR空間, 計2地点)で, 実験者が指定する箇所の長さを被験者に回答させた。ただし, その際に実験者はその値が実際の値と比べて大か小かのみを伝え, それを受けて被験者には, 再び考え直した値を回答させた。被験者には1箇所につき5回まで回答機会を与え, 5回目までに正答できなかった場合は実際の値を教示した。これを複数箇所で繰り返すことで, 被験者は自分に元々あったスケール感と実際とのズレを確認・修正することができ, スケール感を養うことができると考えた。なお, 長さ10m以上の箇所では実際の値の $\pm 0.5m$ を, 10m以下の箇所では $\pm 0.1m$ をそれぞれ正答範囲として設定した。

トレーニング空間と長さを回答させる15箇所をFigure 3-4, Figure 3-5, Table 3-2に示す。トレーニングを始めるにあたって, 被験者は, まず1分程度HMDを装着し, VR空間を自由に体

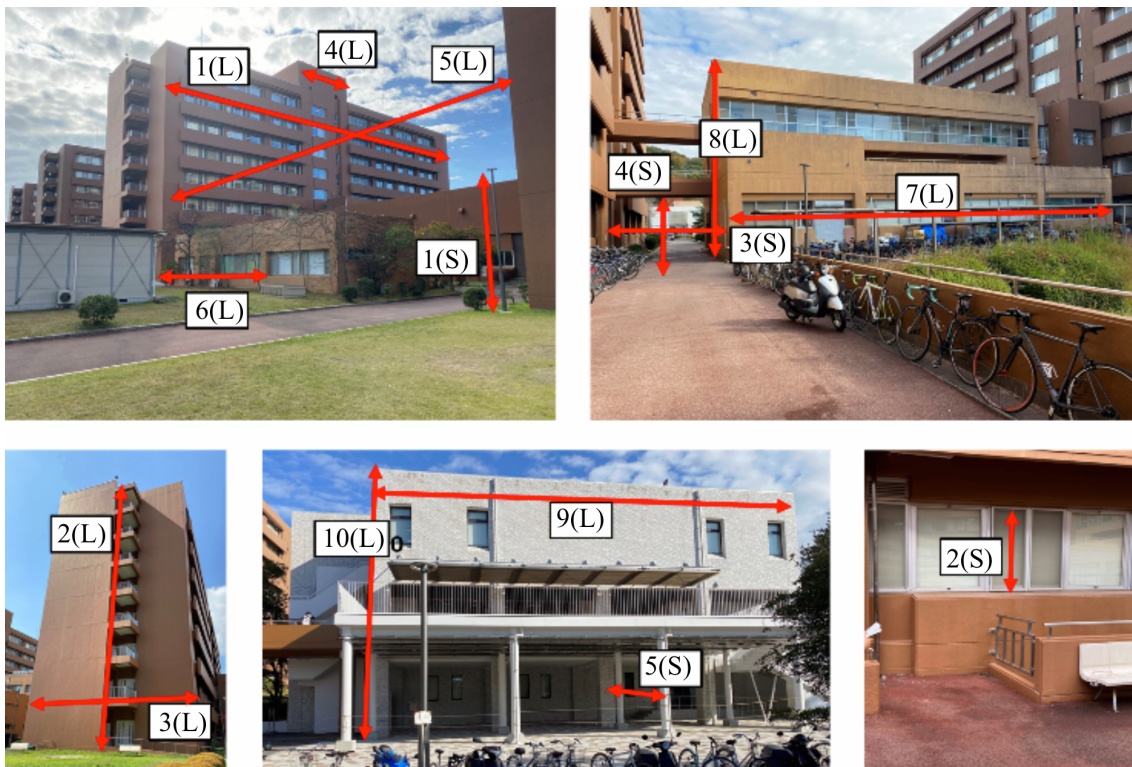


Figure 3-2 Objects in test space (outdoor) (A2 Building and East library)

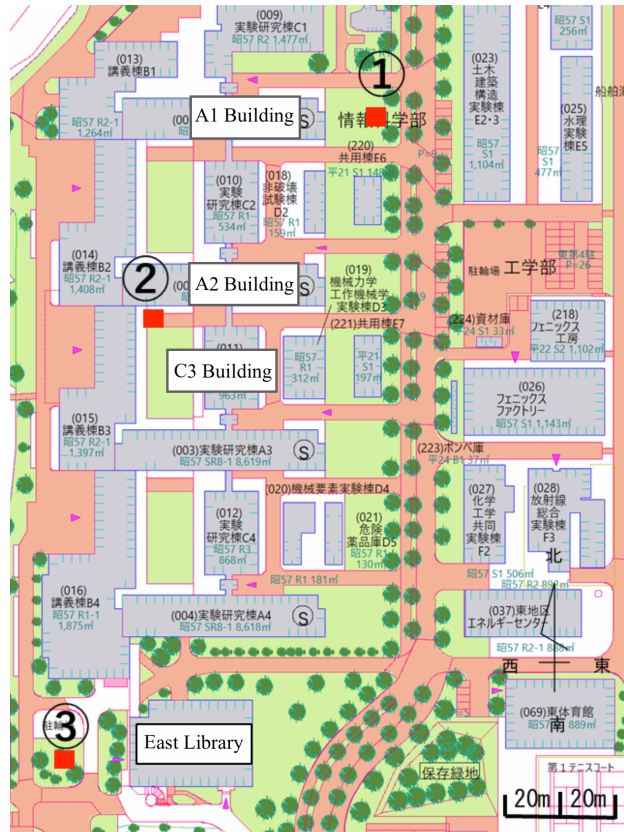


Figure 3-3 Answer locations in test space (outdoor) (A2 Building and East library)

Table 3-1 Length and visual angle of objects in test space (outdoor)

No.	Object	Length (m)	Visual angle
1(L)	Building A2 width	67.8	30°~40°
2(L)	Building A1 height	31.3	60°~70°
3(L)	Building A1 depth	14.4	40°~50°
4(L)	Rooftop protrusion length	10.8	~10°
5(L)	Distance between Building A1 and A2	43.2	50°~60°
6(L)	Distance between Building D2 and E6	10.0	10°~20°
7(L)	Building C3 width	28.8	60°~70°
8(L)	Building C3 height	13.2	30°~40°
9(L)	East Library width	24.0	70°~80°
10(L)	East Library height	13.8	50°~60°
11(S)	Outdoor light height	5.5	10°~20°
12(S)	Window height	1.5	30°~40°
13(S)	Distance between Building A2 and C3	7.2	10°~20°
14(S)	Connecting bridge height	4.0	10°~20°
15(S)	Distance between columns	7.0	~10°

Note: (S) and (L) denote “length of object in 1~10m as an outdoor small scale”, and “length of object larger than 10m as an outdoor large scale” in test space.

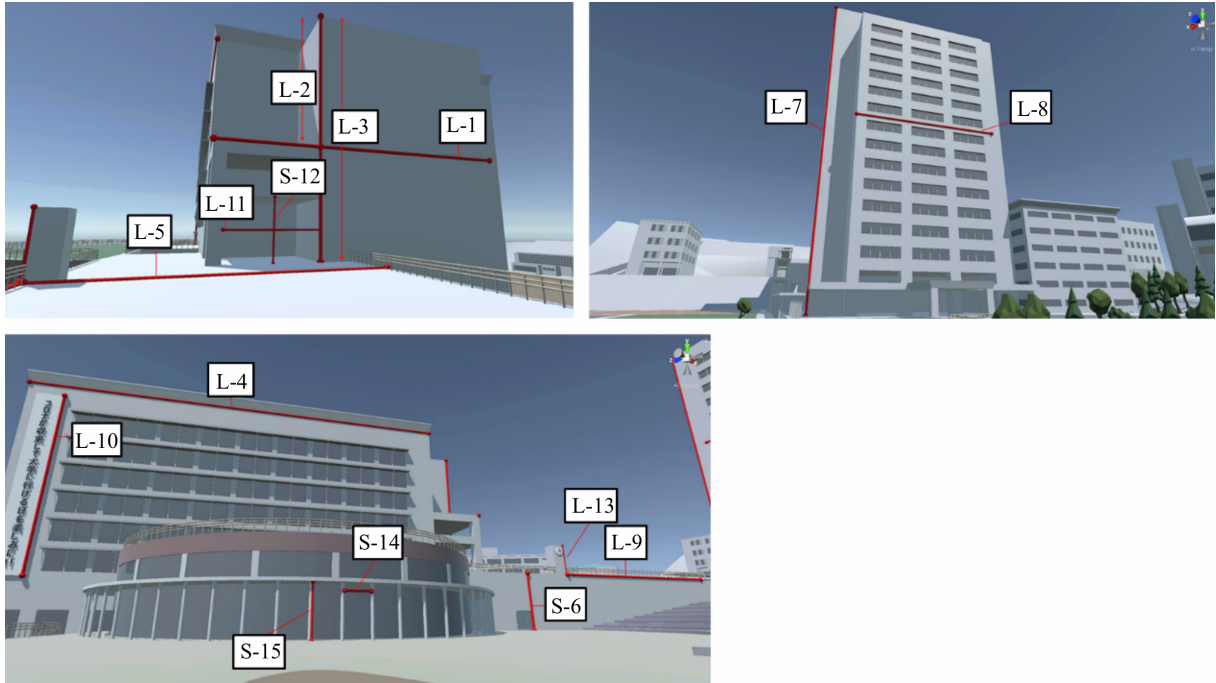


Figure 3-4 Objects in training space (outdoor)

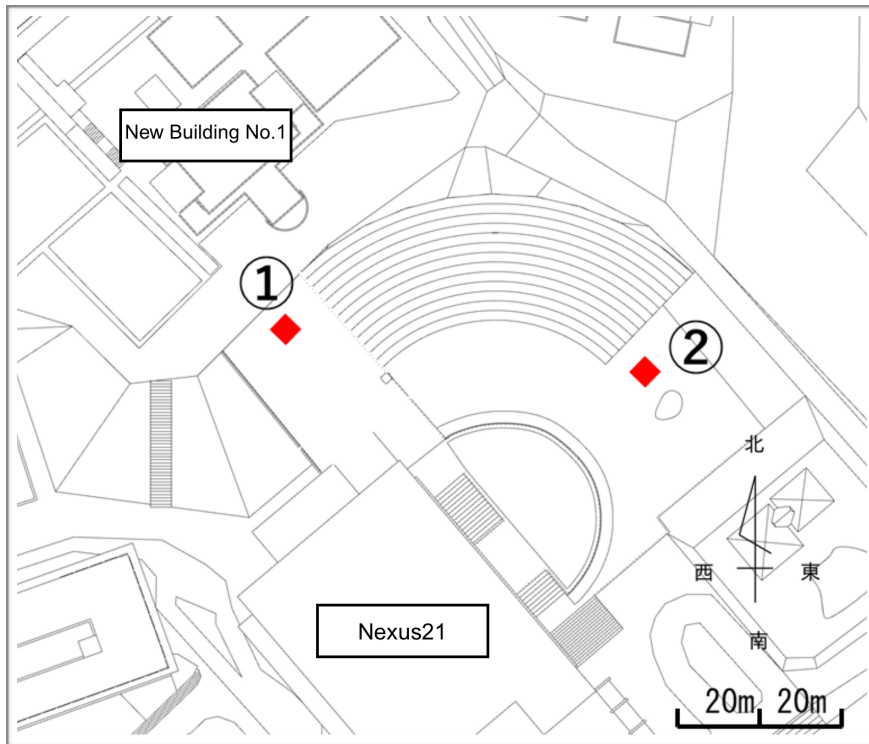


Figure 3-5 Answer locations in training space (outdoor)

Table 3-2 Length and visual angle of objects in training space (outdoor)

No.	Object	Length (m)	Visual angle
L-1	Nexus21 width (positions ①)	37.2	50°~60°
L-2	Nexus21 height (1)	17.0	10°~20°
L-3	Nexus21 height (2)	30.0	30°~40°
L-4	Nexus21 width (positions ②)	70.8	60°~70°
L-5	Connecting bridge width	27.5	40°~
S-6	Connecting bridge height	9.0	~10°
L-7	New Building No.1 height	65.0	60°~70°
L-8	New Building No.1 width	29.0	30°~40°
L-9	Connecting bridge length	31.1	10°~20°
L-10	Hanging curtain length	29.4	20°~30°
L-11	Outdoor light height	10.5	10°~20°
S-12	Nexus21 entrance width	7.0	10°~20°
S-13	Clock height	5.0	~10°
S-14	Distance between columns	2.4	~10°
S-15	Columns height	4.5	~10°

Note: S and L denote “length of object in 1~10m as an outdoor small scale”, and “length of object larger than 10m as an outdoor large scale” in training space.

験した。続いて、実験者がトレーニングの手順を説明した後、被験者はVR空間内で指定した5m×5mの範囲内を自由に移動しながら、トレーニングを行った。したがって、被験者の移動に対して十分に余裕のある空間(広島大学工学部A2-626会議室)で実験は実施した。被験者が観察する画像は、被験者の頭部および身体の動きに追従して変化するものとし、回答箇所の指定は、画像内にそれと分かるように赤いラインを表示させて行った。なお、VR空間内の最初の身体の向きや、回答箇所は被験者ごとにランダムに設定した。

③：トレーニング終了後、再度、試験空間に戻り、実験者が指定する①と同一の15箇所について、①とは異なる順序で回答させた。

これらフェイスシートの記入から①~③の過程は被験者1人ずつ連続して行うこととし、全体で1時間から1時間30分程度の時間を要した。なお、試験空間とトレーニング空間の回答箇所の設定にあたっては、縦横の方向や、視点からの距離などが多様になるよう考慮した。また、屋内空間におけるほとんどの10m以下の箇所のトレーニング効果との比較を想定し、試験空間の15箇所のうち、実際の長さが1mから10mまでの5箇所を「屋外小スケール」、10m以上の10箇所を「屋外大スケール」として区別することとした。

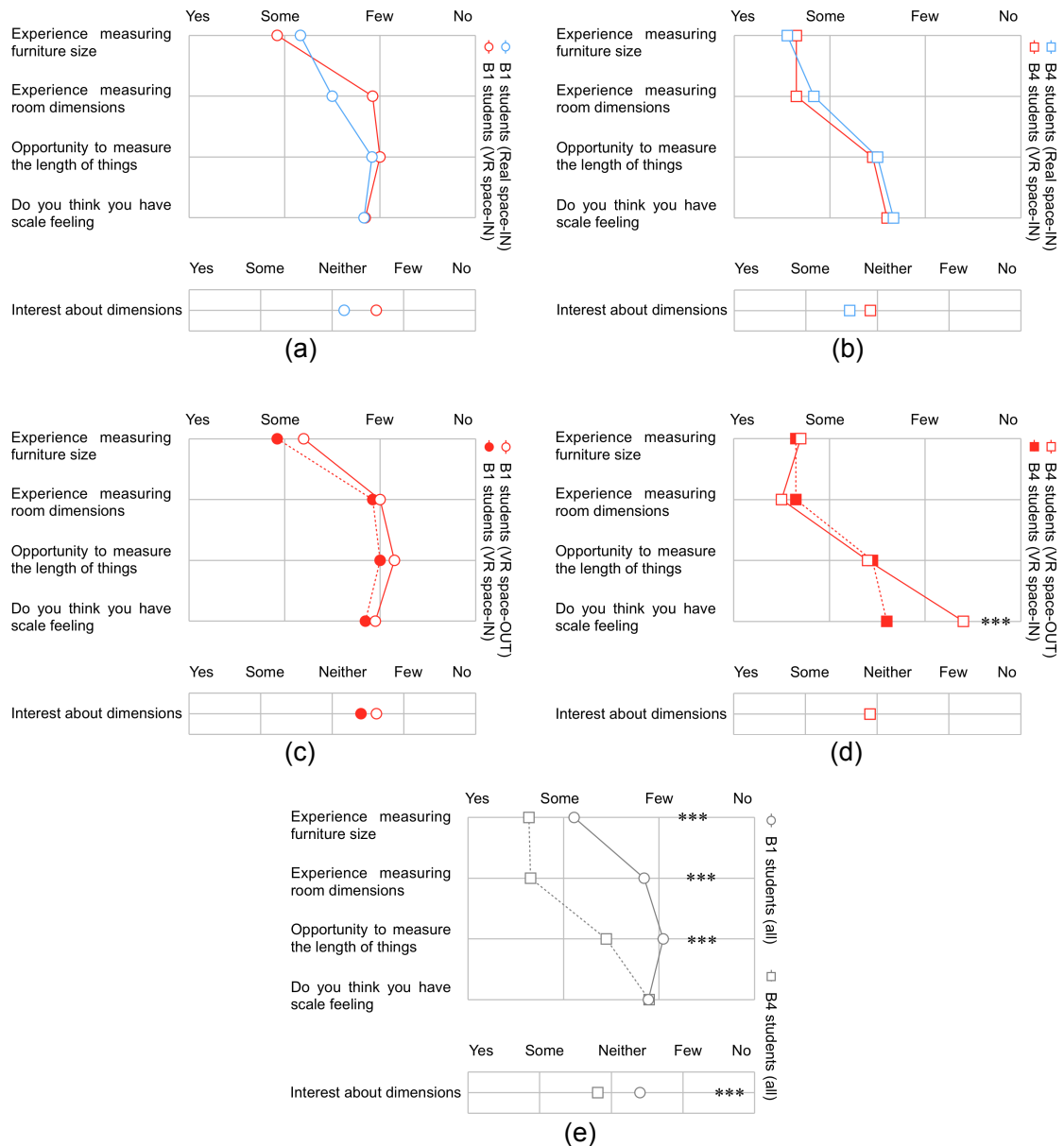
3-2-2. 屋外空間の実験装置と実験空間の設定

トレーニング用のVR空間は、Robert McNeel & Associates 社製の3DCADソフトウェア(商品名:Rhinoceros)と、Unity Technologies 社製のゲーム開発ツール(商品名:Unity3D)を使用し、空間のモデリング・レンダリングを行った。また、呈示機材としては、屋内実験と同様に、Oculus社製のHMD(商品名:Oculus quest)を使用した。

3-2-3. 被験者概要

全ての実験は、2019年12月2日から2021年4月30日の間に行った。各グループそれぞれの被験者数と実験期間の詳細をTable 3-3に示す。

本項では、屋内実空間とVR空間、屋内VR空間と屋外VR空間、1年生と4年生、などの比較によってVR空間の適用効果の検証を行う。そこで、各グループの間での学習効果を比較する前提



Note: * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. p denote “ p value” of t-test.

Figure 3-6 Awareness and experience about the length and dimensions of things:
 (a)(b) Comparison between real and VR space (indoor);
 (c)(d) Comparison between indoor and (outdoor);
 (e) Comparison between B1 and B4 students

Table 3-3 Subjects and experiment date

Experimental space	Grade	Date	Training space	subjects(M/F)
INDOOR	B1 student	2019.12.2~2019.12.19	Real space	13(9/4)
			VR space	13(13/0)
	B4 student	2020.7.13~2020.8.13	Real space	20(9/11)
			VR space	20(14/6)
OUTDOOR	B1 student	2020.12.1~2020.12.30	VR space	20(16/4)
	B4 student	2021.4.7~2021.4.30	VR space	20(14/6)

として、被験者本来のスケール感や、スケールに関する知識など個人属性について確認する必要があるものとする。そこで本項では、被験者の基本属性を尋ねたフェースシートにおける、経験や能力に関わる項目の回答結果より、各グループ間での差異を検討する。

以下、被験者のものの長さに関する意識・経験についての質問に対する回答構成割合を実空間、VR空間別(Figure 3-6(a, b)), 屋内外別(Figure 3-6(c, d)), 学年別(Figure 3-6(e))それぞれをFigure 3-6に示す。

「家具の大きさを測った経験」「部屋の寸法を測った経験」「普段の生活の中でもものの長さを測る機会」及び「寸法についての関心があるかどうか」については、実空間とVR空間、屋内と屋外でほとんど差がないことから、これまでの経験が実験結果に大きな影響を及ぼすことはないものと思われる。一方、学年の違いという観点からみるなら、4年生は3年間の大学での建築教育を受けているため、長さを測る機会と経験は1年生より有意に豊富であるほか、寸法についてもより関心のあることが読みとれる。

なお、「スケール感があると思うか」の項目は、屋内と屋外の間で差異が確認されるが、実空間とVR空間、1年生と4年生で同じ傾向は確認されていない。以上の結果より、「実空間」と「VR空間」、屋内と屋外、それぞれの被験者グループ間に、もともとのスケール感についての知識や経験にほとんど差異がなく、実験結果の解釈にあたってそれらを積極的に考慮する必要のないことが確認できる。

3-3. 学年間の比較による空間規模がスケール感のトレーニング効果に及ぼす影響

3-3-1. 屋内空間における学年間のトレーニング効果比較

① 「試験空間」における指定箇所長さに対する回答状況

前章の1年生の結果と同様に、4年生の試験空間(屋内)におけるトレーニング前後における回答箇所ごとの回答値による箱ひげ図、平均値と標準偏差をFigure 3-7, Table 3-4それぞれに示す。箱ひげ図において、濃い灰色がトレーニング前、薄い灰色がトレーニング後の回答分布である。縦軸に四角枠を付した数値は、箇所ごとの実際の長さを示している。4年生の回答状況では、VR空間の散らばりが狭くなる箇所は11箇所であり、トレーニング効果のあることが確認されるものの、実空間の場合は7箇所となり、1年生より少ない傾向が確認される。また、トレーニング前の

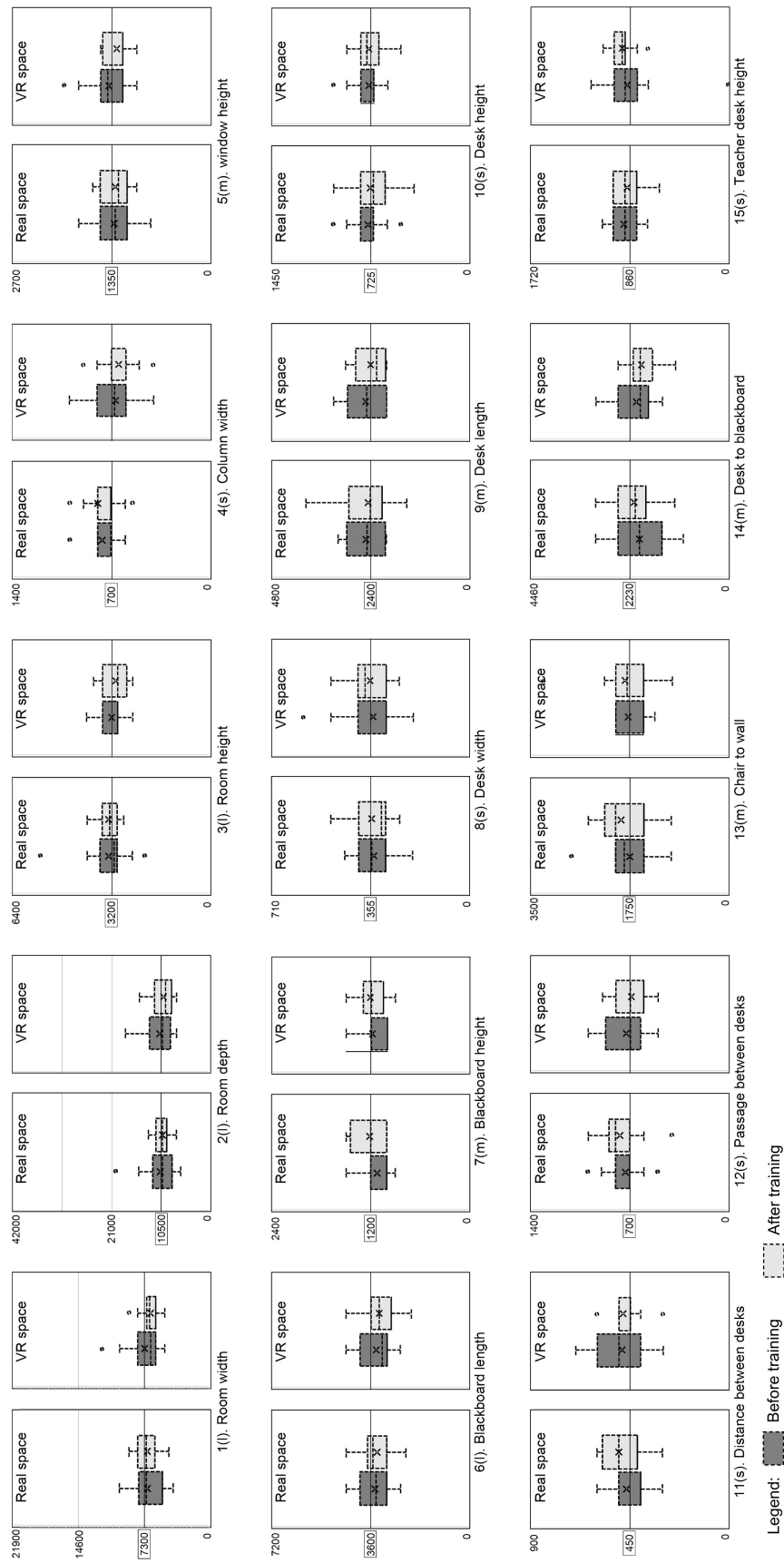


Figure 3-7 Answers before and after training in test room (indoor, B4 students)

Table 3-4 Mean and standard deviation of answer value in each objects (indoor)

objects	correct values	B1 students' answer values						B4 students' answer values													
		before		after		“+/-” of before		before		after		“+/-” of									
		mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD								
1(l)	7300	8908	5696	6415	1532	-	7615	2305	6562	916	-	6850	1613	6915	1130	-	7250	1813	6540	929	-
2(l)	10500	14122	7457	10169	3512	-	11231	3512	9654	1680	-	10535	3231	10075	1675	-	10725	2956	9660	2236	-
3(l)	3200	3408	741	3169	643	-	3615	1055	3369	465	-	3295	690	3275	342	-	3190	446	3050	375	-
4(s)	700	661	203	708	150	-	688	162	712	181	+	763	106	798	187	+	668	138	648	109	-
5(m)	1350	1273	271	1325	247	-	1415	282	1292	194	-	1310	261	1300	195	-	1395	236	1275	151	-
6(l)	3600	3495	1226	3415	1011	-	3308	867	3331	622	-	3415	576	3350	561	-	3415	527	3300	592	+
7(m)	1200	1400	725	1350	204	-	1192	295	1269	278	-	1123	168	1215	190	+	1185	171	1210	179	+
8(s)	355	336	59	340	68	+	369	91	340	49	-	345	72	351	71	-	345	86	357	65	-
9(m)	2400	2609	778	2323	353	-	2631	423	2262	310	-	2520	399	2470	527	+	2510	402	2400	351	-
10(s)	725	758	152	765	114	-	735	99	700	106	+	745	119	725	133	+	735	100	735	101	+
11(s)	450	487	115	488	56	-	531	165	488	148	-	463	89	500	145	+	486	105	483	71	-
12(s)	700	734	292	707	229	-	638	160	640	154	-	728	132	770	144	+	730	142	690	123	-
13(m)	1750	1886	572	1738	334	-	1785	353	1881	553	+	1750	397	1900	416	+	1790	249	1840	462	+
14(m)	2230	2125	504	1946	330	-	2092	385	2246	531	+	1995	498	2135	429	-	2080	413	1960	328	-
15(s)	860	1012	171	984	190	+	923	189	900	165	-	908	112	885	116	+	934	132	933	100	-

Note: All figures are in millimeters unit.; “+” and “-” denote SD value after training is large or smaller than SD before training.

標準偏差に留意すると、1年生よりも、4年生の散らばりが小となる箇所は実空間、VR空間それぞれ14箇所、10箇所となる。これより、4年生の最初の回答値は、1年生に比べより実際の値に近い。トレーニングによってさらに接近することは困難である可能性が示唆される。

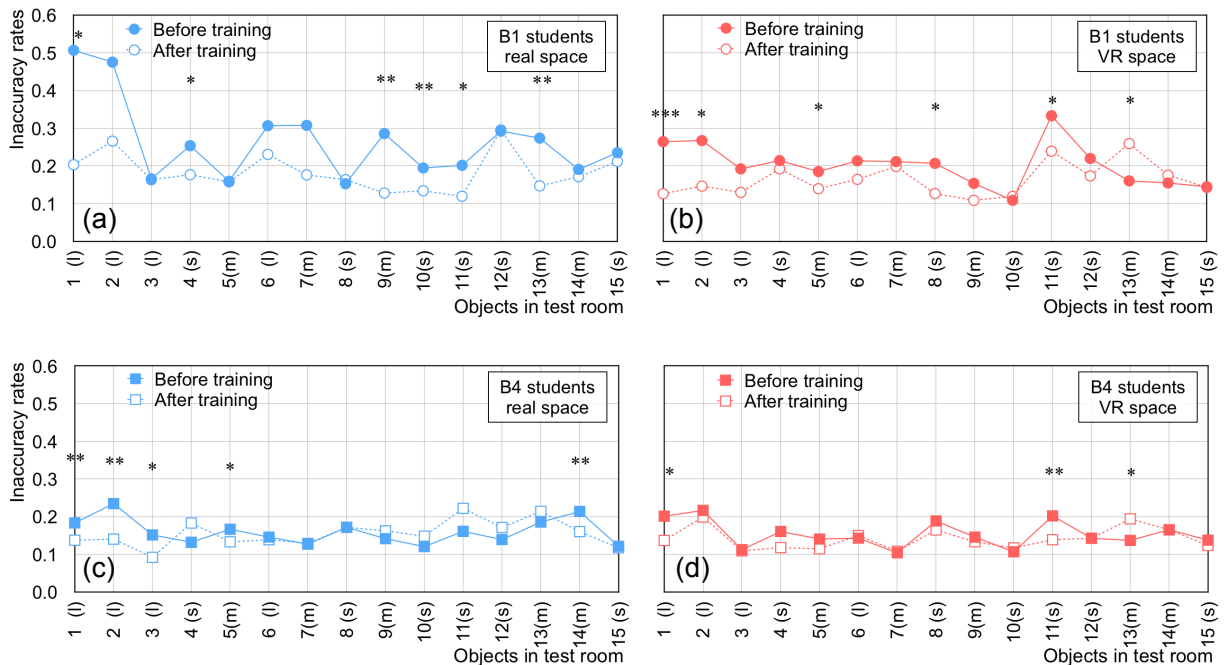
② 箇所ごとの誤差率による比較

次に、前章と同様に、4年生の実験における実空間とVR空間それぞれの、トレーニング前後の誤差率(被験者平均)を、試験空間で回答させた15箇所ごとにFigure 3-8に示す。ここでFigure 3-8(a)には、前章で示した1年生を対象とした同様の結果を再掲する。

これより、1年生実験では実空間とVR空間共にトレーニング後の誤差率がトレーニング前より3%以上減少したのが9箇所だったことと異なり、4年生では、実空間とVR空間それぞれ5箇所と4箇所であり、減少した箇所数が1年生より少なくなっている。加えて、トレーニング前後の誤差率の差異も1年生より小さいことがわかる。

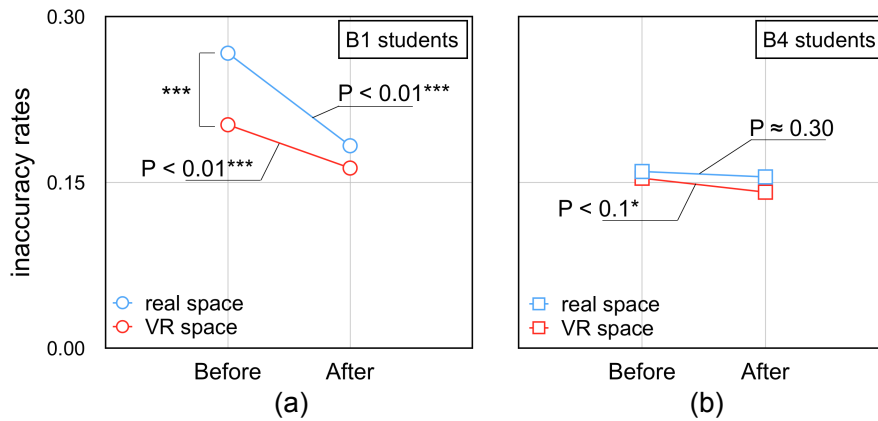
③ 誤差率の総平均による比較

ここで、実空間、VR空間におけるトレーニング前と後の被験者数×15箇所の誤差率の総平均のt-検定結果をFigure 3-9に示す。総平均で比較するならば、4年生でも、トレーニング後の誤差率の方がトレーニング前より減少していることが確認できるが、減少幅は1年生より小となることがわかる。ここで、2-3-3節で得られた「当初誤差が大きい箇所のトレーニングはより効果的」という知見を考慮するならば、一定の寸法意識を有し、もともと誤差率の小さい4年生では、トレー



Note: * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. p denote “ p value” of t-test.

Figure 3-8 Inaccuracy rates before and after training (indoor):
(a) real space B1; (b) VR space B1; (c) real space B4; (d) VR space B4



Note: * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. p denote “ p value” of t-test.

Figure 3-9 Inaccuracy rates before and after training (indoor, mean of all objects):
(a) B1, $n=195$; (b) B4, $n=300$

ニングによる効果が、1年生より小さいものと推察される。

これより、トレーニングによって箇所の長さを判断する精度の向上では上限がある可能性が示唆される。Figure 3-9(b)の結果によると、4年生のトレーニング前の誤差率は約0.15となり、トレーニング後でも大幅に減少する傾向は確認されていない。そこで、その上限は、箇所の長さのおよそ15%であることが推測される。

3-3-2. 屋外空間における学年間のトレーニング効果比較

① 「試験空間」における指定箇所長さに対する回答状況

1年生、4年生の試験空間(屋外)におけるトレーニング前後における回答箇所ごとの回答値による箱ひげ図、平均値と標準偏差をFigure 3-10, Table 3-5それぞれに示す。箱ひげ図において、濃い灰色がトレーニング前、薄い灰色がトレーニング後の回答分布である。縦軸に四角枠を付した数値は、箇所ごとの実際の長さを示している。

まず、トレーニング前後で平均値を比較するなら、トレーニング前より後で大となる箇所が、1年生と4年生それぞれ13箇所と14箇所に上り、全般に増加する傾向が認められる。類似する傾向は、多くの既往研究[8-10]においても確認される。全箇所のうち、「2(L).A1棟の高さ」「7(L).C3棟幅」「9(L).東図書館幅」「10(L).東図書館高さ」といった、実験の際に、視野範囲内に占める長さ(視野角)の大きな箇所で、1年生と4年生共に、トレーニング後の回答の平均値と中央値が、実際の値より大きく、前後の差異も著しいことがわかる。そこで、視野角が回答結果に及ぼす影響を検討するため、トレーニング前の平均値から後の平均値を差し引いた値、すなわち増加量と視野角との相関係数 r を、15箇所をサンプルとして求めた結果、1年生、4年生それぞれ $r=0.461$, $r=0.837$ と正の相関関係が認められた。本実験で用いたHMDによる表示範囲の視野角は $94^\circ \times 94^\circ$ であり、VR空間でトレーニングする際には、被験者の移動の多寡にかかわらず、観察可能な範囲が限定され、 $94^\circ \times 94^\circ$ 以外の部分には映像が表示されず、漆黒の空間にしか見えないの

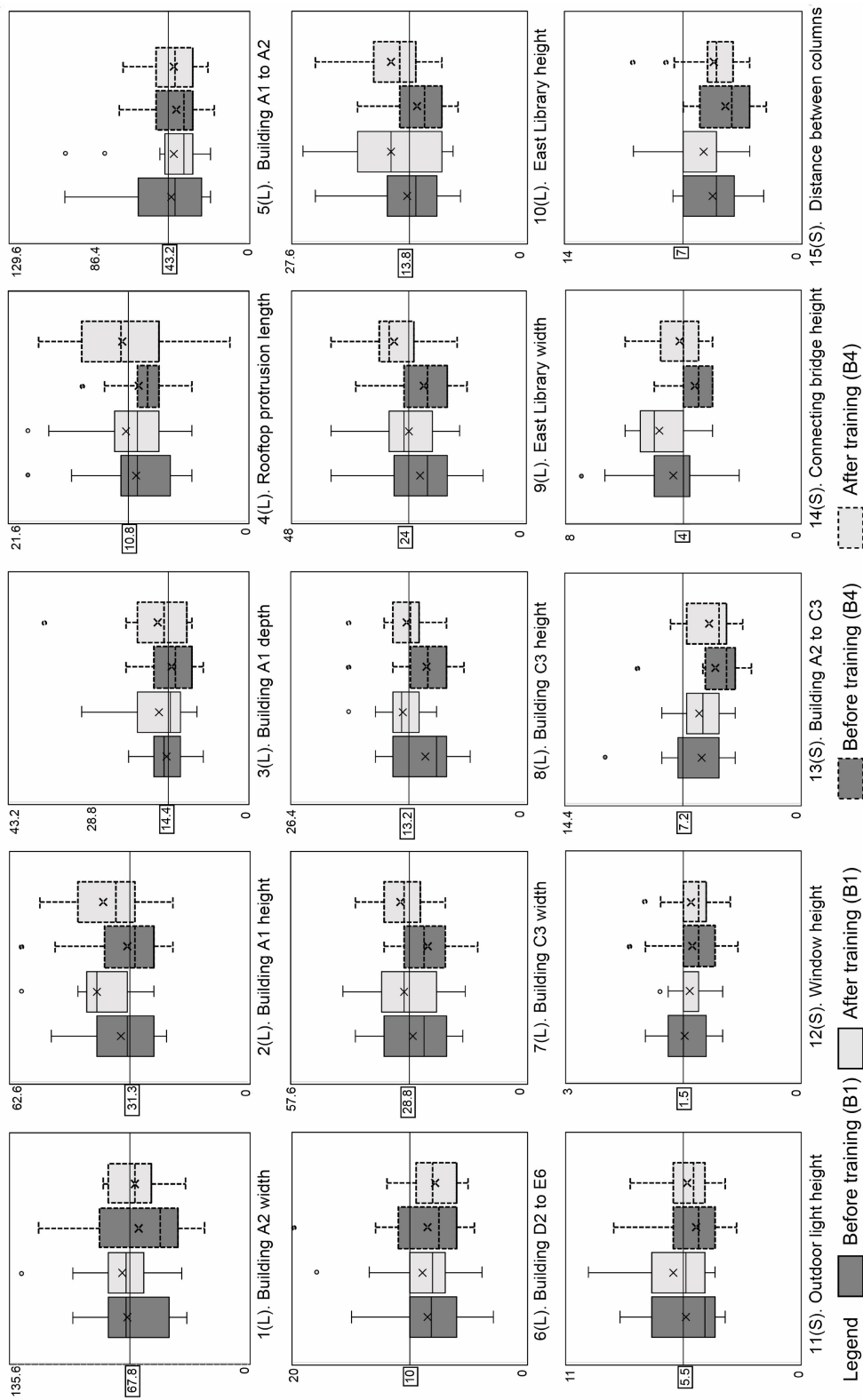


Figure 3-10 Answers before and after training in test space (outdoor, B1 and B4 students)

Table 3-5 Mean, median and standard deviation of answer value in each objects (outdoor)

objects	correct values	B1 students' answer values						B4 students' answer values							
		before			after			before			after				
		mean	median	SD	mean	median	SD	mean	median	SD	mean	median	SD		
1(L)	67.8	69.4	70.0	25.7	71.9	70.0	19.7	-	62.3	50.0	28.2	64.8	65.0	13.7	-
2(L)	31.3	33.7	32.0	8.5	39.9	40.0	11.2	+	32.1	30.0	11.0	38.2	35.0	11.7	+
3(L)	14.4	14.7	15.0	3.5	16.0	14.0	5.1	+	13.8	13.0	4.3	16.3	15.0	6.1	+
4(L)	10.8	10.1	10.0	3.7	11.1	10.0	4.2	+	9.8	9.0	4.6	11.4	11.5	4.4	-
5(L)	43.2	41.8	40.0	20.8	40.2	35.0	18.6	-	39.1	35.0	15.4	40.7	40.0	11.9	-
6(L)	10.0	8.4	8.2	3.1	8.9	8.0	3.0	-	8.5	7.5	3.6	7.8	8.0	1.9	-
7(L)	28.8	27.9	25.0	11.1	30.0	30.0	8.0	-	24.1	25.0	6.6	30.8	30.0	6.2	-
8(L)	13.2	11.3	10.0	3.1	13.9	14.0	2.8	-	11.2	11.0	3.1	13.4	13.0	3.0	-
9(L)	24.0	21.8	20.0	7.9	24.1	25.0	6.6	-	20.8	20.0	5.7	27.0	28.0	6.2	+
10(L)	13.8	14.1	13.0	4.3	16.0	16.0	5.4	+	12.8	12.0	3.1	16.0	15.0	3.9	+
11(S)	5.5	5.4	4.5	1.5	6.0	5.4	1.7	+	4.9	4.8	1.4	5.4	5.0	1.2	-
12(S)	1.5	1.5	1.5	0.3	1.4	1.5	0.2	-	1.4	1.3	0.4	1.4	1.3	0.3	-
13(S)	7.2	6.1	5.0	1.9	6.2	6.0	1.3	-	5.2	4.5	1.8	5.6	5.0	1.3	-
14(S)	4.0	4.3	4.0	1.3	4.8	5.0	1.3	-	3.6	3.5	0.6	4.1	4.0	0.8	+
15(S)	7.0	5.2	5.0	1.7	5.8	5.0	1.6	-	4.5	4.1	1.6	5.2	5.0	1.7	+

Note: All figures are in millimeters unit.; “+” and “-” denote SD value after training is large or smaller than SD before training.

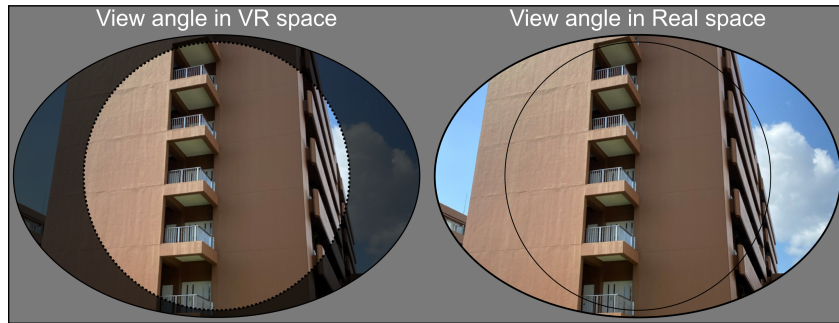


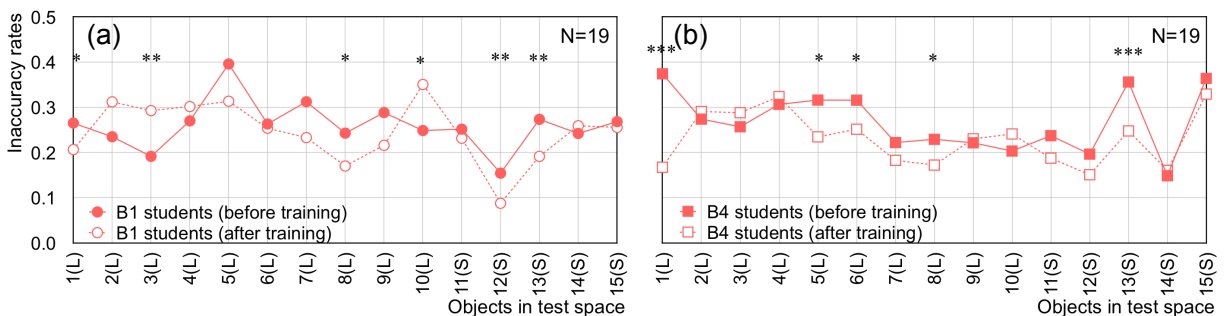
Figure 3-11 Image of view angle in VR space and real space

に対して、トレーニング後の実空間の視野範囲は、人間の最大視野である $200^{\circ} \times 120^{\circ}$ になるため、視野角が 94° を超える箇所でも視野内に含まれる。この点に留意するならば、例えば、Figure 3-11の概念図に示すように、ある建物を眺める際に、VR空間と比べ実空間の方がより多くの部分が見えるため、建物をより大きく感じる可能性があるものと推察される。すなわち、実空間での人間の視野範囲がVR空間より広いことが、実空間で観察する際にVR空間より大きく認識される原因の一つと考えられ、B. Wuら[59]の実験における、視野範囲が狭いほど距離の判断がより小さくなる結果とも対応する。ただし、本実験で用いたHMDの $94^{\circ} \times 94^{\circ}$ の視野範囲に対して、具体的に視野角がどの程度大きい場合に長さの判断に影響を及ぼすのかについては、より詳細に検討する必要があると考えている。

次に、トレーニング前後の標準偏差について検討する。トレーニング前は被験者間の違いが大きくても、トレーニングによって各自の基準が修正されるならば、トレーニング後は被験者間の違いが減少し、同じ値に収斂することが予想される。トレーニング前後で標準偏差が小となる箇所は、1年生と4年生それぞれ10箇所と9箇所であり、共に多数の箇所でトレーニングにより被験者間のばらつきが低下していることが把握できる。これより、トレーニング後の回答は、VR空間でのトレーニングによる影響により、スケールを判断する際の基準が被験者相互で近づいたものと考えられ、スケール感の向上が認められる。

② 箇所ごとの誤差率による比較

次に、誤差率を用いてトレーニング効果を検討する。箇所ごとの誤差率の平均値(サンプル数が被験者数)をトレーニング前後で比較した結果を、1年生と4年生それぞれについてFigure 3-11



Note: * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. p denote “ p value” of t-test.

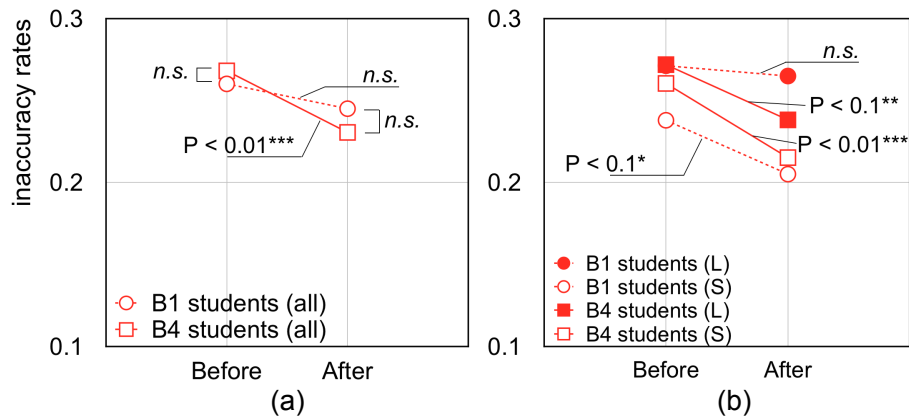
Figure 3-11 inaccuracy rates before and after training (outdoor)

に示す。これより、誤差率が減少したのは、1年生と4年生それぞれ15箇所中10箇所と9箇所、そのうち0.03 ($n=19$)以上減少したのは7箇所と9箇所であった。トレーニングによって、1年生と4年生共に誤差率が多数の箇所で減少することがわかる。これより、屋外空間であっても、屋内空間と同様に、VR空間でのトレーニングでスケール感の向上することが確認できる。

一方、トレーニング後の誤差率がトレーニング前より0.03以上増加した箇所は、いずれも「屋外大スケール」であり、具体的には、1年生は「2(L). A1棟高さ」「3(L). A1棟奥行き」「4(L). 屋上突出部長さ」と「10(L). 東図書館高さ」の4箇所、4年生ではこのうちの「3(L). A1棟奥行き」「10(L). 東図書館高さ」の2箇所であった。「2(L). A1棟高さ」「10(L). 東図書館高さ」は、いずれも視野角が大きい箇所であり、3-3-2-①で述べたVR空間の視野範囲が肉眼より狭いことによる影響と考えられる。

③ 誤差率の総平均による比較

最後に、スケールの大きさがトレーニング効果に及ぼす影響をより具体的に把握するため、誤差率に基づき、トレーニング前後の全15箇所 (Figure 3-12(a))、「屋外大スケール」10箇所と「屋外小スケール」5箇所 (Figure 3-12(b))それぞれの総平均 (サンプル数が箇所数×被験者数)を Figure 3-12に示す。



Note: * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. p denote “ p value” of t-test.

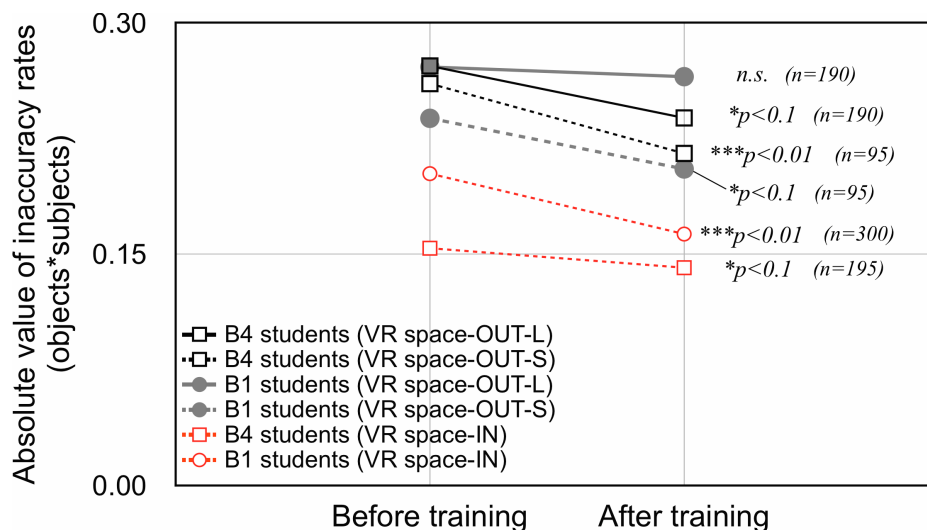
Figure 3-12 Inaccuracy rates before and after training (outdoor):
(a) mean of all objects; (b) mean of Large and Small scale objects

Figure 3-12(a)をみると、4年生の場合、トレーニングによって誤差率が有意に減少しているのに対して、1年生では同様な傾向が確認されていない。また、Figure 3-12(b)における屋外大、小スケールそれぞれのトレーニング前後での比較によると、4年生の「屋外大スケール」「屋外小スケール」はそれぞれ0.03 ($p < 0.1$, $n=190$)と0.05 ($p < 0.01$, $n=95$)の、1年生の「屋外小スケール」は0.03 ($p < 0.1$, $n=95$)の誤差率の減少がみられたのに対し、1年生の「屋外大スケール」では、トレーニング前後で約0.01 ($p > 0.1$, $n=190$)と顕著に減少しているとはいえない。4年生は、建物の階高や開口部の基準寸法についての知識や、大規模な建物を設計する課題を遂行した経験が、スケール感の学習に影響していると推察される。それら基礎的な知識や経験が、トレーニングによって補

強され、それに基づいて「屋外大スケール」においても箇所の長さを推測することが可能になったものと考えられる。これに対して、1年生はそれらに関する知識や考え方が元々ないことにより、「屋外大スケール」でのトレーニング効果が4年生より乏しくなったものと考えられる。これより「屋外大スケール」のような、普段長さを測る機会がより乏しいものを正確に判断する能力を向上させるためには、VR空間でのトレーニング以外に、予め建築に関する基準寸法に関する知識や、大規模な建物を設計する課題を遂行した経験を有していることも重要ではないかと考えられる。

3-3-3. 屋内外のトレーニング効果比較によるVRの適用方法の提案

本節では、空間規模の異なることがスケール感のトレーニング効果にどのような影響を及ぼすかを明らかにするため、屋内、屋外(スケール別)空間それぞれのトレーニング前後の誤差率を、Figure 3-13に示す。また、屋内屋外(スケール別)空間間の t -検定結果を、トレーニング前後、学年それぞれTable 3-6に示す。



Note: * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. p denote “ p value” of t -test.

Figure 3-13 Inaccuracy rates before and after training: results of large scale and small scale in outdoor space and results of indoor space

学年やトレーニングの有無にかかわらず、全般的に、屋外空間の誤差率は屋内空間より顕著に高い傾向が認められる。多くの大学の授業プログラムにおいて、最初は住宅設計、学年の上がることに従って大規模な複合施設まで、設計課題の規模が「小」から「大」となるのは一般的である[19,20]ことを参照すると、規模の大きい屋外空間でのスケール感の学習難易度は、屋内空間より高いものと考えられる。

また、スケールが10m以下であるにもかかわらず、トレーニング前後いずれの時点でも、誤差率が「屋外小スケール」>屋内空間、となる傾向が確認される。これは、屋外空間においては、対象となる箇所が観察者の視点から遠いため両眼視差が乏しく、そのため長さの判断が難しくな

ることが原因の一つとして考えられる。

Table 3-6 (a) p value of t-test between Indoor and outdoor(Large scale) space

Large scale	B1	B4
before training	0.000***	0.000***
after training	0.000***	0.000***

Note: * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. p denote “ p value” of t-test.

Table 3-6 (b) p value of t-test between Indoor and outdoor(Small scale) space

Small scale	B1	B4
before training	0.097*	0.000***
after training	0.053*	0.000***

Note: * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. p denote “ p value” of t-test.

Table 3-6 (c) p value of t-test between Indoor and outdoor(All scale) space

all scale	B1	B4
before training	0.000***	0.000***
after training	0.000***	0.000***

Note: * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. p denote “ p value” of t-test.

以上より、学習難易度の相対的に低い屋内空間でのスケール感を学生に習得させる場合、建築に関する専門教育の経験やスケール感の乏しいことが想定される、学習初期の低学年学生を対象としたほうが、より顕著な教育効果が期待された。これは、長松ら[15,47]が主張している「学習過程の最適化のためには、初期の変動幅が最も大きいこと、その後の長期にわたって与える影響の大きいことから、習熟の後期よりも初期段階の変動が重要となる」ことと対応している。

また、学習難易度の高い課題に対しては、低学年に習得させるには困難があるため、練習を先行させることや、難易度的に下位の課題を与えることが有用であること[15,47]が、多くの教育研究者に指摘されている。これを「屋外大スケール」のスケール感を向上させることに適用すると、予め建築に関する基礎的な知識を学習させることや、VRの低い移動コストで短時間に異なる空間を仮想的に体験可能[60]といった利点を利用し、多くの建築空間でトレーニングを繰り返すことが有効であると考えられる。

3-4. 結語

本章では、屋内、屋外空間それぞれでのスケール感のトレーニング実験を通して、VRを用いる場合、空間規模の異なることがスケール感のトレーニング効果にどのような影響を及ぼすかを

明らかにすると共に、建築の学習経験の異なる各学年それぞれを対象とする場合のトレーニング効果について検証した。

具体的には、学習難易度の相対的に低い屋内空間でのスケール感を学生に習得させる場合、建築に関する専門教育の経験やスケール感の乏しいことが想定される、学習初期の低学年学生を対象としたほうが、より顕著な教育効果が期待されることを把握した。

規模の大きい屋外空間においては、1年生、4年生の被験者共に、視野角の大きい箇所に対する回答の平均値と中央値が実際の値より大きいことから、大きい事物に対して、実際の空間よりVR空間においてはスケールをより小さく感じる可能性が示唆された。

屋外空間における10m以上のより大きな箇所については、4年生のトレーニング効果が1年生より顕著なことから、VR空間でのトレーニング以外に、基準寸法に関する知識や、大規模な建物を設計する課題を遂行した経験を有することの重要性が示唆された。

屋外空間においては、トレーニング後の誤差率が屋内空間より大となるが、観察者の視点から回答箇所まで距離のある屋外空間においては、両眼視差を用いて長さを判断することが困難なことによる影響と予想された。

これらの結果から、大学建築教育における、学生にスケール感を学習させるにあたって、VRの適用方針が提案できた。次章では、「スケール感」という基礎能力学習への適用に続く、実際の建築設計場面を想定したより具体的なVRの適用方法の検討を進める。

第 4 章

不適切箇所
の指摘手法に基づいた各設計内容
におけるVRの適用方法の提案

4-1. 序

前章まで、空間や建物の大きさを見ただ目で正確に判断する能力として定義した「スケール感」の学習効果の観点から、大学生を被験者として、屋内と屋外空間を対象にスケール感のトレーニング実験を行い、VRによっても実空間と同等のスケール感が養われることを確認し、大学建築教育における、学生にスケール感を学習させるにあたっての、VRの適用方針を提案した。

本章では、「スケール感」という基礎能力学習への適用に続く、実際の建築設計場面を想定したより具体的な適用方法の検討を行う。

具体的には、①これまで多くの設計教育におけるVRの適用効果に関する既往研究においては、質問項目に対する被験者の主観的な回答や、設計過程に参加する際の会話内容に基づいて、設計教育におけるVRの効果を検証しており、やや客観性に欠けるものと考えられる。②建築設計の初期から完成に至るまでの設計プロセスにおいて、数種類の設計内容が存在し、必ずしも全ての設計内容においてVRの導入による高い教育効果が得られるとは言いがたい。

以上の①と②の問題点に焦点を絞り、建築設計教育においてVRをツールとした場合、従来からよく用いられる二次元図面(以降、2D)や三次元コンピュータ支援設計(以降、3DCAD)などのツールと、客観性を有する指標を用いて比較して、相互の優劣を明らかにする。さらに、設計に関する知識習得への適用効果を各設計内容、各学年それぞれにおいて詳細に検証する。

そこで、本章では、これらツール間の効果を定量的に比較することを意図し、建築系大学生を被験者とする、「不適切な箇所を探索する」課題の遂行による評価方法を考案した。概念図をFigure 4-1に示す。建築計画・設計上不適切な箇所を、あるツールを用いた場合に最も気づきやすいなら、実際の教育場面において、当該箇所に関する設計上の知識を学生に習得させる際に、他のツールと比べ当該ツールを使用の方が学生の理解が深まり、教育効果の向上が期待されるのではないかと考えられる。また、同一不適切箇所を指摘した学生数を指標として、ツール間の適用効果を定量的に比較することができ、一定の客観性を有するものと考えられる。

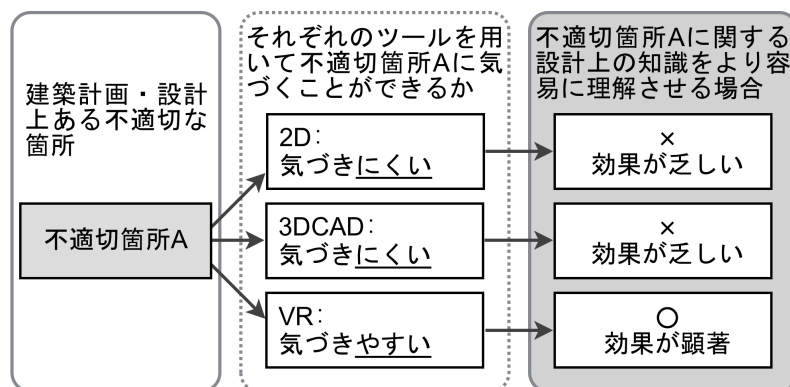


Figure 4-1 The relationship between whether or not error objects can be found and the education effect

また、設計指導者の視点からみた、各設計内容におけるVRの活用可能性に対する予見についても併せて調査することで、「不適切な箇所を探索する」実験の結果との比較から、両者の異同とその要因を明らかにする。これにより、従来、3DCADやVRなど設計ツールの効果に対して指導者が抱く曖昧または過度な期待が是正され、よりの確な運用を可能とする知見が得られるものと考えている。

上述の観点により、本章は、新しい技術であるVRと、伝統的なツールである2Dや3DCADのそれぞれによって同一の建築設計案(以降、設計案)を呈示し、それらに予め設定した建築計画・設計上の不適切箇所に気づくことができるか否かという観点から、各設計内容における効果の優劣を比較検討することにより、それぞれの不適切箇所に関する設計上の知識をより容易に理解するための最適な教材を明らかにすることを目的とする。

本章の構成について、まず4-2節では、実験を実施する準備段階として、設計指導者を対象としたインタビュー調査を行い、それに基づいた不適切箇所の選定、設計案の作成及び設計指導者が予想する実験結果について述べる。4-3節では実験手順を説明し、4-4節では実験結果として、予め設定した不適切箇所に対する指摘状況により、2D、3DCAD、VRの3種のツール間の優劣を検証する。さらに、設定した不適切箇所以外に被験者が指摘した内容に基づき、設定した不適切箇所に対する指摘から得られた結果を改めて検証するほか、設計案を体験する際の各ツールそれぞれの特性についてより詳細に検討する。

4-2. インタビュー調査と実験の準備

本節では、3種のツールの比較からVRの効果を検証する実験を実施する準備段階として、設計指導者を対象に実施した、①学生の設計案によく含まれる不適切箇所の把握、②実験用不適切箇所の検証と実験結果の予想の獲得、を意図した二段階のインタビュー調査の結果について述べる。併せて、それらに基づいた設計案の作成と、2D、3DCAD、VRそれぞれの呈示方法について述べる。

4-2-1. 設計に関する不適切箇所の把握

4-2-1-1. 調査概要

まず、これまでの2Dや3DCADを用いて設計製図などを学ぶ際に、学生が起こしがちな問題を不適切箇所として設定することを考え、広島大学において設計製図の指導経験を有する教員3名(指導経験8~15年、平均11.6年、いずれも住宅設計を含め、集合住宅や美術館など大型施設に関する課題の指導経験も有している)を対象としてインタビュー調査を行った。なお、一部参考程度の情報として、設計製図の授業のTA(Teaching Assistant, 授業ごとに学生が提出する設計案に

対して学生とエスキスを行う)6名も対象として調査した。ただし、TAの設計教育経験を教員と同等とみなすのは困難と考えられることから、不適切箇所の選択にあたっては教員の指摘結果のみを使用することとした。調査期間は2022年4月12日から4月27日で、教員、TAとも一名ずつ行った。

調査は、インタビューの意図を説明した後、①設計製図における初期から完成に至るまでの間、複数の段階の存在を想定して指導を行っているか、②それぞれの段階に関して、学生が起こしがちな問題として何があるかについて、回答を依頼するという流れで行った。

4-2-1-2. 調査結果による不適切箇所の選定

調査結果について、学生が設計製図に取り組む過程においては、動線、構造、空間の組み合わせ等建物スケールで検討する「①建物全体の計画」、空間の大きさ、開口部等空間スケールで検討する「②空間の設計」、家具の配置と寸法、素材の選択等細部を検討する「③詳細設計」といった概ね3つの設計内容(文章やグラフ中の表記を簡潔にするため、以降、それぞれStep1, Step2, Step3とする)があるとする意見の多いことを把握した。

また、学生の設計で頻出する間違いとして、計66種類の内容が指摘されたが、そのうち住宅の屋内空間に関する内容計42種類をTable 4-1に示す。ここで、対象とする建築の用途を住宅に限定した理由としては、被験者の住宅空間に対する経験が、美術館やオフィスビルなどの公共施設より多いと予想され、新たに提案した「不適切な箇所を探索する」実験の実施や不適切箇所の発見についての難易度が相対的に低いと考えたためである。住宅以外の場合のVRを適用した効果については、今後の目標としてさらなる検証を進める予定である。

不適切箇所の選定にあたって、①建築基準法に関連する箇所については、確実に間違いであると想定され、不適切箇所として選定するのが妥当と考えられる。しかしながら、計画面に関する不適切箇所では、利用状況や設計に対する価値観や思い込みの違いによって、間違い、もしくは、正しいと解釈される両方の場合が存在するものと予想される。そこで、②計画面に関しては、学生の設計にこのような不適切箇所が認められた場合に、設計担当教員が普遍的に指摘する箇所を、より確実に設計上あってはならない箇所として予想し、候補として優先的に選定することを基本的な方針とした。

なお、同一箇所に対するツール間の効果を比較することを本実験の主眼として考えており、前述した被験者の設計に対する価値観や思い込みによって、不適切の度合いがそれぞれ異なって認識される可能性が予想されることから、本研究では、不適切の度合いを完全に一致させることは追求しないこととし、箇所間の発見状況間の比較については割愛することとした。

Table 4-1では、Step1~3の各設計内容に関する間違いを、さらに15分類に細分化し、同一の内容を指摘した指導者の人数を集計している。①建築基準法に関連する箇所と、②指摘教員数の多い箇所、これら2条件に基づき、各分類から概ね1~2種の間違いを選定し、それに基づいて不適切箇所を設定した(Table 4-1における「学生的设计で頻出する問題点」列の「→」表記の後に示

Table 4-1 各設計内容において学生の設計で頻出する問題点

設計内容	分類	学生の設計で頻出する問題点【不適切の種類】 →No. 不適切箇所	選択	指摘者数	
				TA	教員
建物全体の計画	①空間(高さ)	天井高が低い【計】 →S1-1. 階段下空間の天井高が低い(階段の高さが低いため)	○	1	2
		天井高が高い【計】 →S1-2. 住宅の天井高(3.5m)が高い	○	3	1
	②空間(関係性)	廊下から部屋に入れない【計】 →S1-3. 子供部屋に主寝室を通って行かなければならない	○		1
		階段を上がると、壁面に向いている【計】 トイレと普通の部屋が隣接【計】 水回りの位置が上下階で一致しない【計】		2	1
	③空間(方位)	人が長くいる部屋が西向きだと暑い【計】 南面に物置, トイレなどを設置【計】		1	1
	④動線	廊下空間が長すぎる, 複雑【計】 →S1-4. 廊下が長くて複雑	○	3	1
		動線が長過ぎる【計】		1	1
	⑤柱, 梁	柱の本数が少ない【構】 →S1-5. 大空間に柱がない(木造住宅で柱間隔6m)	○	2	1
		階段が梁に当たる【計】 →S1-6. 階段の梁が頭に当たる	○	1	1
		柱や梁がない【構】 柱梁が通っていない【構】 片持ち梁の部分が長い【構】		1	1
①	S1-7. 住宅の天井高(2.1m以下)が低い【法】	○		追加-2	
③	S1-8. 北にリビング, 南に水回りを配置【計】	○			
空間の設計	⑥廊下/通路(幅)	廊下の幅が狭い【計】 →S2-1. 台所の通路幅(600mm)が狭い	○	2	2
		廊下の幅が広すぎる【計】 椅子の背後を人が通れない【計】		3	1
	⑦階段	階段が急すぎる【法】 →S2-2. 階段が急すぎる(蹴上270mm)	○	3	2
		階段の段数が多い(2.5mの高さで20段)【計】			1
	⑧空間(大きさ)	中庭があるが狭すぎる(2m×2mなど)【計】 →S2-3. 中庭が狭い(2m×2m)	○	1	2
		居室が狭い(幅2m以下)【計】 玄関の大きさが狭い【計】 1つの建物の部屋の大きさに偏りがある【計】		2	1
	⑨開口部	窓のない居室がある【法】 →S2-4. 窓のない居室がある	○	2	3
		開口部の大きさが足りない(1/7以下)【法】 →S2-5. 窓が少ない空間がある(床面積の1/7以下)	○		2
		窓が開けられない(自然通風ができない)【計】 風の通り道についての考慮がない【計】 吹き抜けの窓が狭い【計】 ガラスが大きい(ブライバシー面)【計】		2	2
	⑩車椅子	段差がある場合, 車椅子が通れない【計】 スロープが急すぎる【法】 →S2-7. 車いす利用者用のスロープが急すぎる	削除	1	1
建具	→S2-6. ドアの幅(500mm)が狭い【計】	○		追加-1	
詳細設計	⑪家具・設備(大きさ)	スケールが間違っている. 大きすぎる【計】 →S3-1. 台所の調理台の奥行き(1000mm)が長い	○	1	1
		ベッドが大きく, 周りの空間が狭い【計】			1
	⑫家具・設備(高さ)	断面上, 家具の寸法が実際より高い【計】 →S3-2. ベッドの高さ(800mm)が高い	○		1
		台面高さの違い【計】 椅子座面から机までの間が狭い【計】		1	1
	⑬家具・設備	収納がない, または少ない【計】 家具の数が多し, 面積と相応しくない【計】		1	1
		屋外の木製地面を屋内空間で使う【材】 →S3-3. 材料選択の間違い(石の机を想定)	変更		1
	⑭素材(選択)	[変更]S3-3. 材料選択の間違い(浴室に天然木製の床面)	○		
	⑮素材(サイズ)	素材のサイズの違い【材】 →S3-4. 材料寸法の違い(800mmの木材を組み合わせて床を構成)	○	1	1
		建具	S3-5. バルコニーの手すりの高さが低い【法】	○	
	建具	S3-6. ドアの開閉方向がおかしい(寝室のドアが外向きに開く)【計】	○		
⑰	S3-7. 椅子の幅(300mm)が狭い【計】	○			

Note: S1, S2, S3はそれぞれStep1, Step2, Step3を示している。灰色で塗りつぶしている箇所は2段階目のインタビュー調査で使用した不適切箇所候補を示す。取消線はインタビューの結果に基づいて除外した不適切箇所候補を, 黄色塗りつぶしは新たに設定した不適切箇所をそれぞれ示している。選択欄に○の付いている箇所が最終的に選定した不適切箇所を表す。表中の【法】【材】【計】【構】は, 当該箇所の不適切の種類がそれぞれ法律面, 素材面, 計画面, 構造面に関することを示す。

す)。

また、得られた不適切の分類を概観すると、ドアや手すりなど「建具」に関する内容が全体に乏しい傾向が窺えた。そこで、建築基準法における手すりに関する内容を参照し、「S3-5. バルコニーの手すりの高さが低い」を追加した。また、1章で述べた既往研究[38]における「VRを用いた設計案の空間確認において、設計に関する知識のない者でも身体による実際の感覚に基づき、設計案の合理性や問題点についての検討過程に参加可能」との結論を、本研究の実験方法により検証することを意図して、建具の寸法や使いやすさに関する「S2-6」「S3-6」を追加した。「建具」のほか、「素材面」に関する内容が、全不適切箇所において「S3-3」の1箇所しかないことから、TA1名による指摘ではあるものの「S3-4」を候補として追加した。その他、VRでの体験により、設計中、細かい部分に関する不適切にも気づくことができるか否かを検証するため、「S3-7. 椅子の幅が狭い」も追加した。

以上を径て、計20箇所を本実験で使用する不適切箇所の候補として選定した(Table 4-1中の灰色で塗りつぶしている箇所)。上述した一部の追加箇所は、いずれも教員から指摘されなかったため、不適切箇所として使用する妥当性について、4-2-3項でさらに検証する。

4-2-2. 不適切箇所を含む設計案の作成と呈示方法

上述より選定した不適切箇所が含まれる設計案としては、想定外の不適切箇所の発生をなるべく避けるため、筆者らが全く新たに計画するのではなく、ハウスメーカーの分譲住宅の設計図をベースとすることにした注1)注2)。また、同一の設計案に20種全ての不適切箇所を挿入することは困難と考えられたため、計5件の設計案(Table 4-2)に分配することとした。以降、実験における2D, 3DCAD, VRそれぞれによる設計案の呈示方法と設定について詳述する。

2D : Graphisoft 社製のCAD ソフトウェア(商品名:ArchiCAD)を用いて作成し、1:100の縮尺でA3判の用紙に出力した。内容は、各階平面図、断面図1~3枚で、建物の方位や床面の材料などの情報も記載した(Table 4-2, 「平・断面図(一部)」の列)。2Dで設計案を呈示する様子をFigure 4-2(a)に示す。

3DCAD : 「2D」における建物の寸法情報などに基づいて、ArchiCAD を用いて設計案を立体的に表現した後、Unity Technologies 社製のゲーム開発ツール(商品名:Unity3D)を使用し、実験用アプリケーションを作成した。Unity3D 内のgame scene を全画面表示(Figure 4-3(a))し、27 インチ

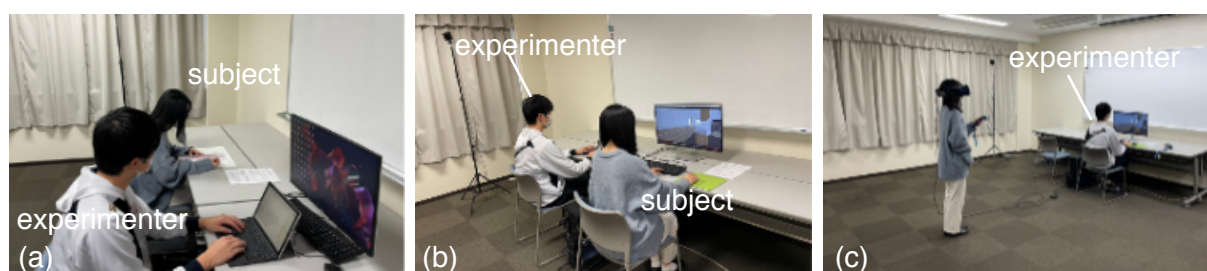


Figure 4-2 設計案を呈示する様子 : (a) 2D; (b) 3DCAD; (c) VR

Table 4-2 各設計案の詳細情報

設計案	平・断面図(一部)	内部空間	詳細情報
Z	<p>1階平面 A-A'断面</p>		<p>木造 2階建て(125.9㎡) 四大家族 不適切箇所(4個)</p> <p>S1-4.廊下が長くて複雑; S1-6.階段の梁が頭に当たる; S2-3.中庭が狭い; S3-1.台所の調理台の奥行きが長い。</p>
X	<p>1階平面 B-B'断面</p>		<p>鉄骨造 2階建て(164.5㎡) 二人家族 不適切箇所(4個)</p> <p>S1-2.住宅の天井高が高い; S2-1.台所の通路幅が狭い; S2-2.階段が急すぎる; S3-7.椅子の幅が狭い。</p>
C	<p>2階平面 A-A'断面</p>		<p>木造 2階建て(114.7㎡) 四大家族 不適切箇所(6個)</p> <p>S1-1.階段下空間の天井高が低い; S1-3.子供部屋に主寝室を通って行かなければならない; S2-5.窓が少ない空間がある; S2-6.ドアの幅が狭い; S3-2.ベッドの高さが高い; S3-5.バルコニーの手すりの高さが低い。</p>
V	<p>1階平面 A-A'断面</p>		<p>木造 平屋(82.8㎡) 二人家族 不適切箇所(5個)</p> <p>S1-5.大空間に柱がない; S1-7.住宅の天井高が低い; S1-8.北にリビング、南に水回りを配置; S2-4.窓のない居室がある; S3-3.材料選択の間違い。</p>
B	<p>1階平面 B-B'断面</p>		<p>鉄骨造 平屋(138.0㎡) 二人家族 不適切箇所(2個)</p> <p>S3-4.材料寸法の間違い; S3-6.ドアの開閉方向がおかしい。</p>

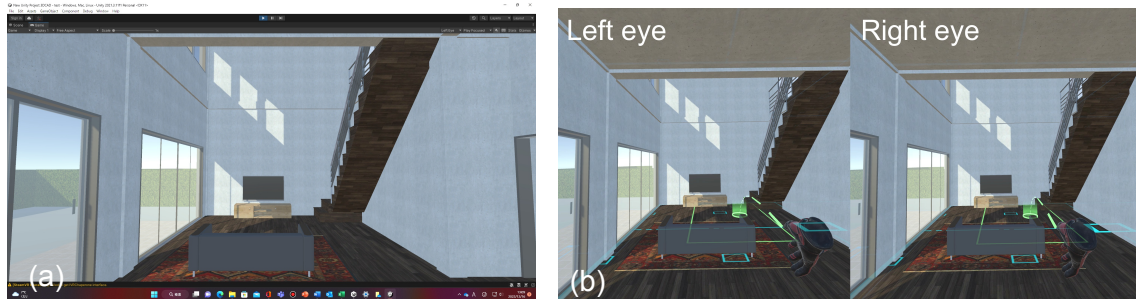


Figure 4-3 調査時使用する3DCAD(a), VR(b)の画面の一例

(解像度1920×1080 pixel)のPCの画面を被験者の頭部から約60 cm の位置で呈示した。基本、人の視点から空間を自由に体験することを想定し、キーボードの上下左右の矢印キーの押下による速度 1 m/s の自由な移動と、マウス操作による、進行方向や視線方向の変更を可能とした(Figure 4-2(b))。

VR：上述した「3DCAD」と全く同一のモデルとゲーム開発ツールを使用した。VRの呈示機材としては、HTC社製のHMD(商品名:VIVE PRO EYE)を使用した。HMDに内蔵されたディスプレイは解像度2880×1600 pixel(片眼1440×1600 pixel)、視野範囲97±10.2°(水平方向)×97±8.4°(垂直方向)15)であり、両眼視差をふまえた各眼用の画像が左右のディスプレイに呈示される(Figure 4-3(b))。VR内での移動については、最大4 m×4 m の範囲内を実際に自由に歩くことを可能としたが、さらに、Figure 4-4に示すように、コントローラから発射される放物線(緑の点線)が床面に当たる位置(緑の円)への瞬時の移動(以降、テレポート)を可能とする機能により、部屋間の長い距離の移動や階段の昇降などを実現している。VRで設計案を呈示する様子をFigure 4-2(c)に示す。

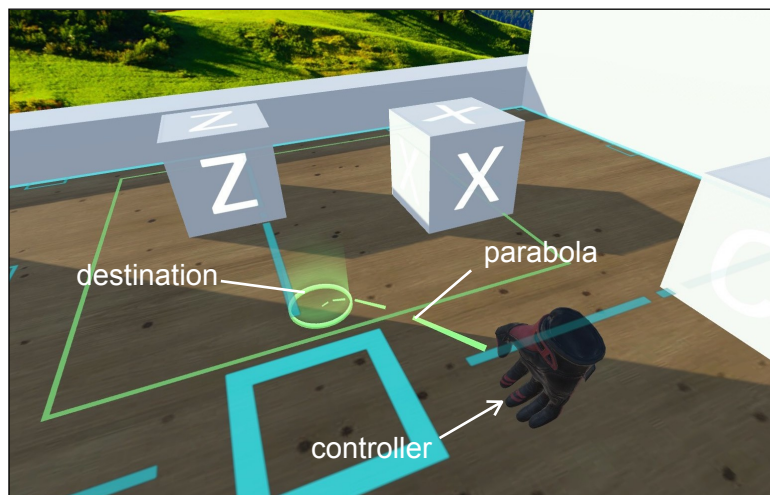


Figure 4-4 VRにおけるテレポート機能による移動

なお、作成した設計案を被験者に呈示するにあたって、2Dでは文字によって表示する建物の方位、構造、床材などの情報を、3DCADやVRの場合においては口頭で被験者に説明することや、高さに関する不適切箇所が、必ず2Dの断面図に含まれるようにすることなど、ツールの呈示方法による情報量の差をできる限り削減するように配慮した。また、3DCADとVRにおけるドアの

開閉については、被験者の立ち位置が空間内の閉じているドアに接近することで(約40 cm 以内と想定)、自動的に開いた状態になるように設定した。

上述の方法で呈示する3DCAD、VR設計案は、利用者の視点による空間体験を想定したものであることから、柱や梁など構造面に関する情報の読み取りについては、2Dよりも制約が多くなるものと考えられる。また、本実験で使用した呈示方法では、構造に関わる全ての情報を示すことは、2Dにおいても困難であると予想される。本研究においては、これらが制約条件となることから、今後、構造面の不適切箇所の発見に関しては、3DCADやVRを用いた利用者の視点からの空間確認のみならず、より多角的な視点（鳥瞰図や建物の分解図など）からの情報提供を可能とする呈示方法の提案が必要と考えられる。

4-2-3. 選定した不適切箇所の調整と予想される実験結果

4-2-3-1. 調査概要

次に、作成した設計案における、設定した20箇所の不適切箇所候補の妥当性の検証と、設計指導者による実験結果の予想を獲得することを目的として、設計製図の指導経験を有する、広島県内の大学、高専教員10名を対象として、2022年7月22日から8月31日の間に一名ずつインタビューを行った。なお、ここでは、不適切箇所の追加や調整を柔軟に進めるため、調査においては5件の設計案のうち3件を先行して作成し、それらを使用してインタビューを行った。

調査は、インタビューの意図を説明した後、不適切箇所候補のリスト(Table 4-1中の灰色で塗りつぶしている内容)を呈示して、それぞれに対して、①学生の設計にこのような不適切箇所が認められた場合に指摘するかしないか(1. 指摘しない, 2. どちらかといえば指摘しない, 3. どちらかといえば指摘する, 4. 指摘する, の4段階評価)と、②どの程度の建築学習経験を有しているなら、それぞれの不適切箇所が発見できるか、指導者の考え方を把握することを意図し、回答の難易度を配慮して、何年生以上ならこのような不適切箇所を学生自ら発見できるか(選択肢は、1. 一年生, 2. 二年生, 3. 三年生, 4. 四年生とし、四年生でも分からない場合や高専の五年生の場合は5を回答)について回答を求めた後、作成した設計案と、それらの中に含まれる不適切箇所を2D, 3DCAD, VRの3種のツールによって実際に呈示し、③それぞれの不適切箇所に対する、各ツールを用いた場合の発見しやすさ(1. 発見しにくい, 2. やや発見しにくい, 3. やや発見しやすい, 4. 発見しやすい, の4段階評価)についての回答を求める、という流れで行った。

ここで、項目①②は、4-2-1項で述べた本実験で使用する不適切箇所の妥当性を確認することと、各ツールそれぞれの適用効果を明らかにするにあたって、設計知識のない/あるいずれの学生を被験者として採用するのかの参考にすることを目的とした。また、項目③は、実験で得られる結果と設計指導者による予想との整合性を検証することを意図して求めた。

4-2-3-2. 調査結果

項目①の箇所ごとの回答結果をFigure 4-5(a)に示す。「S3-3. 材料選択の間違い(石の机を想定)」のみ指摘しない側の回答が多くみられたことから、実験では使用しないこととした。ただし、材料面での不適切箇所数が少なくなるため、不適切の内容を「S3-3. 材料選択の間違い(浴室に木製の床面)」に変更した。また、「S2-7. 車いす利用者用のスロープが急すぎる(勾配は1/6を想定)」については、指摘する側の回答が多く確認されたものの、車いす用のスロープは一般の住宅空間において、あまり標準的な設えではないため除外することとした。さらに、インタビューにおいて、VRを用いた場合、「縦方向の寸法がわかりやすい」や「方位がわかりにくい」など

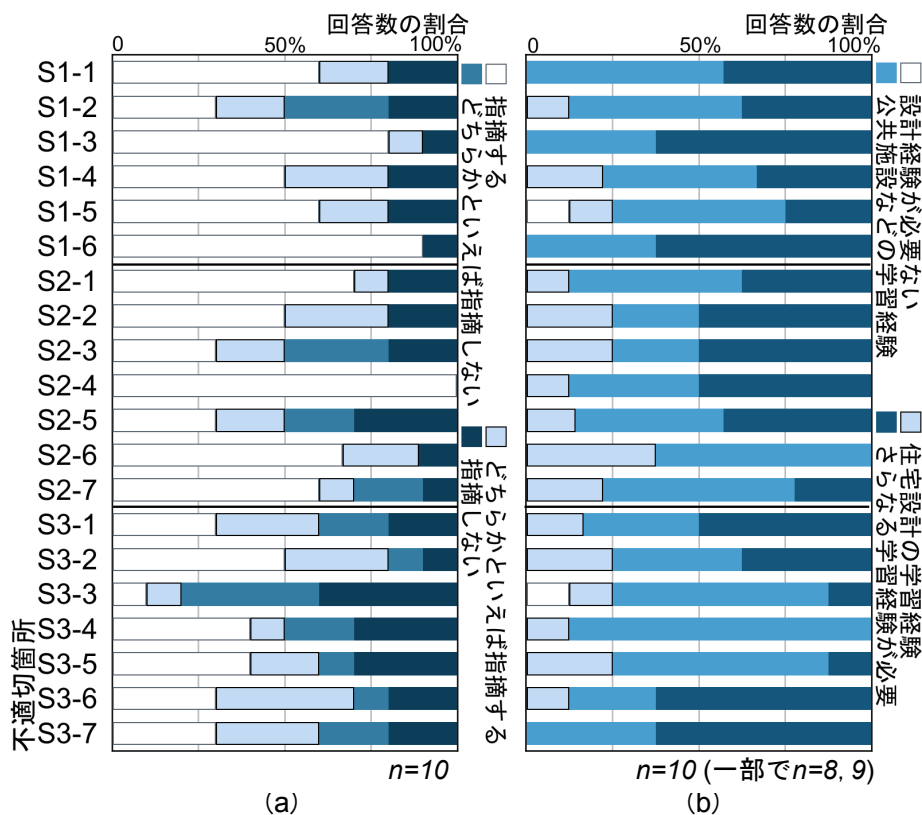


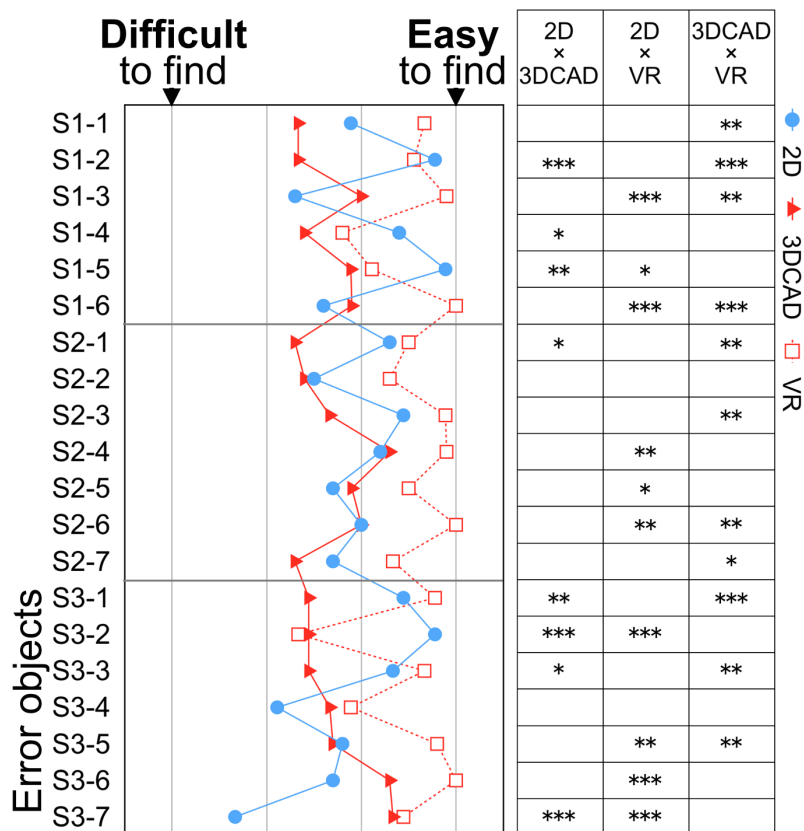
Figure 4-5 不適切箇所候補の指摘有無と発見しやすさの予想: (a) 学生の設計において不適切箇所が出たら指摘するかしないか; (b) 不適切箇所が発見できるに対して必要な学習経験

Table 4-3 学年ごとの授業内容

学年	建築に関する授業プログラム(広島大学工学部第四類)
1年生	教養教育科目中心の履修となり、設計製図を含め建築を中心とする講義はない。
2年生	建築図面の模写、住宅の設計課題を手書き図面・パースで作成、建築計画の講義。
3年生	小学校、集合住宅、美術館など課題を3DCADで平面図とパースを作成。ヒューマンスケールや建築基準法などを学習。
4年生以上	研究室に配属され、必修の設計製図の講義はない、卒業設計・論文に取り組む。

の観点も確認されたことを踏まえ、新たな不適切箇所「S1-7」「S1-8」を追加した(Table 4-1中の取消線が除外した箇所, 黄色塗りつぶしが新たに設定した箇所)。したがって、実験には最終的に21箇所の不適切箇所を用いることとした。各箇所と分配された設計案の詳細をTable 4-2に示す。なお、新たに設定した3箇所については、「S1-7」は法律面の不適切で、「S1-8」「S3-3」も確実に不適切であると考えられるため、これら3箇所に対しては、さらなる妥当性検証は行っていない。

項目②の箇所ごとの回答結果をFigure 4-5(b)に示す。なお、各大学・高専で授業プログラムが異なることから、それぞれの教員の回答は、広島大学工学部第四類(建築分野)の学年ごとの授業内容(詳細についてTable 4-3に示す)に対応させ、広島大学の学生を被験者とする場合の、不適切箇所の発見にあたって必要な学習経験(1年生：特に設計経験は必要ない, 2年生：住宅設計の学習経験が必要, 3年生：住宅のほか、公共施設などの学習経験が必要, 4年生以上：既定の設計授業以外、さらなる学習経験が必要)に合わせて整理している。これより、ほとんどの箇所で7割以上の教員が、住宅のほか、公共施設の設計やそれ以上の学習経験が必要、と判断したことが確認される。これに加え、実験の実施期間を配慮すると、広島大学の3年生以下の学生を被験者にした場合、公共施設の設計などの知識を未だ十分に学習していない時点において、一部の不適切箇所に気づきにくく、各ツールそれぞれの適用効果を明らかにするにあたって、予期する結果が得られない可能性がある。このことから、4年生、並びに、それ以上の高学年の学生を主とし、低



Note: * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$. TukeyのHSD検定。

Figure 4-6 実験における被験者の指摘数

学年の学生を参考として、それぞれを被験者にする事とした。

次に、項目③の回答結果の平均得点をFigure 4-6に示す。全20箇所のうち16箇所で、VRの得点が最も高くなり、全般に発見しやすいと判断される傾向が認められる。特に空間や建具の幅・高さの合理性に関する箇所「S1-1」「S1-6」「S2-6」「S3-5」で、2Dや3DCADと比べ、VRが有意に発見しやすいと判断されている(分散分析によるグループ間有意確率について、「S1-1」： $p<0.05$ 、「S1-6」： $p<0.01$ 、「S2-6」： $p<0.1$ 、「S3-5」： $p\approx 0.22$)。これはVRの場合、3DCADと同様に人の視点から立体的な空間を体験できることに加え、さらに現実と類似した身体感覚を用いて空間の幅・高さや身体との位置関係の確認ができることから、2Dや3DCADより顕著な効果があると予想されたものと考えられる。

また、残る4箇所では、いずれも2Dの得点が最も高い。「S1-3」「S1-4」「S1-5」のような動線設計や構造の合理性などに関する不適切に気づくためには、建物が有する複数の空間全体を同時に把握することが重要と考えられ、人の視点から空間を体験するVRや3DCADよりも、鳥瞰的な2Dの効果が最も期待されていることがわかる。

4-2-4. 設定した不適切箇所以外に被験者が指摘した内容について

たとえハウスメーカーの分譲住宅であっても、様々な側面で間違いの存在する可能性があることから、設定箇所以外の部分が間違いとして指摘されることは避けられないと考えられる。そこで、それらの影響をできる限り除外し、設定箇所以外での間違いがなくなるよう配慮した。即ち、本実験の実施以前に、広島大学工学部および大学院先進理工系科学研究科の建築分野に所属する4年生以上の学生6名を対象に予備実験を実施し、一人が2D、3DCAD、VRのうち、いずれか2種類のツールを使用して5つの設計案全てを確認し、発見された設定箇所以外での間違いについて適宜修正を加えた。その際、設定箇所以外での間違いを網羅的に仔細に把握させることを意図し、一つの設計案を体験可能な時間に制限は設けないことにした。

ただし、以上の過程を経た上でも、設計案に対して被験者それぞれが想定した利用状況によっては間違いとみなされる場合のあることや、被験者それぞれの設計に対する価値観や思い込みの違いによって、一般的には正しいと想定される箇所であっても間違いとして解釈される可能性がある。したがって、設定した不適切箇所以外での間違いが全くない設計案を実験において被験者に提示するのはそもそも困難があると考えられる。そこで、本論文ではその対策として、設定箇所以外の指摘も分析対象として、4-4-2節で検討することとした。

4-3. 実験概要

4-3-1. 実験手順

実験は、被験者に内容を説明した後、5つの設計案を順次提示し、不適切箇所を探索させ、最

後にこれまでの建築設計に関する知識、経験や考え方などを尋ねるフェイスシートに回答させるという流れで実施した。なお、各被験者に全3ツールを経験させたため、1ツール当たり呈示する設計案の数は被験者1名あたり1~2つとなる。したがって、呈示する設計案の順序と使用するツールの順序はそれぞれの被験者によってランダムとなるように設定した。不適切箇所の探索にあたっては、被験者に不適切だと思う箇所を見つけた場合、何(対象物)がどう(状態)なっていて、どういう点が不適切(理由)だと思うかの説明と、不適切さの度合い(1. 若干不適切だと感じる, 2. 多少不適切だと感じる, 3. 不適切だと感じる, 4. 非常に不適切だと感じる, の4段階評価)をそれぞれ口頭で回答させた。実験期間は2022年11月7日~2023年6月29日で、被験者1名あたりの実験時間は全体で1時間から1時間半程度であった。以下各ツールの実験手順について詳述する。

2Dでは、まず設計案の基本情報として、家族の構成、住宅の構造、方角などを説明し、その後、設計案を呈示して探索を開始させ、併せて時間計測を始めた。2Dの場合、発見した不適切箇所については口頭で回答させると共に、図面に丸印をつけさせた。また、呈示した図面に記載することが難しい家具などの寸法も把握するために、長さ 30 cm の三角スケールを使用可能としたが、実験室内にある什器等の実際の寸法は測らないように指示した。

3DCADは、設計案を体験する際の視点の高さを被験者の目の高さと同じように設定した後、実験を開始した。設計案の内部を被験者自身の操作で移動させたが、操作に慣れていないことから、観察が不完全になることを防ぐため、最初に設計案とは異なる準備空間で操作方法を説明し、予め十分に操作を練習させた。その後、実験者が設計案の玄関前に視点を移動させ、基本情報の説明を行った。説明終了後、時間計測を開始し、予め設定したルートを実験者の指示通りに移動させ、内部空間を全て把握させた。次に、実験者が操作して玄関前に移動し、探索を開始させた。なお、不適切箇所を発見した場合は回答と共にキーボード操作によって画面をスクリーンショットさせた。

VRも、3DCADと同様の実験手順であるが、操作方法を練習する準備空間から設計案の玄関前までの移動は被験者に操作させた。不適切箇所を発見した場合は回答と共にコントローラのスイッチ操作で眺めているVRの画面をスクリーンショットさせた。

なお、設計案1件当たりの探索時間は、設計案を把握する時間も含めて8分とツール間で統一したが、これ以上不適切箇所が見つからないと被験者が申告した場合には、途中終了も可とした。

4-3-2. 被験者概要

被験者は、前述した調査結果に基づいて、主とする高学年被験者(以降、Hと称する)は、広島大学工学部および大学院先進理工系科学研究科の建築分野に所属する4年生以上の学生46名(男性37名、女性9名;学部4年生28名、大学院生18名、実験期間、2022年11月7日~11月30日)とした。広島大学の授業プログラムとフェイスシートで尋ねた建築に関する授業の履修状況を参照すると、必修科目(Table 4-3に示す2, 3年次の設計製図の内容)のほか、例えば建築計画Ⅱを41名が、建築環境学Ⅱを全員が履修しており、主要な選択必修科目についても、被験者のほとんどが履修して

いることが確認された。これより、被験者は設計製図のみならず、ある程度の建築計画学、建築環境学に関する知識を有するものと想定される。

また、学年の異なることが各ツールの適用効果に及ぼす影響を検討するため、低学年被験者も参考として採用した。具体的には、大学建築教育の各段階において、VRをツールとした効果を網羅的に検証することを意図し、①建築に関する知識がほとんどない、広島大学工学部建築分野に所属する2年生17名(男性8名、女性9名、実験期間、2023年4月20日~6月9日)、②住宅設計などの建築に関する課題に従事している最中の、若干建築知識を有する広島工業大学建築デザイン学科に所属する1年生15名(男性8名、女性7名、実験期間、2023年6月19日~6月29日)、③住宅設計に関する課題が終了して約2ヶ月が経過し、ある程度の建築知識を有するに至ったと想定される広島大学工学部建築分野に所属する3年生16名(男性7名、女性9名、実験期間、2023年4月6日~5月2日)、それぞれを被験者(以降、L-0、L-1、L-2と称する)とた。(Table 4-4)

Table 4-4 Subjects and experiment date

Subject grade	Architectural experience	Date	numbers	
L-0: 低学年	B2 student of HU	Null	2023. 4. 20 ~ 6. 9	17
L-1: 低学年	B1 student of HIT	Taking a course in residential design	2023. 6. 19 ~ 6. 29	15
L-2: 低学年	B3 student of HU	Completed a course in residential design	2023. 4. 6 ~ 5. 2	16
H: 高学年	B4 above student of HU	Completed all design courses during	2022. 11. 7 ~ 11. 30	46

被験者にこれまでの建築設計に関する知識、経験や考え方などを実験後に尋ねたフェイスシートにおける、一部項目の回答結果を各学年の被験者それぞれについてFigure 4-7に示す。

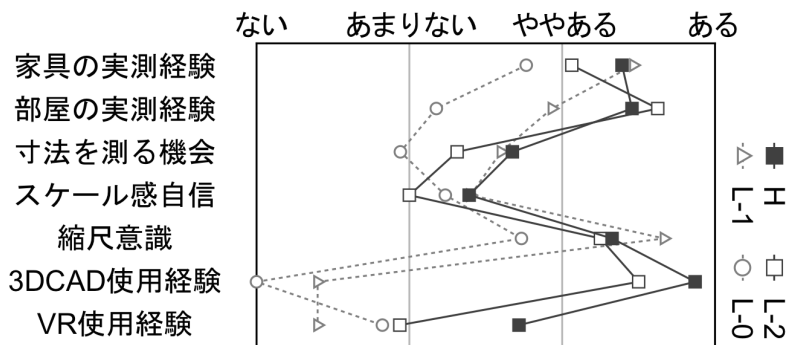


Figure 4-7 被験者の建築に関する経験や予備知識の状況

L-0では、建築に関する講義の受講経験がないため、多くの項目で、知識の乏しい傾向が確認される。それに対して、十分な学習経験を有するHでは、全般に豊富な知識を有する傾向が認められる。また、L-1では、「家具の実測経験」や「寸法を測る機会」など、寸法の実測経験に関する項目で、L-0のみならず、受講年数のより長いL-2と比べても、Hに最も近い傾向が確認される。これは、両大学で設定されている授業プログラムが異なるため、主とする教育内容に影響されたものと考えられる。

4-4. ツールそれぞれの指摘結果の比較によるVRの適用効果確認

まず、5つの設計案それぞれの、各ツールを使用した被験者数は、いずれも16名となるように配分した。設定した21箇所の不適切箇所に対する指摘数と、それ以外の実験者が想定していないが被験者が不適切箇所として捉えた指摘(以降、不適切箇所以外の指摘)数、両者の合計を表す総指摘数、各ツールが使用された回数、また、これらに基づいて算出した1つの設計案に対する被験者1名あたりの平均指摘数をTable 4-5 にツールごとに示す。

Table 4-5 実験における被験者の指摘数

	H: 高学年				L0~2: 低学年			
	2D	3DCAD	VR	total	2D	3DCAD	VR	total
①不適切箇所に対する指摘数(回)	81	80	97	258	58	51	69	178
②不適切箇所以外の指摘数(回)	264	183	177	624	174	167	167	508
③総指摘数(回)	345	263	274	882	232	218	236	686
④ツールが使用された回数(回)	77	75	76	228	80	80	80	240
不適切箇所に対する平均指摘数(①/④)	1.05	1.07	1.28	1.13	0.73	0.64	0.86	0.74
不適切箇所以外の平均指摘数(②/④)	3.43	2.44	2.33	2.74	2.18	2.09	2.09	2.12

なお、不適切箇所以外の指摘数の集計にあたって、実験において、2Dの場合、設計案1件当たり1~3枚の断面図を被験者に呈示するものとした。3DCADやVRの場合に呈示可能な、建物全ての断/立面などに関する情報(「開口部」の高さ、「建具」「家具・設備」の「高さ」や「色彩」)は、2Dでは十分に呈示できないため、ここでの指摘数はそれらについての指摘を除外している。また、逆に屋根裏、柱、梁せい、など3DCADやVRでは探索できない空間や事物に対する指摘内容についても除外した。

これより、不適切箇所に対する指摘数と平均指摘数では、概ね3ツールとも同程度であるが、高、低学年いずれにおいても、VRの値が最も高いことから、設定した不適切箇所については、3種のツールのうちVRで発見しやすい可能性があると考えられる。また、総指摘数では、低学年では使用したツールによる影響が乏しいのに対して、高学年の場合、2Dのほうが3DCAD、VRより多いことがわかる。これは、広島大学の高学年学生の場合、3DCADやVRよりも二次元図面を使う機会が普段から多いと予想されることから、より積極的に指摘がなされたものと考えられる。

さらに、不適切箇所以外の指摘数が設定した不適切箇所に対する指摘より大幅に多くなったことについては、探索時間の8分以内で被験者が指摘可能な回数を、今回の実験においては特に制限していないため、設計案の空間を体験する際、不適切さの度合いによらず、微かな不適切に対しても色々指摘したものと推察される。なお、ここでの不適切箇所以外の指摘に関しては、前述した通り4-4-2項でより詳細に検討する。

4-4-1. 設定した不適切箇所に対する指摘結果による各ツールの効果

4-4-1-1. 各不適切箇所に対する指摘結果の比較

次に、各不適切箇所に対する指摘数(指摘人数)を、当該不適切箇所が含まれる設計案を体験する際に各ツールを使用した人数で除した結果を指摘率とし、高、低学年それぞれFigure 4-8に示す。

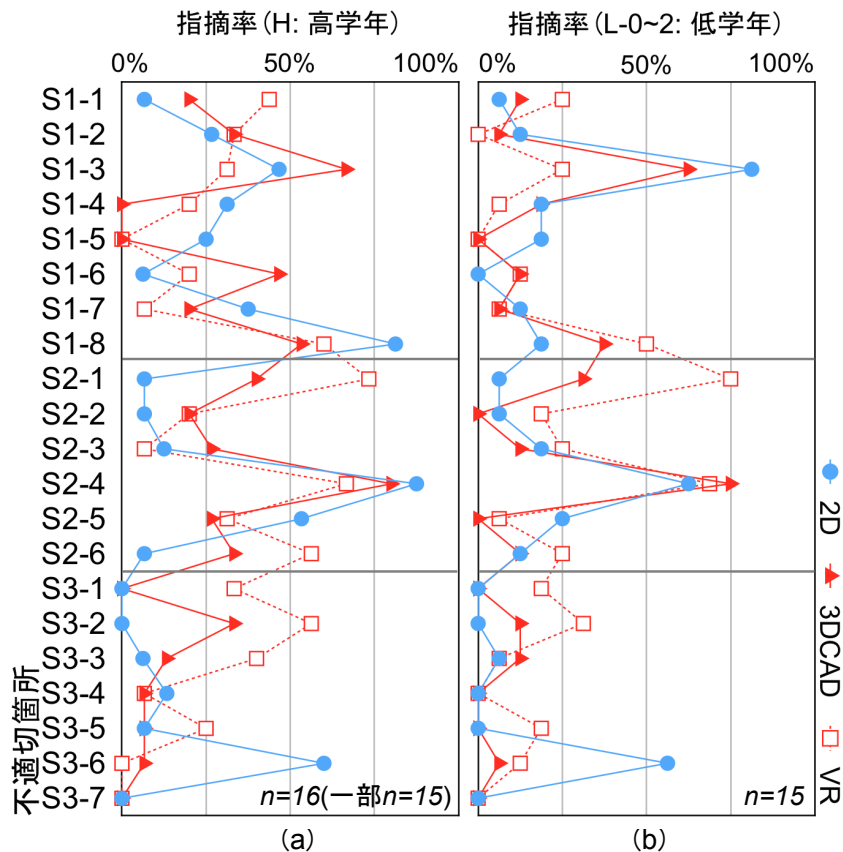


Figure 4-8 不適切箇所ごとの指摘率: (a) H: 高学年; (b) L-0~2: 低学年

指摘人数の合計を見ると、高学年の「S1-8」「S2-4」、低学年の「S1-3」「S2-4」のように指摘人数が被験者の半数以上の不適切箇所と、「S1-4」「S1-5」「S3-7」などのように指摘人数が高、低学年共に極めて少ない不適切箇所の双方が存在することがわかる。これより、箇所によって不適切であることを発見する難易度がかなり異なっていたものと考えられる。特に「S3-7. 椅子の幅が狭い」に関しては、いずれのツールでも発見した被験者がいなかった。これは、探索時間に制限を設けたことにより、細かい家具の大きさまで指摘できなかったものと考えられるほか、建築設計・計画上の不具合であると被験者がそもそもみなさなかった可能性も指摘できる。また、指摘されやすさをツール間で比較すると、高学年では、2Dで最も指摘された不適切箇所は8箇所、3DCADでは5箇所、VRでは9箇所、低学年ではそれぞれ、7箇所、4箇所、10箇所、という結果となった。以下、ツールごとに発見しやすい不適切箇所について詳述する。

①高学年

まず、高学年の場合、2Dを用いた場合に発見しやすい不適切箇所としては、「S1-4. 廊下が長くて複雑」「S1-5. 大空間に柱がない」「S3-6. ドアの開閉方向がおかしい」などが挙げられる。

「S1-4」「S1-5」については、インタビューによる予想と対応しており、設計図を鳥瞰することによって、柱、梁といった構造物、部屋の配置など設計案全体に関する情報を把握することが他のツールと比べて容易であるため、発見しやすかったものと考えられる。また「S3-6」の、ドアが廊下側に開いて通路を遮断することに関しては、3DCADやVRでも直感的にある程度発見できるものと想定していたが、指摘した人数はそれぞれ0名と1名となり、ほとんど発見できていない。これは、三次元空間で通行に支障があることを経験したとしても、それを設計・計画上の問題点として解釈するには隔たりがあり、それよりも普段設計製図等で使用している2Dの図面上での知識に基づいた指摘のほうが容易であった可能性が示唆される。

3DCADを用いた場合に発見しやすい不適切箇所としては、「S1-6. 階段の梁が頭に当たる」「S1-3. 子供部屋に主寝室を通って行かなければならない」などが挙げられる。このうちインタビュー調査では「S1-6」はVRで最も発見しやすいと予想されていたが、VRの実験時に被験者が階段を昇降する際の様子を確認すると、階段(足下)をみながらテレポートの操作を行うことが多く、頭の上部にある梁を見逃してしまう可能性があるのに対して、3DCADでは空間を連続的に把握できるため、発見できたものと考えられる。また、「S1-3」に関しても、VRの場合、被験者が部屋間を移動する際、テレポート機能を積極的に使用する傾向が窺えたことから、3DCADとVRで差がある原因は同様に解釈される。

VRを用いた場合に発見しやすい不適切箇所としては、「S1-1. 階段下空間の天井高が低い」「S2-1. 台所の通路幅が狭い」「S2-6. ドアの幅が狭い」「S3-1. 台所の調理台の奥行きが長い」「S3-2. ベッドの高さが高い」「S3-3. 材料選択の間違い」などが挙げられる。これらの多くは寸法に関わる不適切箇所であり、VRでは身体感覚が利用できることにより、空間、建具、家具など寸法の実際の大きさ情報が得られない2Dや3DCADと比較して、発見が容易であったことが改めて確認でき、インタビュー調査による予想とも対応がみられた。

②低学年

続いて、低学年の指摘結果を確認する。高学年の「S1-5. 大空間に柱がない」「S3-6. ドアの開閉方向がおかしい」など「構造面」や「ドア開閉方向」に関する不適切箇所は2Dを用いた場合に、「S1-1. 階段下空間の天井高が低い」「S2-1. 台所の通路幅が狭い」「S2-6. ドアの幅が狭い」など「大きさ」や「高さ」に関する不適切箇所については、VRを用いた場合にそれぞれ発見しやすい傾向は、低学年でも同様に確認される。ただし、「S1-3. 子供部屋に主寝室を通って行かなければならない」「S1-6. 階段の梁が頭に当たる」など、「空間の連続性」や「通路上に存在する事物」に関する不適切箇所については、高学年の場合3DCADで最も発見しやすい傾向が得られたが、低学年では確認されていない。Figure 4-7における学年それぞれの「3DCAD使用経験」に対する回答結果をみるなら、L-0とL-1の場合、ほとんど使用経験のないことが把握でき

る。また、「ある」側に回答しているL-2も、広島大学工学部建築分野の授業プログラムを確認した結果、学部2年次後期に3DCADの使用方法を学習することから、使用経験が「ある」との回答にはなるものの、設計課題における実践的な経験はないものと予想され、高学年のHほどの習熟度ではないと考えられる。したがって、3DCADの適用効果は、2DやVRよりも実践経験や習熟度によって制限されるものと推察される。

また、「S1-1. 階段下空間の天井高が低い(階段の高さが低いため)」「S1-2. 住宅の天井高(3.5m)が高い」「S1-7. 住宅の天井高(2.1m)が低い」など、断面上の「高さ」に関する不適切箇所では、使用したツールにかかわらず、低学年の指摘率は高学年より低下する傾向がみられ、設計案についての高さ情報に関する意識は、高学年より鈍感であるものと推察される。

4-4-1-2. 各設計内容に対する指摘結果の比較

各不適切箇所の指摘率を、さらに各設計内容のStep1~3に分け、2D、3DCAD、VRごとに平均した指摘率をFigure 4-9に示す。また、Figure 4-9(a)には、前述した設計指導者対象のインタビュー調査における項目③から予想された結果として、発見しやすいから発見しにくいまでの4段階の回答に基づくStep1~3それぞれの平均得点を示す。なお、ここでの平均指摘率は、実験で用いた21箇所の不適切箇所のうち、インタビュー調査でも共通して使用した18箇所のみに基づいて算出している。

Figure 4-9(a)の予想された結果においては、Step1~3のいずれでも、VR > 2D > 3DCADの順となり、3DCADが最も発見しにくいと評価される傾向が確認できる。3DCADの場合、VRのように身体感覚を利用できず、2Dのように固定的な縮尺(100分の1など)もないため、設計上の不適切箇所

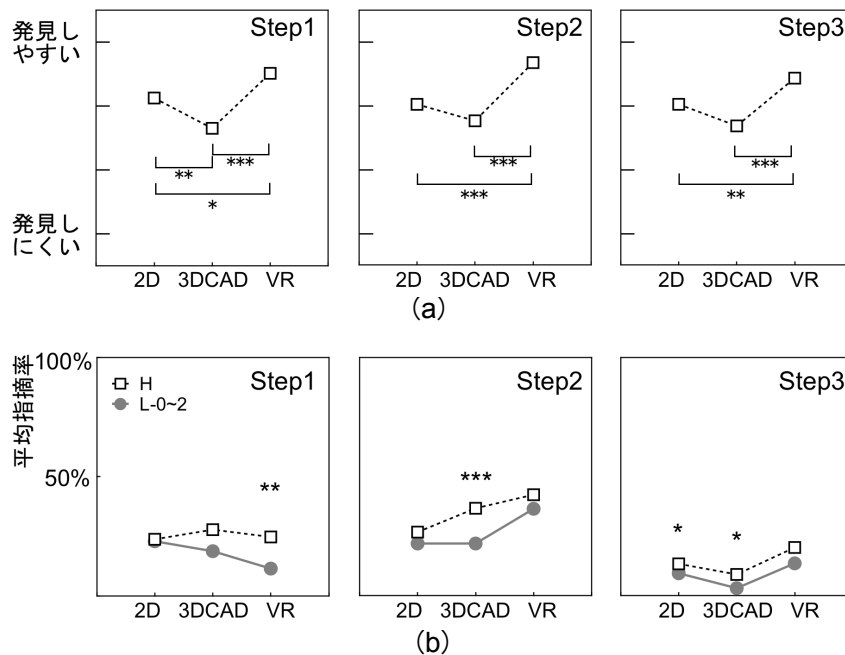


Figure 4-9 各設計内容に対する発見しやすいツール: (a) インタビュー調査による予想; (b) 平均指摘率による結果

所に気づきにくいと判断されたものと予想される。

しかしながら、Figure 4-9(b)の実験結果と比較すると、予想では全ての設計内容で3DCADが最も発見しにくいツールであったものの、実際はStep1とStep2において、2DやVRより常に劣る傾向は確認されず、不適切箇所を相当程度指摘できるものと考えられる。これは、3DCADで経験する空間の三次元情報がVRと同一であるほか、被験者が不適切箇所を探索する際、人の視点で実際に歩いていることを想定しながら空間を自由に経験でき、一定程度の没入的な体験が得られて、VRとほぼ同等の三次元空間情報を把握できること、また、設計指導者が3DCADをそこまでの特性を有するツールとして十分に認識していなかったことも原因ではないかと考えられる。ただし、家具などの寸法の不適切箇所が多く含まれるStep3では、VRが予想通り最も発見しやすい結果となった。

4-4-1-3. 各設計内容における教育効果の整理

以上の結果を踏まえ、本節では各設計内容において、各ツールそれぞれの優劣についてまとめて述べる。

まず、動線、構造、空間の組み合わせなどを検討する「①建物全体の計画」においては、2D、3DCAD、VRそれぞれで優勢な内容が確認された。鳥瞰的な2Dでは動線や構造面についての、連続移動可能な3DCADでは空間の連続性や通路上に存在する事物についての不適切箇所をそれぞれ発見しやすいことが明らかになった。ただし、空間の組み合わせに関する「S1-8. 北にリビング、南に水回りを配置」では、高学年の場合2Dで発見しやすいものの、「S1-1. 階段下空間の天井高が低い」のような、空間の位置が不適切であるため一部の空間が狭小になることなどについては、高、低学年共に身体感覚があることで空間の大きさにより敏感なVRによる効果が顕著であることが把握できた。これより、設計課題の遂行にあたっては、平面上で空間の組み合わせや位置関係を検討した上で、VRを用いて改めて合理性を確認することが効果的と考えられる。

また、空間の大きさ、開口部などを検討する「②空間の設計」においては、前節の結果より、全体的に2Dよりも、高学年で3DCAD、VRの両者、低学年でVRに高い効果が確認された。練度の高い設計者であれば、これまでの知識や経験に基づいて、2Dでも空間の大きさを検討できるものの、設計初心者を対象にする場合、三次元であるVRの利用によって、短時間で空間の有する情報を直観的に把握できるものと考えられる。ただし、「②空間の設計」に含まれる「S2-1. 台所の通路幅が狭い」「S2-6. ドアの幅が狭い」など細かな空間や建具についての不適切箇所では、3DCADでもある程度の発見が可能だが、身体感覚が利用できるVRほどではないことがわかる。

さらに、家具の配置や寸法、素材の選択等を検討する「③詳細設計」においては、前述した通り、VRの利用が最も効果的であると考えられる。

4-4-2. 不適切箇所以外の指摘を用いた実験結果の検証及び各ツールの特性分析

前節では、設定した不適切箇所の指摘結果から、2D、3DCAD、VRの3種のツール間の優劣を検討した。本節では、不適切箇所以外の指摘内容に対するツールごとの指摘数においても、設定した不適切箇所の指摘数と同様の傾向がみられるか、さらなる検証を行う。また、不適切箇所以外の指摘内容の分類により、設計案を体験する際の各ツールそれぞれの特性についてより詳細に考察する。

4-4-2-1. 指摘数による各ツールの比較

まず、不適切箇所以外の指摘が内容ごとにそれぞれ何回指摘されたかを集計した。3種のツールを合わせた総指摘数ごとに何種類の指摘内容が得られたかを集計した結果をTable 4-6に示す。

これより、3回以下の少数被験者にしか指摘されない内容が大半を占め、被験者の指摘内容にはばらつきが大きいことがわかる。したがって、被験者が設計案に含まれる不適切箇所を探索す

Table 4-6 不適切箇所以外の指摘数

3種のツールの総指摘数(回)	3以下	4	5	6	7	8以上
指摘内容(種)	467	24	13	11	4	19

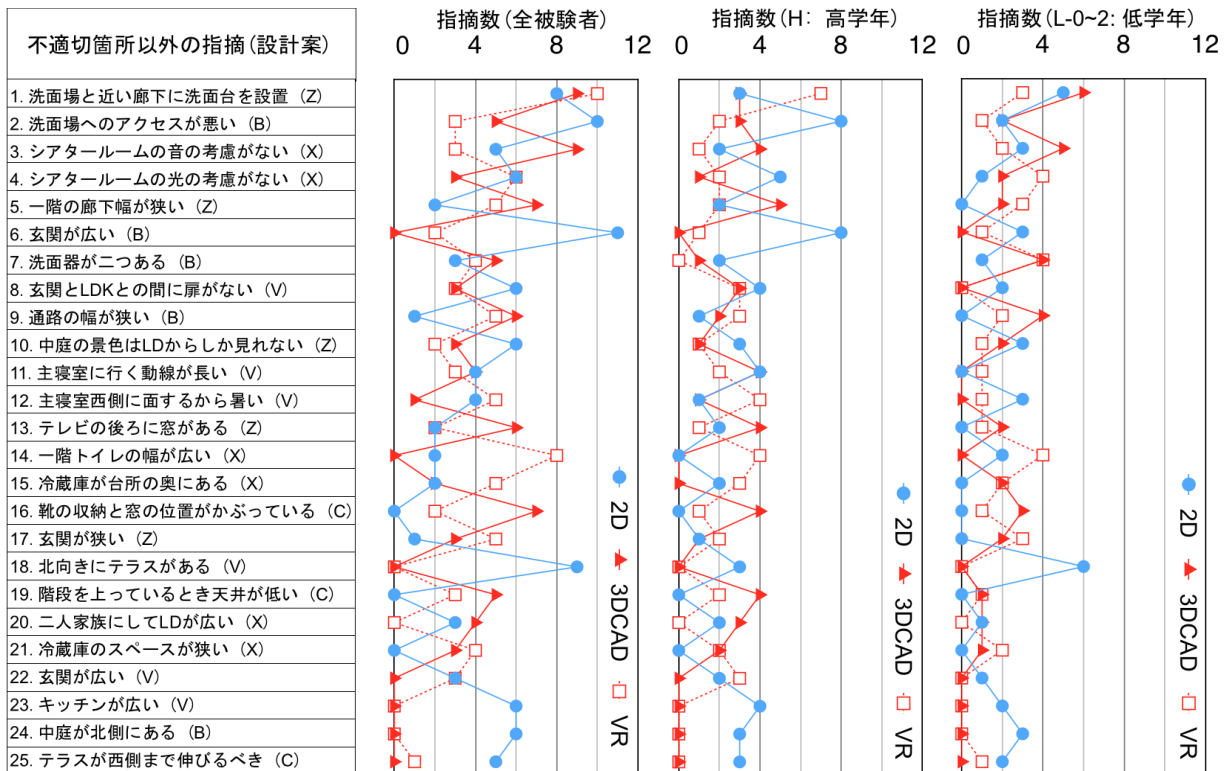


Figure 4-9 不適切箇所以外の指摘(指摘数の多い内容)

る際、個人の好みや着眼点の違いが相当程度反映され、それぞれ思い思いの指摘がされているものと推察される。

具体的な指摘内容をみると、設計案Vにおいて「寝室へのアクセスが悪い」といった、多少なり不適切と言える内容や、同じく設計案Vにおいて「机が低い」といった、実際には適切な（被験者が間違っている）内容の双方が確認された。このような指摘内容を、実験者が不適切か否か主観的に判断するのはいささか妥当性を欠くことから、本章では、それぞれのツールを使用して指摘した全ての内容を、被験者が設計案を体験する際に着目しやすい要素として捉え、実際の不適切の有無によって区別しての考察は割愛することとした。ただし、多くの被験者に指摘された内容ほど、実際に不適切である可能性が高いと推察されることから、一定数以上の被験者から指摘された内容を代表例として、以下、検討する。総指摘数が6回以上(ツールによる指摘数の差が5回以上の内容も含む)の、設定した不適切箇所以外の指摘を抽出し、それぞれに対する各ツールの指摘数をFigure 4-9に示す。

これより、「3」「5」「7」「8」など、学年にかかわらず、ツール間の指摘数の差が2~3回以内と僅かで、明確な差異のない指摘内容が約半数に上る。

ツール間で指摘数の差の大きい内容をみるなら、高学年の場合、「2.洗面場へのアクセスが悪い(B)」のような動線設計の合理性に関する不適切は2Dで、「19.階段を上っているとき天井が低い(C)」といった階段を昇降する際の不適切は3DCADで、それぞれ指摘数が最多となることが確認され、設定した不適切箇所に対する指摘結果と一部対応した傾向が得られたものと考えられる。また、「6.玄関が広い(B)」「23.キッチンが広い(V)」など、空間の大きさに関する内容については、2Dの指摘数が3DCAD、VRより大幅に多い傾向が認められる。ただし、「5.一階の廊下幅が狭い(Z)」「9.通路の幅が狭い(V)」「14.一階トイレの幅が広い(X)」「21.冷蔵庫のスペースが狭い(X)」など、本来の面積が建物全体に対して小さい割合を占める空間の大きさに関する内容では、2Dの場合はほとんど指摘されていない。これは、2Dでは、隣接する空間同士の比較によって空間の大きさに関する合理的な判断が容易になると想定されるものの、寝室、LDKなどより小さい廊下やトイレなどの空間では、それらと比較して判断が困難な可能性が示唆され、2Dよりも三次元の空間情報を有する3DCADやVRの方が判断しやすいものと予想される。

上述した内容に関する低学年の指摘状況を見るなら、使用したツールによる指摘数の違いは高学年ほど顕著ではないものの、2Dの場合「6.玄関が広い(B)」「23.キッチンが広い(V)」が、VRの場合「14.一階トイレの幅が広い(X)」がそれぞれ指摘されやすいといった高学年と類似した傾向も認められる。これより、高学年と同様に、適切なツールの使用により、低学年にも高い理解度を求め得ることが期待される。

4-4-2-2. 指摘内容の種類による各ツールの比較

前節では総指摘数の多い内容に着目して考察したが、本節では、総指摘数の少ない内容もそれらに加えて考察する。このため、はじめに指摘内容の分類、整理を行う。

まず、「空間」「開口部」「建具」など指摘対象によって『大分類』し、次に「空間：大きさ」「空間：配置」「空間：数・量」などそれぞれの対象が具体的にいかなる側面で不適切かによって『中分類』した。さらに、「〇〇が大きい/小さい」「〇〇が過多/不足」「動線が長い/複雑」など具体的にどのような不適切かに関する内容を『小分類』として、それぞれTable 4-7のように定義して集計を行った。

Table 4-7 不適切箇所以外の指摘の分類

大分類	中分類	小分類(不適切の内容)
空間	大きさ 配置 数・量 形と比例	大きい/広い, 小さい/狭い, 高い, 低い 動線(長い, 複雑等), 方位, 関係性 不要, 過多, 不足
開口部	採光 デザイン プライバシー	北向き, 西日, 不足, 過多, 採光できない 位置, 過多, 使用困難, 様式 位置, 過多, 大きい
建具	大きさ 配置 数・量 仕様	大きい, 小さい, 高い, 低い 動線(長い, 複雑等), 関係性 不要, 過多, 不足 使いにくい
家具・設備	大きさ 配置 数・量 仕様	大きい, 小さい, 高い, 低い 動線(長い, 複雑等), 関係性 不要, 過多, 不足 家具の細部設計, 使いにくい
構造	柱, 梁, 壁	太さ, 大きさ, 間隔, 数量, 位置
複合要素	空間・建具・家具	動線(長い, 複雑等), 関係性
素材	素材の選用	相応しくない

また、学年毎に被験者数が若干異なることに留意し、あるツールを用いた分類それぞれに対する指摘数を当該ツールを使用した回数で除した結果を、ツール1回の使用当たりの平均指摘数として算出した。ツールごとの平均総指摘数(全分類合計)と、『大分類』項目それぞれに対するツールごとの平均指摘数をTable 4-8, Figure 4-10にそれぞれ示す。

Table 4-8 ツール1回の使用あたり平均総指摘数

学年\ツール	2D	3DCAD	VR	Total
H	3.43	2.44	2.33	2.74
L-2	2.59	2.00	1.59	2.06
L-1	2.29	2.44	2.77	2.51
L-0	1.69	1.86	1.93	1.82
凡例(平均総指摘数):		少ない		多い

Table 4-8の平均総指摘数をみるなら、H, L-2共に、 $2D > 3DCAD > VR$ の順となるのに対して、L-1とL-0は $VR > 3DCAD > 2D$ となり、全く逆の傾向が確認される。H, L-2の場合、新たなツールであるVRを使用する際、設計に関する内容を設計・計画上の知識として解釈するには隔たりがあり、それよりも普段設計製図等で使用機会の多い2Dでの、図面上の知識に基づいた指摘のほうが容易であるものと推察される。一方、L-1とL-0は、設計知識が乏しいことに加え、2Dを三次元空間として理解し、空間情報を取得するには習熟度が不足しており、困難であることが予想さ

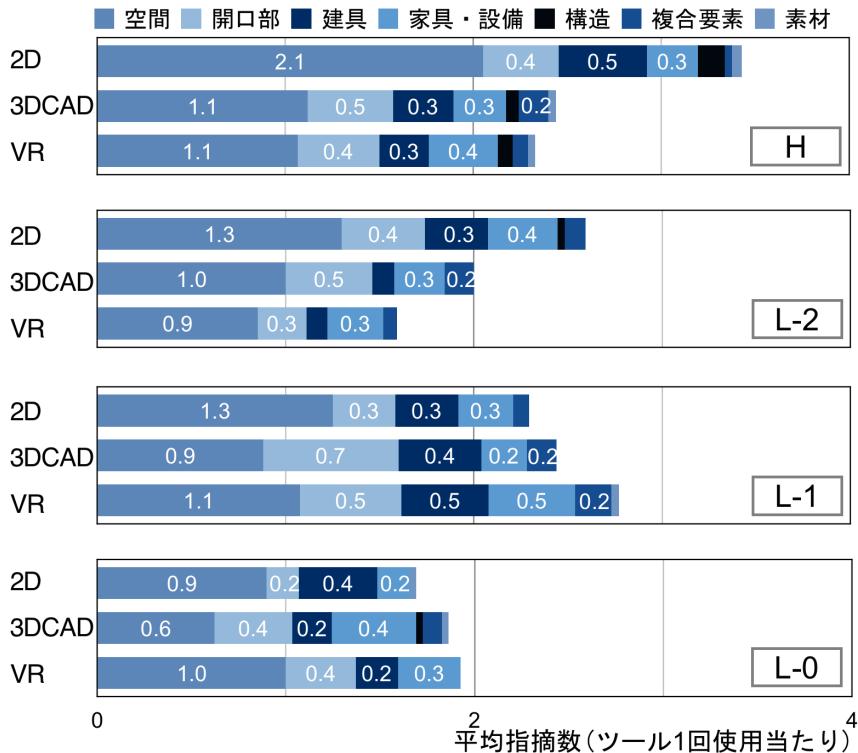


Figure 4-10 不適切箇所以外の指摘の分類集計(大分類)

れ、普段からよく経験している実空間により近いVRのほうが指摘が容易であると考えられる。以上より、大学の設計教育においてVRを教育ツールとして取り入れる場合、建築知識を有する高学年よりも、学習初期の低学年を対象として適用する場合の効果がより高いものと予想される。

Figure 4-10をみるなら、いずれの学年、ツールにおいても平均総指摘数の多い「空間」「開口部」「建具」「家具・設備」の4項目については、全ての指摘の8割以上を占めることから、以下それらについて考察する。

①「空間」

「空間」については、2Dや3DCADでの平均指摘数が学年が上がるに伴い増加する傾向が認められるものの、VRにおいては低学年でも高学年と同等程度の指摘数が確認される。これより、低学年を指導する場合、図面判読能力や習熟度を要する2Dや3DCADを使用するよりも、実物大の設計案を人の視点で体験でき、体験時の操作も相対的に容易なVRの方が、「空間」に関する知識が理解されやすいものと推察される。

「空間」に含まれる『中分類』項目の結果をFigure 4-11(a)に示す。2Dの経験や建築知識が乏しいにも関わらず、L-1やL-0でも「空間：配置」に対する指摘が多数となるのに対して、VRの指摘数が相対的に少ない傾向も窺えた。さらに、上述した『中分類』のうち、総指摘数の多い「空間：大きさ」「空間：配置」に含まれる『小分類』項目の結果をそれぞれFigure 4-11(b), Figure

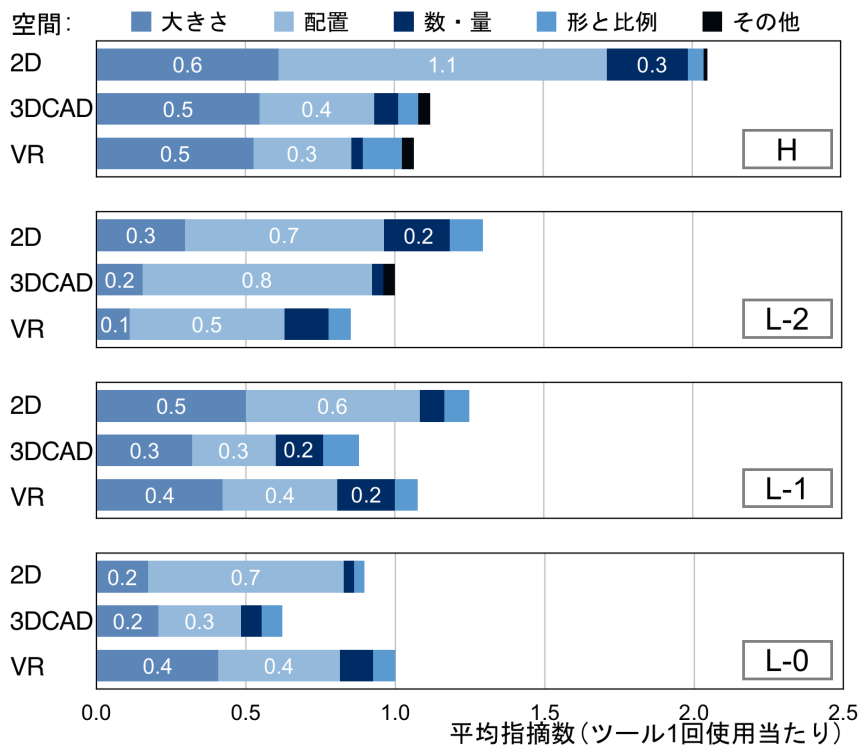


Figure 4-11(a) 不適切箇所以外の指摘の分類集計(中分類:空間)

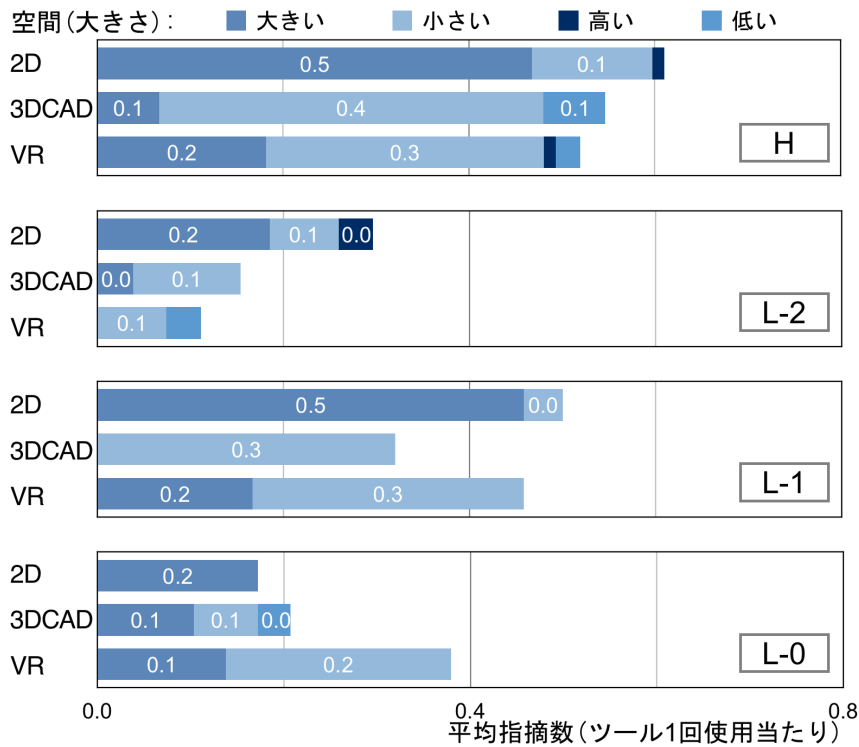


Figure 4-11(b) 不適切箇所以外の指摘の分類集計(小分類:空間:大きさ)

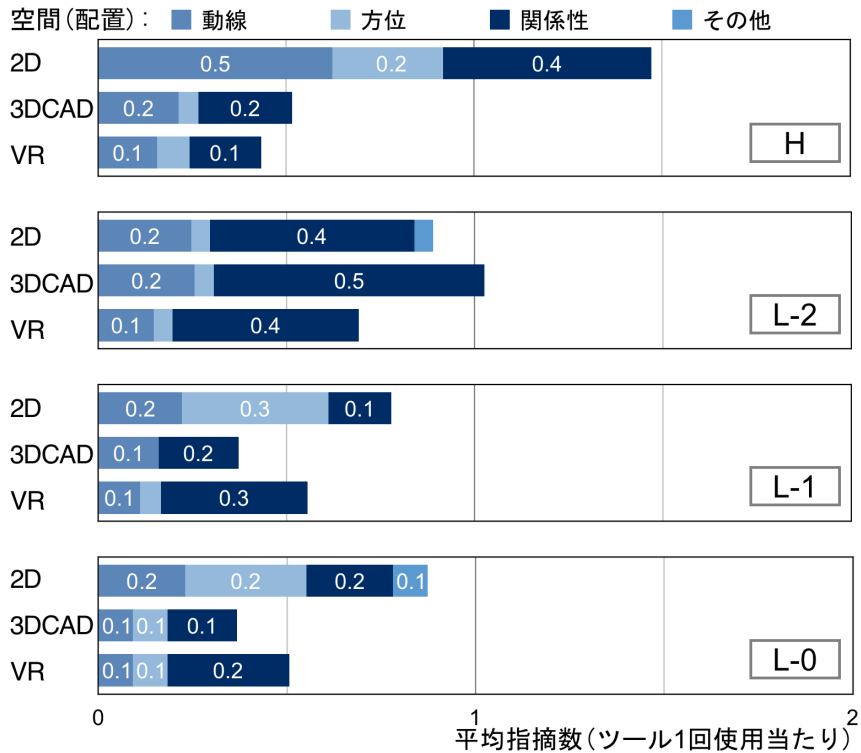


Figure 4-11(c) 不適切箇所以外の指摘の分類集計(小分類:空間:配置)

4-11(c)に示す。

「空間：大きさ」では、3DCADで「大きい」の指摘数が2DとVRより少ないほか、「小さい」の指摘数の多い傾向が多く学年で確認される。これより、3DCADで設計案を体験する場合、空間をより小さく感じる可能性が示唆される。3章から得た、VRでは空間のスケールを現実空間より小さく感じるといった結果を参照すると、本実験における3DCADは27インチのPC画面を被験者の頭部から約60cmの位置で呈示していることから、設計案を体験する際の視野範囲が最大60°前後となり、VRの視野範囲よりさらに狭く、そのことが空間を小さく感じる原因の一つとなったと考えられる。これを受けて、空間の大きさが小さいという不適切に対する判断は、2DやVRと比較して、3DCADで敏感になる可能性が示唆される。

「空間：配置」において、Hでは、「空間から空間へのアクセスが不便」や「隣接する空間の機能が相互影響」といった複数空間の「動線」や隣接する空間の「関係性」が、L-2では「関係性」が、さらにL-1とL-0では「例:主寝室が北西にある」といった単一空間の「方位」がそれぞれ多く指摘される傾向がみられる。これより、学年が上がるほど、空間をより全体的に把握できる能力が向上するものと推察される。2Dの経験や建築知識が乏しいにも関わらず、L-1やL-0でも「空間：配置」に対する指摘が多数となる。

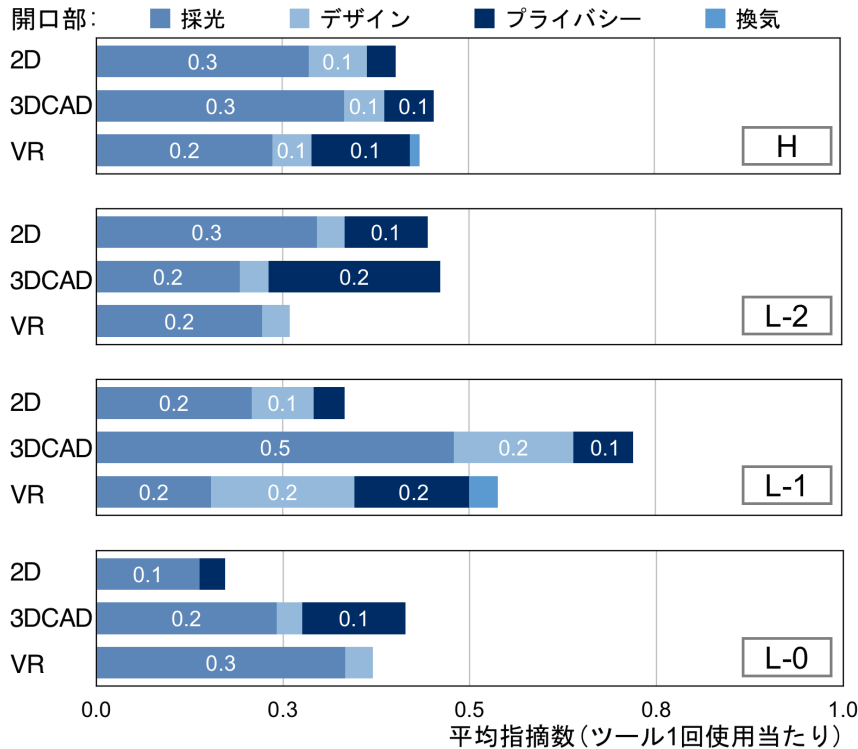


Figure 4-12 不適切箇所以外の指摘の分類集計(中分類:開口部)

② 「開口部」

多くの場合、壁面上に位置する「開口部」についてみるなら、HとL-2では、使用したツールの影響があまりみられないのに対して、設計経験が乏しいと予想されるL-1とL-0では、平面的な情報から空間をイメージする能力が必要な2Dよりも、空間の立面を直観的に確認できる3DCADやVRの方が指摘数の多いことがわかる。ただし、3DCADとVRそれぞれの指摘数に留意すると、いずれの学年においても、VRよりも3DCADの指摘数の多い傾向が確認される。これは、VRの移動方法がテレポートと実際の歩行であるため、壁や開口部など立面上にあるものよりも、被験者が地面を長く観察していることが原因の一つとして推察される。

なお、「開口部」に含まれる『中分類』項目の結果をFigure 4-12に示す。学年や使用したツールによる顕著な相違は確認されない。

③ 「建具」

「建具」については、L-1以外の学年において、2Dによる指摘数が最も多いことがわかる。この現象を解釈するため、「建具」に含まれる『中分類』項目の結果をFigure 4-13に示す。ドアの位置関係、開閉方向や回転軸の位置などの内容が多く指摘された「建具：配置」「建具：仕様」両者を合計した指摘数を確認すると、いずれの学年においても、2Dによる指摘数が最も多いことがわかる。これは、3DCADやVRでもドアの開閉が再現されてはいるものの、2Dでは図面上扇形の表記になることから、ドアの開閉が周囲に及ぼす影響の把握がより容易になるものと考えられる。

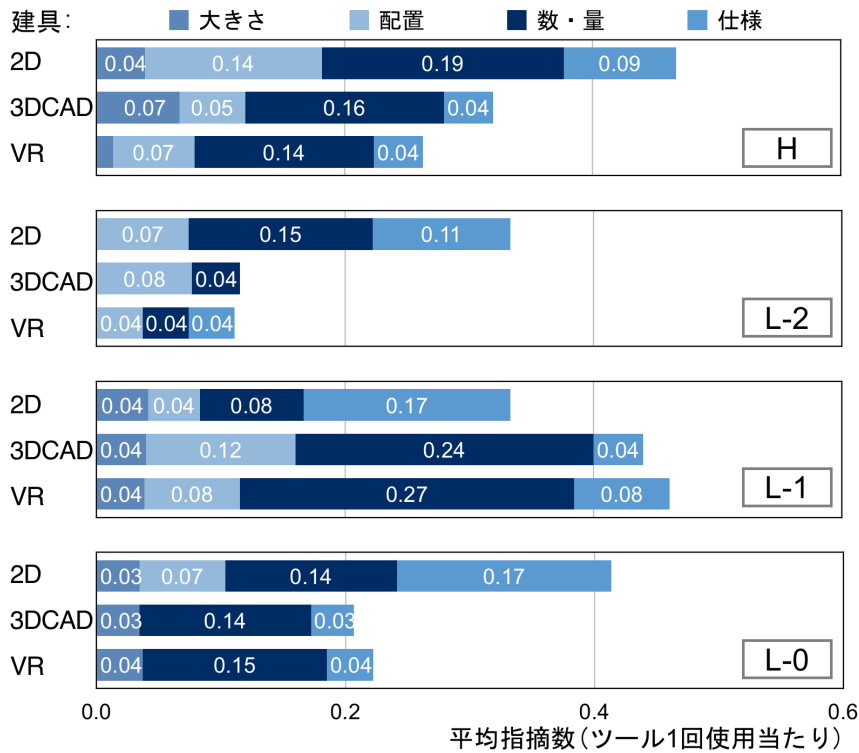


Figure 4-13 不適切箇所以外の指摘の分類集計(中分類:建具)

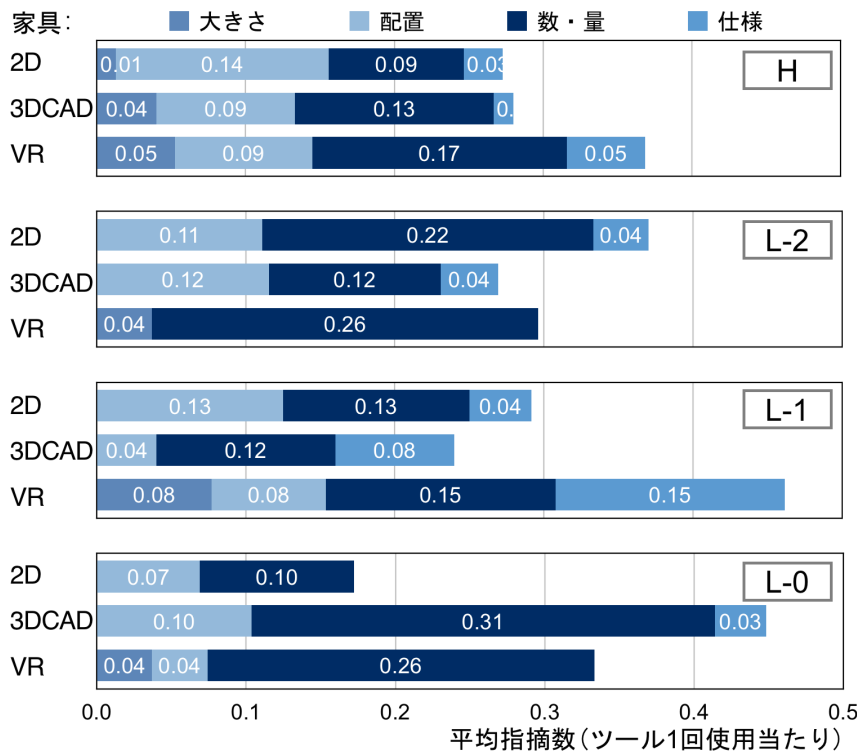


Figure 4-14 不適切箇所以外の指摘の分類集計(中分類:家具)

また、L-1の「建具：数・量」に対する3DCADやVRによる指摘数は、他の学年よりも多い傾向が確認される。これは、大学間の授業プログラムにおける具体的な指導方法の違いが影響している可能性が示唆されるが、これについてはさらなる検証が必要と考えている。

④「家具・設備」

「家具・設備」に関して、設計案を作成にあたって、ほとんどArchiCADのデフォルトモデルを使用したため、不適切が存在する可能性は低いものと予想される。いずれの学年でも指摘数は相対的に小さい割合を占めるほか、学年や使用したツールによる顕著な相違は確認されない。

従って、「家具・設備」に含まれる『中分類』項目の結果をFigure 4-14に示す。VRの「配置」に対する指摘数が2Dより少ない傾向が改めて確認されるが、「数・量」に対する指摘数が2Dより多いこともわかる。これより、設計案における「家具・設備」など細かい設計内容を検討する際、積極的にVRを使用することによって、一定の効果が得られるものと推察される。

以上より、各学年の学生が設計案を確認する際、どの部分により容易に着目するかについて、ツールそれぞれの特性を把握することができた。

4-5. 結語

本章では、まず、建築設計教育に使用する教材・設計支援ツールの適用効果を定量的に把握するため、「不適切な箇所を探索する」課題の遂行による評価方法を提案した。従って、新しい技術であるVRと、伝統的な教材・設計支援ツールである二次元図面や3DCADのそれぞれについて、各設計内容（「建物全体の計画」「空間の設計」「詳細設計」）における教育効果の優劣を検討した。以下、得られた知見について述べる。

二次元図面では、「建物全体の計画」における動線や構造面、3DCADでは「建物全体の計画」における空間の連続性や通路上に存在する事物、VRでは、「空間の設計」や「詳細設計」における小空間、建具や家具の寸法に関する不適切箇所をそれぞれ発見しやすいことを把握した。これより、各設計内容に含まれている不適切箇所に関する知識を学生に理解させるにあたっては、当該不適切箇所を発見しやすいツールを教材・設計支援ツールとして使用することにより、高い理解度を得ることが期待された。

設計指導者の予想結果、3DCADを除き、実験結果とほぼ対応していた。3DCADについては、効果が最も低いとの予想に反して、「空間全体の計画」や「空間の設計」において、VRと概ね同等な効果を有することが実験結果より確認できた。これには、3DCADで経験する空間の三次元情報がVRと同一であり、両者がほぼ同等の機能を有していたことに加え、設計指導者の先入

感や過度な期待による影響も考えられた。ただし、低学年を対象とする場合、3DCADの適用効果は二次元図面やVRよりも実践経験や習熟度によって制限されるものと推察された。

設計案における「空間」に関する内容では、二次元図面や3DCADでの指摘数が学年が上がるに伴い増加する傾向が認められるものの、VRにおいては低学年でも高学年と同等程度、かつ、二次元図面や3DCADより多くの指摘数が確認された。これより、低学年が設計製図の課題に取り組んでいる際、図面判読能力や習熟度を要する二次元図面や3DCADよりも、実物大の設計案を人の視点で体験でき、体験時の操作も相対的に容易なVRを併せて使用の方が、「空間」に関する知識が理解されやすく、設計案を積極的に検討することが促進されるものと推察された。

ただし、「空間から空間へのアクセスが不便」といった複数空間の「動線」に関して、複数の空間全体を同時に把握することが重要と考えられ、人の視点から空間を体験するVRや3DCADよりも、鳥瞰的な二次元図面の効果が最も期待されていることがわかった。

VRの場合には、実際に歩いて移動することに加えて、テレポートによる移動方法を採用したため、機器や現実空間で歩ける範囲の制限によって、部屋間の移動や階段を昇降する際に一部の空間情報を、地面を長く観察しているため、壁や開口部など立面的な情報を、それぞれ見逃してしまう可能性があることから、教材・設計支援ツールとして適用する場合、移動方法の設定について留意する必要があるものと考えられた。

注：

注1) 設計案の作成にあたって参照したハウスメーカーの平面図は、間取りのみが描かれており、柱の配置などの記載がなかったため、実験用設計案の作成時に、壁などの位置関係から柱と梁の位置を推定して追加した。柱を追加する際、3DCADやVRで視認可能な位置にある柱を優先して追加した。また、壁内で視認困難な柱については、追加した柱と梁で繋がっていることや、1階と2階の対応関係といった建物全体の整合性を保つ観点から、一部の柱をさらに追加した。

注2) 5つの設計案の天井高さの設定にあたって、不適切箇所であるX案の3500mmとV案の2100mmを除く、Z、C、Bの三案を同じ高さに設定すると、X案とV案において他の案と異なる高さを設定したことが目に付きやすくなるものと予想される。これをなるべく避けるため、Z、C、Bの三案の1階天井高さが相互に異なるように、設計案Zは2800mm、設計案Cは2500mm、設計案Bは2600mmとそれぞれ設定した。この天井高さの調整により階高（二階の床面位置）も変化し、それに伴い階段室の形状や配置、階段の蹴上げなどにも影響が及び、新たな不適切箇所が生じる可能性があるため、設計案の作成にあたっては、天井高さの変更は天井懐の厚さの調整により実現することとした。これにより、Z案ではやや現実的ではない天井懐にせざるを得なかった。ただし、天井懐の厚さの調整が実験結果へ及ぼす影響を確認するため、

全被験者の指摘内容を確認した結果、最も問題が多いと考えられるZ案での梁型や梁せいに関する指摘はみられず、他の案においても、V案に対して「梁せいが小さい」との指摘が被験者1名よりなされたのみであった。これより、上述した天井高さの調整による実験結果への影響はごくわずかであると考えた。

第 5 章

結論

5章. 結論

本章では、これまでの各章における内容を総括し、本研究の成果をまとめるとともに、今後の課題について示し、全体の結論とする。

第1章においては、本研究の背景と目的について述べると共に、本研究と関連する既往の研究について概観し、本研究の位置づけを行った。さらに、本研究の研究計画を示した。

第2章では、スケール感のトレーニング実験を通して、建築教育の場面において、実空間の代替としてVRによって呈示する建築空間を使用する場合、寸法が正確に把握できるか否かを検証した。

具体的にはまず、実空間、VR空間両グループそれぞれでトレーニングする際の状況を比較した結果、実空間、VR空間両グループに一部共通した傾向のあることを示したが、VRという新しい技術を体験しながらスケール感を学習する際、長さを判断するにあたって、実空間と比較して若干長い思考時間の要することを把握した。

次にスケール感の学習効果については、被験者間の標準偏差や誤差率が減少した回答箇所数からみるなら、両グループとも積極的な効果の得られていることが確認できた。また、もともと誤差率の大きい箇所では、トレーニングは効果的であるが、逆にもともと誤差率の小さい箇所では効果があまりない傾向が、両グループとも存在することが把握できた。

実空間、VR空間のトレーニング前後の誤差率を比較すると、トレーニング前に実空間とVR空間との間で、当初のスケール感が異なっていたにもかかわらず、トレーニングによって概ね同等程度になっていることが確認された。

これらの結果から、大学の建築設計教育において、実空間の代替としてVRによって呈示する建築空間を使用する場合、寸法といった空間情報が正確に把握できるか否かという観点から、実空間の代替性を有することを示した。

第3章では、屋内、屋外空間それぞれでのスケール感のトレーニング実験を通して、VRを用いる場合、空間規模の異なることがスケール感のトレーニング効果にどのような影響を及ぼすかを明らかにすると共に、建築の学習経験の異なる各学年それぞれを対象とする場合のトレーニング効果を検証した。

具体的には、学習難易度の相対的に低い屋内空間でのスケール感を学生に習得させる場合、建築に関する専門教育の経験やスケール感の乏しいことが想定される、学習初期の低学年学生を対象としたほうが、より顕著な教育効果が期待されることを把握した。

規模の大きい屋外空間においては、1年生、4年生被験者共に、視野角の大きい箇所に対する回答の平均値と中央値が実際の値より大きいことから、規模的に大きい事物に対して、実際の空間よりVR空間においてはスケールをより小さく感じる可能性が示唆された。

屋外空間における10m以上のより大きな箇所については、4年生のトレーニング効果が1年生より顕著なことから、VR空間でのトレーニング以外に、建築に関する予備知識を有することの重要性が示唆された。

屋外空間においては、トレーニング後の誤差率が屋内空間より大となるが、観察者の視点から回答箇所まで距離のある屋外空間においては、両眼視差を用いて長さを判断することが困難なことによる影響と予想された。

これらの結果から、大学建築教育において、学生にスケール感を学習させるにあたっては、学習難易度の相対的に低い屋内空間でのスケール感を学生に習得させる場合、建築に関する専門教育の経験やスケール感の乏しいことが想定される、学習初期の低学年学生を対象とするのが効果的であること、また、学習難易度の高い屋外空間に対しては、低学年に習得させるには困難があるため、難易度的に下位の課題を与えて練習を先行させることや、予め建築に関する基礎的な知識を学習させることなど、VRの適用方針が提案できた。

第4章では、まず、建築設計教育に使用する教材・設計支援ツールの適用効果を定量的に把握するため、「不適切な箇所を探索する」課題の遂行による評価方法を提案した。続いて、新しい技術であるVRと、伝統的な教材・設計支援ツールである二次元図面や3DCADのそれぞれについて、各設計内容（「建物全体の計画」「空間の設計」「詳細設計」）における教育効果の優劣を検討した。以下、得られた知見について述べる。

二次元図面では、「建物全体の計画」における動線や構造面、3DCADでは、「建物全体の計画」における空間の連続性や通路に存在する事物、VRでは、「空間の設計」や「詳細設計」における小空間、建具や家具の寸法に関する不適切箇所がそれぞれ発見しやすいことを把握した。これより、各設計内容に含まれている不適切箇所に関する知識を学生に理解させるにあたっては、当該不適切箇所を発見しやすいツールを教材・設計支援ツールとして使用することにより、高い理解度を得ることが期待された。

設計指導者の予想結果は、3DCADを除き、実験結果とほぼ対応していた。3DCADについては、効果が最も低いとの予想に反して、「空間全体の計画」や「空間の設計」において、VRと概ね同等な効果を有することが実験結果より確認できた。これには、3DCADで経験する空間の三次元情報がVRと同一であり、両者がほぼ同等の機能を有していたことに加え、設計指導者の先入感やVRへの過度な期待による影響も考えられた。ただし、低学年を対象とする場合、3DCADの適用効果は二次元図面やVRよりも実践経験や習熟度によって制限されるものと推察された。

設計案における「空間」に関する内容では、二次元図面や3DCADでの指摘数が学年が上がるに伴い増加する傾向が認められるものの、VRにおいては低学年でも高学年と同等程度、かつ、二次元図面や3DCADより多くの指摘数が確認された。これより、低学年が設計製図の課題に取り組んでいる際、図面判読能力や習熟度を要する二次元図面や3DCADよりも、実物大の設計案を人の視点で体験でき、体験時の操作も相対的に容易なVRを併せて使用するのが、「空間」に

関する知識が理解されやすく、設計案を積極的に検討することが促進されるものと推察された。

ただし、「空間から空間へのアクセスが不便」といった複数空間の「動線」に関しては、複数の空間全体を同時に把握することが重要と考えられ、人の視点から空間を体験するVRや3DCADよりも、鳥瞰的な二次元図面の効果が最も期待されていることがわかった。

VRの場合には、実際に歩いて移動することに加えて、テレポートによる移動方法を採用したため、機器や現実空間で歩ける範囲の制限によって、部屋間の移動や階段を昇降する際に一部の空間情報を、地面を長く観察しているため、壁や開口部など立面的な情報を、それぞれ見逃してしまう可能性があることから、教材・設計支援ツールとして適用する場合、移動方法の設定について留意する必要があるものと考えられた。

以上、本研究では、まず、低学年被験者を対象とした実空間、VR空間それぞれにおける屋内空間でのスケール感のトレーニング実験結果を相互に比較することによって、実空間の代替としてVRによって呈示する建築空間を使用する場合、寸法が正確に把握できることを検証した。

また、VRを用いて、上述した屋内空間での低学年被験者に加え、屋内空間での高学年被験者、及び、屋外空間での高、低学年被験者それぞれを対象として、スケール感のトレーニング実験により得られた結果を相互に比較した。これにより、学生の建築に関する基礎知識を考慮した上で、スケール感がより効果的に養われるためには、屋内空間でのスケール感を学生に習得させる場合、建築教育の学習初期の低学年学生を対象とすること、学習難易度の高い屋外空間に対しては、難易度的に下位の課題を与えて練習を先行させることや、予め建築に関する基礎的な知識を学習させることなど、VRの適用方法を提案した。

さらに、スケール感のほか、実際の建築設計場面において、教材・設計支援ツールの適用効果を定量的に把握するため、「不適切な箇所を探索する」課題の遂行による評価方法を考案し、高学年、及び、低学年それぞれを被験者とした実験を行った。VRと、二次元図面や3DCADとの、不適切箇所の発見状況を相互に比較することによって、設計教育における、よりの確なVRの適用方針を明らかにした。

本研究で明らかになった手法を用いてVRと従来の教育手法との比較によって、教育効果の相互の優劣を明らかにした。実際の建築設計教育現場において、VRの利点を生かして、学生の建築計画、建築基準法などそれぞれに対する理解度を向上するための新たな教材を開発したり、設計製図場面での、設計案に対する積極的な検討を促進するための設計支援ツールとして適用したり、学生の建築に対する興味や学習意欲が喚起させたりできる有効な方法となることが考えられる。将来のより科学的、効果的な教育方法の開発に貢献することが本研究で達成できた。

最後に、本研究で得られた成果をふまえたうえで、さらに今後の展開を考えるならば、以下の3点に注目することで、効果的な教育手法の提案に貢献するために、さらに有用な知見を提供できるものと考えられる。

1点目は、第4章から述べた実験結果から、「空間を全体的に把握」や、「空間の連続性」や

「通路上に存在する事物」などそれぞれに関する項目においては、二次元図面、3DCADよりも、VRの適用効果が乏しい傾向が確認された。これに対して、設計教育の場面において、人の視点からの空間体験に加え、より多角的な視点（鳥瞰図や建物の分解図など）から空間を体験する機能や、空間内を連続的に移動する機能をそれぞれ追加することによって、本来のVRの利点を保つと同時に、二次元図面や3DCADの有利な方面も積極的に導入することで相互効果をもたらすことで、VRの有効な適用場面をより一層広げることが期待される。

また、2点目は、第4章から述べた「不適切な箇所を探索する」実験において、低学年の場合の実験に参加可能な被験者は各学年いずれにおいても15名程度（二次元図面、3DCAD、VRそれぞれ5-6名程度）となった。これが制約条件となることから、本研究において学年ごとの設定した不適切箇所に対する指摘結果の比較検討には至っていない。今後、建築設計を学習する最中の学年それぞれにおいて、VRの適用効果をより詳細に検討するため、被験者を追加して検討する必要があると考えられる。

3点目は、現在、視線追跡機能が導入されているHMDを入手することが容易になっており、これを契機として、本研究で提案した、「不適切な箇所を探索する」課題の遂行によるVRの適用効果を定量的に評価する方法において、空間をVRで体験する際の観察特性と、問題箇所がその学生に気づかれるか否か、または、空間情報が学生にどれほど把握されているかなどとの相互関連について検討することにより、設計内容に応じた学生に理解されやすい観察方法が明らかになることが期待される。これによって、設計教育場面での、VRを適用するにあたって、より有効な使用方法を提案することが可能になるものと考えられる。

参考文献

参考文献

- [1] C. Carbonell-Carrera, J.L. Saorin, S. Hess-Medler, Spatial orientation skill for landscape architecture education and professional practice, *Land* 9 (5) (2020) 161, <https://doi.org/10.3390/land9050161>.
- [2] S. Sugita, D. Nishina, R. Kobayashi, T. Tanaka, H. Oishi, A study on alternative possibility of psychological evaluation of exterior space by whole sky image evaluation, *J. Environ. Eng.* 83 (745) (2018) 235–245, <https://doi.org/10.3130/aije.83.235>. Released March 30, 2018, Online ISSN 1881-817X, Print ISSN 1348- 0685.
- [3] M. Akiyama, D. Nishina, S. Sugita, Y. Asami, T. Tanaka, H. Oishi, R. Kobayashi, A study on alternative possibility of whole sky image in psychological evaluation of indoor space, 748, *J. Environ. Eng.* 83 (2018) 503–513, <https://doi.org/10.3130/aije.83.503>. Released June 30, 2018, Online ISSN 1881-817X, Print ISSN 1348- 0685.
- [4] J.L. Higuera-Trujillo, J. Lopez-Tarruella, C. Llinares, Psychological and physiological human responses to simulated and real environments: a comparison between Photographs, 360 Panoramas, and Virtual Reality, *Appl. Ergon.* 65 (2017) 398–409, <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.05.006>
- [5] Y.A. De Kort, W.A. Ijsselstein, J. Kooijman, Y. Schuurmans, Virtual laboratories: comparability of real and virtual environments for environmental psychology, *Presence Teleoperators Virtual Environ.* 12 (4) (2003) 360–373, <https://doi.org/10.1162/105474603322391604>.
- [6] S.F. Kuliga, T. Thrash, R.C. Dalton, C. Ho’scher, Virtual reality as an empirical research tool — exploring user experience in a real building and a corresponding virtual model, *Comput. Environ. Urban Syst.* 54 (November) (2015) 363–375, <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbysys.2015.09.006>.
- [7] K. Chamilothori, J. Wienold, M. Andersen, Adequacy of Immersive Virtual Reality for the Perception of Daylit Spaces: Comparison of Real and Virtual Environments, *Leukos*, Jan. 2018, pp. 1–24, <https://doi.org/10.1080/15502724.2017.1404918>
- [8] W. Peter, A.G. Amy, B.T. William, H.C. Sarah, Effects of stereo viewing conditions on distance perception in virtual environments, *Presence Teleoperators Virtual Environ.* 17 (1) (2008) 91–101, <https://doi.org/10.1162/pres.17.1.91>.
- [9] S. Yamada, E. Kitamoto, N. Jincho, K. Oikawa, A study on spatial perception in immersive virtual space, *AIJ J. technol. des. ume* 24 (58) (2018) 1303–1307, <https://doi.org/10.3130/aijt.24.1303>.
- [10] B. Wu, T. Ooi, Z. He, Perceiving distance accurately by a directional process of integrating ground information, *Nature* 428 (2004) 73–77, <https://doi.org/10.1038/nature02350>
- [11] S. Aydin, B. Aktas, Developing an integrated VR infrastructure in architectural design education, *Front. Robot. AI* 7 (2020), 495468, <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.495468>
- [12] S. Kavanagh, A. Luxton-Reilly, B. Wuensche, B. Plimmer, A systematic review of Virtual Reality in education, *Themes Sci. Technol. Educ.* 10 (2) (2017) 85–119. <https://www.learntechlib.org/p/182115/>
- [13] J. Pirker, A. Dengel, The potential of 360° virtual reality videos and real VR for education—a literature review, 4, in: *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 41, 2021, pp. 76–89, <https://doi.org/10.1109/MCG.2021.3067999>
- [14] S. E. Gathercole and T. P. Alloway : *Working Memory and Learning : A Practical Guide for Teachers*, SAGE Publications (2008) (in Japanese)
- [15] M. Nagamatsu, K. Kawada, T. Yamamoto, T. Yamane, Construction of a Skill Evaluation Model and Consideration on Learning Processes, *IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems*, 2015, Volume 135, Issue 1, Pages 66-72, 2015. 01, <https://doi.org/10.1541/ieejieiss.135.66>
- [16] 瀧沢絵里: テスト教示・練習課題の難易度が内発的動機付けに及ぼす影響について, 学習院大学人文科学論集XIX,2010, https://www.gakushuin.ac.jp/univ/let/top/publication/JI_19/JI_19_014.pdf
- [17] 山本良平, 大橋ゆかり: 難易度の高い運動課題の学習特性に関する研究, 理学療法学Supplement, 2011, p. 431, <https://doi.org/10.14900/cjpt.2011.0.ab0431.0>
- [18] 鈴木彩香, 宇都雅輝: 項目反応理論に基づく難易度調節可能な読解問題自動生成手法, 言語処理学会, 第29回年次大会, 発表論文集, pp. 1891-1895, 2023.
- [19] 丹羽由佳里, 大野秀敏: 建築設計課題の分析-東京大学建築学科における設計課題を遡る-, 日本建築学会技術報告集, 23, pp. 459-464, 2006.
- [20] 山野大星, 小林猛, 井庭崇: 住宅設計課題におけるパターン・ランゲージを用いた評価作成と指導の効果, 日本教育工学会論文誌, 46(3), pp. 493-507, 2022.
- [21] M. Nagamatsu, T. Usuzaka, K. Kawada, T. Yamamoto, Y. Yamane, Consideration on a Model between Teacher and Student Based on Control Engineering Approach, *IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems*, 2014, Volume 134, Issue 10, Pages 1537-1542, 2014. 10, <https://doi.org/10.1541/ieejieiss.134.1537>

- [22] 秋田美穂, 恒川和久, 建築設計教育における設計課題と学習成果に関する考察, 日本建築学会計画系論文集, 82巻, 739号, p. 2461-2468, 2017.
- [23] 秋田美穂, 谷口元, 設計課題の受講過程における初学生の学習量及び空間想像力と成績に関する考察, 日本建築学会計画系論文集, 2011, 76巻, 663号, p. 1045-1051
- [24] 秋田美穂, 戸部栄一: 建築系大学教員の設計教育におけるスケール感の認識と設計課題に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第70巻, 第596号, pp. 235-238, 2005. 10
- [25] K. Wada, T. Saitoh, T. Tanemura, S. Boda, S. Nishimura, A Study on Design Methods for Space Creation in Architectural Design Processes, *Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ)*, 2015, Volume 80, Issue 713, Pages 1535-1545, Released August 18, 2015, Online ISSN 1881-8161, Print ISSN 1340-4210, <https://doi.org/10.3130/aija.80.1535>
- [26] 松本みさと, 山形敏明, 阿部恵利子: 設計製図教育における思考プロセス—解読型課題への取り組みから—, 日本建築学会大会学術講梗概演集, 教育, pp. 13-14, 2023. 9
- [27] 下川雄一, 川崎寧史, 宮下智裕: CAD・CGを利用した空間デザイン表現の演習教育, 図学研究, 第39巻, 3号 (通巻109号), pp. 13-20, 平成17年9月
- [28] 高木舜典, 和田浩一, 伊丹弘美, 林亮佑: 建築設計教育における学生の3D-CAD/CGの活用が及ぼす空間イメージの特徴—設計案を3Dモデル化する過程における思考内容の分析—, 日本建築学会大会学術講梗概演集, 建築計画, pp. 51-52, 2022. 9
- [29] 大倉佑介, 大西康伸: 建築設計演習におけるVRを用いた学生自身による作品評価に関する試行, 日本建築学会大会学術講梗概演集, pp. 863-864, 2017. 8
- [30] Rauschenberger, M., Schrepp, M., Pérez Cota, M., Olschner, S., and Thomaschewski, J. (2013). Efficient Measurement of the User Experience of Interactive Products. How to Use the User Experience Questionnaire (UEQ). Example: Spanish Language Version. *The International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*. doi: [10.9781/ijimai.2013.215](https://doi.org/10.9781/ijimai.2013.215)
- [31] Schrepp, M., Hinderks, A., and Thomaschewski, J. (2014). “Applying the user experience questionnaire (UEQ) in different evaluation scenarios,” in *Design, User Experience, and Usability. Theories, Methods, and Tools for Designing the User Experience. DUXU 2014. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 8517. ed A. Marcus (Cham: Springer), doi: [10.1007/978-3-319-07668-3_37](https://doi.org/10.1007/978-3-319-07668-3_37)
- [32] A. Wakita, D. Nishina, S. Kindaichi, S. Sugita, H. Oishi, A. Shimizu, M. Akiyama: A study on the psychological evaluation of indoor space with whole sky image. Part 6 Experimental results by a HMD, head mount display. *Proceedings of Annual Research Meeting, Chugoku Chapter, Architectural Institute of Japan (AIJ)*, Vol. 42, pp. 491-494, 2019. 03
- [33] 川角典弘, 輪玉隼也, 上道礁瑚, 関谷拓人: 仮想空間モデルの表現が空間体験に与える影響に関する考察, 日本建築学会大会学術講梗概演集, 情報システム, pp. 171-172, 2022. 9
- [34] T. Hong, M. Lee, S. Yeom, K. Jeong, Occupant responses on satisfaction with window size in physical and virtual built environments, *Building and Environment*, Volume 166, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106409>
- [35] Fedaa Abd-Alhamid, Michael Kent, John Calautit, Yupeng Wua: Evaluating the impact of viewing location on view perception using a virtual environment. *Building and Environment*, Volume 180, 2020, 106932, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106932>
- [36] Junjie Li, Wei Wu, Yichun Jin, Ruyue Zhao, Wenyan Bian, Research on environmental comfort and cognitive performance based on EEG+VR+LEC evaluation method in underground space, *Building and Environment*, Volume 198, 2021, 107886, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107886>
- [37] Z. Jin, Y.K. Juan, Is Fengshui a science or superstition? A new approach combining the physiological and psychological measurement of indoor environments, *Building and Environment*, Volume 201, 2021, 107992, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107992>
- [38] 石田康平, 石谷粹将, 田中義之, 千葉学: VRを通じた空間の経験が設計プロセスに与える影響, 建築設計における創造的プロセスを支える対話ツールとしてのVRに関する研究(その1). 日本建築学会計画系論文集, 2019年 84巻 761号, pp. 1579-1587.
- [39] D. Mabuchi, Y. Yoshioka, A. Enta, K. Fujii, T. Sano: Development and effectiveness of "Scale Training", a scale sense learning tool utilizing VR. *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Architectural Planning and Design*, pp. 1009-1010, 2018. 07
- [40] C. Hansol, K. Seung-Nam: Training street-level “sense of scale” as a spatial perception ability in recorded virtual reality: A Solomon four-group design approach. *Virtual Reality*, 27. 1-16. 2023.
- [41] Y. Shimokawa, R. Kobayashi, Practice of architectural education DX using virtual space Real-scale observation and discussion of architectural, *KIT progress* 31 (2023) 64-73, 3, <https://cir.nii.ac.jp/crid/1050576811655889280>

- [42] 下川雄一, 小林諒馬: 多人数でのVR空間同時体験による建築空間特性学習効果に関する研究(その1), 日本建築学会大会学術講梗概演集, 教育, pp. 9–10, 2023. 9
- [43] 小林諒馬, 下川雄一: 多人数でのVR空間同時体験による建築空間特性学習効果に関する研究(その2), 日本建築学会大会学術講梗概演集, 教育, pp. 10–11, 2023. 9
- [44] 矢野拓幹, 野村秀久, 須田達, 下川雄一: 3Dバーチャルツアー技術による建築施工教育ツールの開発, 日本建築学会大会学術講梗概演集, 教育, pp. 7–8, 2023. 9
- [45] K.B. Ahmad, H.A. Hussain, Z.A. Mostafa, The application of virtual reality technology in architectural pedagogy for building constructions, *Alex. Eng. J.* 58 (Issue 2) (2019) 713–723, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.06.002>
- [46] A. Angulo, Rediscovering virtual reality in the education of architectural design: the immersive simulation of spatial experiences, *Ambiances 1* (2015), <https://doi.org/10.4000/ambiances.594>
- [47] A. Angulo, V. V´asquez, Guillermo, Immersive simulation of architectural spatial experiences, in: Marcelo Bernal, Paula Gómez (Eds.), *Knowledge-based Design - Proceedings of the 17th Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics. SiGraDi XVII. Valparaiso, Chile, 2013*, pp. 495–499.
- [48] E.J. Gibson, R. Bergman, The effect of training on absolute estimation of distance over the ground, *J. Exp. Psychol.* 48 (6) (1954) 473–482, <https://doi.org/10.1037/h0055007>
- [49] A.S. Gilinsky, Perceived size and distance in visual space, *Psychol. Rev.* 58 (6) (1951) 460–482, <https://doi.org/10.1037/h0061505>
- [50] W.C. Gogel, The absolute and relative size cues to distance, *Am. J. Psychol.* 82 (1969) 228–234. <https://www.jstor.org/stable/1421247>
- [51] W.C. Gogel, Scalar perceptions with binocular cues of distance, *Am. J. Psychol.* 85 (4) (1972) 477–497, <https://doi.org/10.2307/1421713>
- [52] W.C. Gogel, Cognitive factors in spatial responses, *Psychologia: An International J. of Psychology in the Orient* 17 (4) (1974) 213–225. <https://psycnet.apa.org/record/1975-24526-001>
- [53] R.C. Toye, The effect of viewing position on the perceived layout of space, *Percept. Psychophys.* 40 (1986) 85–92, <https://doi.org/10.3758/BF03208187>
- [54] C.A. Levin, R.N. Haber, Visual angle as a determinant of perceived interobject distance, *Percept. Psychophys.* 54 (1993) 250–259, <https://doi.org/10.3758/BF03211761>
- [55] D.R. Lampton, D.P. McDonald, M. Singer, J.P. Bliss, Distance estimation in virtual environments, *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.* 39 (20) (1995) 1268–1272, <https://doi.org/10.1177/154193129503902006>
- [56] HP of Oculus. <https://www.oculus.com/> (Accessed 27 October 2021).
- [57] iNFINITE Production: VR Headset database. <https://www.infinite.cz/projects/HMD-tester-virtual-reality-headset-database-utility> (Accessed 2 January 2021).
- [58] J.L. Joseph, A discussion of cybersickness in virtual environments, *SIGCHI Bull* 32(1) (Jan. 2000) 47–56, <https://doi.org/10.1145/333329.333344>
- [59] B. Wu, T. Ooi, Z. He: Perceiving distance accurately by a directional process of integrating ground information, *Nature*, Vol. 428, pp. 73–77, 2004. 03
- [60] A. Latini, E.D. Giuseppe, M. D’Orazio, Immersive virtual vs real office environments: a validation study for productivity, comfort and behavioural research, *Build. Environ.* 230 (2023), 109996, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.109996>