

卒業論文

バーチャルリアリティーを用いた
照明環境の違いによる距離認識に関する研究

2017 年度卒業論文

指導教員 ミケレット・ルジェロ

横浜市立大学国際総合科学部国際総合科学科

物質科学コース

140475

長濱智晴

目次

第1章 はじめに

1.1 背景	4
1.2 両眼視差について	5
1.3 奥行き知覚の理論	7
1.4 バーチャルリアリティーについて	8
1.5 実験目的	10

第2章 実験方法

2.1 Unity3D について	11
2.2 実験操作	
2.2.1 被験者について	11
2.2.2 対象物の配置	11
2.2.3 被験者による操作方法について	15
2.3 被験者データの集計について	17
2.4 ダウンサンプリングについて	18
2.5 シグモイド曲線（ボルツマン近似）について	18

第3章	結果	
3.1	「時間」と「距離 Δd 」の関係性について	
3.1.1	統計的解析	19
3.1.2	被験者の Δd 距離調節の様子	22
3.2	HMD を利用した被験者の頭の動き	24
第4章	考察	
4.1	統計的解析による考察	28
4.2	被験者 Δd 調節の様子の考察	29
4.3	被験者の頭部の動きの考察	31
第5章	まとめ	33
第6章	謝辞	33
第7章	参考文献	34
	実験操作説明	35

第1章 はじめに

1.1. 背景

人間は五感（視覚、聴覚、嗅覚、触覚、味覚）と呼ばれる、外界と接するときに得られるまたは必要とされる感覚を持つ。その中でも、人間は視覚から得られる情報が多く、脳神経でも視覚に関するものが多い。人間は視覚を発達させた動物とすることができる。近年では視覚に関する技術は大きな発展をとげている。テレビや映画などでは、画像・映像技術の発展により、バーチャルリアリティー（VR）を娯楽としても利用できるようになるなど、3D・立体視技術が注目されている。1.4でバーチャルリアリティーについて述べていく。

そもそもなぜ人間が奥行きを知覚するのかは多くの科学者が議論してきた。人間が二つの異なる眼をもっていることで生じる両眼視は、左右の網膜像は微妙に異なる。このことを両眼視差と言う。ここで議論となるのは、人間の眼に届く像は二次元であるが、我々人間が知覚するのは三次元的な世界であるということである。つまり、三次元的な世界は一度目の網膜で二次元的に記録され、脳によって再び三次元的に解釈されているのである。

この複雑な二次元、三次元の交替を行う脳の構造に注目が集まり、脳の働きを解明しようとする科学者が多い。「脳が空間をどのように知覚するのか」を解明するためにはVRを用いることは脳の働きの解明の大きな近道と言える。

私たち人間の生活を考えてみる。人間は生活していると視覚から入る情報で物事を判断、行動する。自動車のドライバーであれば信号、標識、歩行者、道路環境を瞬時に判断し、ドライバーの握ったハンドルを適切に操作する。自動車運転の例のように、視覚と手の動き（握ったハンドルの操作）の関係性は強いものである。2つの関係性を定量的な分析をすることは、視覚情報研究の領域において重要性は高い。だが実際に被験者を募り、視覚と手の動きの関係を定量的に解析した実験は数少ないことが分かっている。本論文では、VRを用いてこの2つの関係性を解析することが最大の目的である。

またVRの仮想現実という、プログラミング言語によって制御できる特性を活かし、被験者のヘッドマウンドディスプレイ（HMD）をトラッキングすることで、実験中の頭部の動きにも注目し、より先進的な実験を行うことも目的である。人間がある程度距離の離れた物体に注目する時、どのような行動を起こすと考えられるか想像してほしい。ある人は眼を細めて眼球の水晶体のピントを合わせるような行動をしたり、眉をひそめながら頭を上下左右に動かす等々、様々な行動が考えられる。今回は視覚的な情報を得ている最中の頭部の動きにも注目し実験を行った。

本論文では、まず第1章ですでに研究が進み、知られている人間の奥行きを感じ取ることのできる仕組み、理論を述べ、第2章では実験方法、第3章で実験の被験者から得られたデータの集計の結果を述べる。第4章ではその結果からの考察を述べていく。

1.2. 両眼視差について

1.1. で述べたように 3D・立体視の手がかりは、左右の眼の網膜像の微妙な差異による両眼視差であると言われている。この両眼視差を利用すれば三次元的な仮想的空間を創造することが可能となる。ここでは両眼視差について述べていく。

人間は異なる位置に二つの眼を持っている。このため対象物を見たときに目の網膜に映る像は、右眼と左眼では微妙に異なっている。この左右の眼による像の若干の違いのことを両眼視差 (Figure1.2-1) という。人間はこの像の微妙な差異を一瞬で視神経から脳へと伝え、奥行き空間を知覚するのである。VR、3D ディスプレイ等では人工的に両眼に違った画像を知覚させることで、奥行きのある映像を人間に知覚させているのである。

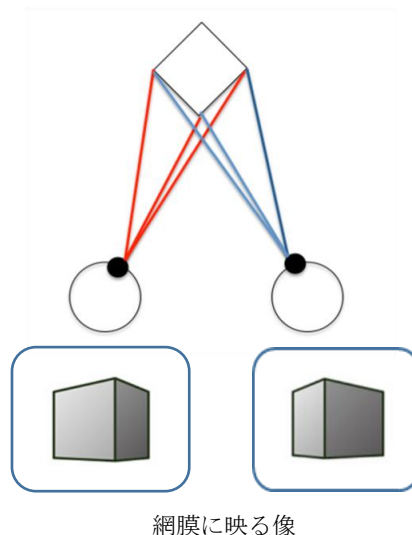


Figure1.2-1 両眼視差と網膜像

マイナビニュース[連載] 3D 立体視の解体新書—立体視という知覚(3)より引用

<https://news.mynavi.jp/photo//article/graphics-98/images/0011.jpg>

上の Figure1.2-1 のように両眼視差を考えれば、左右の眼の見え方に違いがあることが理解できる。

また、この両眼視差を幾何学的な視点から考えることで定量的な分析も行えることが分かる。Figure1.2-2 は幾何学的両眼視差モデルである。A と B は注目する対象物であり、下の二つの円は眼球を表したものである。 l は左右の眼の距離を表していて、対象物 A との距離を D 、A と B との距離の差を d とする。Figure1.2-2 のような対象物の位置の場合、それぞれの対象物と左右の眼の成す角度を考えることができる。また、目の網膜に映る二つの対象物の間隔の違いが分かる。その間隔は左眼の場合 θ_1 、右眼は θ_2 の間隔と考える。この θ_1 と θ_2 の差 $\Delta \theta$ が両眼視差である。

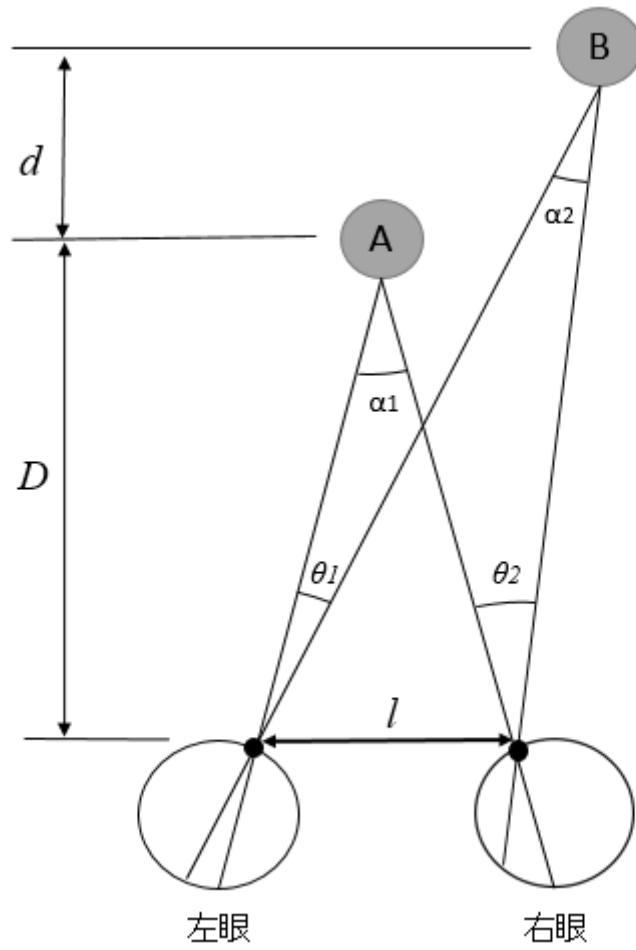


Figure1.2-2 幾何学的両眼視差モデル(塩入, 2012)

両眼視差を幾何学的視点から数式（塩入, 2012）にすると、

$$\begin{aligned}
 \Delta\theta &= \theta_2 - \theta_1 \\
 &= \alpha_2 - \alpha_1 \\
 &\cong \frac{l}{D} - \frac{l}{D + d} \\
 &\cong \frac{dl}{D^2}
 \end{aligned}$$

以上のように考えることで、両眼視差の定量的な解析の初歩的なアプローチになる。

1.3. 奥行き知覚の理論

これまで、人間が奥行きを感じ取る手がかりとして「両眼視差」について述べてきた。ここではもう一度人間が奥行きや三次元的空間を知覚する理論について述べる。

人間は三次元世界の中で暮らしている。しかし、視覚情報を知覚する眼の網膜は二次元的なセンサーであるため、目からは縦横の情報しか取得できないはずである。目に映る世界が三次元的に感じられるのは、人間は持つ脳が三次元の世界を作り上げているのである。1.1 背景でも述べたように、三次元的な世界は一度眼の網膜で二次元的に記録され、脳によって再び三次元的に解釈されているのである（日本バーチャル，2006:28）。この過程における眼の網膜に映る二次元的な情報から三次元の世界を再構築する際には、人は様々な情報源をもとに知覚している。「両眼視差」以外にどのような情報源があるのか述べていく。

- 目の筋肉から知る奥行き「輻輳」

人間の場合、水平方向に約 180 度、垂直方向に約 130 度の視野を持つと言われているが、対象物を鮮明に捉えることができるのは約 1~2 度と言われている。私たちが本に書かれている本を読むときは、眼球を動かして字を追って読んでいく。この眼球運動は三次元空間でも同じである。人間の眼が左右に離れていることで、遠くの物体を見るときは両眼の視差が平行になり、近くの物体を注視するときは、視線交わる。このときの物体と両眼の視線が作る角度を輻輳角という。

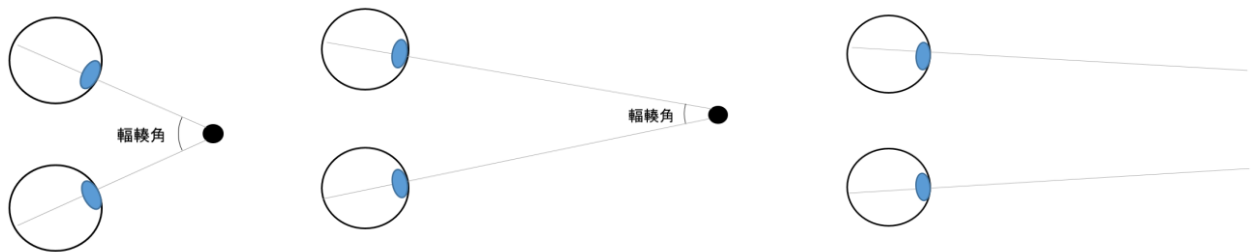


Figure1.3 輻輳角の様子（日本バーチャル，2006:30）

上の図のように、物体が近いほど輻輳角が大きくなり、遠いと小さくなる。この輻輳角が人間の奥行き知覚の手がかりの一つであり、眼球運動による筋肉の動きを脳が感知して、奥行きを捉える。

- 動きから得る情報「運動視差」

人間が動きながら三次元世界をする理由は、ある時点 t での眼と対象物との距離に注目すると、次の時点 $t + \Delta t$ では距離が異なるので、それぞれの時点で眼の網膜像は違いが生じてくる。この違いのことを運動視差という。脳はこの時間変化ごとの網膜像の差を瞬時に処理することで三次元世界を知覚することができる。

1.4. バーチャルリアリティー (VR) について

これまで、人間の眼が奥行きを感じ取る理論を述べてきた。この章では、近年急速な技術進歩が見られるバーチャルリアリティー (VR) について述べていく。VR は、被験者 (ユーザー) に、実物ではないがそれと同じような環境を、被験者の五感を刺激することの技術、その体系を作り出すもののことを指す。

VR は両眼視差という人間の性質を活かしたものと述べた。さらに詳しく VR の仕組みについて見ていく。VR は CAVE (多面立体映像装置) と言われる技術を使用している。これはユーザーが立方体の中にいるとして、四方の壁、床、天井がスクリーンとなり映像が映し出される。この映像は、ユーザーの眼がバーチャル空間の特定の位置にある場合の光景が、左眼用と右眼用映像として二重に映し出され、体験者が頭を動かすと、それに応じて映像も動く (日本バーチャル, 2006:19-20)。ユーザーは HMD ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着して観察すると、縦横の制約のない、広がった世界を感じ取ることができる。そして頭の動きに同調させていることで、その空間が静止した空間に知覚できるのである。このようにバーチャルリアリティー空間が確立される訳であるが、この空間はユーザー、すなわち VR 体験者のみが認識するものである。体験者は HMD を利用して得られる知覚的性質が、現実の世界と総じて似ている、リアルであると認識するのである。もちろんこのリアルさは体験者の脳によって知覚するのである。

これまで、VR におけるリアリティーは体験者しか知覚することできないと述べてきた。しかし技術の進歩により、近年ではミックスドリアリティー (MR) と呼ばれる技術に大きな注目が集まっている。MR とは現実空間と仮想現実を融合して、現実と仮想が同時に影響するような複合現実世界を作り出す技術のことである。体験者にはホログラムと言われるデバイスを装着してもらうことになる。VR は体験者自身も仮想現実世界に入ることになり立つものであったが、MR は体験者が今居る空間で仮想現実の物体を知覚することができるという、VR よりも一歩進んだ技術である。今回の論文では詳しくは触れないが、今後注目したい技術進歩である。



Figure1.4-1 被験者の様子
被験者は図のように実験を行う。



Figure1.4-2 HMD（ヘッドマウントディスプレイ）を装着する被験者

1.5. 実験目的

人間が物体を三次元的に知覚する仕組みを利用して VR 技術などに応用していることは述べてきた。両眼視差等の理論、幾何学的に考えることは、知覚情報研究の大きな進歩になったのは事実である。しかし通常の生活を営む上で人は自由に動いているし、周りの環境（明るさ、色、鮮明度等など）による影響もかなり大きい。より先進的な実験、そしてより定量的な分析をするために、人々の生活の環境に近い実験環境を作り出すことができれば、人間の視覚研究に関する新しい発見も生まれてくると考える。

そこで本実験は、VR という特徴を活かして上で述べたような人間が生活を営む三次元空間により近いものを作り出し、実際に被験者を募り、視覚実験を行うことで、「視覚」と「人間の対外的な身体反応」の関係性を追求していくことがこの実験の大きな目的である。

人間は視覚から得る情報として、ある物体と物体との間の距離、奥行きを認識する能力がある。いわゆる「距離感」を掴むことができる。その物体間の「距離感」であったり、奥行きを掴むために、人間は眉をひそめてみたり、頭その注目物体から視線を外さずに頭を動かしたり等の行動を起こしたりした経験がある人は多いだろう。今回はその「距離感」を掴むことに注目した。また上で述べた対外的な身体反応というのは、今回は手の動き、頭部の動きの2種類に限定した。

つまり本実験目的は、人間の物体の距離感を認知していく過程において手の動きとそれに伴う頭部の動きの関係性を解析することである。

また、先ほど VR を使用することの利点は、実験を行うのに相応しい仮想現実を作り出せる点であることは述べたが、もう一つ利点がある。それは欲しい実験データを抽出できるという点にある。VR 自体がプログラミング言語で統制されているので、被験者の動きのデータをリアルタイムで保存することができる。このことは今回の実験の最大の特徴であり、より定量的な視覚情報実験を成功させるものであると考えている。

第2章 実験方法

第2章では、実際に行った知覚実験の詳細について説明していく。定量的な実験を行う知覚情報実験において、実験方法の考案、構築が大きな鍵を握る。視覚と人間の対外的な身体の関係性を解析するために、実験操作はより簡易的、分かりやすさを目指し、考案した。以下で実験操作を述べていく。

2.1. Unity3D について

今回の実験で被験者が体感する仮想現実には Unity3D という、ゲームエンジンを使用している。Unity3D は主にコンピュータゲーム、携帯ゲームを開発するために用いられている。この Unity3D 自体は C 言語・C++ で開発されているが、スクリプト言語としては C#/JavaScript 等のプログラミング言語で開発することができる。今回の実験環境はすべて C# 言語でプログラミングしている。

Unity3D という本来ゲーム開発をするためのエンジンを知覚実験に用いたのは、その機能性にある。マウスの動きに対象物の動きをリンクさせることが容易にできる他、後に述べていくが、今回の実験で抽出したかったデータ（二つの対象物の二点間の距離、経過時間、仮想空間上の xyz 座標等）をエンジン上に保存、記録できるようにプログラミングできる利点がある。現在までに、ゲーム開発エンジン Unity3D を用いた知覚実験を行った科学者はいないに等しい。

2.2. 実験操作

2.1.1. 被験者について

被験者は晴眼者 5 名（眼鏡、コンタクトレンズ等の矯正も含む）で行った。被験者には「実験説明書」（最終ページ参照）を熟読してもらい、口頭説明による思い込み、勘違いを防ぎ、それぞれの被験者に平等な説明によって実験操作できるようにした。さらに被験者に対しては筆者側から必要以上に話しかけることはせずに、被験者が実験に集中できるようにした。

2.1.2. 実験環境・対象物の配置

被験者は VR ゴーグルを装着すると、仮想現実の世界の中に入る。被験者は周りを壁で囲われた部屋の中にいる。Figure2.1-1 のように、その部屋には、細長い横長のスリットを通じて外が覗けるようになっている。そのスリットを通じて、被験者には白い壁の前に配置されている二つの対象物（ α 、 β ）を観察する。

被験者、対象物の配置は Figure2.1-1 のようになっている。二つの対象物は被験

者から見て手前側が α 、奥側が β となっている。Figure2.1-2のように α 、 β の初期の奥行きは5 m離れている。単位はすべてUnity3D上のメートル単位(a.u.)である。この5 mは、両眼視差による奥行き知覚の影響を受ける距離の限界値とされている。被験者が両眼視差の影響を受けやすい状況で実験を行ってもらう。

この実験は、明るい環境（環境1）と暗い環境（2）との2つの環境の下で実験を行ってもらう。

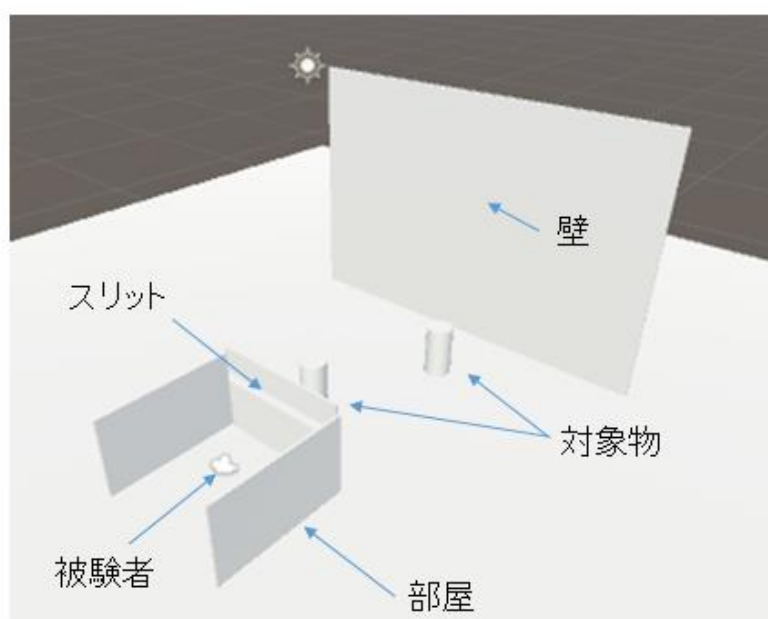


Figure2.2-1 実験環境、物体の配置

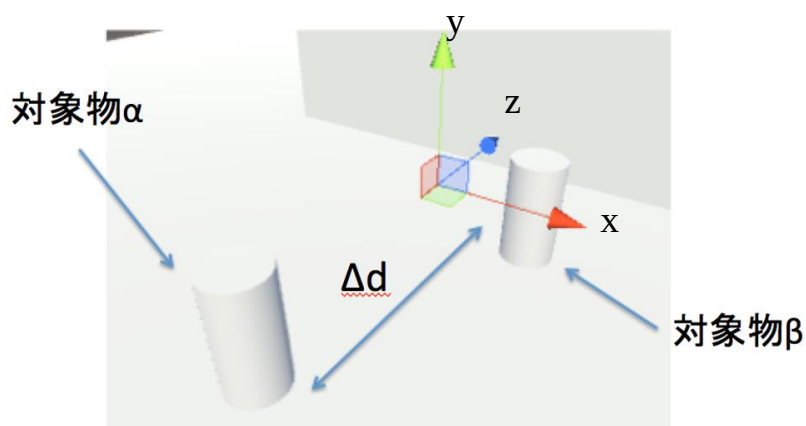


Figure2.2-2 対象物の配置

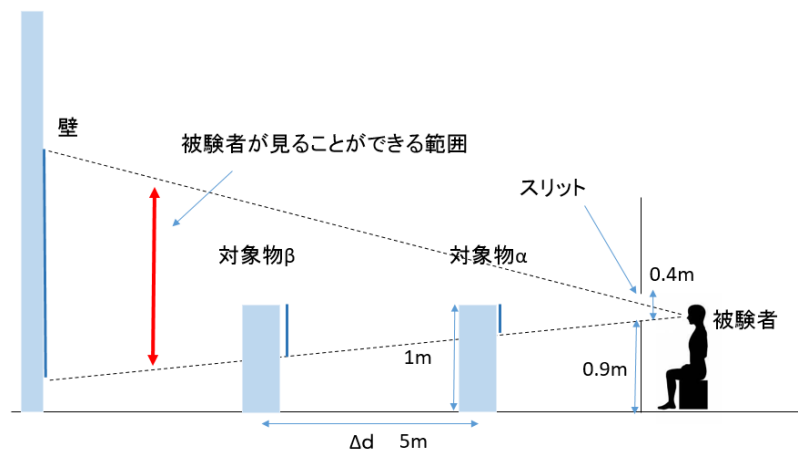


Figure2.2-3 被験者の視野（環境 1）

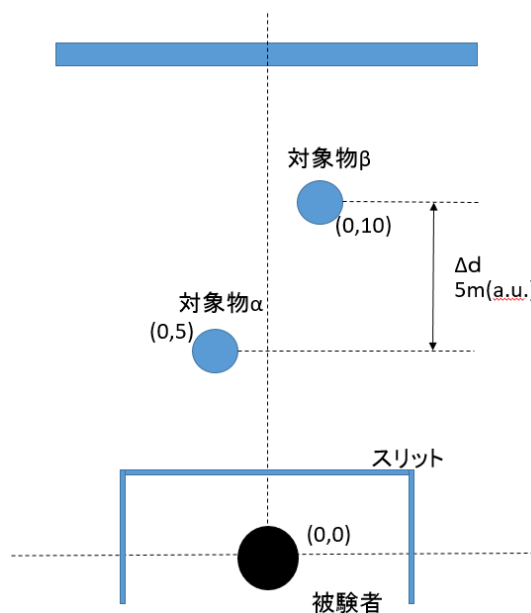


Figure2.2-4 被験者頭上から見た実験環境

Figure2.1-3 は、被験者が仮想現実の実験環境の中での位置関係を示したものである。被験者は椅子に座った状態で操作を行い、スリットから対象物を観察する。被験者によって座高の大きさは様々なので、地面から 0.9m(a.u.) のところで 0.4m の幅のスリットから観察する。

被験者が行う実験の環境は、Figure2.2.3-5,6 で示してある。環境 2 の照明は、対象物 β の頭上で地面から 4.5m の高さから照らしている。この照明の光は照明から 10m の範囲を照らすことができる。

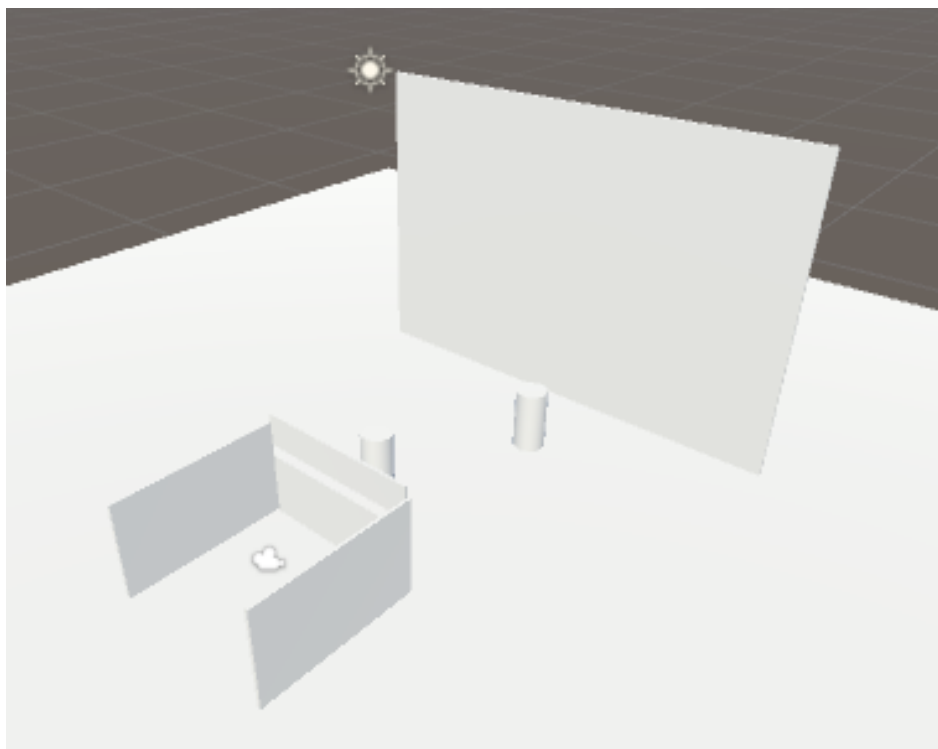


Figure2.2-5 環境 1（明るい環境）

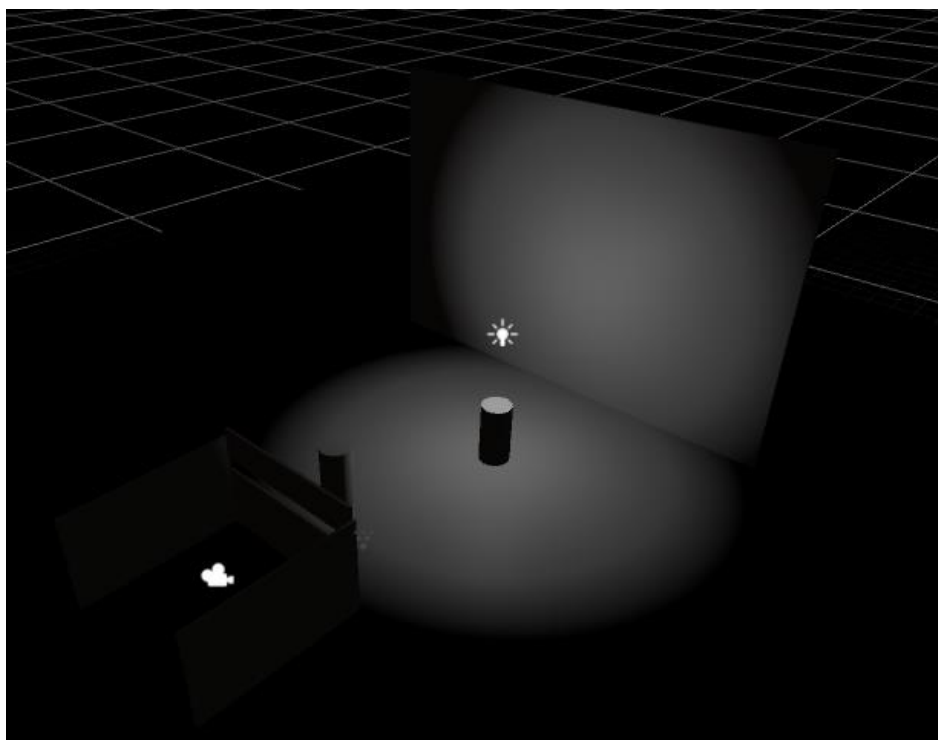


Figure2.2-6 環境 2（暗い環境）ただし対象物 β の上に照明を設置。照明は対象物 β の頭上にある。

2.2.3. 被験者による実験操作について

被験者は椅子に座った状態で実験を行う。被験者の前には机があり、その上に被験者が扱うマウスが置かれている。被験者はヘッドマウントディスプレイを装着して右手でマウスを軽く握り着席する。被験者の握るマウスと仮想現実中の対象物 α の動きは z 軸方向のみリンクしている。つまりマウスを被験者から遠ざけるように動かせば、対象物 α は被験者から遠ざかるように動く。被験者は対象物 β と対象物 α とが被験者との距離感が同じになるように調整する（ z 軸が被験者の観測地点から同じ距離になるようにする）。

実験は、被験者が2つの対象物が同じ距離感になったと感じるときまで自由にマウスを動かすことができる。被験者はこれ以上調整する必要がなくなった感じたときに被験者の合図で実験はリセットされ、また初めから調整を行う。被験者はこの実験操作で環境1の下で5回繰り返し、環境2の下でも5回繰り返し行う。

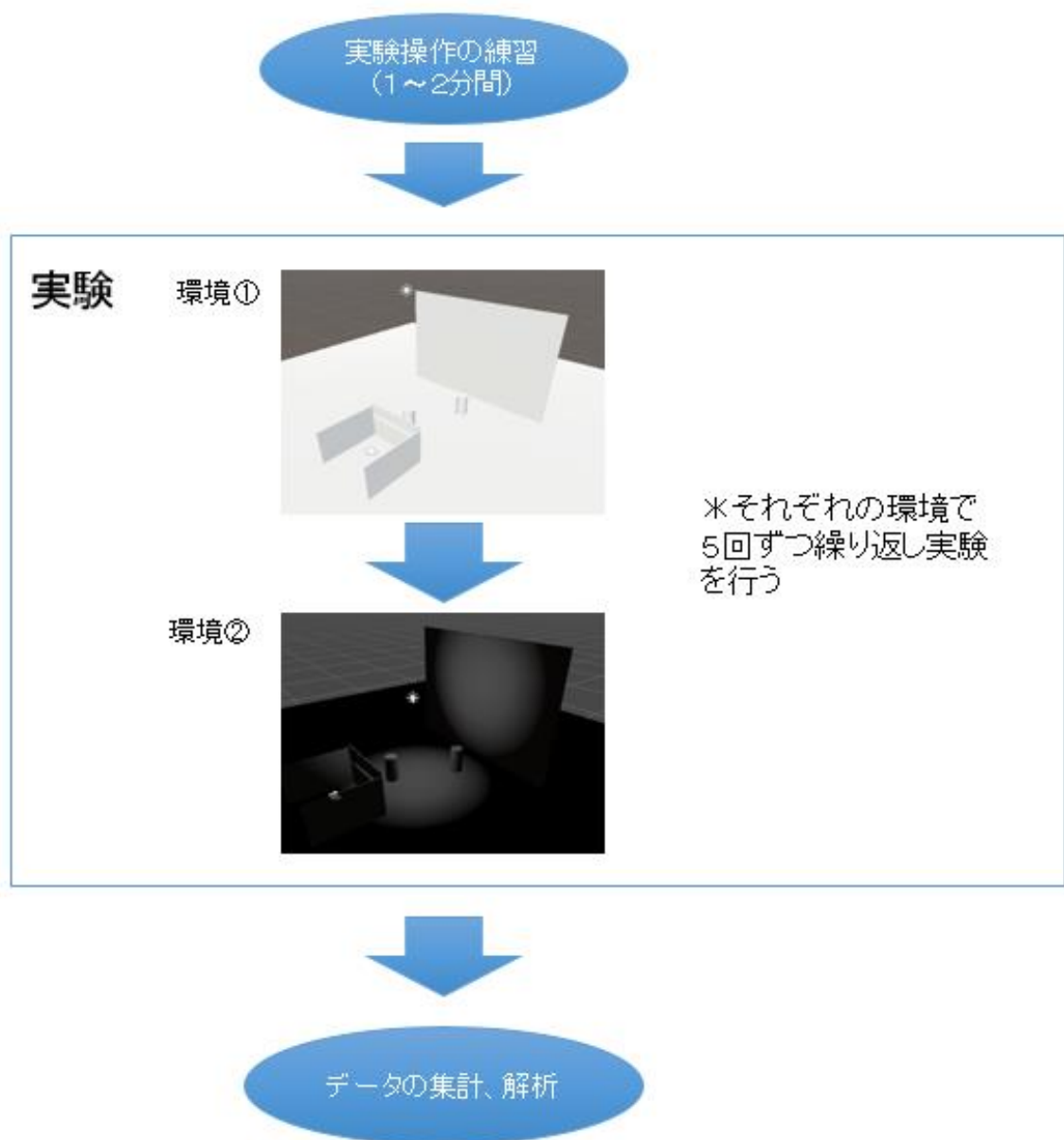


Figure2.2-7 実験フロー

被験者は上のような実験フローで実験を行う。操作実験の練習、同じ環境で5回実験を繰り返し行うことで実験に対する慣れの影響を少なくする理由がある。

2.3. 被験者データの集計について

これまで実験方法について述べてきたが、Unity3D を使って実験を行ったのは実験環境を創作する為だけではない。その環境下でどのような動き方をしたのか、経過した時間はどれくらいなのか等の全てをプログラミングでデータの抽出、調整を行うことができる理由も大きい。

実験では、被験者が対象物 α 、 β の距離を調節した時間、最終的な調整距離 Δd 、そして実験中の頭部の動き (xyz 軸座標) を集計した。頭部の動きは、被験者が椅子に座って実験を行ったときの頭部の位置を中心にそこからどれだけ動いたのかを集計できるようにプログラミングを行った。実験が終わったあとでデータは csv ファイルに保存、出力される。

Table2.3 被験者データの保存ファイルの例

	A	B	C	D	E	F	G
1	0	5	0.02264857	3.055816	-3.782198		
2	0.06	5	0.02261418	3.055923	-3.782185		
3	0.12	5	0.02267858	3.055823	-3.782209		
	0.18	5	0.02264136	3.05575	-3.782209		
	0.24	5	0.02257675	3.055708	-3.782294		
	0.3		56076	3.055694			
7	0.36		560628	3.055734			
8	0.42	5	0.02272758	3.055707			
9	0.4800001	5	0.0227593	3.055694			
10	0.54	5	0.02278513	3.055666	-3.782454		
11	0.6	5	0.02272224	3.055679	-3.78239		

Table2.3 のように csv ファイルは、「時間」「距離 Δd 」「被験者頭部 (xyz 座標)」が出力されるようにプログラミングした。「時間」であるが、被験者がマウスの操作準備が整いパソコンの「space」キーを押してから、被験者の距離調節が終わり「終わりました」の声があってから「x」キーを押すまでを「時間」とした。「距離 Δd 」は Figure2.2-2 にあるように対象物 α 、 β の z 軸の距離のことである。「被験者頭部 (xyz 座標)」は HMD を装着した被験者の頭部の座標である。この座標であるが、(x,y,z) 座標の初期値は (0, 0, 0) であるが被験者それぞれの身長 (座高) に差異があるため、出力される xyz 座標の初期値は (0, 0, 0) よりも多少のズレが見える。解析したいデータは頭部の動きである。よって時間ごと (0.06sec 毎) に抽出されるデータを初期値の x、y、z 座標それぞれで引き算したデータを扱う。そうすることで実験開始時からどれだけ変化したのかをわかりやすくすることができる。

2.4. ダウンサンプリングについて

この実験は被験者一人が知覚実験を行い、「時間」ごとのマウスの動きによる「距離 Δd 」のデータや「被験者頭部 (xyz 座標)」のデータを集計し、分析することが目的である。しかし被験者ごとで実験にかかる時間もマウスの動かし方も多種多様であり、そのままのデータを分析することは非常に困難である。そこで、被験者ごとで得られたそれらのデータを、何らかの方法で「平均化」できないか考えた。用いた手法が「サンプリング周波数変換」である。

実験時間は被験者によって様々である。よって、全体の被験者がどのような Δd の距離調節を行い、どのように頭部を動かしたのかを相対的に評価、比較するためには、被験者それぞれの時間ごとの Δd 、頭部座標のデータの数を合わせる必要がある。今回は、すべての被験者のデータ数を 50 として、ダウンサンプリングを実行した。ダウンサンプリングの計算はすべて python 言語でプログラミングを実行し、計算させた。

2.5. シグモイド曲線（ボルツマン近似）について

後の章で述べていくが、今回の実験では被験者の Δd 調節の様子を時間経過でプロットして、環境の違いによってその差異を考察することが目的である。その際に必要になるのがボルツマン関数への近似であり、 Δd と経過時間の相関性を明らかにするものである。

シグモイド曲線は、座標中で「S」字型の曲線を描いているものを指す。この曲線は薬などの効果を測るとシグモイド曲線を描くことは知られている。

シグモイド関数 $g(z)$ は次のような関数である。

$$\varsigma_a(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}}$$

以上で表される。標準シグモイド曲線と言われるもの $a=1$ のときである。

シグモイド曲線の性質は、標準シグモイド曲線で考えると、漸近線を $y=0$ と $y=1$ で持つことであり、

$$\begin{aligned}\lim_{x \rightarrow \infty} \varsigma_a(x) &= 1 \\ \lim_{x \rightarrow -\infty} \varsigma_a(x) &= 0 \\ \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \varsigma_a(x) &= 0\end{aligned}$$

である。

被験者のデータを分析し、どの値で漸近線を持ち、収束しているのかを分析することも実験目的である。

第3章 結果

この章では、以上で述べてきた実験で得られた結果について述べていく。ここでは第4章で実験の考察をしていくために得られた被験者データを表などでまとめ、そこからわかることを述べていく。

3.1 「時間」と「距離 Δd 」の関係性について

3.1.1 統計的解析

まずは得られたデータを統計的な処理を行い、解析を試みる。2.3. で記述したような csv ファイルの「時間」と「距離 Δd 」の二つの関係性を解析した。

被験者の二つの環境での5回の操作「時間」の平均した表を載せておく。被験者は実験を二つの環境で5回ずつ実験を行っている。被験者一人ひとりが行った実験結果で、環境による結果の違いがあるのか t 検定で解析した。Table3.1 にあるように5人の被験者の内、実験時間で優位性がある結果となった人は1人であった。

被験者間での実験時間を環境ごとで平均を求め、t 検定を行った結果を Table3.2 に示す。被験者ごとの環境1、2それぞれの平均値から t 検定を行ったところ、0.7 となった。この値から5人の被験者で、二つの実験環境の実験時間に差があるとは言えないことが分かった。

次に被験者から求めた Δd について、統計的な処理を行った結果を示す。

一人の被験者の二つの環境による実験で、一つの環境下で5回ずつ行った結果の平均を求めた表を Table3.3 に示す。Table3.3 に示すように、被験者ごとで二つの環境下での Δd の平均値で t 検定を行った。すると、優位性がある結果となったのが5人中4人となった。

今度は、被験者間の Δd の平均値を比べて、統計的処理を施した場合を考える。Table3.4 にあるように5人の被験者の平均値を求めて t 検定を行ったところ、0.68 となり、 Δd の結果から有意性は認められなかった。

Table3.1 被験者の実験操作時間と有意性の結果

被験者	環境 1	環境 2	t 検定	有意性の有無
1	6.32	14.59	0.187	有意差なし
2	9.79	9.27	0.639	有意差なし
3	9.98	6.31	0.004	有意性がある
4	7.10	6.47	0.350	有意差なし
5	9.26	9.13	0.920	有意差なし

Table3.2 被験者の実験時間平均

平均時間		
被験者	環境①	環境②
1	6.32	14.59
2	9.79	9.27
3	9.98	6.31
4	7.1	6.47
5	9.26	9.13
t 検定	0.7	

Table3.3 被験者ごとの Δd 平均 (5 回の実験操作別)

Δd				
被験者	環境①	環境②	t 検定	有意性
1	-0.035	-0.542	0.038	有意性あり
2	-0.645	-2.366	0.018	有意性あり
3	-0.572	-0.634	0.853	差がない
4	0.25	-0.12	0.032	有意性あり
5	0.295	1.51	0.004	有意性あり

Table3.4 被験者の Δd 平均と有意性の結果

Δd		
被験者	環境①	環境②
1	-0.03	-0.54
2	-0.64	-2.37
3	-0.57	-0.63
4	0.25	-0.12
5	0.3	1.51
t検定	0.68	

3.1.2 被験者の Δd 距離調節の様子

被験者から得られた「時間」「 Δd 」の二つのデータをグラフ化した。次のページの Figure.3.1.2-1 のように、x 軸を「時間 (s)」、y 軸を「距離 (m)」(Δd) としてグラフ化した。二つの環境での 5 回の被験者の距離調節の様子が観察できた。Figure.3.1.2-1 で被験者がどのように距離調節に至っていったかを観察すると、実験開始直後に被験者は素早くマウスの移動をしている。その後、 Δd の距離が小さくなる、すなわち対象物 α 、 β の奥行距離が小さくなると、マウスの移動を停止させるような行動を起こしていることが観察できる。この行動はどの被験者にも確認され、また実験環境にも関係ないこともグラフで確認できた。Figure3.1.2-3 は全被験者をダウンサンプリングして平均化したグラフである。

環境 2 のグラフに注目すると、環境 1 では観察されないような移動調節を始めた直後の段差のような部分があることが分かった。

ここでより定量的な分析を目指すために、被験者のグラフから、ボルツマン近似の式を応用させて、より定量的な解析を行った。

Figure4.2-1 は全被験者の時間毎の Δd の値をダウンサンプリングしてプロットしたものである。プロットしたものをしてみると時間が経つとグラフは緩やかになっている。そして環境 2 では特に緩やかにシグモイド関数的な形になっている。このプロットにボルツマン近似曲線（シグモイド関数）を施したのも Figure3.1.2-2 に示している。プロットしたデータから、ボルツマン曲線への近似式を計算した。

シグモイド曲線の式を発展させ、ボルツマン近似（Boltzmann sigmoid）に応用させ、式中の計算因子（ A_1 、 A_2 、 x_0 、 dx ）を求めた。

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(x-x_0)/dx}} + A_2 \cdots \textcircled{1}$$

table4.2 Boltzmann sigmoid 式計算の式中因子

	環境 1	環境 2
A_1	6.012±0.0728	5.044±0.0388
A_2	-1.222±0.0970	-0.394±0.0313
x_0	4.585±0.0422	3.587±0.0233
dx	2.373±0.0697	0.959±0.0240
R^2	0.999	0.997

以上のような分析から、第 4 章で考察を述べる。

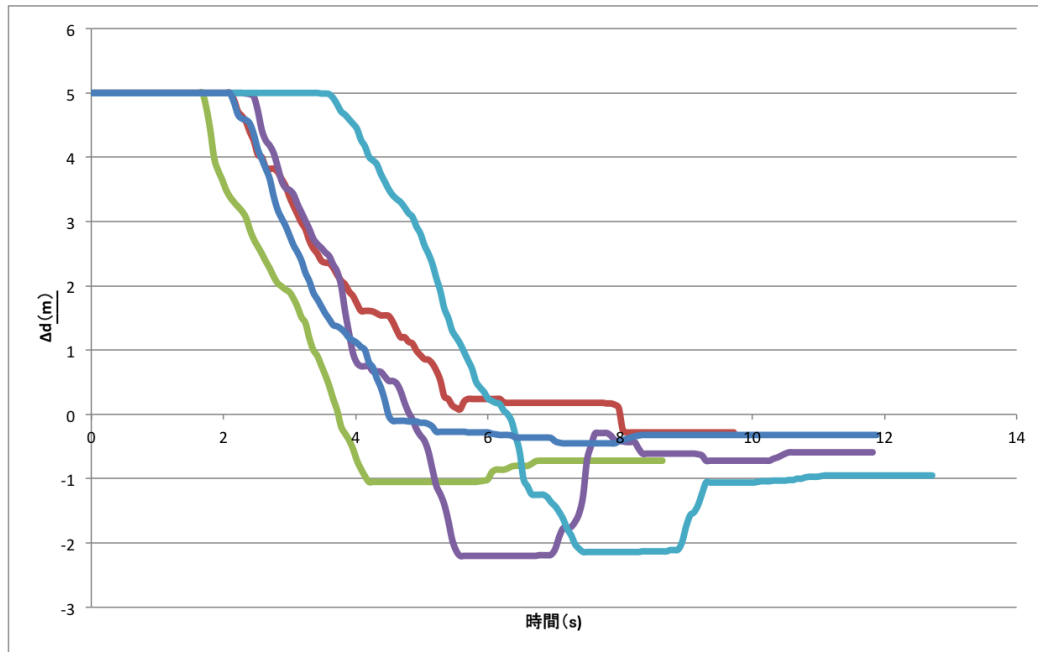


Figure.3.1.2-1 ある被験者の Δd 調節の様子（環境1：5回実験）

環境別ダウンサンプリングプロットの比較

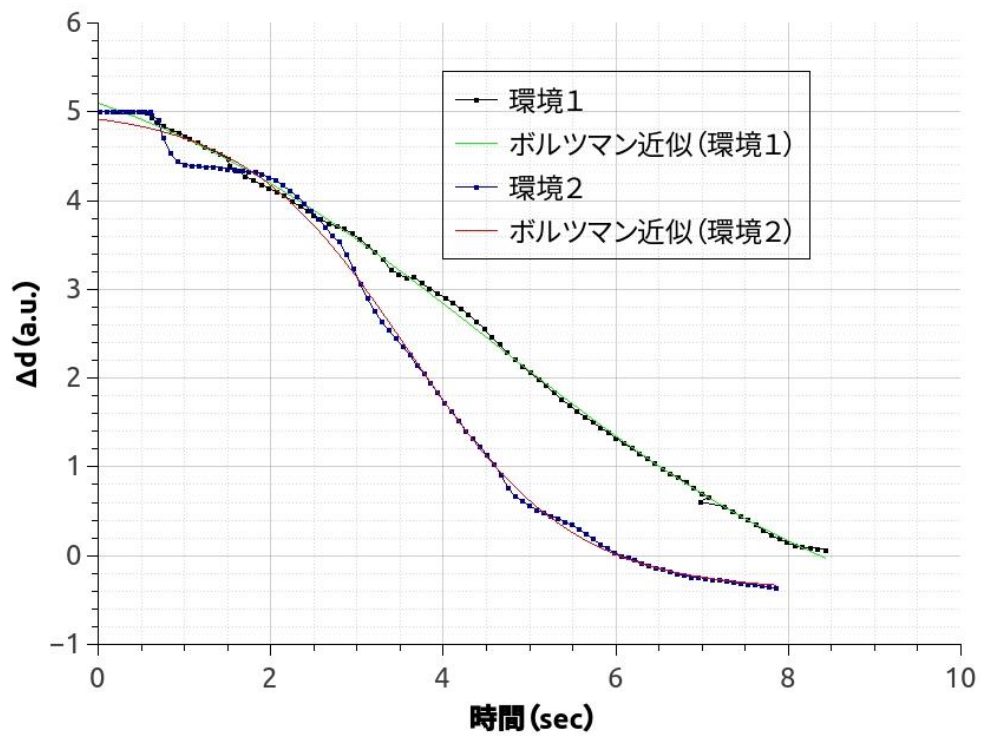


Figure.3.1.2-2 全被験者のダウンサンプリングプロット

3.2 HMD を利用した被験者の頭の動き

実験中の被験者の頭部の動きを分析するために、HMD をトラッキングすることで xyz 座標をデータ集計し 3D プロットし、環境 1, 2 で違いがあるか分析した。被験者の実験中の頭部の動きを分析するために、ここでも一人ひとり被験者の xyz 座標データをそれぞれでダウンサンプリングを行った後、全被験者のデータを集計して、それぞれの環境別でダウンサンプリングして 3D プロットしたものが Figure3.2-1 である。

Figure3.2-2 は x、y、z 方向から見たグラフの形も載せているが、全被験者が相対的に環境の違いでどのような頭の動きをしたのかを観察することができる。

Figure3.2-2 のように x、y、z 軸に垂直な方向から観察すると、環境ごとで特徴が表れた。さらに Figure3.2-3、Figure3.2-4 のように、xy、xz 平面の二次元でプロットしたもので考えた。被験者スタート地点 (0,0,0) から矢印で軌跡を示した。環境 1 では xy 平面で第一象限に集中していたのに対し、環境 2 では第 3 象限に集中してプロットされているのが分かる。xz 平面で見ると、どちらも z 軸の正の方向に多くプロットされ、環境 1 では第一象限へ、環境 2 では第二象限に集中していた。

またさらに注目したいのは、環境ごとの移動距離である。xy、xz 平面でも環境 2 の方が頭の移動距離が大きいことがわかる。

もう一度詳しく頭の動きについて観察する。Figure3.2-3 で観察できることは、環境 2 では被験者は一度頭を左に動かした後に原点 (頭のスタート地点) に戻すように右へ動かしている傾向にあった。環境 1 では頭を右動かしたままその位置を保持しているようであった。また、頭の前後の動きに注目すると、どちらの環境でも一度も後ろ方向に動くことは観察されなかった。

動き方の結果についてまとめると、xy 平面で見た結果、環境 1 では頭を前方斜め上方向に動かし、環境 2 では前方左斜め下方向に動かしていたことが分かった。環境 1 は、右に動かしてその場に留まるが、環境 2 では、左に動かした後、右方向に再び戻すように動かすことが観察できた。最後に xz 平面から観察し、前後左右の頭の動かし方を確認してみると、環境 1 では一度斜め右に動かし始めてから少し元の位置に戻ってくるように動くのに対し、環境 2 では一度左斜め前に動かした後に、右に向きを変えて、スタートの位置よりも右側に動かすような傾向があった。

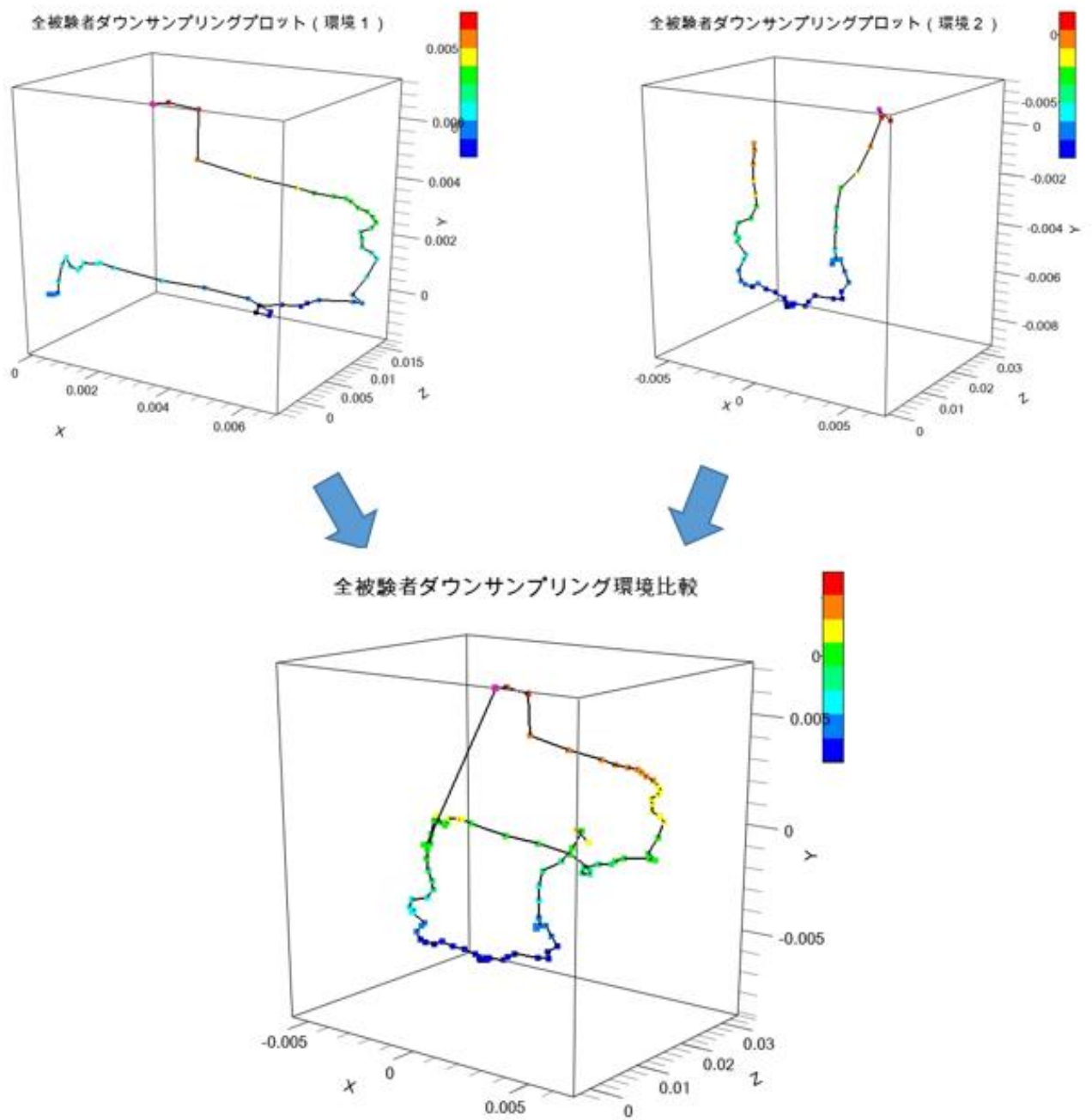


Figure3.2-1 被験者のダウンサンプリング 3D グラフ
環境 1, 2 それぞれでダウンサンプリングしたものを 3D プロットした。

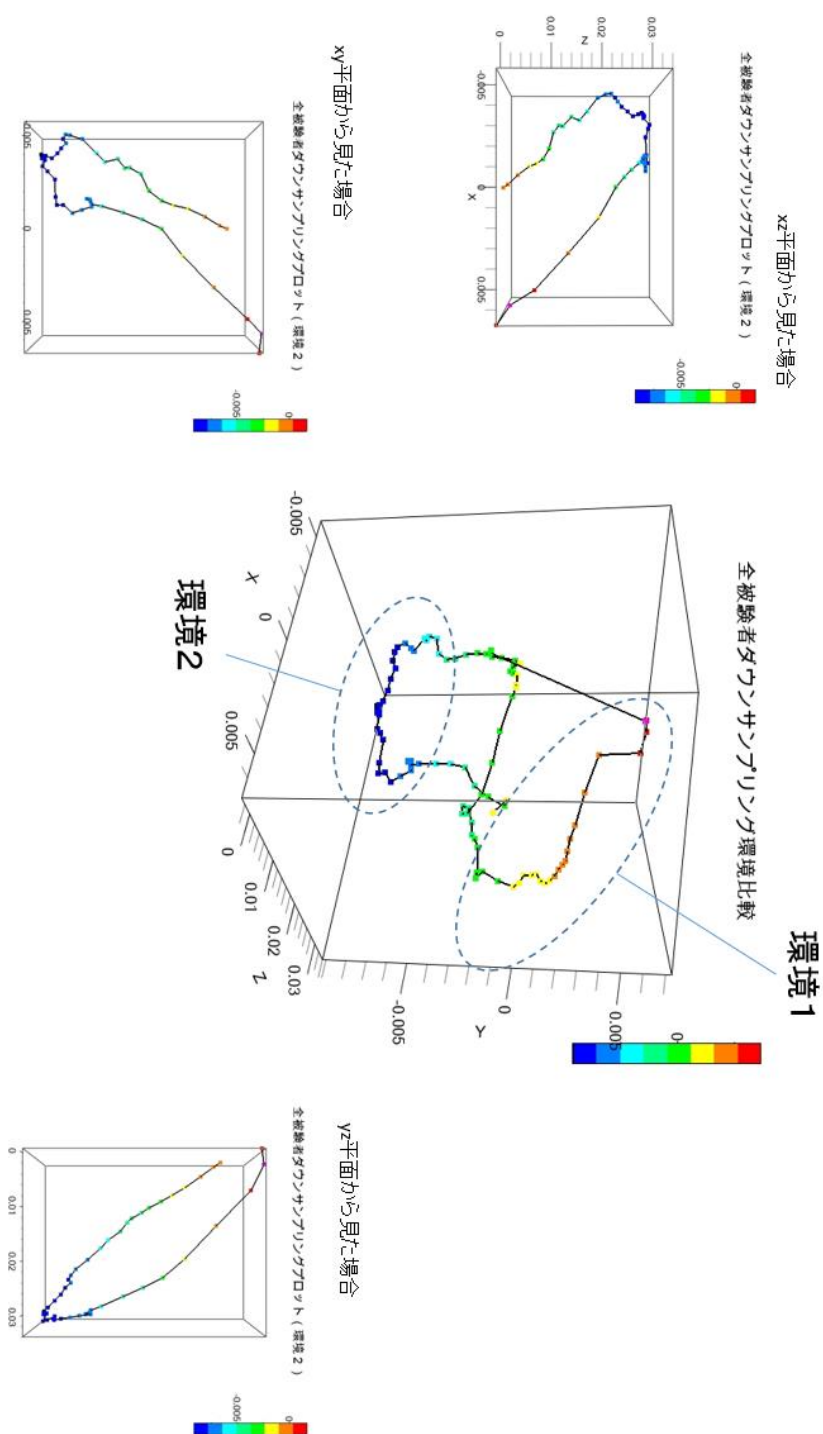


Figure3.2-2 全被験者のサンプリングプロットの環境別の比較

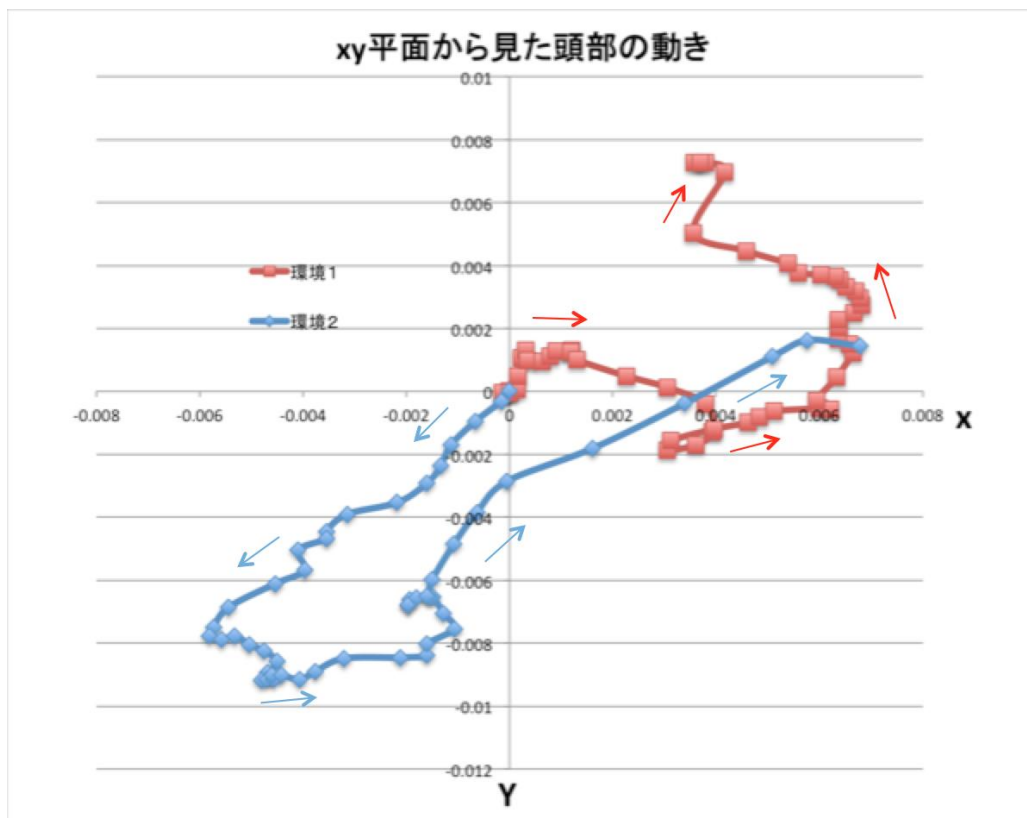


Figure3.2-3 xy 平面から見た頭部の動き（頭の上下左右の動き）

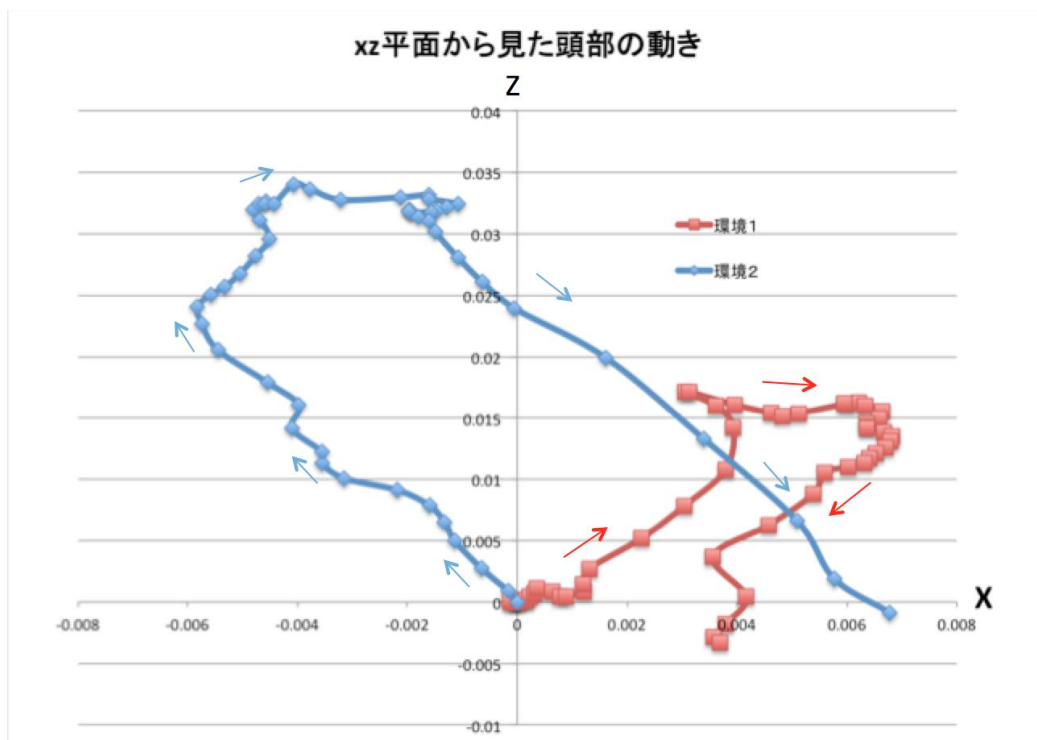


Figure3.2-4 xz 平面から見た頭部の動き（頭上から見た頭の動き）

第4章 考察

第3章で得られた結果から考察を述べていく。ここでは、被験者から得られたデータから推測されること、実際の得られたデータから統計的処理、ダウンサンプリングした結果から裏付けられることを述べていく。

4.1 統計的処理による考察

3.1.1で被験者の「時間」「 Δd 」の結果から、被験者間と一人の被験者の操作という二つの観点からt検定を行い、その結果から環境の違いによる結果の違いを述べることはできないか、分析した。

この実験は明るい環境での実験と、暗い環境での実験と二つ行う。被験者はこの二つの環境の違いを実感することができるわけだが、ただ「明るいから操作が容易だった」「暗いから操作が難しかった」等の意見、感想だけでなく、実験データの解析によって操作の簡易さ、容易さを結論付けることはできないかと考えた。実際に被験者に実験操作の難易度を聞いてみると、暗い環境では操作は難しいと答えた人が多かった。

この被験者の感想を裏付ける結果を直接言うことは難しいが、二つの環境での操作が違うと言うことができないか、t検定を用いて解析した。

Table3.2は被験者の実験操作時間をt検定したものであり、Table3.4は被験者が最終的な Δd の値の平均にt検定を行った表である。どちらも帰無仮説「この二つの環境に違いがあると言える」とした場合、実験時間の場合0.7、 Δd の場合0.68となり、有意水準5%を上回り、帰無仮説は棄却されてしまった。つまり、実験時間と Δd の結果では二つの環境の違いを言うことはできなかった。

筆者の当初の予測では、暗い環境の方が視覚的にも制限され、操作時間に時間がかかり、なおかつ Δd の誤差も大きくなるだろうと考えていた。t検定の結果からも分かるように、「人間は操作が難しいと感じたから、操作に時間がかかる」「操作がやりにくいから、正確性を欠く」と結論付けることはできないと考察できる。

人間は環境の明るさに関わらず、二つの対象物の奥行きを間違えずに把握できることが推測される。

4.2 被験者 Δd 調節の様子 of 考察

被験者の最終的な実験経過の時間、 Δd の値からは二つの実験の違いを結論付けることは難しかった。次は、被験者がどのように距離調節を行ったのか、 Δd の距離調節の様子をグラフ化して考察していく。前章でも述べたようにダウンサンプリングを行い、同じデータ数にして被験者の調節の様子を平均化することで分析を試みた。さらにボルツマン近似を行ったことで得られたデータから考察を行う。

Δd の値がどの値に収束しているのかは、環境 1 の場合 -1.222 ± 0.0970 、環境 2 の場合 -0.394 ± 0.0313 と環境 1 の方が $\Delta d = 0$ に近い漸近線となった。前の節 4.1 の統計的な考察で、環境の違いによる Δd の違いは無いと考察したので、 A_2 の数値の違いに大きな意味はないと考察した。

次に、 x_0 の値から 2 つのグラフを比較する。 x_0 はシグモイド曲線の S 字中央の閾値である。環境 1、2 の x_0 はそれぞれ 4.585 ± 0.0422 、 3.587 ± 0.0233 であり、誤差の範囲の中にそれぞれの x_0 は重なることは無い。このことから、2 つの環境下での実験に違いがあったという結論をつけることができると考察した。さらにその差異を考えてみる。先ほどと同じように x_0 を比べると、環境 2 の方がシグモイド曲線の中央に早く差し掛かることがわかる。このことから被験者は環境 1 の操作よりも素早くマウスを動かしたのではないかと予測できる。このことを裏付けるのが dx である。

環境 1 dx は 2.373 ± 0.0697 、環境 2 dx は 0.959 ± 0.0240 と環境 1 の方が大きい値を示しているが、改めてボルツマン近似式①を見ると、この dx が大きいほど、 x_0 地点での微分したときの値（シグモイド曲線の傾き）は小さくなることに注意したい。

ここから実際に傾きを求めると、環境 1 では、 0.5 ± 0.0697 環境 2 では、 1.4 ± 0.0240 となり、環境 2 での操作の方がマウスの動きは速かったことが分かる。

環境 1、2 の Δd 調節の様子に差異が出たのかについて考察する。環境 2 の移動調節が速かったのは、照明の影響であると考えた。実験開始直後では、対象物 α は影で見えにくいため、早く視覚に捉えたいという気持ちからマウス移動を速めたのではないかと考察した。

また、環境 2 ではシグモイド曲線の S 字中央の閾値点 x_0 が環境 1 よりも時間が速かったことに関しては、 Δd 距離調節に被験者は時間を割く傾向にあるのではと考察した。 x_0 の位置、そしてその地点での傾きが大きい分、漸近線への近づき方も緩やかになる。環境 2 では最後の Δd の距離調節が、被験者の心理に慎重性が働いたと考察した。

環境別ダウンサンプリングプロットの比較

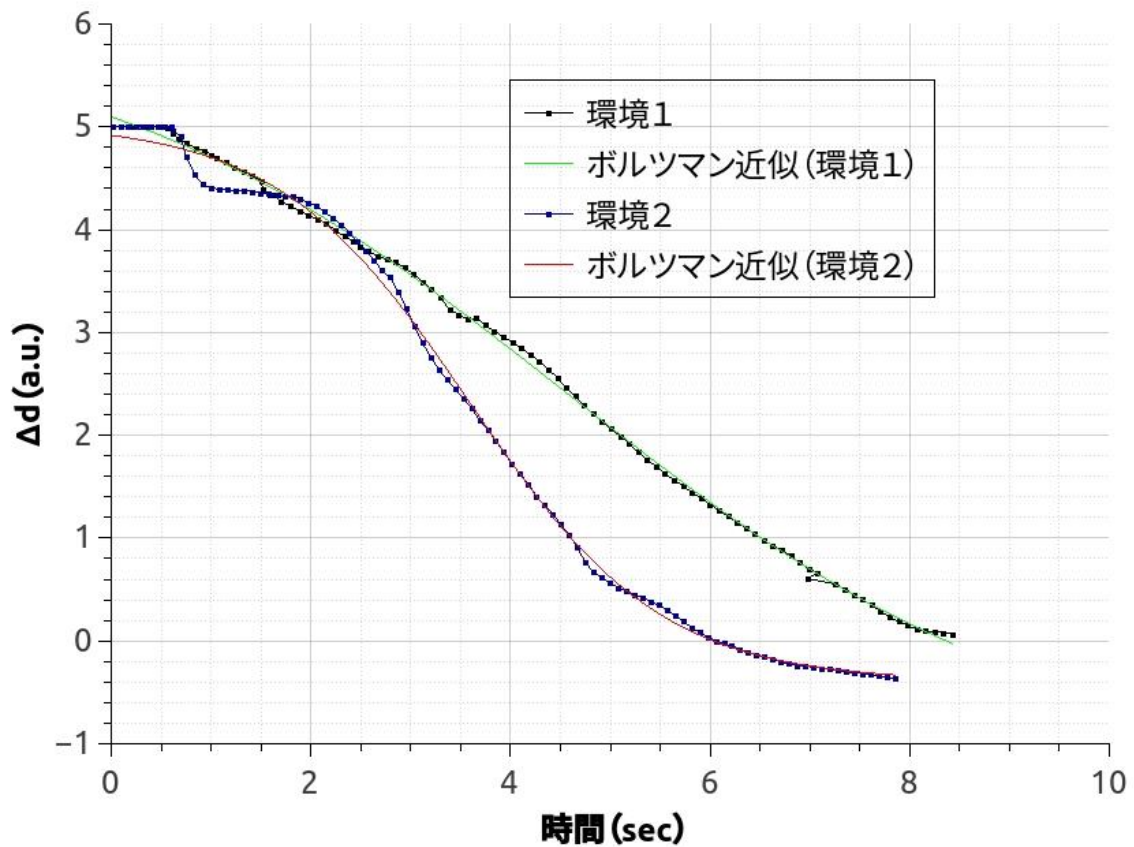


Figure4.2-1 環境別のダウンサンプリングプロットの比較

- ボルツマン近似（環境 1）
決定係数 $R^2=0.999$
 $x_0(\text{center})=3.587\pm0.0233$
 $dx(\text{time constant})=2.373\pm0.0696$
- ボルツマン近似（環境 2）
決定係数 $R^2=0.997$
 $x_0(\text{center})=4.585\pm0.0421$
 $dx(\text{time constant})=0.959\pm0.0240$

4.3 被験者の頭部の動きの考察

被験者の頭部の動きを解析するために、全被験者の実験中の頭部座標（xyz 座標）のデータをダウンサンプリングしてプロットした（Figure3.2-1 参照）。Figure3.2-2 のように xy、xz、yz 平面から観察した。点線で示すように環境 1，2 とで動き方に特徴の違いがあった。そのことについて考察を述べていく。

全被験者の頭部の動き方の結果から考察されることは、暗い環境であると人間は総じて頭の動きが激しくなるということである。この原因について考察、追求してみる。

アメリカ合衆国のスタンフォード大学⁸⁾で HMD を用いて、人が感じる「不安」を識別する論文が発表され、頭の”Yaw”の動き（頭を振る動き）と不安感との相関が大きいという結論を出している。この結論を踏まえて考察する。

環境 2 という実験環境は暗い環境であるが、まったく光がない環境ではない。対象物 β の頭上に光が灯っている。そのため、対象物 α を視野に捉えるためにはある程度対象物 α を動かさなければならない（Figure4.3-1）。環境 1 は全体に明かりが広がり、環境 1 に比べ、被験者が感じる視野的なストレス（不安）は確実に大きい。被験者はこの視野的ストレスのため、激しく頭を動かしたと考察した。

既存の論文の考察以外に考えられることについて考察する。なぜ、環境 1，2 とで頭の動きの上下左右の違いが出たのか。それは環境 2 に存在する照明の影響であると考察する。被験者の前方には横長のスリットが存在し、そこからの対象物への視野は限定される（Figure2.2-3 参照）。

環境 2 は頭上の照明による「光」と「影」の影響は無視できない。環境 2 での被験者の上下左右の動きから考えると、被験者が初めに左斜め下方向に頭部を動かしたのは、照明の位置を確認するための動作をしたためであると考察した。環境 1 と比べて特徴の違いが出たのは、視野の確保をする必要があったからである。そして、被験者の実験終了時の頭の位置に注目すると、環境 1，2 も xy 平面の第一象限で終了していることが分かる。このことから被験者は最終的な Δd の距離調節の決定を環境の差異にかかわらず、同じ頭の位置で行う傾向にあることを示唆しているのではないかと考察した。

環境 2 での被験者の頭部の動き方をまとめると、一度被験者は照明の位置を確認するため頭を左斜め下方向に移動し、対象物の存在を確認し、 Δd の距離調節を行ったのである。

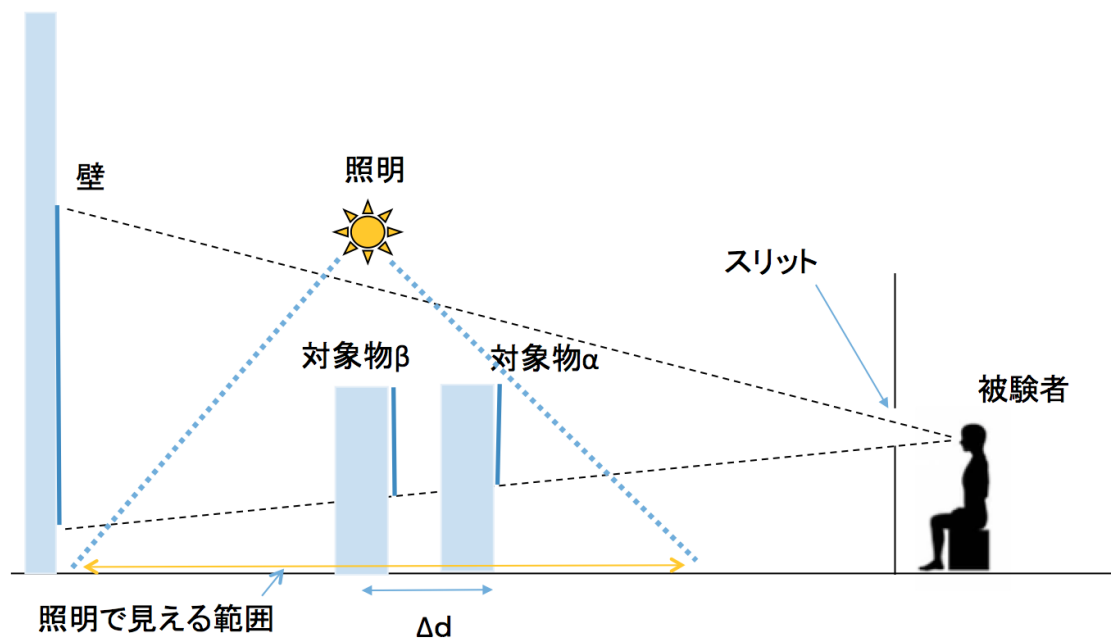


Figure4.3-1 環境 2 の照明と対象物の関係

被験者は α を β に近づけなければ、対象物 α の全体を捉えることはできない。

第5章 まとめ

これまで Δd と実験時間の関係性、実験中の被験者の頭の動きに関して考察をしてきた。

人の奥行き知覚に関して、明るい、暗いという2つの環境の違いでは奥行き(Δd)を知覚する能力に優越があるという結果は得られなかった。しかしその奥行き知覚し、奥行き距離(Δd)を調整するまでの過程で、実験環境によって違いが現れることが判明した。そしてそれは主に手を動かす速さと、その時の頭の動きである。この原因は、明るさが暗いという視覚的なストレスによる不安と、早く対象物を目で捉えたいという焦りであると考察した。この違いは、視覚という観点から我々が普段の生活する上で、大きな影響があると言える。

車のドライバーは視線で自身が運転する車の身の回りの情報を一瞬で捉え、ハンドルで操縦している。今回の実験に似た環境で運転することがあれば、ドライバーの頭は揺れ、ハンドルを握った手の動きは落ち着かなくなることも考えられる。夜の運転であれば、町の街灯とその次の街灯までの距離が離れている道もある。そのような状況に自身の身体に起こる反応を理解しておけば、事故の防止になるはずである。

本実験の今後の展望について述べる。照明の光が対象物に当たって発生する影の形、大きさに関しても分析し、奥行き知覚と影の関係について詳しく調べていくことで研究を進めていく。

また影の分析をすることで被験者の頭の動きに関しても、研究が進むと考える。被験者がなぜ、暗い環境で左側に傾く傾向を示したのか。より深い考察ができると考える。

第6章 謝辞

本研究を進めていくにあたり、研究テーマ設定、実験方法、データ分析方法等全てにおいてご指導賜りましたミケレット・ルジェロ教授には心から感謝申し上げます。また、知覚情報研究室のメンバーには、研究のご協力、意見等も多く頂きました。この場を借りて感謝申し上げます。

2017年9月16日東京理科大学合同シンポジウムにて、ポスター発表致しました。会場の設営、進行をしていただいた東京理科大学の皆様、そして横浜市立大学大学企画担当の皆様誠にありがとうございました。

2018年1月18日日本視覚学会2018年冬季大会にて、ポスター発表致しました。会場に足運び、私のポスターに興味を持っていただき、連絡を下さった皆様、誠にありがとうございました。

関わった全ての人に感謝申し上げます。

第7章 参考文献

- 1) 山口真美(2005)『視覚世界の謎に迫る』,株式会社講談社
- 2) 日本バーチャルリアリティー学会 VR 心理学研究委員(2006)『だまされる脳 バーチャルリアリティーと知覚心理学入門』,株式会社講談社
- 3) 長田昌次郎(1997)「視覚の奥行距離情報とその奥行感度」,NHK 放送科学研究所
- 4) 塩入諭(2012)「立体/奥行知覚の基礎」,『日本視覚学会』,東北大学,電気通信研究所
- 5) 大久保克哉(2015)「両眼立体視における3次元空間移動時の奥行き恒常性」,高知工科大学大学院工学研究科基盤工学専攻
- 6) 長石道博(2014)「視知覚の場による顔表情認知モデルの検討」,『映像情報メディア学会誌』
- 7) 佐藤訓志, 藤本健治(2003)「力学系の性質を利用した非線形確率システムの制御」
- 8) Andrea Stevenson Won(2016), "Identifying Anxiety Through Tracked Head Movements in a Virtual Classroom" Brian Perone and Michelle Friend (eds.), Cyberpsychology, Behavior, and social networking, Volume 19, Number 6, 2016

実験操作説明

実験にご協力いただき誠にありがとうございます。この操作説明を必ず読んで、実験の流れを理解していただいてから実験を行います。この実験はあなたの視覚と手の動きを測定するものです。実験の便宜上、実験主催者があなたの腕をつかむことがあります。ご容赦ください。

～実験上の注意（*必ず理解してください。）～

1. 椅子に座って、「実験対象者の方へ」と「実験操作説明」をお読みください。
2. 座った状態のまま実験を行います。あなたの利き腕を机の上の印のところに置くようにしてお待ちください。
3. 机の上に置いてある VR ゴーグルを装着してください。
4. 装着したまましばらくお待ちください。装着すると手元の視覚が失われます。慌てずにお待ちください。
5. 実験中の指示の声をこちらで決めさせていただきます。

「**実験を開始します**」・・・目の前に物体が出現します。それと同時にあなたの利き手をマウスへと誘導します。そのままお待ちください。実験中にマウスのクリックを押さないでください。

「**調整を始めてください**」・・・あなたはマウスを動かしてください。

「**マウスから手を放してください**」・・・手を軽くマウスから放してください。マウスのクリックを押さないでください。

～実験の流れ～

練習

1. 眼前に二つの円柱が見えます。手前の円柱はマウスの動きとリンクしていますので、マウスを動かして奥側にある円柱と、自身から見て丁度同じ距離感になるように調整してください。

本実験

1. あなたは、横長のスリットのついた部屋の中にいます。そのスリットから外が覗けるようになっています。
2. そのスリットから二つの円柱が見えます。
3. 指示に従って、手前にある円柱をマウスで動かし、奥側にある円柱と自身から見て丁度同じ距離感になるように調整してください。

調節が終わりましたら、「**終わりました**」と言ってください。実験を終了します。