

東京大学大学院新領域創成科学研究科

環境システム学専攻

2021 年度

修士論文

VR 手法を用いた実験室内の視線分布
と影響要因に関する解析

2022 年 1 月 20 日提出

指導教員：大島 義人 教授

張 宛瑩 (チョウ エンエイ)

目次

第 1 章 緒言	1
1.1 大学実験室の現状	1
1.1.1 実験室の重要性と課題	1
1.1.2 大学実験室の既往研究例	1
1.2 VR 中の実験室再現	3
1.2.1 VR 紹介と研究例	3
1.3 視覚について	5
1.3.1 視覚の重要性と研究例	5
1.3.2 視線追跡と研究例	5
1.4 本研究の目的と特徴	7
1.4.1 研究目的	7
1.4.2 本研究の特徴	7
第二章 検討項目	8
2.1 実験室環境	8
2.1.1 通路幅と視点分布	8
2.1.2 照明条件と視点分布	9
2.1.3 実験室物の色の変更	9
2.3 実験室ユーザー	10
第三章 実験方法	11
3.1 実験概要	11
3.2 被験者実験	12

3.2.1	実験装置	12
3.2.2	実験場所	13
3.2.3	被験者	17
3.2.4	VR 実験室の作成	17
3.2.5	実験手順	27
第四章 実験データ		28
4.1	データの獲得方法	28
4.2	データの可視化	31
第五章 結果と考察		46
5.1	実験室環境の検討	46
5.1.1	実験室内道の広さと視線分布の検討	46
5.1.2	実験室内物の色彩要素と視線分布の検討	49
5.1.3	実験室内の照明と視線分布の検討	51
5.2	被験者の身分による注視行動の変化	53
5.3	まとめと考察	54
第六章 結言		55
付録		56
参考文献		62
謝辞		64

緒言

1.1 大学実験室の現状

1.1.1 実験室の重要性と課題

実験室は、科学研究と知的革新の拠点であり、科学技術の発展と社会の進歩に重要な役割を担っており、大学をはじめ、各研究機関、産業界などにそれぞれの特徴を有した実験室がある。これらの実験室は、世界の先端的な基礎研究が行われることが多く、ノーベル賞受賞者や科学技術革新を生み出しており、学术交流の場としても重要な場所になっている。

その中でも大学の実験室は、学生が基礎的な実験を習得することや研究者が自らの研究を行う場として、利用されている頻度が高い。他のと比べて、実験室は変数の厳格な管理が可能である。しかし同時に、現代の研究は先端性と複雑性を重視するため、実験条件は多様化し、高温高圧、急速凍結、レーザーの応用、または有毒・有害な化学物質の使用などの実験操作が実験室でしばしば行われ、実験室は日常の場（家庭、レストラン、オフィス）とは異なっている。日常生活では定常作業が行われている（レストランで料理、食事をする。オフィスで仕事をする）が、大学の研究室では未知的な研究成果を出すために非定常作業が試されることが多く行われており、多様な実験条件の組み合わせのため、実験室には特殊性がある。従って、大学の実験研究において、研究の推進とリスクが表裏一体の関係にある中で、研究の創造性やアクティビティを損なうことなく、安全に研究を遂行することは難しい課題である^[1]といわれている。

1.1.2 大学実験室の既往研究例

大学で発生している事故の約 3 割が実験室での事故と報告^[2]されており、その種類もさ

まざまである。既往研究によると、実験室で発生した事故：流し水道配管の破損による損害；溶解（希釈）熱による火傷；紫外線による目の損傷；ガラス細工でのガラス切断時の破片による目の損傷；試薬瓶の取り扱いでの事故；試薬運搬時の試薬瓶の破損事故；溶融塩の突沸；アセトアルデヒドへの曝露；アンモニアの吸い込み；裸火よりの引火；電気乾燥器内での有機蒸気の爆発等が挙げられる^[3]

実験室の事故を引き起こす人の身分は特定のグループはない。研究の過程で常に新しい実験技術が習得されるため、実験にまつわる事故は必ずしも新人が起こすとは限らない。実験室のユーザーは、学生、教師、研究者、安全巡視者、大学の産業医など、多岐にわたる。事故は実験時間外でも発生する、例えば薬剤の取り扱いや実験後の片付けなどで発生する可能性がある。既往研究によると、実験関連事故の発生は、大学 1 年生から博士課程の学生まで、幅広いグループに及んでいる^[4]。

実験室の安全性を高めるためには、まず実験室を理解し、その上で安全教育や管理などを充実させることが重要である。既往研究には、実験室を人、物、場の 3 つに分け、それらの相互作用を体系的に分析することで、実験室の安全性を向上するための基礎的知見を得た例がある^[1]。例えば、中和滴定操作をモデルとして、実験操作の数理モデルを作成し、実験者の作業結果の予測の検討^[5]、また RFID (Radio Frequency Identification) と Web カメラを使って、実験室への試薬の出入り、軌跡、使用時間、使用場所をモニタリングし、実験室における化学物質の使用実態が明らかにされている^[6]。

1.2 Virtual reality の実験室

1.2.1 Virtual reality とその研究例

Virtual reality (以下 VR) とは、計算機等を使って合成された、実物ではないが、機能としての本質は同じであるような環境を、ユーザーの五感を含む感覚を刺激することにより理工学的に作り出す技術およびその体系のことである^[6]。VR は、体験者が仮想空間に浸かり、システムと相互作用しているような錯覚をもたらし、体験者個人にとって新しい体験を構成している。

VR 技術には、以下に示す独特な特徴や利点がある。

第一に、VR システムは、時間や空間の制約をなくすることができる。Google Earth の VR 版では、没入型装置を使うことで、世界中の百以上の場所を選び、まるでパラシュートで周囲を囲まれているようなリアルな状況の中で見る事が可能になる。体験できるのは有名観光地だけでなく、世界の主要博物館も用意されている。VR ゴーグルを装着すると、その場にいるような感覚になる。多くの研究者が VR を利用してさまざまな種類の模擬実験を行い、心理学、医学、安全学などの分野に関連する実験を行うことができる。実験自体はシミュレーションであるが、実験の手順や方法は現実のものと高い互換性を持っている。この VR をベースにしたシミュレーションは、学習者に実験プロセスを事前に体験させ、継続的に実験を行うことで理解・習得させる新しい方法と考えられる。時間と空間の限界を超えて、多くの実験を繰り返し体験、エラーを修正することが可能になる。

第二に、VR システムは、現実には実現しにくい、あるいは体験しにくいシナリオ／活動をシミュレートすることができる。VR は、リアルな実際の場所をシミュレートできるだけでなく、3D シーンデザインによって、現実には到達しにくい、あるいは不可能な状況体験を作り出せる。例えば、VR での人体探索では、赤血球の上に立ち、血液循環をたどり、体内のさまざまな組織や臓器を体験することで、新しい視点や感覚を得ることがで

きる。体験者は、いくつかのシミュレーション状況を体験することで、より直感的に知覚・理解できるようになり、科学的知識や法則の理解、批判的思考のきっかけ、自分自身の新たな気づきを得ることが可能である。VR は、ミクロの知覚だけでなく、衛星軌道、月面着陸、星間航行といった壮大なシナリオを体験することにも利用できる。

第三に、VR は体験のリスクを軽減し、複雑なスキルのトレーニングに活用することができる。例えば、医療分野では、人間の臓器をシミュレートしたリアルな 3D 体験により、人体モデルの現実なスケール再現し、訓練の妥当性や効果を高め、微細運動訓練の精度を高めるとともに、実際の人間に対して繰り返し訓練を行うことによるリスクの低減を図れる。また、VR システムは、軍人が新しい技術を探求し、習得するための訓練にも利用できる。宇宙分野では、NASA が宇宙飛行士の任務遂行能力を向上させるために開発した VR システムがある。

その他にも時間と費用の節約；現実には不可能なことができる。例えば部屋の大きさや色を瞬時に変えること；火災現場や地震発生など、危険な状況を疑似体験できるなどの利点がある。

VR 技術は、幅広い研究分野で活用されている。医療：脳卒中患者の手指機能リハビリテーションのための VR システムを開発した^[8]。室内環境：VR を用いて、室内環境に取り込まれた自然要素（植物）が人間の不安レベルに及ぼす影響を検証した^[9]。また、VR システムは、病院の患者さんに自然やその治療効果をもたらす方法となる可能性があることが示された^[10]。建築：VR を用いた分析システムを開発し、避難行動の分析に活用した^[11]。

1.3 視覚について

1.3.1 視覚の重要性と研究例

視覚は人間の生活にとって重要な感覚であり、人間は生まれたときから視覚を頼りに周囲を観察し、知識を得てきた。人は情報を収集するために五感を活用しており、その中でも視覚からの情報は約 80%を占めると言われている^[12]。

目は、形を見分けるための重要な器官である。物体のいくつかの特徴のうち、形状は主要なものであり、形状を識別するのが視覚である。あらゆる物体は、形、音、色、味などの属性を持っているが、物体を認識する際には、老若男女を識別したり、あらゆる種類の動物を識別したりと、他の属性よりも形状の属性が重要なことに表示される。視覚障害者は、他の知覚に頼って対象を識別しているため、より多くの時間と労力を必要となる。

また、形状が視覚でしか認識できないものも多く、形状の情報を触ったり、匂いを嗅いだり、音を聞いたりする情報に変換することができないため、視覚障害者にとって非常に抽象的で、識別しにくいことである。例えば、空や雲、星、月などを認識することが挙げられる。

視覚は、個人の発達の他の側面においても大きな役割を果たして、物体の客観的な存在を認識するのに役立つ、個人の行動範囲を広げ、環境を探索する個人の意欲を刺激するのに大きな作用をしている。

1.3.2 視線追跡と研究例

視覚は人間の最も重要な感覚の一つであるため、その追跡技術も急速に発展している。視線追跡技術を発展するために、視覚計算は不可欠である。視覚計算とは、人間の視覚を理解し、視覚器官を画像処理システムに置き換え、人間の脳の代わりに計算機で入力画像の処理と理解を完結させるものである。一方、情報技術や知能科学の発展に伴い、視覚科

学は人工知能の分野で人気のある分野の一つである。視線追跡技術は、視覚分野の人気話題の一つとして、連続した画像の検出、特徴抽出、分類・認識、追跡・フィルタリング、行動認識を行い、対象の正確な運動情報パラメータ（位置、速度など）を取得し、それらを適宜処理・解析して対象の行動理解を実現する技術である^[13]。

視覚に関する研究は様々な分野に広がっている。教育分野：公立小学校の教師の視線を追跡することで、その視点を可視化し、生徒の行動と一緒に分析することで、教師の視線の傾向と意図の関連性を明らかにした^[14]。交通分野：自転車走行中の高齢者と若年者の視線を追跡・分析することで、運転中の視点分布の特徴を年齢層別に比較し、自転車利用時の安全性を高めるための提言を行った^[15]。社会福祉分野：弱視者における公共標識の視認性について、眼球運動測定装置を用いて調査した。公共標識の視認性の結果により、ほとんどの重要な交流標識が弱視者にとってうまく機能していないことがわかった^[16]。

1.4 本研究の目的と特徴

1.4.1 研究目的

実験室の条件ごとの人の視線を解析し、注視するモノ、注視時間の変化から、身分ごとに実験室の条件から受ける影響を比較検討することを目的とする。今回は通路幅の広さ、実験室にある物の着色、部屋の明るさといった各々の条件を持った実験室内を歩行する際の人の視線を解析した。さらに実験室の中に予め危険な場所を設定し、学生と巡視者の注視点、注視時間を比較することで、安全に対する認識を比較検討した。

1.4.2 本研究の特徴

検討にあたり、多様な実験室の環境（明るさ、道の広さ、物の色など）を再現するために VR を採用した点が、本研究の最大の特徴である。VR とは、現物・実物ではないが、機能としての本質は同じであるような環境を、ユーザーの五感を含む感覚を刺激することにより理工学的に作り出す技術およびその体系^[5]であり、教育、娯楽、医療、航空宇宙、その他の分野で幅広く利用されている。VR では、現実の世界では不可能または操作困難なことを実現する事ができるため、本研究に応用した場合、さまざまな実験室を VR 空間上に再現し、設備や実験室の全体的な大きさ、色、位置の変更、照明の調整や、火災や煙の発生といった事故やトラブル発生のシミュレートといった、現実空間では容易に実現できない事象を再現することが可能となる。また、被験者の視線情報を取得するために、VR 空間上でのアイトラッキング技術を組み合わせている点も、本研究の大きな特徴である。

第二章 検討項目

2.1 実験室環境

実験室は安全方面に関するルールが厳しくなっているが、実験室設計に関する明確なルールは規定されていない。実験室建設のデザイナーや初期ユーザーの考え方は、そのまま研究室のデザインを決定することになる。しかし、その後の研究室の使用感は、使用者の変更や実験設備の入れ替えなどのことで、あまり良いとは言えない状況が多いと思われる。研究の準備段階では、他の分野の研究室の状況を把握するために、生物学、物理学、化学分野などの研究室を訪問した。この間、同じ専門分野の研究室でも、設備や実験室のレイアウトが大きく異なることがある。そして、各専攻によって、実験室の条件に求められるものは異なっている。例えば、生物学の研究室では、植物や昆虫を育てるために光や湿度、温度などを厳しく管理しているが、物理学や化学の研究室では、厳しい条件を必要されていない。実験室が狭い、使っていない機器が置いてある、電源ケーブルが整理されにくいなど、各実験室で使用者が改善したい点は異なっている。実験室の環境は、実験者に影響を与え、間接的に実験室の安全性や効率にまで影響を与える可能性がある。

そこで本研究では、実験室の環境と利用者の関連性、具体的には実験室の通路の狭さ、明るさ、物の色と視点分布との関連性を把握することに焦点を当てた。

2.1.1 通路幅と視点分布

多くの実験者は、自分が使う実験室の通路が狭いという印象を持っているだろう。

化学に限らず、物理や生物など、大学や大学院の研究室を数多く訪問していると、実験の内容や設備は違っても、通路が狭いという感覚は一致している。その理由としては、実験室の面積が小さいこと、多くの人が同時に使うこと、物の配置が悪いことなどが挙げられる。通路の幅が狭いと、作業効率や安全性の低下などの問題が生じると考えられる。

本研究では、検討項目 1：実験室の通路幅の違いが使用者の視点分布特性にどのような影響を与えるかを検討した。実験室の通路の幅を変えたときに、どの物が実験室ユーザーにとって見やすいかを検討した。

2.1.2 照明条件と視点分布

照明条件は実験室ごとにほぼ統一されている（特殊な照明条件を必要とする実験を除く）。実験中、実験室内のほとんどの照明が点灯するが、実験室の清掃時や忘れ物を取る時には、一部の実験室照明しか点灯しない場合がある。

検討項目 2：実験室の明るさの違いが視点分布の特徴に与える影響について検討した。

2.1.3 実験室の物の色の変更

色の識別性、視認性、誘目性といった特性は安全標識、サインや誤認防止といった安全を守ることに活用されていることや、色自体も人の心理への影響を与えるという報告^[17]がある。従って、実験室における色の誘導性の適切な使用は、実験室の安全性向上に貢献する可能性があると考えられる。例えば、化学薬品瓶のフタを閉めることを忘れると、安全上の問題となる場合がある。この問題に応じて フタの内側の色を鮮やかに変えることで人の注意を引き、フタの閉め忘れの確率を下げる事が可能になると考えられる。また、実験室の隅の床上に物（台車や廃液タンクなど）を置いていて気がつかなかった場合、実験者が転倒を引き起こす危険がある。物の色を変えて注意を引くことで、そのような事故の可能性を減らすことができると考えられる。

検討項目 3：実験室内の物体の色が被験者の注意にどのような影響を与えるかを検討した。

2.2 実験室ユーザー

大学実験室の利用者は、初学者である学生、経験を積み重ねた博士課程の学生、スタッフ、教員などであり、経験はもちろんのこと、安全に対する認識や知識にも利用者間で差があることは言うまでもない。人は情報を収集するために五感を活用しており、その中でも視覚からの情報は約 80%を占めると言われているほどに重要な要素である^[2]。実験室においても同様であると考えられ、人の身分や経験、立場などの違いに基づいた、同じ条件の実験室に対する注視点の解析結果から、実験室内の人の視線をコントロールする可能性が拓け、創造性や活動性を損なわずに安全に実験を行うための実験室設計、安全教育・管理に関する基礎的知見が得られることが期待される。

検討項目 4：実験室ユーザーの身分（経験豊富な学生や安全巡視者）の違いによって、同じ実験室でそれぞれの視線分布の特徴を検討する。

第三章 実験方法

3.1 実験概要

実験者の視点分布と実験室環境や物の色の関係性に着目した実験である。各実験室条件（道の広さ、明るさ、物の色）において、学生と安全巡視者に視線追跡機能がある VR ゴグルを装着してもらった上で、VR 実験室内で歩行してもらう被験者実験を行った。その注視行動を記録し解析することにより、実験者が注視によってどのように身の回りの環境の情報を獲得しながら歩行し、それらにはどのような特徴があるのか、環境と注視行動との関係性について分析した。

3.2 被験者実験

3.2.1 実験装置

VR 機器：HTC 会社 VIVO Pro Eye シリーズ製品（ゴーグル 1 個、ハンドル 2 本、データベース 2 個）。（図 3.1）

この設備の特徴は：1.高精度なアイトラッキング機能付き、現実世界のようなインタラクションを VR で両眼の動きと瞬きを VR 空間のアバターに反映する。2.中心窩レンダリング機能は GPU 負荷が最適に割り当てを可能となり、ユーザー視線に基づいてグラフィック解像度を最適化し、GPU のレンダリング負荷を軽減することで、より自然に見える映像にレンダリングすることでパフォーマンスを向上させる。3.快適性とバランスを調整すること。着脱しやすいように、簡単に調節できるように、そして長く使用できるように細部までこだわって設計されている。頭の大きさを問わずフィットする。調整可能なレンズで目の疲れを最小限に抑える。ほぼすべての目のタイプに対応し、メガネを付けたままでも使用可能である。（詳しくは、機器の HP を記載すること。）



図 3.1 HTC 製 VIVO Pro Eye シリーズ製品

3.2.2 実験場所

実験は、東京大学大学院 柏キャンパス 環境棟 4 階 談話室 (図. 3-2)で行った。



図 3.2 談話室

準備作業；十分な移動スペースを確保し、床から 1.8m 以上離れた対角線上に 2 台のデータベース（被験者の位置を検出するための物）を置き、水平に 15 度下向きに回転させて設置した。



図 3.3 データベース

パソコンは仮想実験室の実験台の位置に相当する活動エリアの中心に置くことで、被験者の動きを妨げないようにしていた。そして、コンピュータと電源をつなぐ配線は、実際の配線が実験者の動きを妨げないように、仮想実験室内の配線と重なっていた。

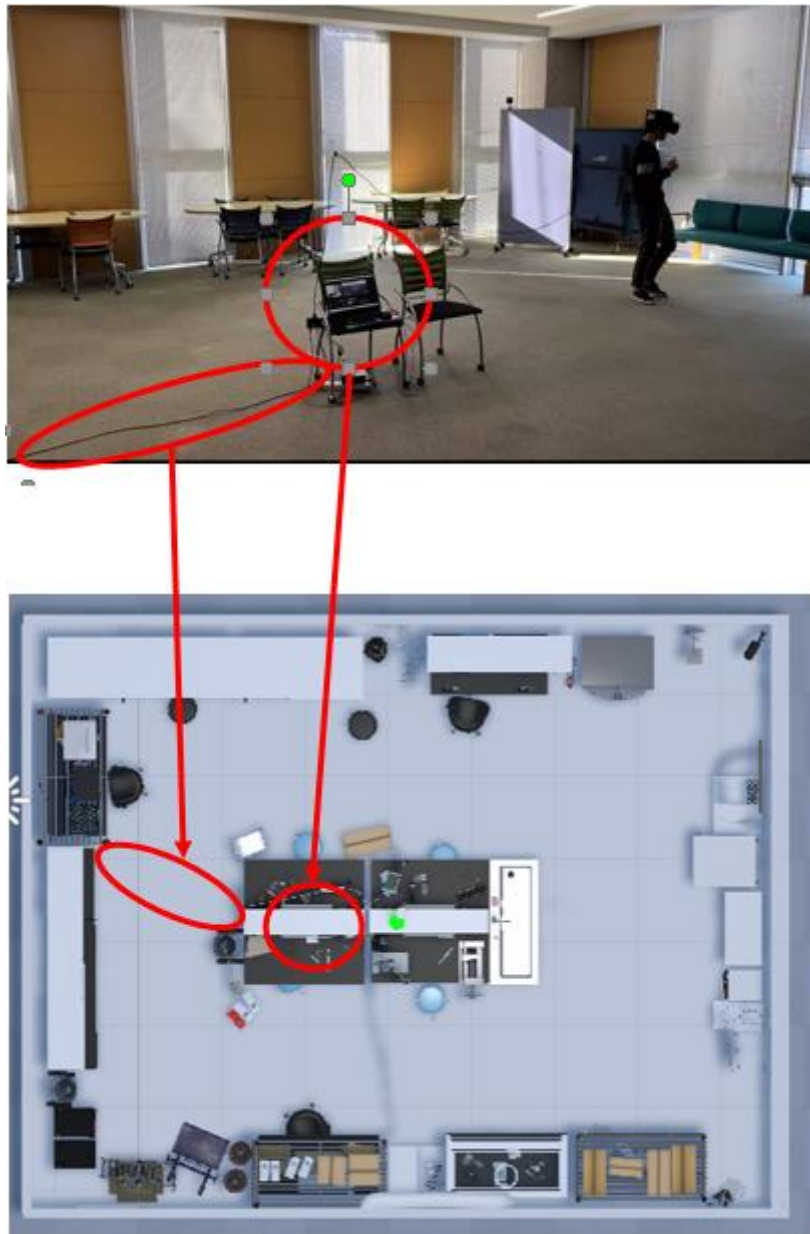


図 3.4 パソコンとケーブルの位置

VR ゴーグルのケーブル問題：実験の準備段階で、被験者は VR メガネを装着し、仮想空間内で活動を行った。被験者のフィードバックとして、VR メガネのデータケーブルは、振り向いたり歩いたりするときに被験者に不便を強いる（図 3.5）ことになり、実験結果に影響を与える可能性があるとのことだった。また、データケーブル自体の長さが短く、仮想ラボの遠くの隅々まで届かない場合（図 3.6）があった。



図 3.5 ケーブルの長さが足りない



図 3.6 ケーブルは歩行に邪魔

この問題に対処するために VR ケーブル管理セット（図 3.7）を採用した。

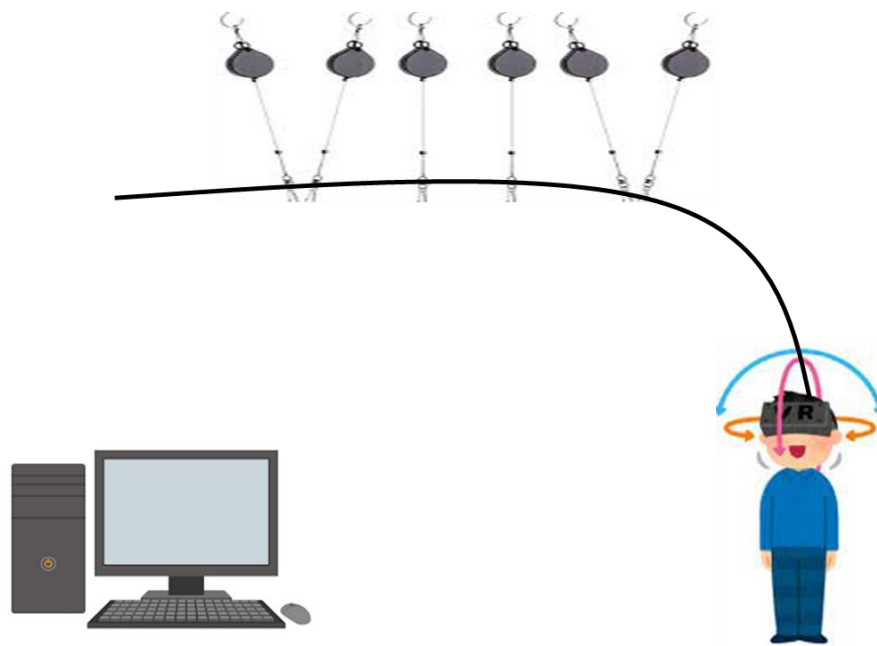


図 3.7 VR ケーブル管理セット

VR ケーブル管理セットには伸び縮みの仕組みを採用しており、それを天井に設置し、VR ゴーグルのケーブルを上配置することで、被験者の歩行の制約を最大限に抑制して、バーチャル空間の体験を向上させた。また、コード調整可能長さも 1.8m であるため、仮想実験室の隅から隅まで歩くことが可能な長さにする事ができた（図 3.8）。



図 3.8 実験現場のケーブル管理セット

3.2.3 被験者

被験者は、東京大学大学院新領域創成科学研究科の学生 11 名(B4 ; 2, M1; 1, M2; 5, D1; 2, D2; 1 名、全部化学系実験経験あり)、安全管理者 3 名 (特任専門職員 ; 1、助教 ; 1、准教授 ; 1 名、) である。被験者のうち 2 名がメガネを掛けており、1 名がコンタクトレンズを着用していた。

3.2.4 VR 実験室の作成

本研究では、バーチャルラボの設計・製作がより重要である。Blender を使用して作成した 3D 実験室を Unity にインポートし、VR 実験室の準備を完了した。Blender は 3DCG アニメーションを作成するための統合環境アプリケーションである。Unity は、Unity Technologies が開発・販売している、IDE を内蔵するゲームエンジンで、作成した 3D モデルの部屋を、VR システムの部屋に変換することが可能である。

実験室をデザイン→被験者が体験→フィードバック→修正というサイクルを何度か繰り返した結果、以下のような実験デザインにした。

バーチャルラボを現実中のラボに近づけるために、バーチャルラボの配色はすべて実際のラボに存在する配色を使用している。また、バーチャルラボの実験室用具 (実験台、ヒュームフードなど) モデルは、ほとんどが市販のものである (大部分のモデルは株式会社オカムラから直接提供された)。そして、部屋にあるすべての物体は、現実と同じ寸法にモデリングした。

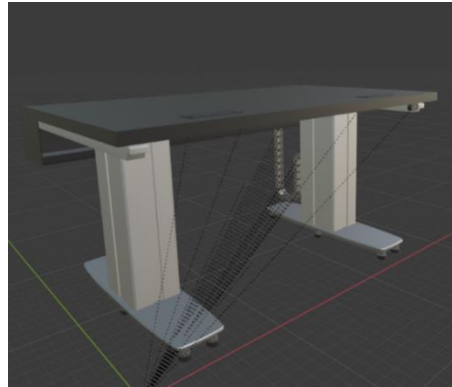


図 3.9 株式会社オカムラから提供されたモデル（実験台）

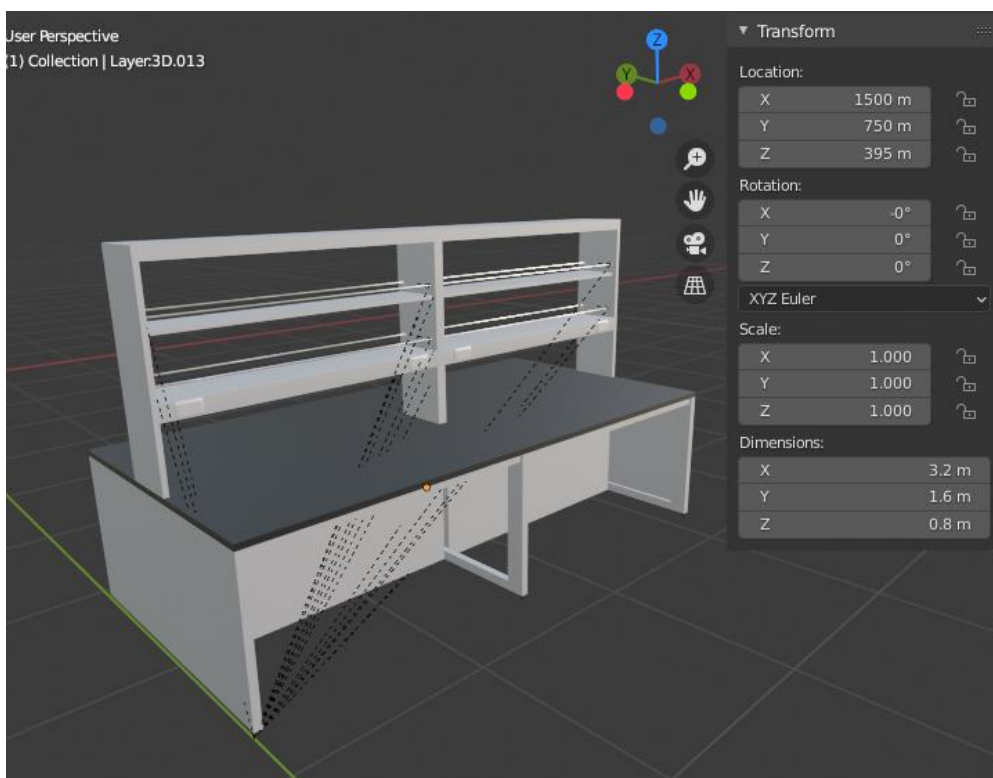


図 3.10 実寸スケールのモデル（実験台）

「標準ラボ」「狭いラボ」「色彩ラボ」「照明ラボ」「安全ラボ」の計 5 つの実験室がある。

標準ラボ（ラボ 1）：使用されている化学実験室で、大きさは 9.0×7.0×2.7 m（長さ×幅×高さ）である。実験台、冷蔵庫、遠心機、流し台、薬品瓶、廃液タンク、ヒュームフード、椅子、顕微鏡、実験装置、安全標識、ポンペ、雑貨などのセットアップをした（図 3.11）。



図 3.11 違う角度の標準ラボ（ラボ1）

狭いラボ（ラボ2）：大きさは7.5 × 5 × 2.7 m（長さ×幅×高さ）で、標準ラボより縦横の長さが短くなり、高さ、物の数や大きさも変わらない。一方で、実験室の通路幅は狭くなった（図3.12、図3.13）。



図 3.12 狭いラボ（ラボ2）



図 3.12 ラボ1とラボ2 通路幅の比較

色彩ラボ（ラボ3）：試薬瓶の蓋と台車、2つの物体を変更した（図3.13）。フタと台車を選んだ理由は、フタを閉めないで試薬瓶を開けたまま、実験者は有機溶媒等の蒸気を吸引する危険性があるため、今回は蓋の内側を鮮やかな赤色に変更し、その誘目性について検討した。コーナーに台車が置いてあると、気づきにくく、衝突の危険がある。本研究では、台車の一部を赤色に変更することで、注意力を高め、衝突の可能性を低減させることを試みした。

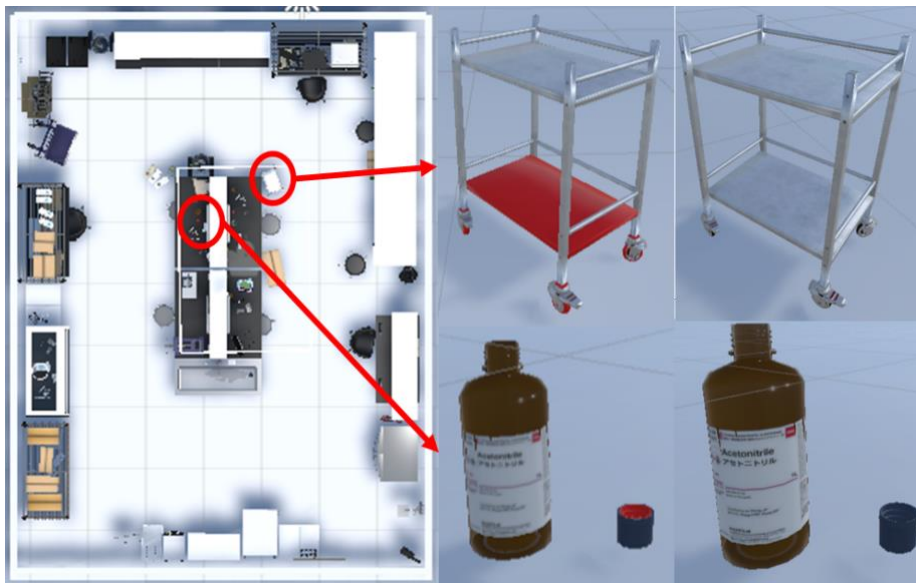


図 3.13 フタと台車色の変更



図 3.14 フタがラボ 3 にある様子



図 3.15 台車がラボ 3 にある様子

照明ラボ（ラボ4）：ラボ1の半分の面積の照明を消した（図3.16）。



図3.16 ラボ4

安全ラボ（ラボ5）：この実験室は、ユーザー（学生、保安検査員）の異なる身分による視点分布の特徴を調べるために作った（図3.17）。定期安全チェック表をもとに、標準ラボ内に、実験室にあえて危険な箇所を11個作った（落下防止処置がされていない箱；固定されていないボンベ；落下する可能性のある万力；通路上のケーブル1；通路上のケーブル2；ヒュームフード：蓋のない薬品瓶；ヒュームフード：蓋のない注射器；ロックされていない薬品棚；畳まれていない脚立；実験台上の私物（カバン）；床上の水漏れ）。

また、試作のバーチャルラボを体験した産業医が、「実際のラボにもっと物があるべき、もっと散らかっているべき」と助言したので、安全ラボに薬品と雑貨を追加した。



図 3.17 ラボ5



図 3.18 水漏れ

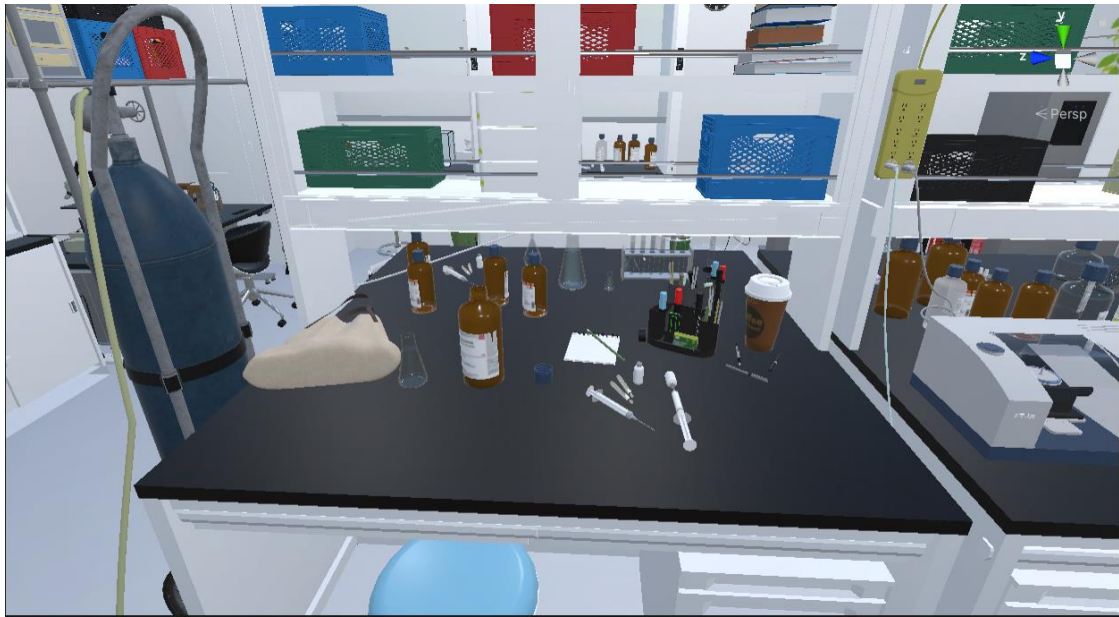


図 3.19 注射器の針



図 3.20 固定していないボンベ



図 3.20 床上のケーブル



図 3.21 ヒュームフード中の注射器

3.2.5 実験手順

1、視線追跡機能を持つ VR メガネを装着してもらい、キャリブレーションしてから仮想空間に入り、VR 設備と実験環境に慣れるため、1 分間自由に歩いた。

2、安全ラボ（ラボ 5）に入り、被験者を「安全の角度；この実験室で実験室の安全上、違反があるかを観察する；実験者が怪我をしないようにする」の観点で立たせる。スタート地点から時計回りに歩き、スタート地点に戻るといふ被験者の行動路線を決めた。（観察の視点は、大学産業医が自身の作業内容を要約した話がベースとなる。）

3、Step 3：ラボ 1～4 の順で、被験者は見学者の立場で、VR 実験室内を歩いた。

（step2 と step3 の実施中に、実験者の視点データを記録する。詳細は次章で説明する。）

第四章 実験データ

4.1 データの獲得方法

今回使用した VR デバイスは HTC VIVO pro eye シリーズで、それ自体にアイトラッキング機能が搭載されており、両目で見た点がより明確になり、ゲームなどがよりスムーズに動くという、画像表示の処理を良くするために使用されている。被験者の注視点情報はテキストとして出力されないため、注視点座標を取得するためには、C#言語で関連プログラムを記述する必要がある（図 4.1）。

視線知能の C#プログラムの開発に関して、本研究では Git Hub の内容を参考した。

(<https://github.com/ume-study/ViveProEye>)

C#プログラムの内容の一部は以下に示している。

```
9     namespace anipal
10    {
11        namespace Eye
12        {
13
14            public class Practice : MonoBehaviour
15            {
16                Vector3 GazeOriginCombinedLocalC, GazeDirectionCombinedLocalC;
17                Ray ray;
18                FocusInfo focusinfo;
19
20                // Use this for initialization
21                void Start()
22                {
23
24                }
25
26                // Update is called once per frame
27                void Update()
28                {
29
30                    SRanipal_Eye.GetGazeRay(GazeIndex.COMBINE, out GazeOriginCombinedLocalC, out GazeDirectionCombin
31
32                    Vector3 GazeDirectionCombinedC = Camera.main.transform.TransformDirection(GazeDirectionCombinedL
33                    RaycastHit hit;
34                    Physics.Raycast(Camera.main.transform.position+GazeOriginCombinedLocalC, GazeDirectionCombinedC*
35
36                    SRanipal_Eye.Focus(GazeIndex.COMBINE, out ray, out focusinfo);
37
38
39                    if (Input.GetKeyDown(KeyCode.S))
40                    {
41                        Debug.Log(GazeOriginCombinedLocalC);
42                        Debug.Log(GazeDirectionCombinedC);
43                        Debug.Log(Camera.main.transform.position);
44                        Debug.Log(Camera.main.transform.rotation * Vector3.forward);
45
46                        Debug.Log(focusinfo.point);
47                        Debug.Log(hit.point);
48                    }
49                }
50            }
51        }
52    }
```

図 4.1 C#プログラム

この C#プログラムは、VIVO pro eye のアイトラッキング開発者ソフトウェアと連携して、VR ゴーグル装着者の目の動きに関する情報を取得することができる。VIVE Pro Eye の計測はレンズの真ん中上部とレンズ周りにある近赤外線センサ（図 4.2）を使って計測される。



図 4.2 赤外線センサ

各座標は 2 つのレンズの中心にある System Origin を基にして決まる。

プログラムの基本原理は、VR メガネに取り付けたアイトラッキング装置で目の動きをとらえ、視線を見えない線に変換するというもの。装着者が仮想区間の物体を見ると、視線と物体が一致し、その一致した点を C#プログラムが「衝突」と判断し、衝突点の座標が記録されることになる。ここで重要なのは、Unity の定義するワールド座標系は左手座標系を使用しているが、プログラムでは X 軸が右から左へ走る右手座標系を定義している。視点の座標のほか、瞳孔の位置、まばたきの開く程度、瞳孔の直径などのデータも取得でき、心理学や人間科学などの分野にも応用できると考えられる。

視点データ（図 4.3）は、最初は Unity ソフトウェアのコンソールにしか表示されない
ので、視点座標と時間データを csv ファイルに保存するために、2 つ目の C#プログラムを
書く必要がある。最後に csv ファイルを Excel 形式（図 4.4）に変換する。

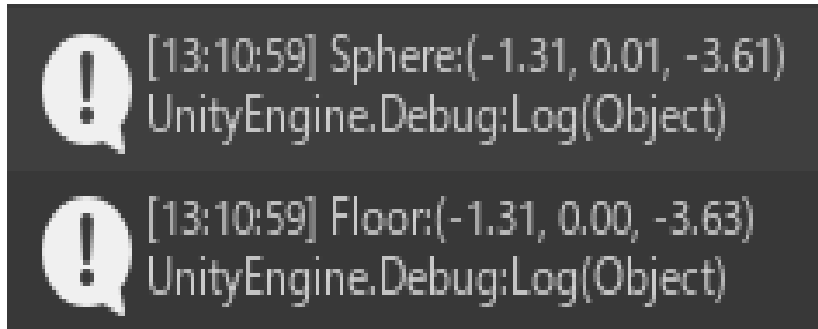


図 4.3 視点データ

	A	B	C	D
1	x	y	z	time
2	-1.31256	0.01564	-3.61584	0.353333
3	-1.31658	0	-3.6354	0.452209

図 4.4 Excel シート

4.2 データの可視化

視点座標が得られたら、実験者が見ている仮想実験室内のアイテムをより視覚的に理解するために、データをより直感的な 3 次元空間散布図 (図 4.6) に変換する必要があった。Excel シートに保存した (x、y、z) 座標をソフトウェア”rinearn graph 3D (引用)” (図 4.5) に入力した。rinearn graph 3D は、表計算ソフトや数値計算プログラムなどで作成されたファイルから 3 次元グラフを作成できる 3D グラフソフトである。

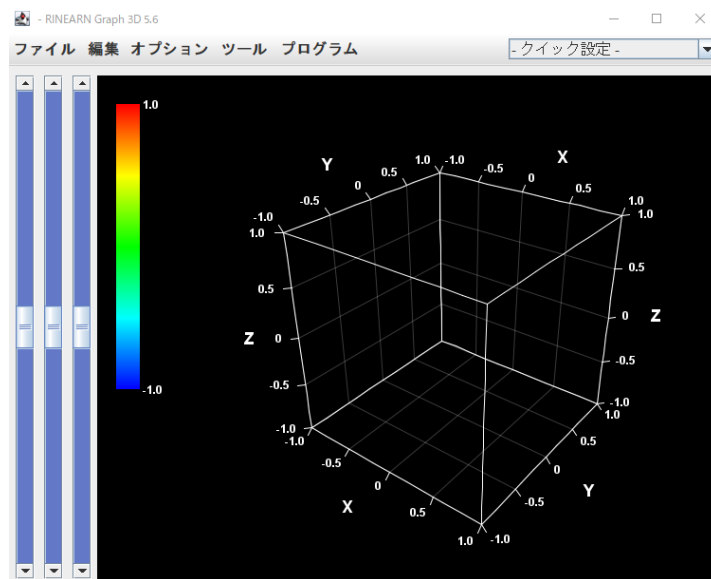


図 4.5 rinearn graph 3D

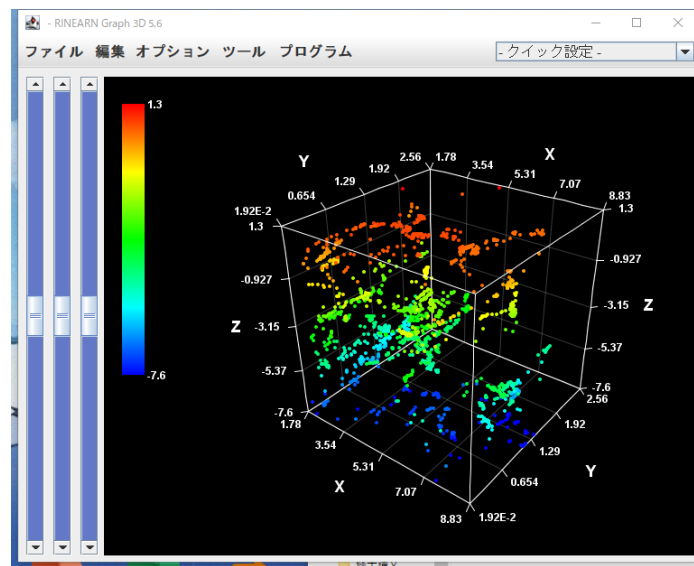


図 4.6 三次元空間散布図

視点グラフの色の設定について：ソフトウェア rinearn graph 3D では、1.8m 以上の点を赤、0.8m 以下の点を紺、0.8～1.8m の間で紺から赤に徐々に変化するように設定されている。視点の高さが高いほど、3D 散布図中に対応する点は暖色に近い（図 4.7）。

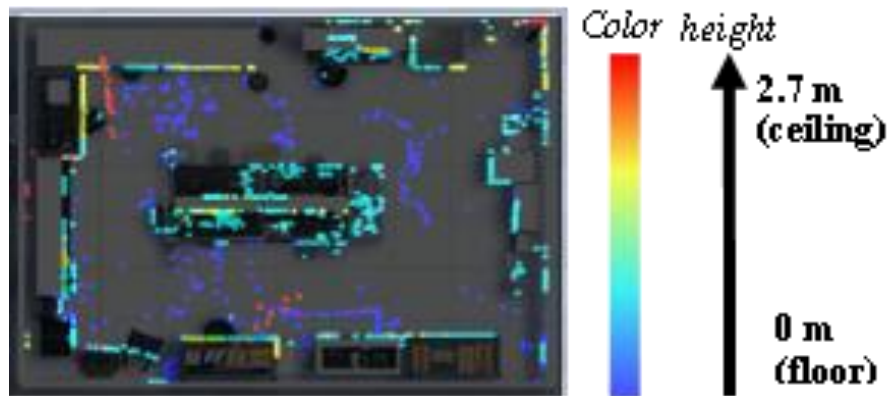


図 4.7 3D 散布図の視点色意味

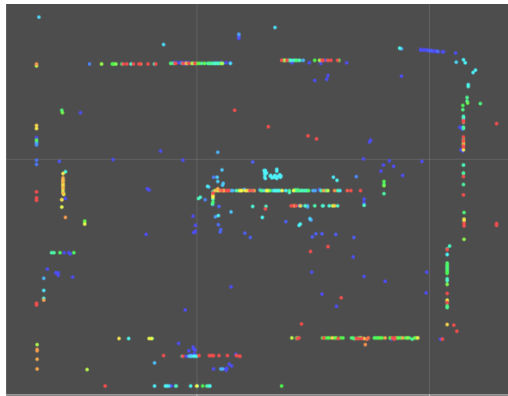
3D 視点散布図が得られたら、そのトップビューを取得する。トップビューの透明度を70%に調整し、バーチャルラボのトップビューと重ね合わせる。この方法により、実験室の観察中に被験者が何を見ていたかがわかり、視点数や集計の度合いによって注視時間や関心領域を特定することができる。



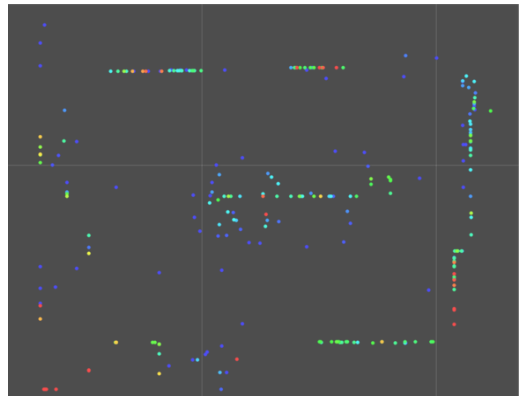
被験者 2号



被験者 3号



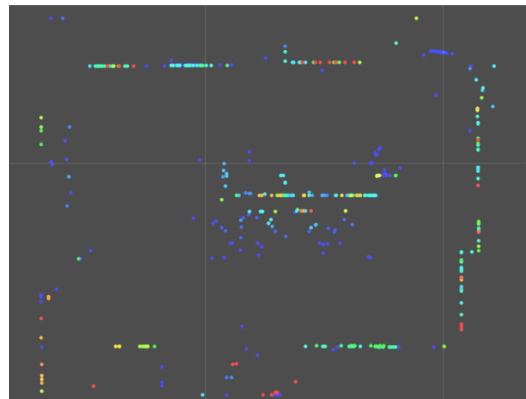
被験者 4号



被験者 5号



被験者 6号

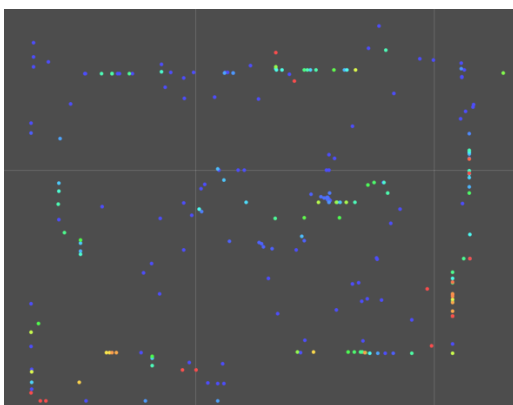


被験者 7号

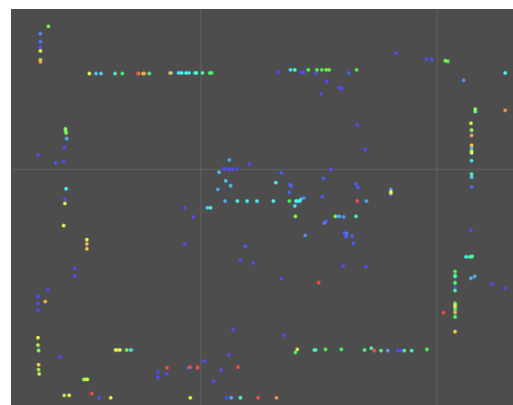


被験者 14 号

色彩ラボ



被験者 1 号



被験者 2 号



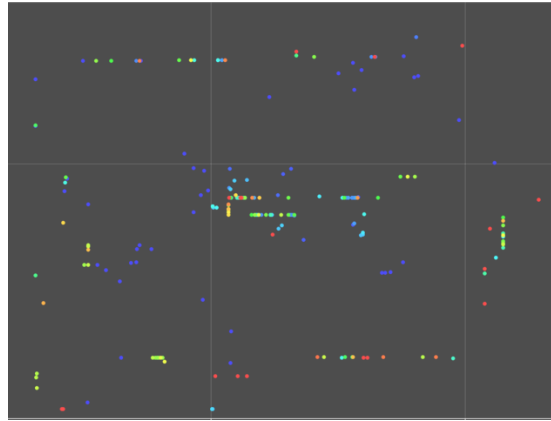
被験者 3 号



被験者 4 号



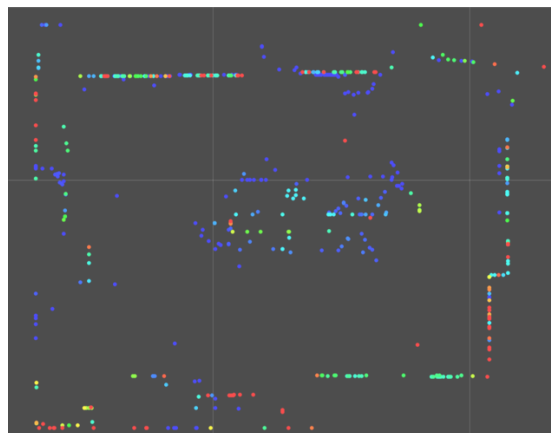
被験者 5 号



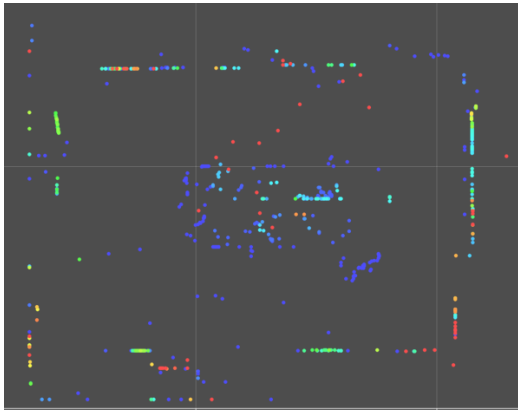
被験者 6 号



被験者 7 号



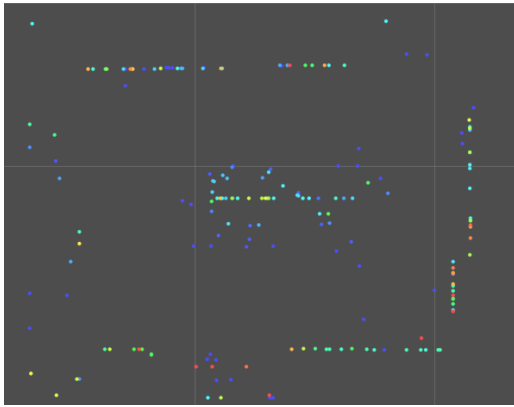
被験者 8 号



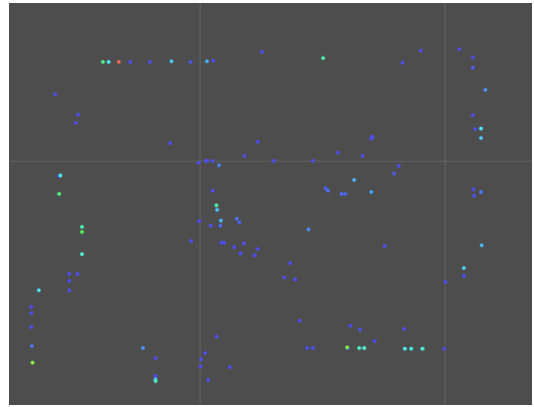
被験者 9 号



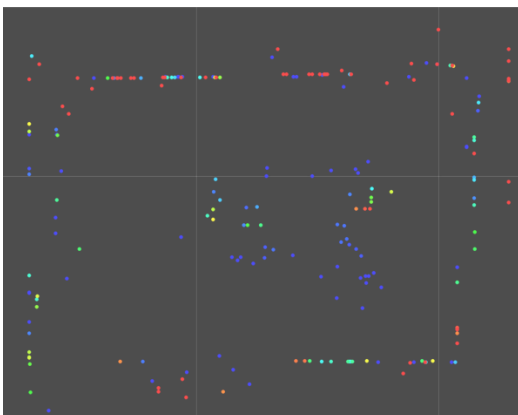
被験者 10 号



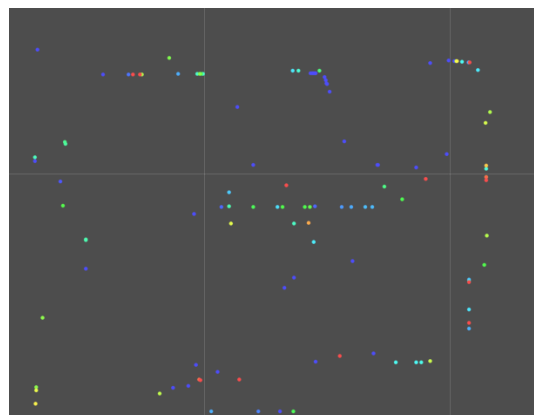
被験者 11 号



被験者 12 号



被験者 13 号

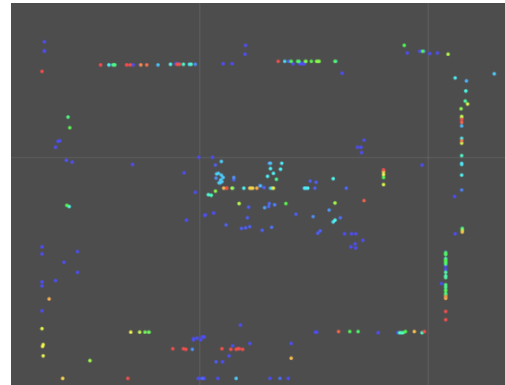


被験者 14 号

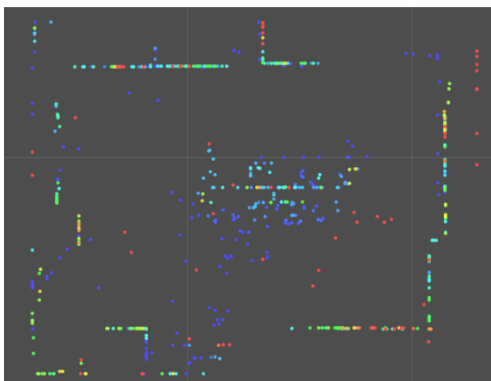
照明ラボ



被験者 1 号



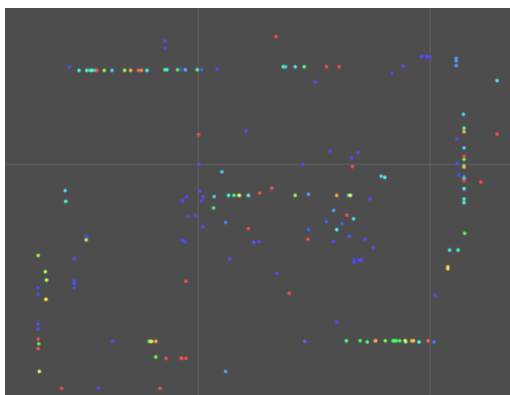
被験者 2 号



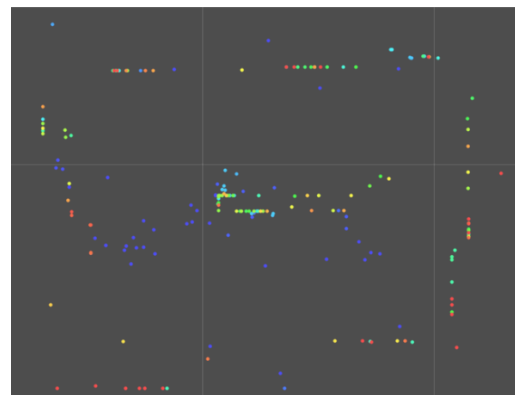
被験者 3 号



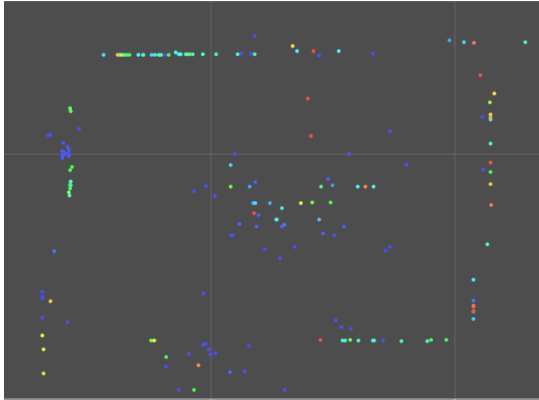
被験者 4 号



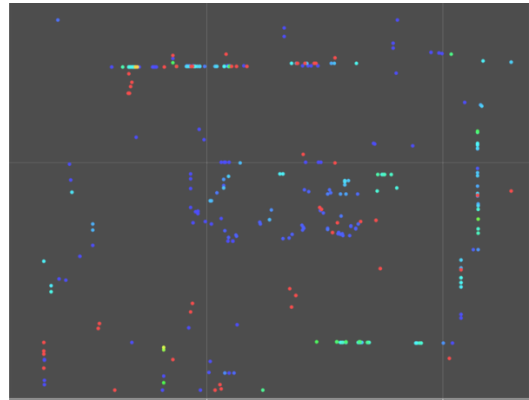
被験者 5 号



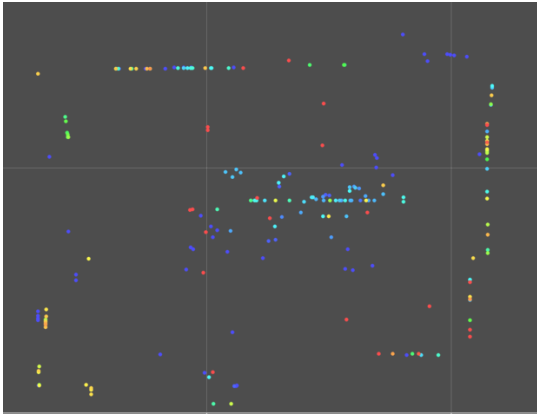
被験者 6 号



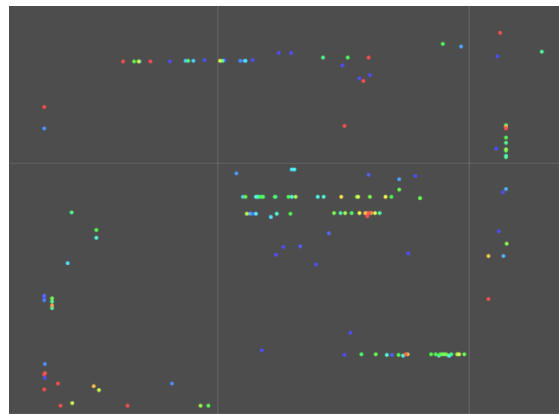
被験者 7 号



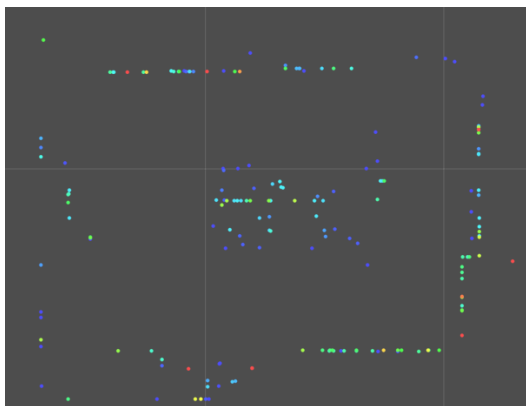
被験者 8 号



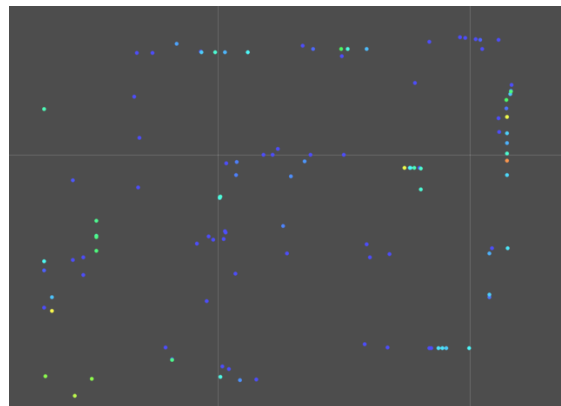
被験者 9 号



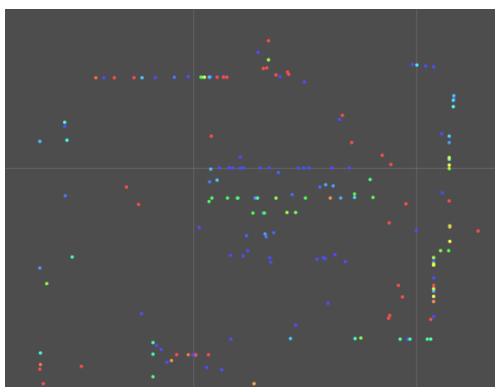
被験者 10 号



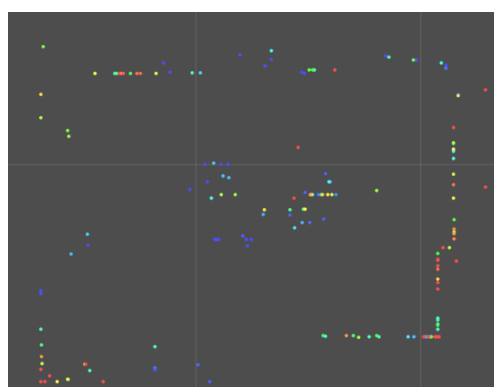
被験者 11 号



被験者 12 号



被験者 13号



被験者 14号

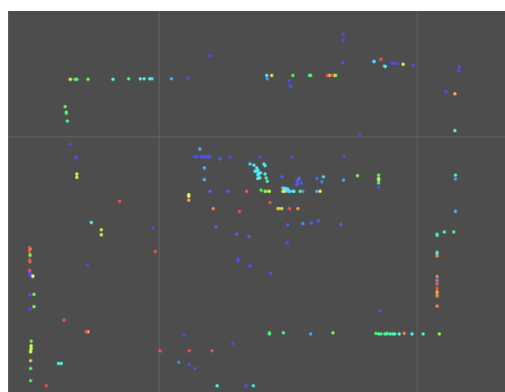
狭いラボ



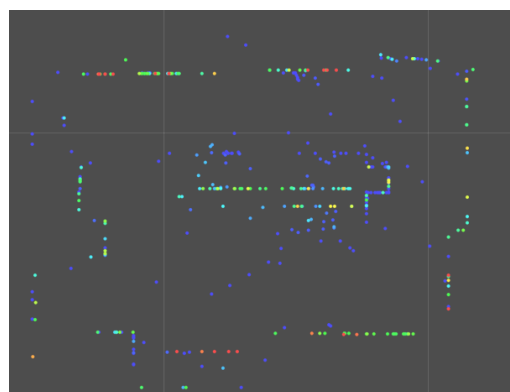
被験者 1号



被験者 2号



被験者 3号



被験者 4号



被験者 5 号



被験者 6 号



被験者 7 号



被験者 8 号



被験者 9 号



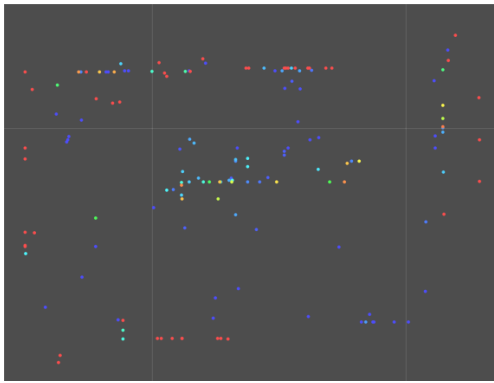
被験者 10 号



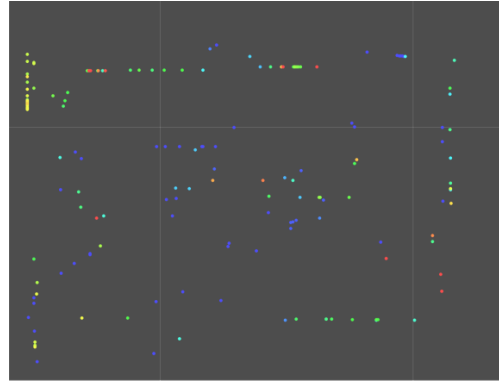
被験者 11 号



被験者 12 号

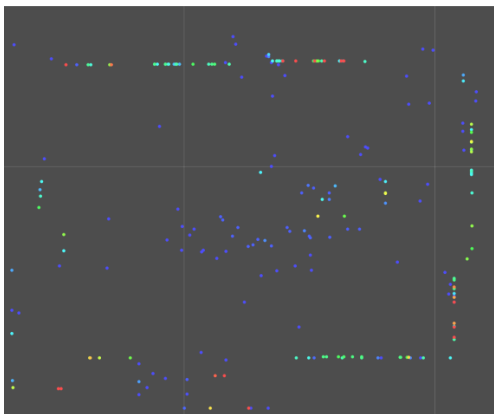


被験者 13 号



被験者 14 号

安全ラボ



被験者 1 号



被験者 2 号



被験者 3号



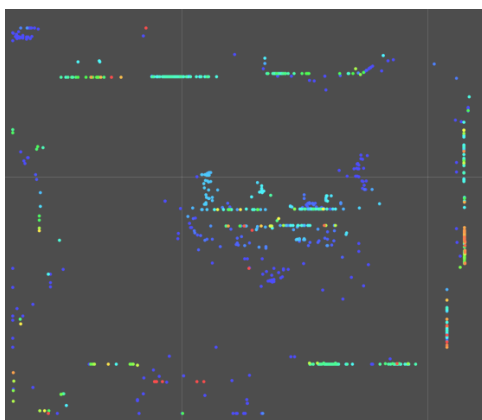
被験者 4号



被験者 5号



被験者 6号



被験者 7号



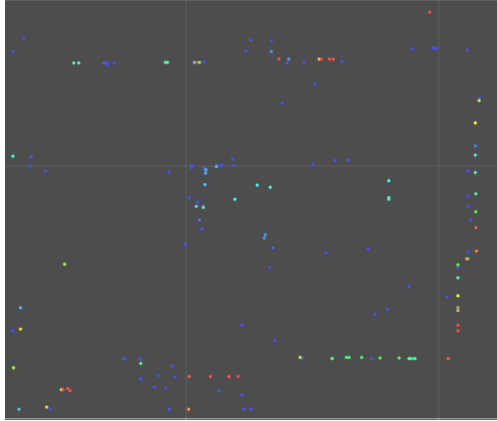
被験者 8号



被験者 9 号



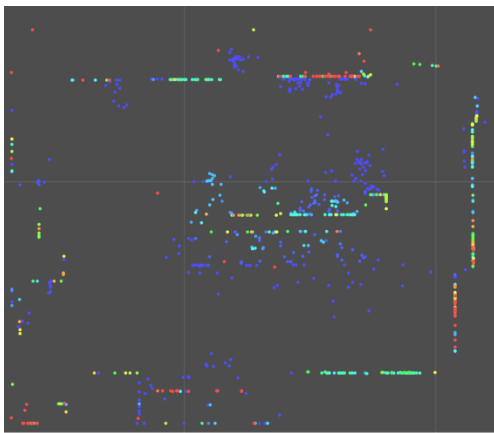
被験者 10 号



被験者 11 号



被験者 12 号



被験者 13 号



被験者 14 号

第五章 結果と考察

5.1 実験室環境の考察

5.1.1 実験室内通路の広さと視線分布の検討

通路幅が注視行動に与える影響を検討するための、ラボ 1（標準ラボ）とラボ 2（狭ラボ）の視点分布を比較した。

実験室での通路の広さが注視行動に与える影響について調べた。

通路幅が異なるラボ 1 とラボ 2 の結果を解析した。その際、被験者の視線の高さを上：実験台棚から天井まで（1.8～2.7m）中：実験台から実験台棚まで（0.8～1.8m）下：床から実験台まで（0～0.8m）として分類した（図 5.1）。被験者の歩行中の視線の高さの割合を図 5.2 に示した。



図 5.1 高さの割合

各被験者がラボ 1、ラボ 2、この 3 つの部分を見つめた時間の割合を別々に計算した（図 5.2）。

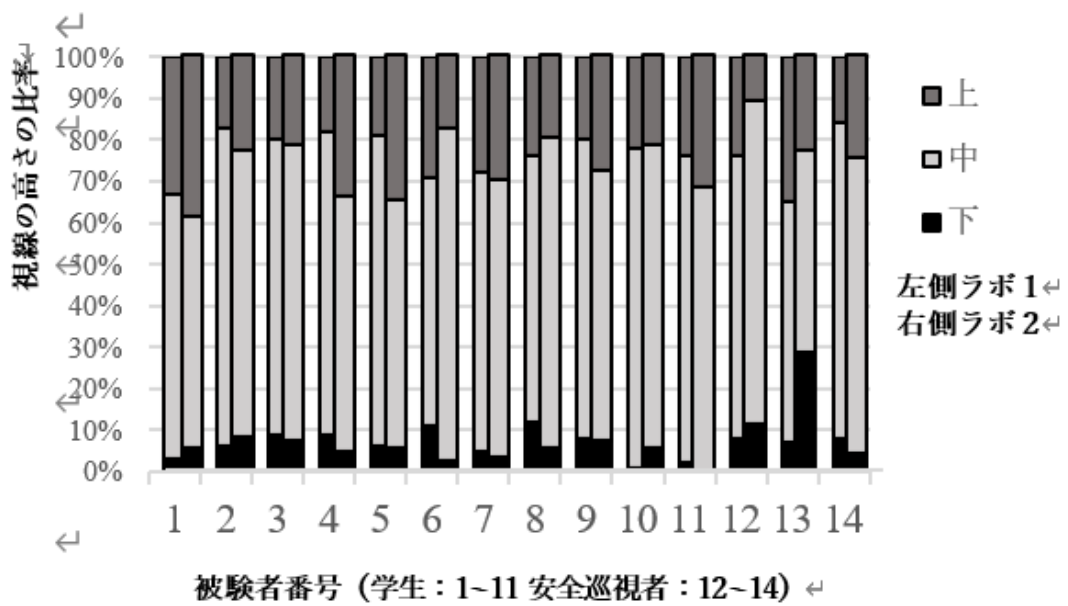


図 5.2 通路幅が視点の高さ分布に与える影響

表 5.1 ラボ 1 と比較した、ラボの 3 部分の視線分布率の人数変化 (学生)

人数	増加	一致	減少
上	7	1	3
中	2	2	7
下	3	0	8

表 5.2 ラボ 1 と比較した、ラボ 2 の 3 部分の視線分布率の人数変化 (安全管理者)

人数	増加	一致	減少
High	1	0	2
Middle	1	0	2
Low	2	0	1

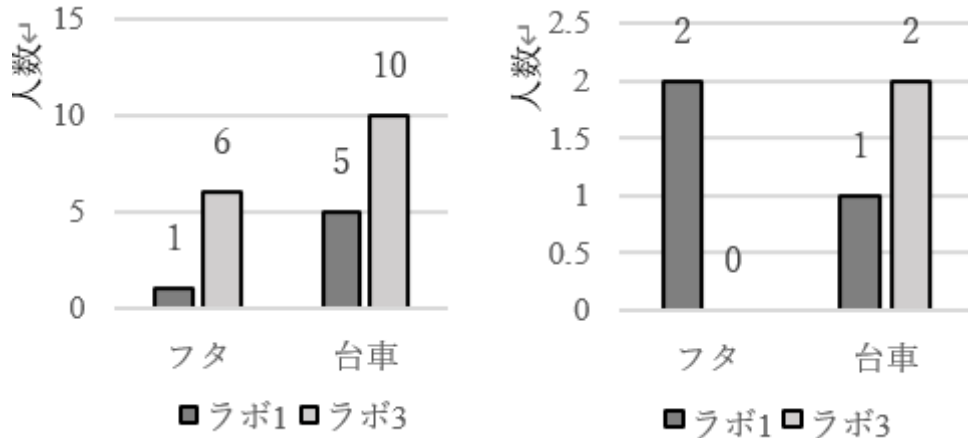
結果：表 5.1 によると、被験者が学生の場合、通路を狭くすると、実験室の高い区間に目を向ける人が多く、低いところに目を向ける人が少なくなることが分かった。通路幅が狭くなると、視点の分布が高いところに移動し可能性が見られた。一方で、表 5.2 によると、安全検査官にはその傾向が見られなかった。したがって、通路幅と視点分布の関係を調べる時、被験者の身分を考慮する必要がある。

展開：実験室の通路に廃液タンクや実験器具、ゴミ箱が置いていることは、実験室ではよくある。通路が狭くなると、高いところにあるものに目が行きやすくなり、低いところのものが見えなくなり、衝突や転倒する可能性が増える。また、現段階の研究では通路を全体的に狭めた、通路の下部や上部だけが狭くなった場合は検討する必要がある。

5.1.2 実験室内物の色彩要素と視線分布の検討

ラボ1とラボ3の試薬瓶のフタと台車に気づいた人の数をカウントし、それぞれ注視された総時間を算出した。

学生：



安全管理者：

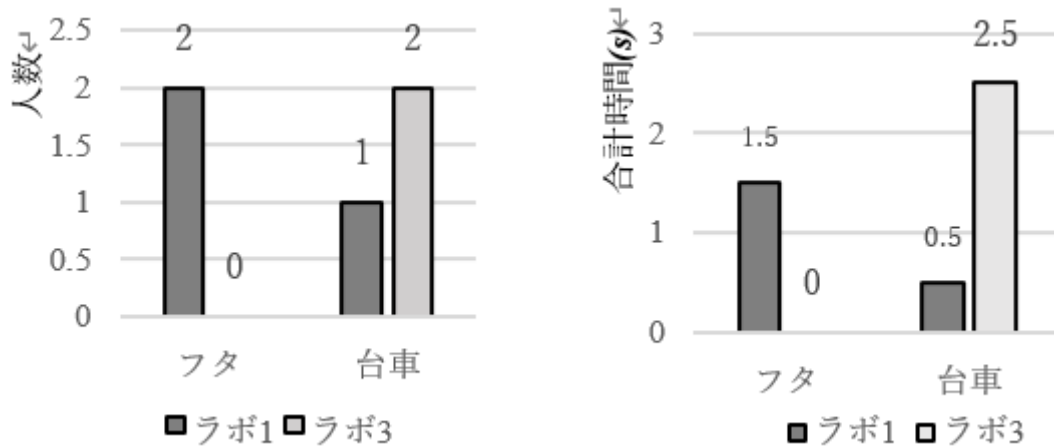


図 5.2 物体の色が注視動作に与える影響

結果：被験者が学生の場合、フタと台車の両方の色が赤に変わると、気づく人が増えた。

蓋は6人にしか気づかれなかったが、台車は10人に気づかれた。

対象物が小さい場合、その色は注目されるかどうかには少ない影響を与える可能性がある。

対象物が大きい場合、その色が注目されるかどうかにより大きく影響を与える可能性がある。

また、台車が通路にあるため被験者の移動の妨げになり、フタが実験台にあるため人の移動に影響しない。したがって、注目を集めることと位置にも関連性がある可能性がある。

5.1.3 実験室内の照明と視線分布の検討

ラボ4の明るさを落としたエリアに10個の物体を選び、ラボ1とラボ4で被験者がそれぞれの物体を見る時間の長さを記録した。ラボ4の暗いエリアで、設備1、ボンベ、設備2、顕微鏡、救急箱、戸棚1、戸棚2、戸棚3、ヒュームフード1、ヒュームフード2の10点を選び、10点のうち5点は明るい時に長く見ていた物、5点は暗室時に長く見ていた物。ラボ1とラボ4で被験者がそれぞれの物体を注視した時間を算出した。

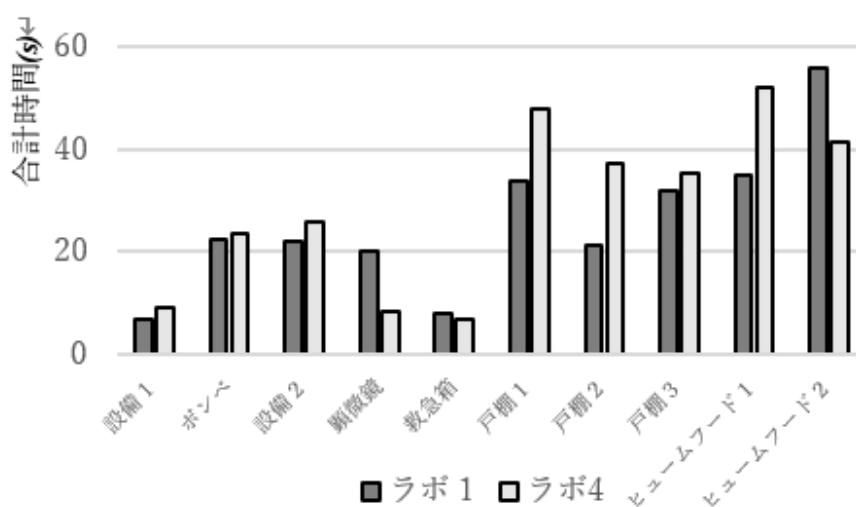


図 5.3 全学生が各物を見た時間の合計

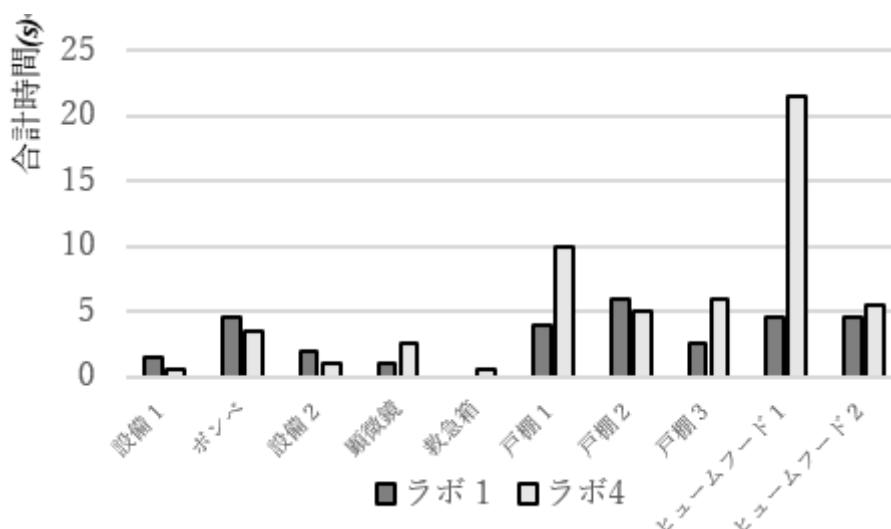


図 5.4 全安全管理者が各物を見た時間の合計



図 5.5 戸棚 1、2、3

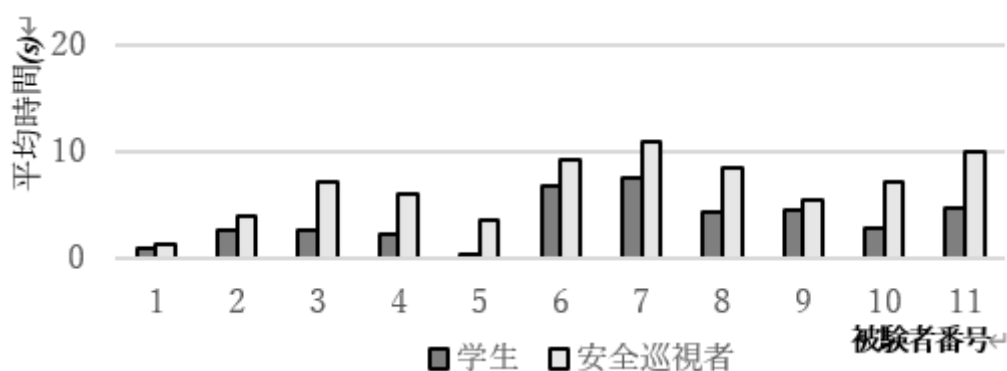


図 5.6 ヒュームフード 1、2

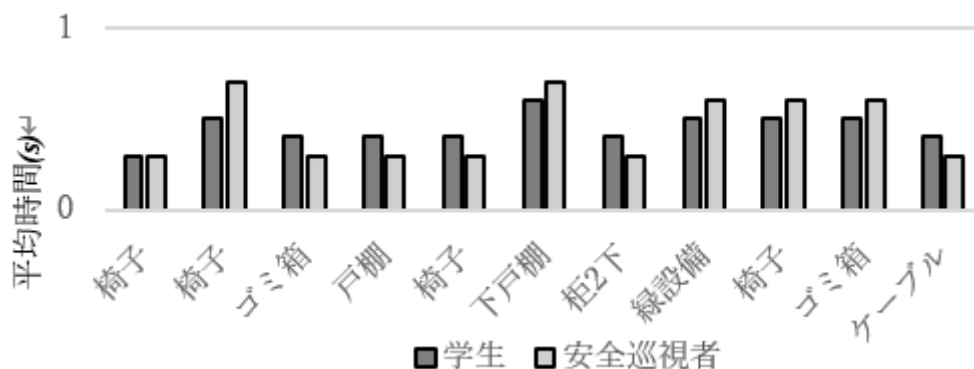
結果：図 5.3、5.4 によると、設備 1 や救急箱など、サイズが小さく、構成が単純な物体では、実験室の明るさの変化は、注視時間に与える影響は少ない可能性がある。収納機能を持つ戸棚やヒュームフード（ビーカーや試験管を収納した戸棚 1、薬品瓶を収納した戸棚 3、薬品瓶や注射器を置いたヒュームフード 1、2）など大きなものについては、実験室を暗くすると注視時間が長くなる可能性がある（図 5.5、5.6）。また、似たようなものが連続して現れると、注視時間が相対的に短くなる。

5.2 被験者の身分による注視行動の変化

被験者がラボ5のすべての物を見ていた時間を記録し、危険性のある物（床上的水漏れ、研究室内の私物、固定されていないガスボンベ、蓋が開いた試薬瓶など）を見ていた時間の長さを身分（学生、安全巡視者）によって比較した。また、ラボ5で学生と安全管理者が最も短時間で見た11個の対象物を確認した。



5.7 危険物を見ていた平均時間



5.8 最も注目度の低いものの平均注視時間

結果：図 5.7 安全管理者は、危険性のある物体を学生よりも長く見ており、最も短時間で見る事ができた物の種類は一貫しており、そのうち 6 つは同じ場所にある同じ物でした。図 5.8 安全管理者は、安全と関連する物体だけを長く見て、実験室内のすべての物体長く見ることはないと考えられる。

5.3 まとめと考察

本研究では、実験室という特殊な環境において、環境や利用者の身分が視点の分布に与える影響を調査した。

【通路の広さ】 実験室での通路の広さが注視行動に与える影響について調べた。

通路幅が異なるラボ1とラボ2の結果を解析した。その際、被験者の視線の高さを上：実験台棚から天井まで(1.8~2.7m) 中：実験台から実験台棚まで(0.8~1.8m) 下：床から実験台まで(0~0.8m)として分類した。被験者が学生の場合、進路が狭くなると、全体として視点の分布が上向きになる傾向があるが、安全管理者の場合、視点分布はこのような傾向を示されていない。

【物の色】 実験室での物の色が注視行動に与える影響について調べた。

ラボ1とラボ3の試薬瓶のフタと台車に気づいた人の数をカウントし、それぞれ注視された総時間を算出した。台車のような大きな物には、より鮮やかな色に変えることで、注目されやすい可能性がある。フタのような小さなものに関しては、色を変えるだけで注目を集めない可能性がある。

【明るさ】 実験室での明るさが注視行動に与える影響について調べた。

ラボ4の明るさを落としたエリアに10個の物体を選び、ラボ1とラボ4で被験者がそれぞれの物体を見る時間の長さを記録した。部屋の明るさを抑えた場合、小さな物体を注視する時間に与える影響が少ない可能性がある。戸棚やヒュームフードなど中に入っているものは見えにくくなるため、注視する時間が長くなると考えられる。

【身分】 学生と安全管理者が11個の危険性のある物(水漏れ、固定されていないポンペ、通路上ケーブルなど)を見る時間(s/人)を比較した。安全管理者は学生よりも危険なものに注視する時間が長い。学生と安全管理者が最も短い時間で見た11のものを確認した。最も注目度の低い物の種類は両者とも同じで、その半数は同じ物だった。安全管理者は、危険性のある物だけをより長時間見ている可能性がある。

第六章 結言

本研究では、VRとアイトラッキング技術を組み合わせ、実験室の環境（明るさ、大きさ、物の色）と実験室のユーザーの身分が注視行動に及ぼす影響を検討した。実験室の通路の幅は、異なる高さの物体の注目度に影響を与える。実験室の明るさの変化は、見えにくいものに注意を向ける度合いに影響する。また、物体の色が注目度に影響を与えるかどうかは、物体の大きさや位置によって異なる可能性が示された。実験室内ユーザーの身分は、見る物の種類によって注視時間に影響する可能性が示唆された。

このような実験室の条件に対する視線への影響を明らかにしていくことで、実験室の安全性向上のための具体策が提案できる可能性が期待される。

付録

視覚情報の解析において、視点の座標データを求めるプログラムを作成した。
作成したプログラムはこちらに記載する。

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using System.Runtime.InteropServices;
using System;
using UnityEngine;

namespace ViveSR
{
    namespace anipal
    {
        namespace Eye
        {

            public class UmeEye : MonoBehaviour

            {
                private static EyeData eyeData;
                private static VerboseData verboseData;
                private float pupilDiameterLeft, pupilDiameterRight,pupilDiameterCombined;
                private Vector2 pupilPositionLeft, pupilPositionRight,pupilPositionCombined;
                private float eyeOpenLeft, eyeOpenRight,eyeOpenCombined;
                private Vector3 gaze_direction_right,gaze_direction_left,gaze_direction_combined;
                private Vector3 gaze_origin_right,gaze_origin_left,gaze_origin_combined;
                private float convergence_distance;

                //
                private Ray ray;
                private FocusInfo focusInfo;
                public float radius=5.0f;
```

```

public float maxradius=5.0f;
private float LeftOpenness, RightOpenness;

private Vector3 origin;
private Vector3 direction;

public ParticleSystem hitRight;
public ParticleSystem hitLeft;

// Use this for initialization
void Start()
{

}

// Update is called once per frame
void Update()
{

    SRanipal_Eye.GetEyeData(ref eyeData);
    SRanipal_Eye.GetVerboseData(out verboseData);

    // 目の開き具合(0~1 で評価)
    eyeOpenLeft = eyeData.verbose_data.left.eye_openness;
    eyeOpenRight = eyeData.verbose_data.right.eye_openness;
    eyeOpenCombined = eyeData.verbose_data.combined.eye_data.eye_openness;

    // 視線の方向ベクトル(各変数-1~1)
    //右手座標系なので x が正負逆なのに注意

    gaze_direction_left = eyeData.verbose_data.left.gaze_direction_normalized;
    gaze_direction_right = eyeData.verbose_data.right.gaze_direction_normalized;
    gaze_direction_combined =

```

```

eyeData.verbose_data.combined.eye_data.gaze_direction_normalized;

    // 視線の始点座標(角膜の中心) SystemOrigin が(0,0,0)右手座標系
    gaze_origin_left = eyeData.verbose_data.left.gaze_origin_mm;
    gaze_origin_right = eyeData.verbose_data.right.gaze_origin_mm;
    gaze_origin_combined
eyeData.verbose_data.combined.eye_data.gaze_origin_mm;

    // 瞳孔径 (直径)
    pupilDiameterLeft = eyeData.verbose_data.left.pupil_diameter_mm;
    pupilDiameterRight = eyeData.verbose_data.right.pupil_diameter_mm;
    pupilDiameterCombined
eyeData.verbose_data.combined.eye_data.pupil_diameter_mm;

    // 瞳孔の位置座標(0~1 で正規化済み)
    pupilPositionLeft = eyeData.verbose_data.left.pupil_position_in_sensor_area;
    pupilPositionRight
eyeData.verbose_data.right.pupil_position_in_sensor_area;
    pupilPositionCombined
eyeData.verbose_data.combined.eye_data.pupil_position_in_sensor_area;

    convergence_distance
eyeData.verbose_data.combined.convergence_distance_mm;

    //Focus//
    SRanipal_Eye.Focus(GazeIndex.COMBINE, out ray, out focusInfo, radius,
maxradius);
    SRanipal_Eye.Focus(GazeIndex.COMBINE, out ray, out focusInfo, maxradius);
    SRanipal_Eye.Focus(GazeIndex.COMBINE, out ray, out focusInfo);

    //GetEyeOpenness
    SRanipal_Eye.GetEyeOpenness(EyeIndex.LEFT, out LeftOpenness);

    //GetGazeRay
    SRanipal_Eye.GetGazeRay(GazeIndex.COMBINE, out origin, out direction);

```

```
SRanipal_Eye.GetGazeRay(GazeIndex.COMBINE, out ray);

//GetPupilPosition
SRanipal_Eye.GetPupilPosition(EyeIndex.LEFT, out pupilPositionLeft);

//

//Debug.Log("c" + gaze_direction_combined);
//Debug.Log("R" + gaze_direction_right);
//Debug.Log("L" + gaze_direction_left);

RaycastHit hit;
if(Physics.Raycast(ray,out hit))
{

}

}

}

}

}
```

獲得した座標データを CSV ファイルに保存するプログラム。

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
using System.IO;

namespace ViveSR
{
    namespace anipal
    {
        namespace Eye
```

```

{

public class UmeCSV : MonoBehaviour
{

    //csv
    public string filename ="ume";
    StreamWriter sw;
    Vector3 GazeOriginCombinedLocalC, GazeDirectionCombinedLocalC;

    // Use this for initialization
    void Start()
    {
        sw = new StreamWriter(@"\" + filename + ".csv", false);
        string[] s1 = { "x", "y", "z","time"};
        string s2 = string.Join(",", s1);
        sw.WriteLine(s2);
    }

    // Update is called once per frame
    void Update()
    {

        SRanipal_Eye.GetGazeRay(GazeIndex.COMBINE, out
GazeOriginCombinedLocalC, out GazeDirectionCombinedLocalC);

        Vector3 GazeDirectionCombinedC =
Camera.main.transform.TransformDirection(GazeDirectionCombinedLocalC);
        RaycastHit hitC;

        if (Physics.Raycast(Camera.main.transform.position,
Camera.main.transform.position + GazeDirectionCombinedC * 50, out hitC))
        {
            string[] str = { "" + hitC.point.x, "" + hitC.point.y, "" + hitC.point.z,""+

```



```
UnityEngine.Time.time };  
    string str2 = string.Join(", ", str);  
    sw.WriteLine(str2);  
    }  
    if (Input.GetKeyDown(KeyCode.F))  
    {  
        sw.Close();  
    }  
    }  
    }  
    }  
}
```

参考文献

- [1] 大島 義人, 実験研究の安全構造に関する科学的アプローチの重要性, 環境と安全, Vol.8, o.3,83-89, 2017.
- [2] 山本 仁, 安全で快適な実験室のデザイン — フレキシビリティ、室内気流そして耐震性を統合して考える—, 環境と安全, Vol.5, No.3, 143-147, 2014.
- [3] 川泉 文男, 化学実験での事故防止のために—いくつかの事故例と安全教育 2 身近に見聞きした事故と“危ない体験“, 化学と教育, ol.53, No.37, 394-397, 2005.
- [4] 錦見 端, 古屋大学における学生の事件関連事故リスクの統計的解析, 環境と安全, Vol.10 No.1, 1-7, 2019.
- [5] 小淵喜一, 大島義人, 実験安全評価のための作業者特性の数値化—中和滴定操作を例とした実験操作における探索的学習についての数理的解析, 環境と安全, ol.7, No.1,3-9 , 016.
- [6] 根津 友紀子, 林 瑠美子, 大島 義人, Radio Frequency Identification システム及び web カメラを用いた化学実験室における試薬の動態に関するケーススタディ, 環境と安全, Vol 5, No1, 9-17, 2014.
- [7] 廣瀬 通孝, バーチャル・リアリティ, コンピュータ ソフトウェア Vol.11 ,No.5,65-75, 1994.
- [8] David J, Virtual Reality-Enhanced Stroke Rehabilitation, IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL SYSTEMS AND REHABILITATION ENGINEERING, VOL. 9, NO. 3, SEPTEMBER 308-318, 2001.
- [9] Jie Y, Jing Y, Effects of biophilic indoor environment on stress and anxiety recovery: A between-subjects experiment in virtual reality, Environment International, 136, 1-10, 2020.
- [10] David Jack, Virtual Reality-Enhanced Stroke Rehabilitation, IEEE TRANSACTIONS

ON NEURAL SYSTEMS AND REHABILITATION ENGINEERING, VOL. 9, NO. 3,
SEPTEMBER 2001.

[11] 目黒 公郎, バーチャル・リアリティの避難行動シミュレータへの応用, 土木学会論文
文集 No. 556/1-38, 197-207, 1997.

[12] 加藤 宏, 「視覚は人間の情報入力の80%」説の来し方と行方, 筑波技術大学テクノ
レポート Vol.25 (1), 95-100, Dec. 2017.

[13] Hou. C, A review of vision tracking techniques[J], Journal of Automation, (4):603-
617, 2006.

[14] 姫野完治, 教師の視線に焦点を当てた授業リフレクションの試行と評価, 日本教育工
学会論文誌 40(Suppl.), 013-016, 2016.

[15] 山中英生, 相知敏行, 真田純子, 自転車走行時の若年者・高齢者の視線特性の比較分
析, 土木計画学研究・講演集 (CD-ROM), 48, 2013.

[16] 村井保之, 河原正治, 巽久行, 関田巖, 宮川正弘, 視線解析による弱視者の視認支援
への取り組み, 第9回情報科学技術フォーラム講演論文集, 743-744, 2010.

[17] Naz Kaya, Helen H. Epps, Relationship between Color and Emotion: A Study of
College Students, Coll Stud J 38 no3 S, 2004.

謝辞

論文をここまで書くということは、大学院での勉強が一段落するという事です。この2年間を振り返ってみると、本当に多くの方々にお世話になりました。

最初に、最も尊敬する指導教員の大島先生に感謝します。大島先生は、知識が豊富で、広い視野を持った、指導経験豊富な先生です。昔から「人に魚を渡すより、釣りの方法を教える方がいい」と言いますが、大島先生は釣りを教えるような先生です。この2年間、研究テーマの選定から実験方法の確立、論文の執筆に至るまで、大島先生は直接やり方を教えるのではなく、指導や助言をしてくださいました。これにより、研究室の学生たちは勉強方法だけでなく、良い学習習慣や思考方法を身につけることができ、非常に有益なものとなっています。

次に、研究・生活の両面で大変お世話になった研究室の特任助教 根津友紀子さんに感謝します。根津さんは豊かな研究経験を持つ優しい人です。毎回、ゼミが終わると、研究の方向から論文の書き方まで、根津さんと相談しました。学生の悩みを自分のことのように考えてくれる根津さんには、感謝の気持ちはいつも持っています。また、ゼミで丁寧なコメントをしてくれた秋月先生、いつもサポートしてくれた主原先生、学生の面倒を見てくれた秘書の中村さん、一緒に遅くまで頑張ってくれた学生の王若瑤さん、李雪さん、朱崢瑋さん、友達の笨さん、頼さん、李さん、王さんに感謝します。

また、共同研究者である株式会社オカムラに感謝します。打ち合わせの際には、様々な実験室、実験什器の話など詳細に教えてくださり、サプライヤーメーカーの視点の多くを学ばせていただきました。また、VR実験室を作成する際には、モデルデータを提供くださいました。

最後に、お父さんとお母さんに感謝します、両親の理解と協力がなければ、ここで生活し、勉強することはできなかったもので、今後は積極的に恩返ししていきたいと思っています。

この論文の準備で、私は研究生生活を振り返ることができました。論文の完成は新たな研究生生活の始まりを意味します。両親や先生方の期待に応えられるよう、これからも精進していきたいと思います。

張宛瑩