

ネッカーキューブを用いた 視覚情報の定量化

2018年度卒業論文

指導教員 ルジェロ・ミケレット

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

学籍番号 150056

石塚 あやか

目次

1 章	はじめに	3
1-1	研究背景	3
1-2	ネッカーキューブとは	5
1-3	先行研究および仮説	8
1-4	本研究の目的	11
2 章	実験方法	12
2-1	測定ソフト作成について	12
2-2	実験手順	13
2-3	実験パターン	14
2-4	解析に用いたプログラム	17
3 章	結果	18
3-1	測定時間の解析	18
4 章	考察	26
5 章	まとめ	28
6 章	謝辞	29
7 章	参考文献	30

1 章 はじめに

1-1 研究背景

人が外界から得られる情報は五感（視覚、聴覚、嗅覚、味覚、感覚）で受け取り、脳で処理される。その五感のうち、視覚から受け取る情報の割合は80%以上と言われており、目に見えるものの情報がいかに重要かがわかる。本研究では、その視覚が錯覚を起こす錯視というものについて研究を行ってきた。

錯視とは、実際に網膜に写る物理的特性とは異なる性質を脳が認識し、知覚してしまう現象である。同じ大きさのものが異なる大きさに見えたり、静止しているものが動いているように見えたりと錯視は様々な種類があり、錯視が起こる要因もそのそれぞれの錯視によって異なる。この錯視の先行研究として、大きく多義図形知覚と両眼視野闘争というものがある。多義図形知覚とは、一つの図形に二つ以上の見え方が可能であるような図形のことを指す。例えば今回使用しているネッカーキューブや、美術の教科書などに載っているルビンのつぼ（図1-1）などがそれに当たる。両眼視野闘争は、左右の眼が同時に認識できないくらい異なった図形を提示したとき、それらの一方のみが見えるような現象である。例えば近年流行している3D映像は、この両眼視野闘争を用いている。この二つを総称して知覚闘争と呼ぶ。多義図形知覚と両眼視野闘争の二つに共通して言えることは、網膜に写る像は定常であるにもかかわらず、意識に上る「見え」は二つ以上あり、またそれがどちらか一方しか見えない、ということである。ただこのどちらか一方、というのはしばらくその対象を観察していると二つの見えが自律的に交代する。この自律的な交代を知覚交代と呼ぶ。[2]

錯視についてはこれまで多くの研究がなされてきているが、錯視が起こる脳のメカニズムまで解明されておらず、なぜ錯視が起こるのかは未解明な点が多い。そこで本研究では、実際に錯視が起こるタイミングを計測し、ネッカーキューブの定量化をはかることで錯視という現象をより深く追求したいと考えている。

本論文では第1章で研究の目的およびネッカーキューブについて述べ、第2章で実験方法、第3章で得られた結果とそのデータを分析した結果、第4章でそれらについての考察をしていく。



図 1-1 ルビンの壺 向かい合う二人の人の顔か、一つの壺に見える多義図形
工藤英美「反転多義図形認知の発達」に関する最近の研究動向」(2012)より引用
https://ci.nii.ac.jp/els/contentscinii_20181227165206.pdf?id=ART00098844
65

1-2 ネッカーキューブとは

ネッカーキューブ（別名ネッカーの立方体）とは、立方体の骨格を斜めから見たような形の図形で、前述した多義図形に分類される。この図形は、二次元の図形でありながら三次元の立体のように見える錯視の中でも、最も単純で対称性のある図形の一つであると注目されている。ネッカーキューブは、図 1-2 のように右下の正方形が手前に見えたり、左上の正方形が手前に見えたりする錯視を起こすことが知られている。

図 1-2 の図形をじっと見ていると、二通りの見え方が交互に生じることがわかる。これは、一点を注視する時間が長いとその周囲が見えなくなるというトロクスラー現象（Troxler effect）（図 1-3）によってネッカーキューブの一部が見えなくなるために生じる。また、人は無意識のうちに普段見慣れているものを認識しやすくなる傾向にある。ネッカーキューブが二次元であるのに立体のように見えてしまうのも、普段から立方体は立体であるという認識が習慣づいており、二次元のものとして認識する経験が少なかったためであると言える。

ネッカーキューブに関する先行研究はこれまでに多く行われている。1973 年の科学論文雑誌 *nature* では、歪ませたネッカーキューブ、面に印をつけたネッカーキューブ、傾きのあるネッカーキューブでの研究論文が掲載されており、普通のネッカーキューブだけではなく見えかたに変化があるよう手を加えた上での実験となっている。普通のネッカーキューブは後述する先行研究等で研究されているように知覚交代に法則があるが、この論文のような変形ネッカーキューブでは知覚交代は“起きない・起きにくく、また元に戻る時間が著しく早い”という結論となっている。

科学の世界で非常に権威のある雑誌にも多数取り上げられていることから、ネッカーキューブの研究は非常に意義があるということが言える。

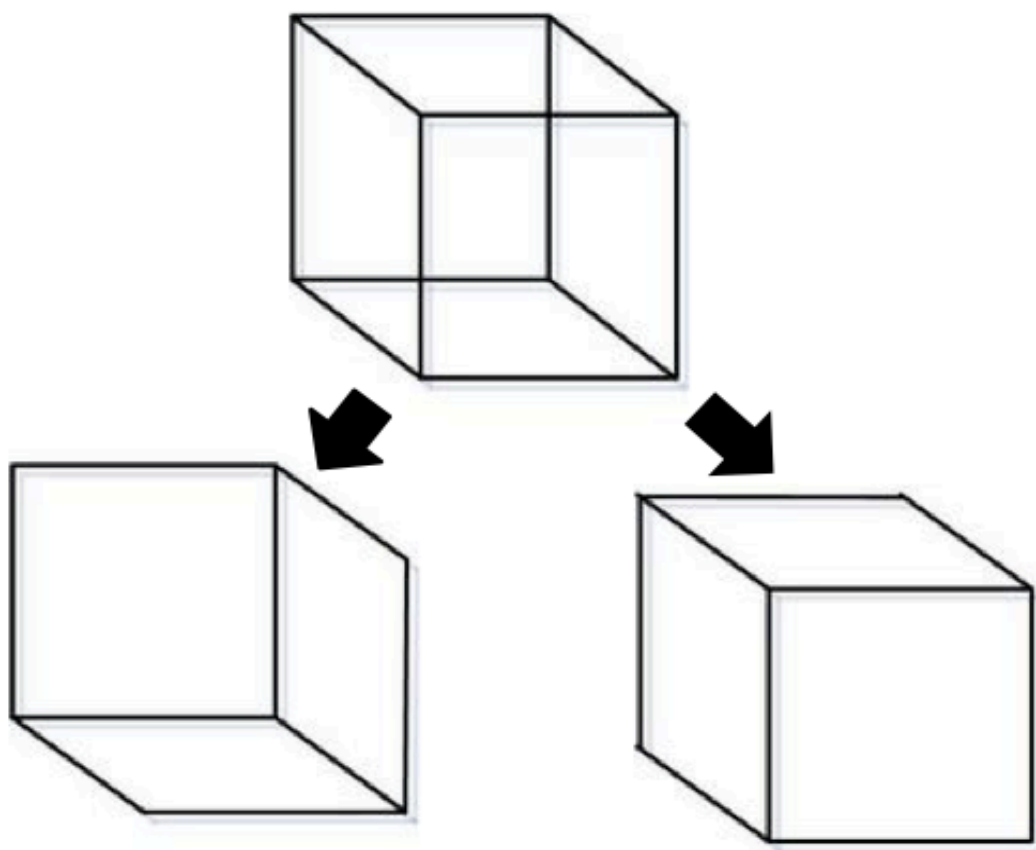


図 1-2 ネッカーキューブとそのふた通りの見え方

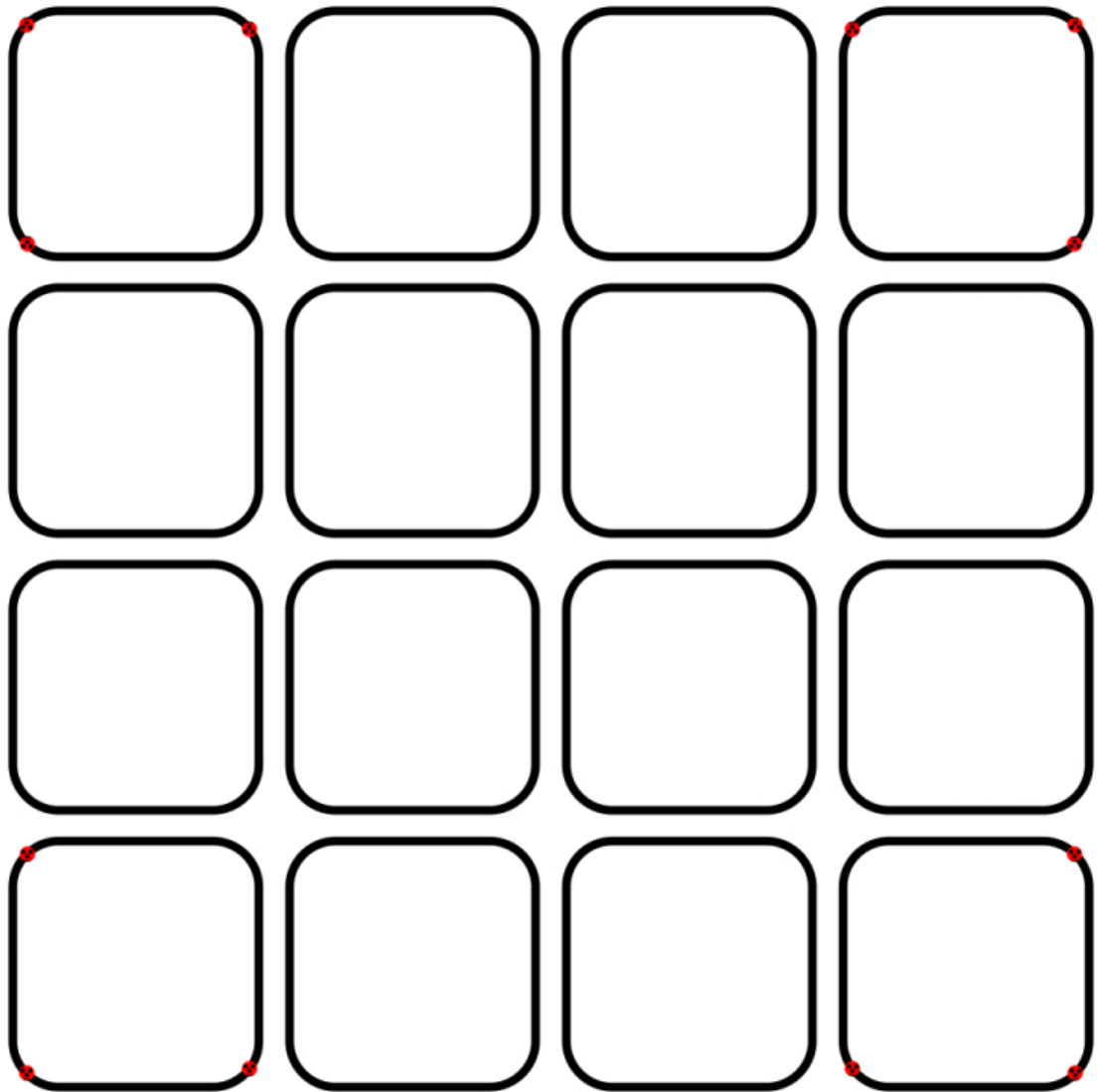


図 1-3 トロクスラー錯視 中央に注目すると、四隅のてんとう虫が見えなくなる
北岡明佳の錯視のページ <視覚的補完の錯視> 消失現象いろいろ より引用
<http://www.psy.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/extinction.html>

1-3 先行研究および仮説

本研究を行うにあたって、同じネッカーキューブの研究を行っている論文[2]を参考にした。この論文では、画面上の静止したネッカーキューブを見て、奥行き知覚が切り替わったタイミングを計測し、その知覚交代時間を求めた、というものである。実験概略の図を図1-4に示した通り、本研究で行っている実験と非常に機構が似ているといえる。

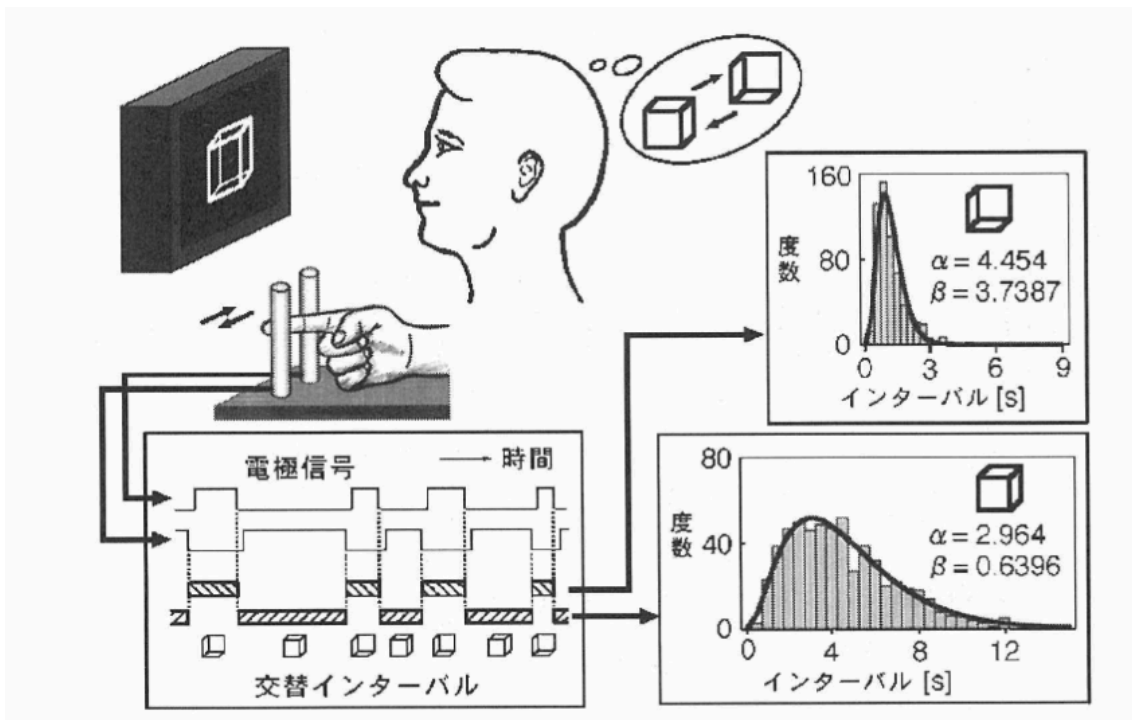


図 1-4 知覚交代の実験の概略

村田勉「視覚的意識のゆらぎの背後にある脳の量子的状態と確率ダイナミクス」

日本神経回路学会誌(2001) 141 ページより引用

この先行研究では、左右の知覚交代時間のヒストグラムは以下のガンマ分布の式によくフィットするという結果となっている。

$$f_{\alpha\beta}(t) = \frac{\beta^\alpha t^{\alpha-1} e^{-\beta t}}{\Gamma(\alpha)}$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx$$

$$(\alpha > 0, \beta > 0)$$

α を変化させていくとガンマ分布の形状も滑らかに変化していくが、 α が自然数の時に限り、そのガンマ分布は一定の確率過程から生じる。単位時間あたり一定の確率 β で独立に生起する確率事象がある時、この確率事象が α 回生じるまでの所要時間の分布がこのガンマ分布に従う。略図を図 1-5 に示す。

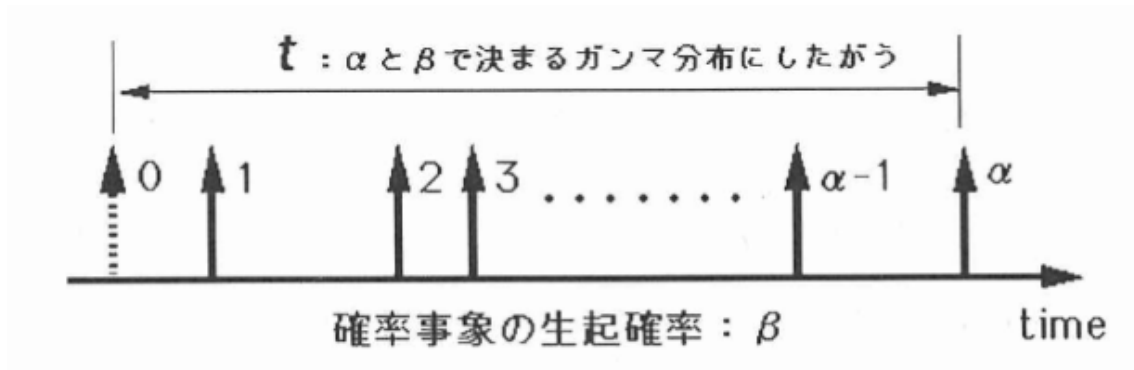


図 1-5 ポアソン過程における確率事象の時間インターバル

また、この式を用いて得られているガンマフィットの値は、下側の面が手前に見えるものが $\alpha=2.964$ 、 $\beta=0.6396$ 、上側の面が手前に見えるものが $\alpha=4.454$ 、 $\beta=3.7387$ となっている。図 1-6 をみると α の値は中央値が 3～4 に集中しており、見え方の種類による依存性が小さいが、 β は有意に依存するとされている。

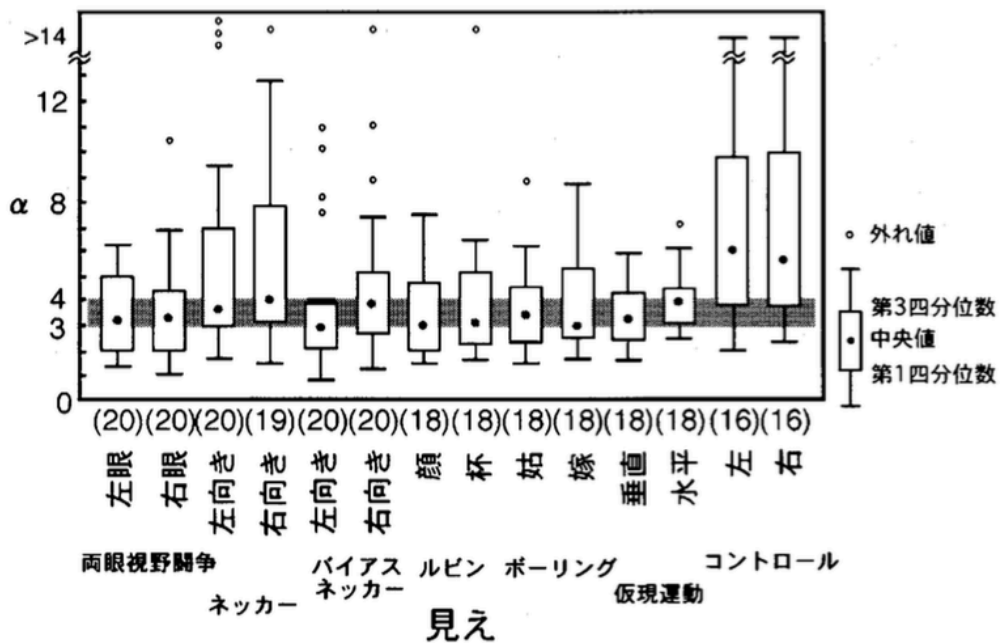


図 1-6 知覚交代インターバルのガンマ分布のパラメータ α の箱ひげプロット

本研究ではこの先行研究に、キューブを回転させること・注視点を加えることでオリジナル性を加えた。この先行研究での結果をふまえて、本研究での回転するネッカーキューブは同じようにガンマ分布に従い、左右で差が出るのではないだろうかと考えた。また、注視点を置くことで奥行き知覚が容易になり、知覚交代に変化が見られるのではないかと期待している。

1-4 本研究の目的

本研究では、このネッカーキューブを用いて錯視が生じる際の脳の神経メカニズムを解明したいと考えている。ネッカーキューブの先行研究はもう既にいくつも行われているが、動く・回転するネッカーキューブの実験は少ない。また、奥行き知覚が起こる脳のメカニズムについてはまだ解明されていない点も多く、ネッカーキューブという物体・現象は多く雨の科学論文で取り上げられていることから、本研究には非常に意義があると考えている。

そこで本研究ではパソコン上でネッカーキューブを回転させ、ネッカーキューブを見たときに起こる奥行き知覚の錯視を定量的に測ろうと考えた。またさらにオリジナル性を加えるため、キューブのサイズを3種類設けた。また、何もないシンプルな立方体と中心に注視点を置いたものの2パターンを用意し、奥行き知覚の変化を期待している。この条件の上で実際に錯視が起こるタイミングを計測し、回転するネッカーキューブの定量化をはかることで錯視という現象の新しい数理モデルを構想することを目的とした。錯視という現象を明らかにすることで、日常に潜む錯視をより有効活用できたり、もしくは危険を少なくすることができると考えている。例えばそれは道路の交通標識をより効果的にさせたり、様々な乗り物の運転手が錯視による危険を回避し、より安全な運転をできるようになるということが期待できる。

2章 実験方法

2-1 測定ソフト作成について

本実験では回転するネッカーキューブを実際に被験者に見てもらうため、3DCGソフトのBlenderを用いてアニメーションを作成した。

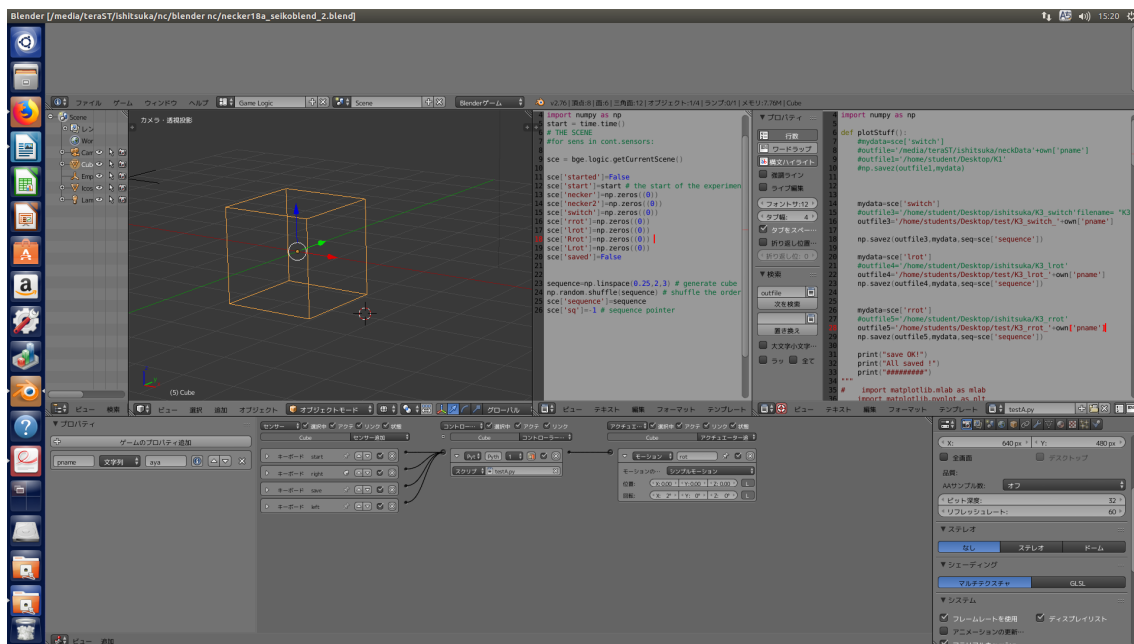


図 2-1 Blender を用いて作成したアニメーションの開発画面

図 2-1 は測定ソフトの開発画面である。画面中央左の枠だけの立方体が本実験で使ったネッカーキューブである。このネッカーキューブを全画面に拡大し、被験者にはネッカーキューブだけが写っている画面を見てもらった。

Blender 内での長さの単位は Blender Unit(BU)で定義されている。立方体の辺の長さは small が 0.25、midium が 1.125、big が 2.0 で作成している。中心に置いてある注視点はキューブのサイズに関係なく 0.1 で作成した。また回転は x 軸方向に 2 度、その速度は 0.01 で定義し、アニメーションを作成した。

2-2 実験手順

最初に練習としてネッカーキューブが回転の様子を見て、左右への回転の切り替わりが見えることを確認してもらう。この練習を行った後、以下に示すキーの説明をしてから実験に移った。

①space キーを押すとアニメーションが開始する。

②最初に回転している向きから回る方向が逆になった時点でその向きと同じ矢印キーを押す（例:右向きに回っている時に左向きに回転が変化したら左矢印、←）。

③左右の矢印キーを合計60回押すと自動で終了する仕組みになっている。また、3つのサイズがキーを20回押すごとにランダムで変化する。

④真ん中に注視点を置いたバージョンで同じ工程を繰り返す。

今回の実験では被験者に対して注視点のあるパターンとないパターンの計2回の計測を行った。また、時間ではなくキーを押した回数によってプログラムが終了するようになっているので、被験者一人一人かかった時間は異なっている。

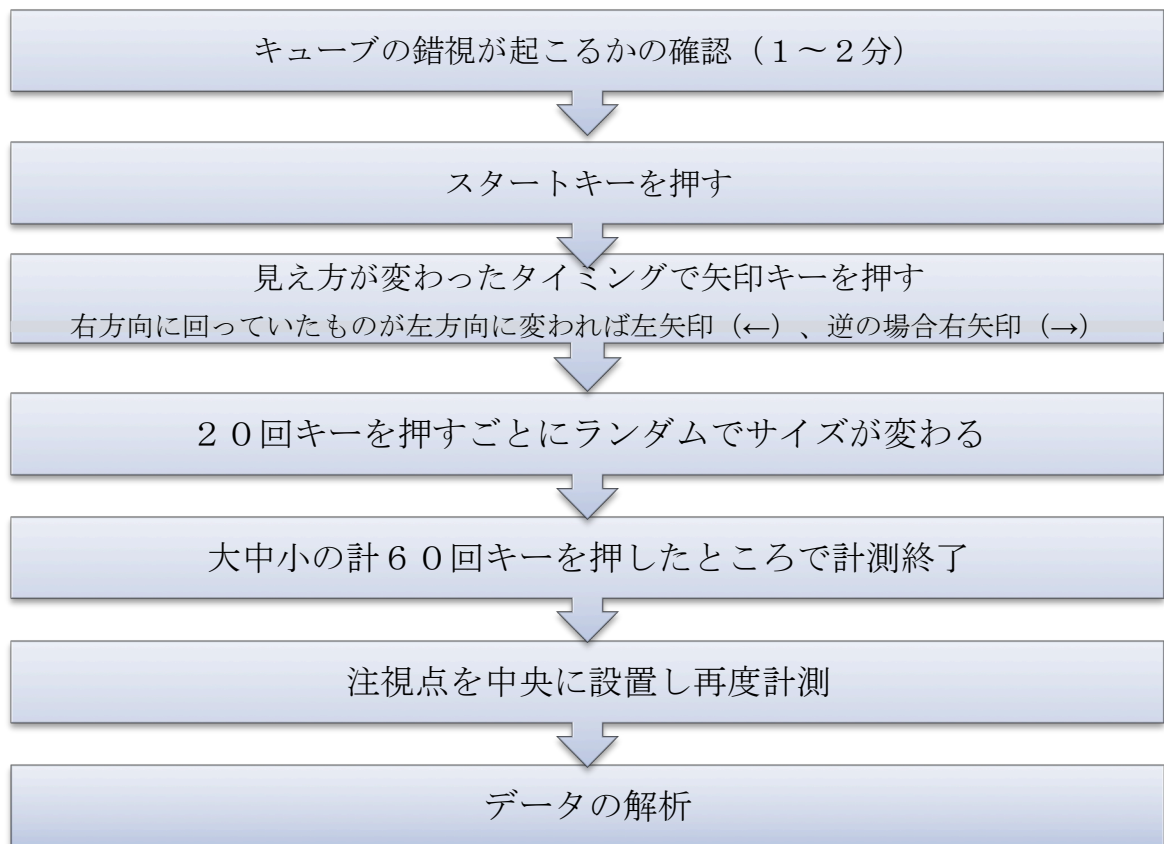


図 2-2 実験内容のフローチャート

2-3 実験パターン

実験では、注視点のある・なしの2パターンの中にさらにそれぞれ大中小のサイズ展開があるため、計6通りのネッカーキューブがある。また、キューブのサイズは異なるが、プログラム上でのキューブの回転速度は一定である。

被験者は大学生・大学院生の晴眼者12名（男性9名、女性3名）を対象に実験を行った。また実験中は会話などをせず、被験者が実験に集中できるようにした。以下の6パターンが実験で使ったネッカーキューブである。

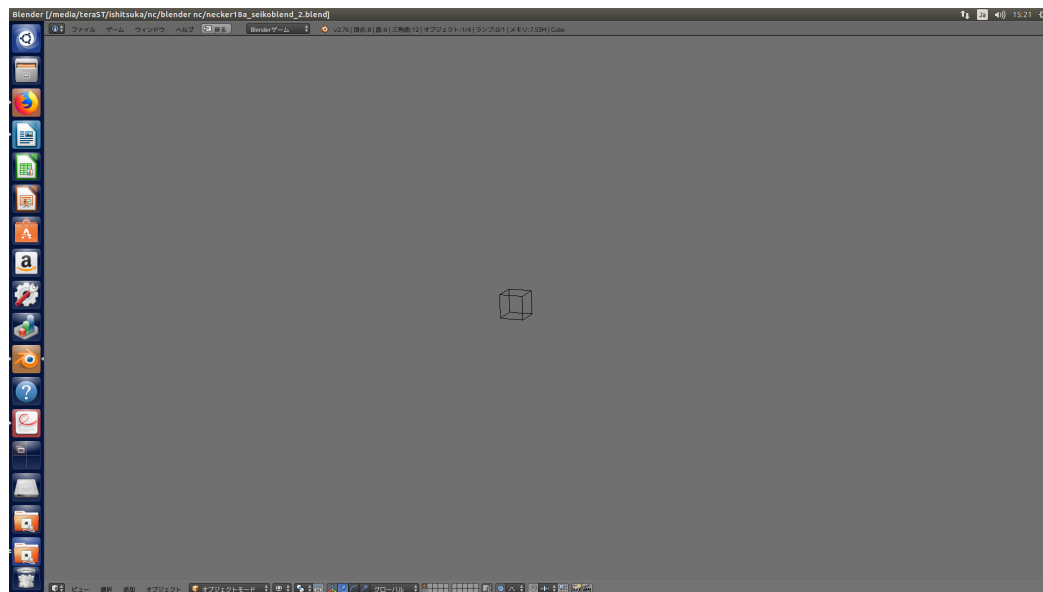


図 2-3 パターン1 注視点なし・キューブ小

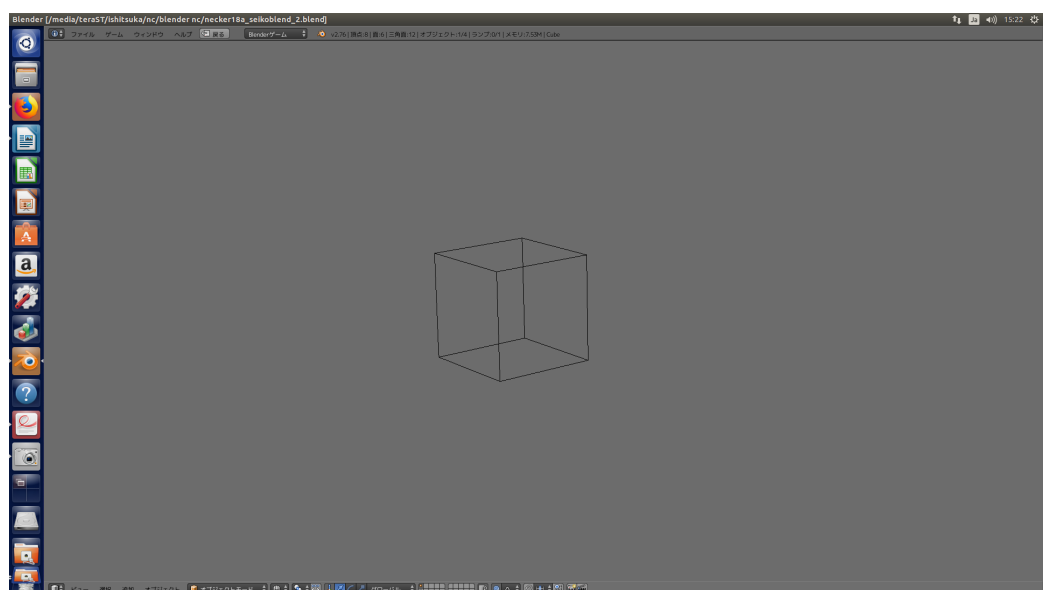


図 2-4 パターン2 注視点なし・キューブ中

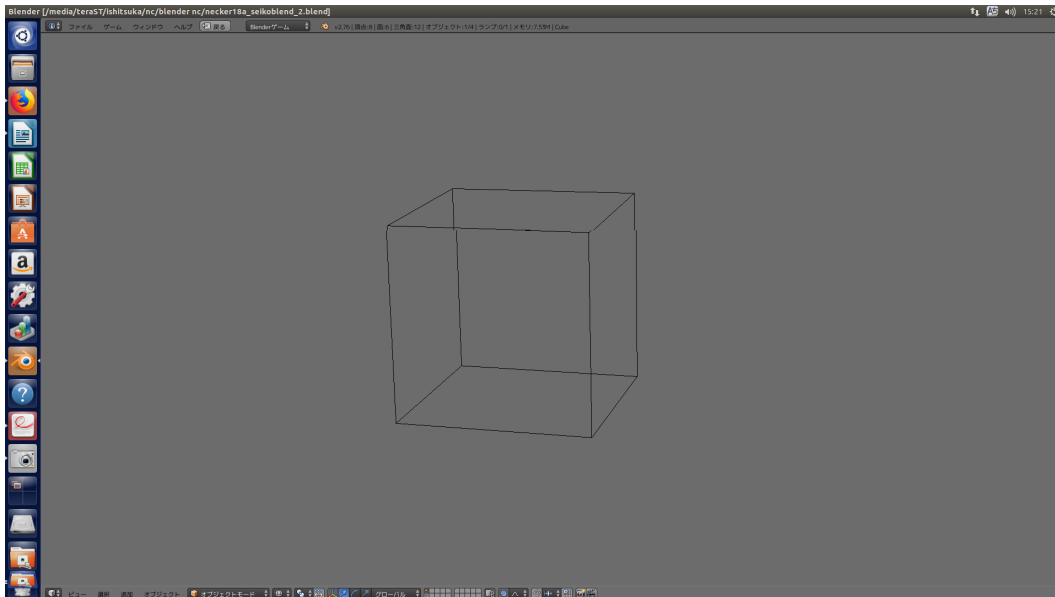


図 2-5 パターン3 注視点なし・キューブ大

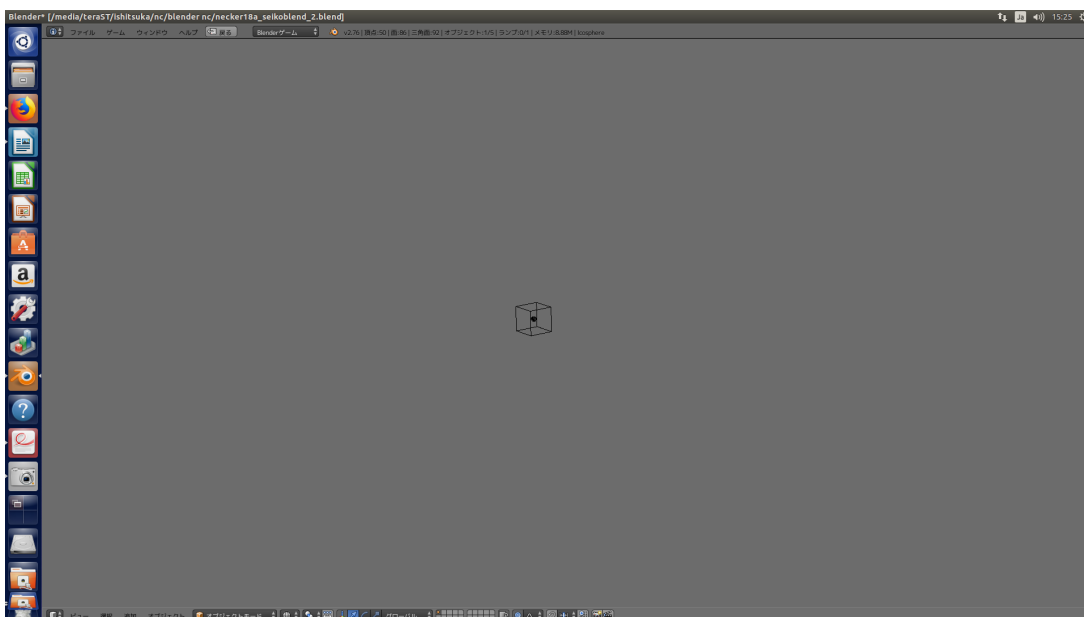


図 2-6 パターン4 注視点あり・キューブ小

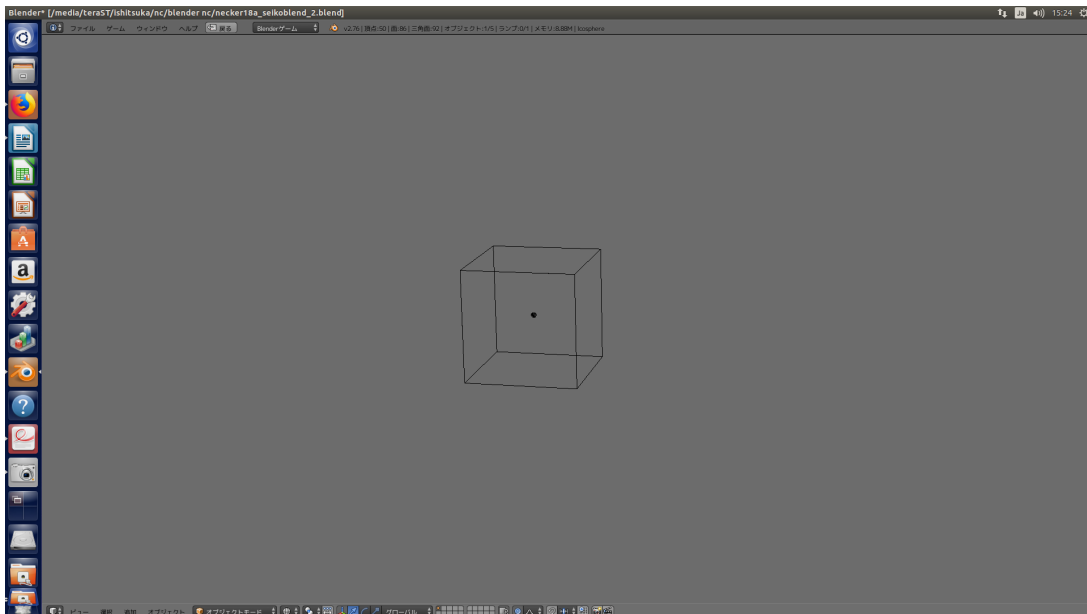


図 2-7 パターン 5 注視点あり・キューブ中

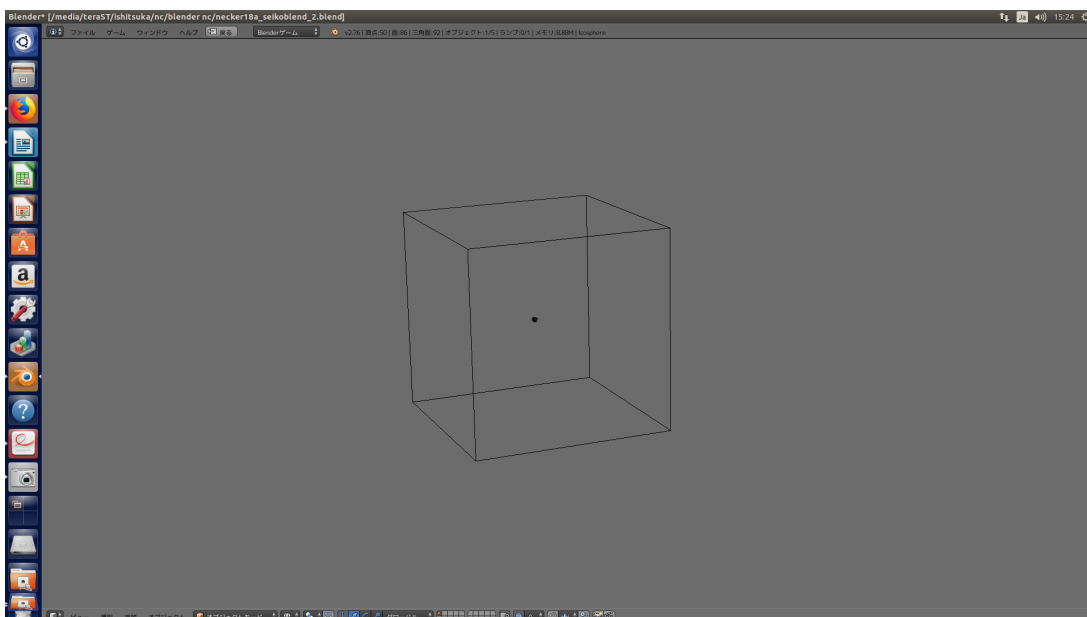


図 2-8 パターン 6 注視点あり・キューブ大

以上の6つのパターンのキューブで計測を行った。注視点のある・なし両方の場合において大中小のサイズの表示される順番はランダムであるので、サイズ間の“慣れ”による差はないと考えている。スペースキーが押されてプログラムが開始した時点を開始点とし、左右の矢印キーが押された時間を記録する。この時間を計測データとし、後述するプログラムで解析を行った。

2-4 解析に用いたプログラム

得られたデータの解析にはプログラミング言語 python を用いてデータの平均化およびそのグラフ化、データの t 検定までを行うプログラムを作成した。プログラム内容の一例を記載する。

```
29
30 def plotMult(dataD, dataND, tt):
31     import matplotlib.pyplot as plt
32     plt.close
33     fig=plt.figure(tt)
34     fig.suptitle(tt)
35
36     plt.subplot(2,1,1)
37     tdata=dataD[0,:]
38
39     from scipy.stats import entropy
40     s=entropy(tdata)
41     print("entropy dot: ",s)
42     import scipy.stats as stats
43     alpha, loc, beta=stats.gamma.fit(tdata)
44     print("Gamma fit:", alpha, loc, beta)
45
46     edges=range(len(tdata))
47     plt.bar(x=edges, height=tdata)
48     plt.xlabel("times (sec)")
49     plt.ylabel("probability")
50     plt.ylim([0, 0.45])
51     avr, std=avgStd(range(len(tdata)), tdata)
52     plt.title(r'Dot, Ave:%4.2g Var:%4.2g'%(avr, std))
53     plt.grid(True)
54
55     plt.subplot(2,1,2)
56     tdata=dataND[0,:]
57
58     from scipy.stats import entropy
59     s=entropy(tdata)
60     import scipy.stats as stats
61     alpha, loc, beta=stats.gamma.fit(tdata)
62     print("Gamma fit:", alpha, loc, beta)
63     print("entropy no dot:", s)
64
65     edges=range(len(tdata))
66     plt.bar(x=edges, height=tdata)
67     plt.xlabel("times (sec)")
68     plt.ylabel("probability")
69     plt.ylim([0, 0.45])
70     avr, std=avgStd(range(len(tdata)), tdata)
71     plt.title(r'No Dot, Ave:%4.2g Var:%4.2g'%(avr, std))
72     plt.grid(True)
73
74     plt.show()
75
```

図 2-8 解析に用いたプログラム画面の一例

このプログラムでは、注視点あり・なしのデータをグループ化し、matplotlib.pyplot を用いて x 軸に時間、y 軸に頻度のヒストグラムのグラフを作成する。

「tdata」を時間のデータとして読み込み、点あり(dataD)と点なし(dataND)で分ける。そこでエントロピーの関数を導入し、tdata に対してのガンマ分布とエントロピーが計算される。その後、range で tdata の長さを全員分平均化し、そこから plt. で始まる文が x 軸を時間(s)、y 軸を頻度として y 軸のメモリの上限を 0.45 としたヒストグラムのグラフをプロットする。またグラフのタイトルの横に平均値、標準偏差が数値として記載される。

3 章 結果

3-1 測定時間の解析

2 章の 3 項で述べたプログラムを用いて、得られたデータの解析を行った。今回実験で得られているデータはプログラムの開始時間を始点とし、キーを押した時間である。キーには左右の矢印の 2 種類があり、左矢印の押された時間・右矢印の押された時間・左右関係なくキーの押された時間の 3 つのデータのまとまりが保存されている。また、今回求めているデータは右回り・左回りに「見えている」時間であるので、キーを押された時間とその次に押された時間の差を取る必要がある。一例として、最初にプログラムが始まった時、右回りにキューブが回転しているように見えたとする。右回りのキューブは左回りに変化するので、最初に押されるキーは左矢印である。このようにして左右の差を求めた時、(右矢印キーの押された時間-左矢印キーの押された時間=左回りに見えている時間)、(左矢印キーの押された時間-右矢印キーの押された時間=右回りに見えている時間) である。

また、1 章で述べたように先行研究では、知覚交代のヒストグラムがガンマ分布によくフィットするという結果となっており、その **alpha** と **beta** の値が結果として算出されている。そこで本研究でもヒストグラムに対するガンマフィットの値を算出した。用いたプログラムを以下に記す。

```
def pHistAndGamma(o,edgs,ht,raw,ttmsg):
    # help do plot the histogram and the gamma fit
    # "o" is the matplotlib object
    tdata=ht/ht.sum() # the histogram normalized
    from scipy.stats import gamma
    alpha,loc,beta=stats.gamma.fit(raw,3000) # the gamma fit INITIAL CONDITIONS
    print("gamma fit %s: " %ttmsg,alpha,loc,beta)
    o.bar(x=edgs[:-1],height=tdata) # the histogram
    x=linspace(0,edgs[-1:],100) # creates the x of the pdf plot
    gm=gamma.pdf(x,alpha,loc,beta)
    o.plot(x,gm,'rx')
    o.xlabel("times (sec)")
    o.ylabel("probability")
    avr,std=avgStd(range(len(tdata)),tdata)
    from scipy.stats import entropy
    s0=entropy(ht) # smalls
    o.title('%s, Ave:%4.2g Var:%4.2g entropy:%4.4g \n Gamma Parameters alpha: %4.2g loc: %4.2g beta: %4.2g' % (ttmsg,avr,std,s0,alpha,loc,beta))
    o.grid(True)
```

図 3-1 ガンマフィットを計算するプログラム

以上のことを踏まえて、プログラムで計算した結果のグラフを下に記していく。
 グラフの横軸は知覚交代の時間、縦軸に頻度がプロットされている。また各ヒストグラムのタイトルの隣には t 検定を行った際の T 値と p 値が記載されており、グラフ上部には Ave (平均値)、Var (標準偏差)、entropy(エントロピー)、ガンマフィットの値が記載されている。

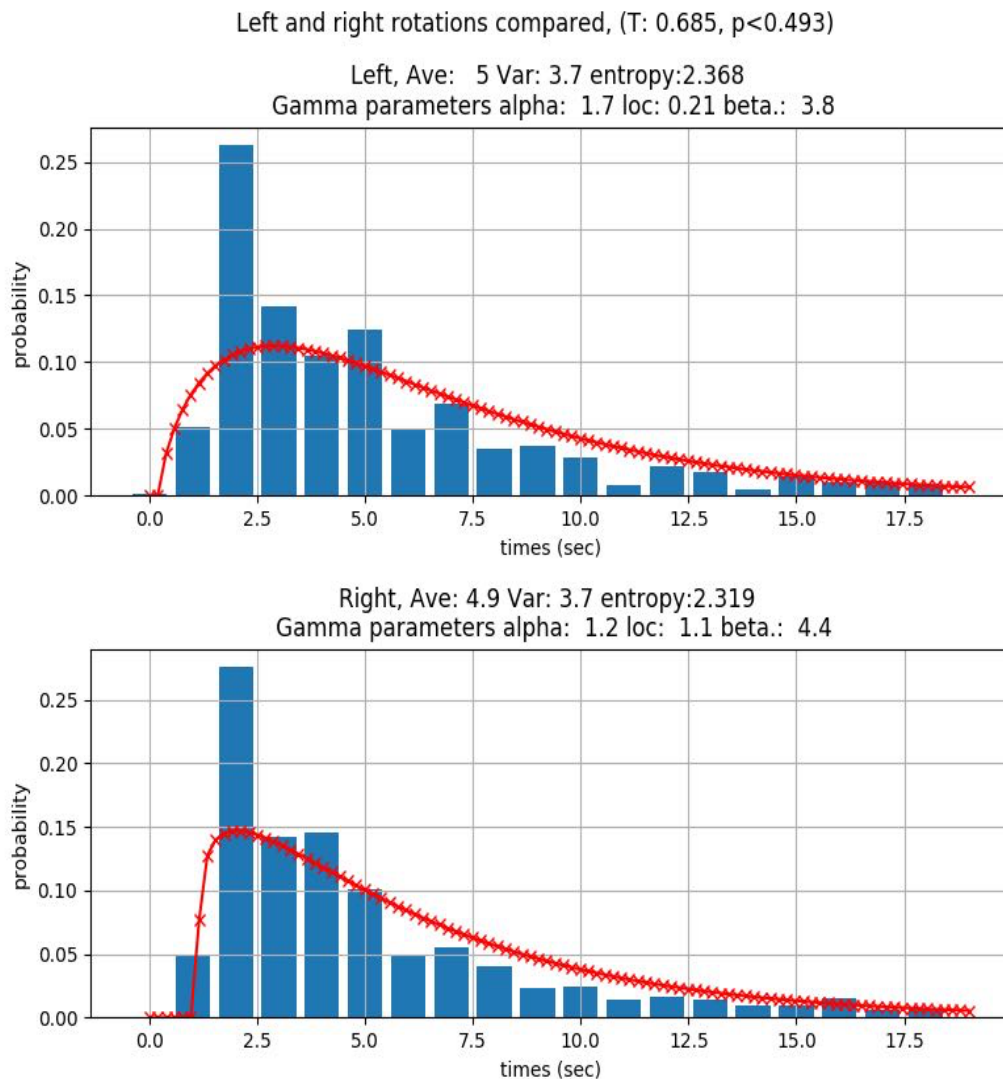


図 3-2 左回りに見えている時間(上)と右回りに見えている時間(下)のヒストグラム

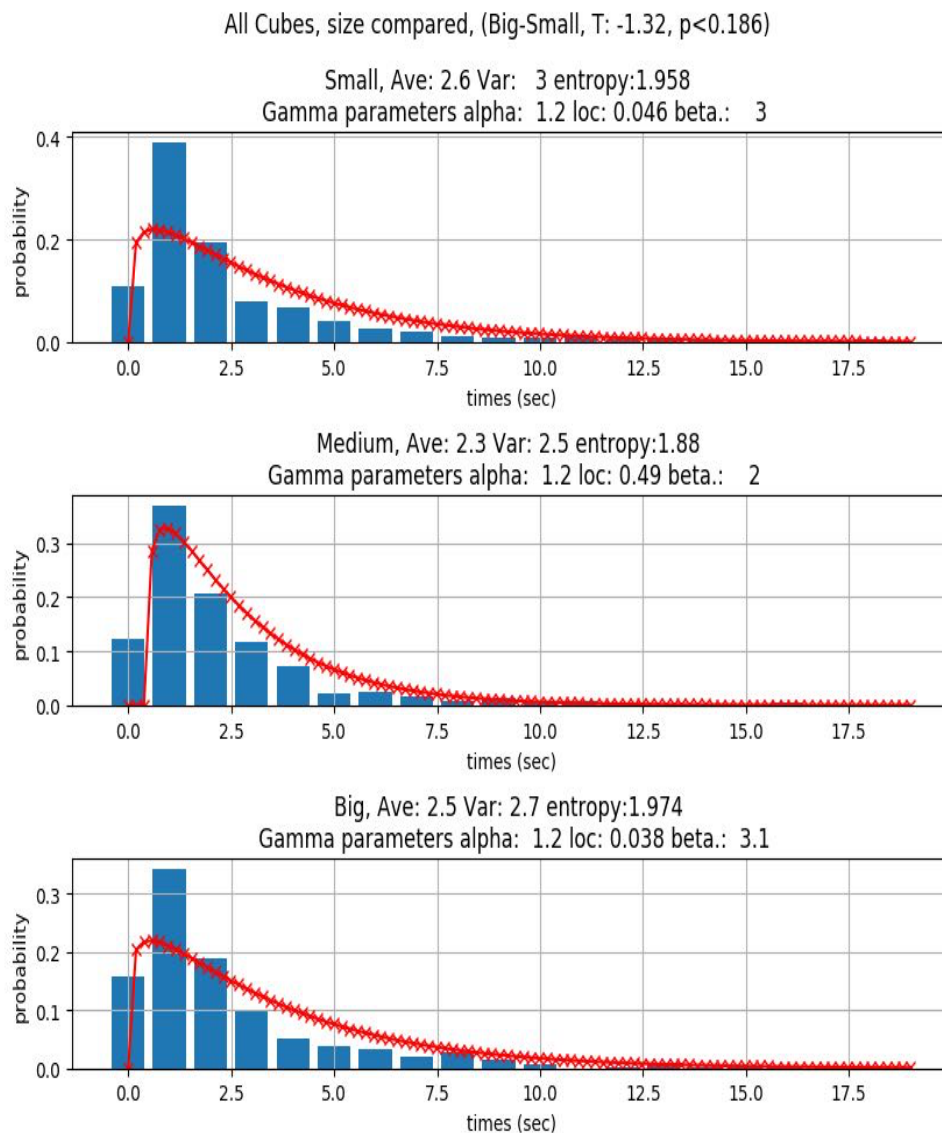


図 3-3 サイズが大、中、小のキューブのヒストグラム

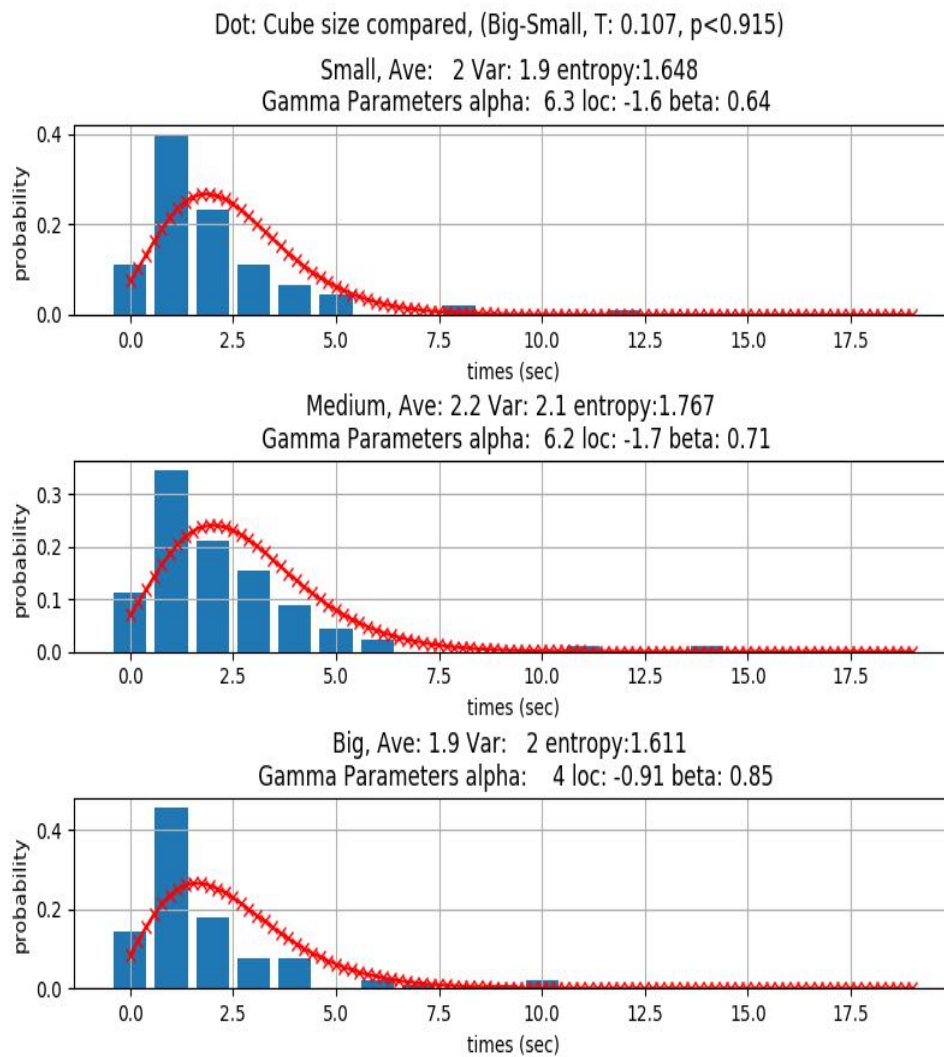


図 3-4 注視点があるネッカーキューブにおける、キューブのサイズが大中小のヒストグラム

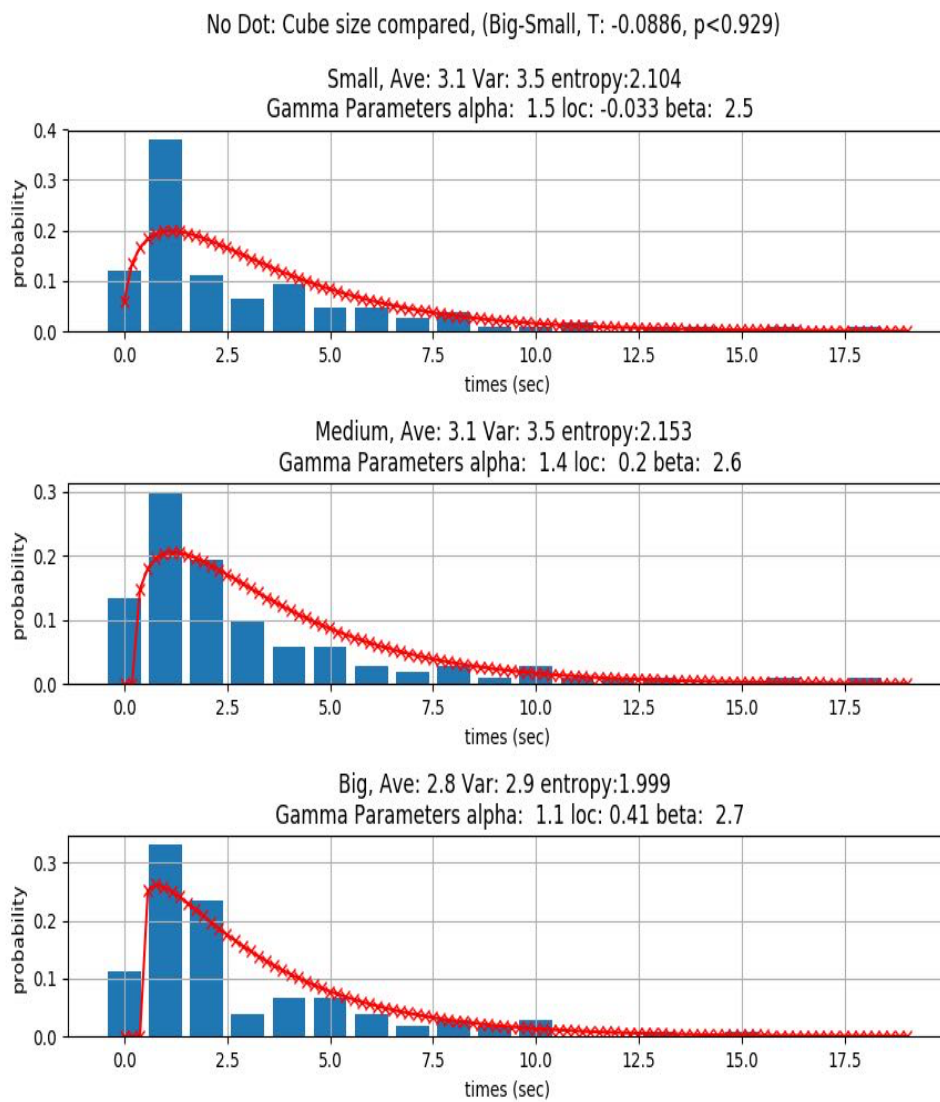


図 3-5 注視点のないネッカーキューブにおける、キューブのサイズが大中小のヒストグラム

All Cubes, Dot presence compared, (Dot-No Dot, T: -5.59, $p < 2.76e-08$)

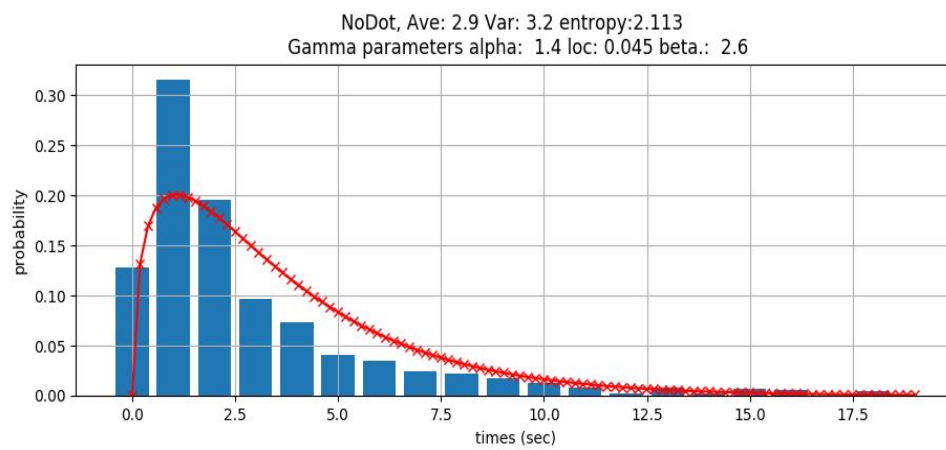
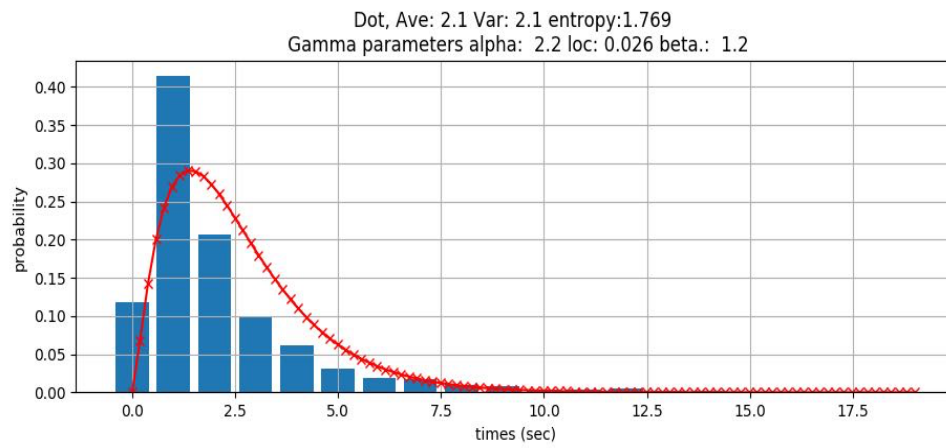


図 3-6 注視点のある、なしによるヒストグラム

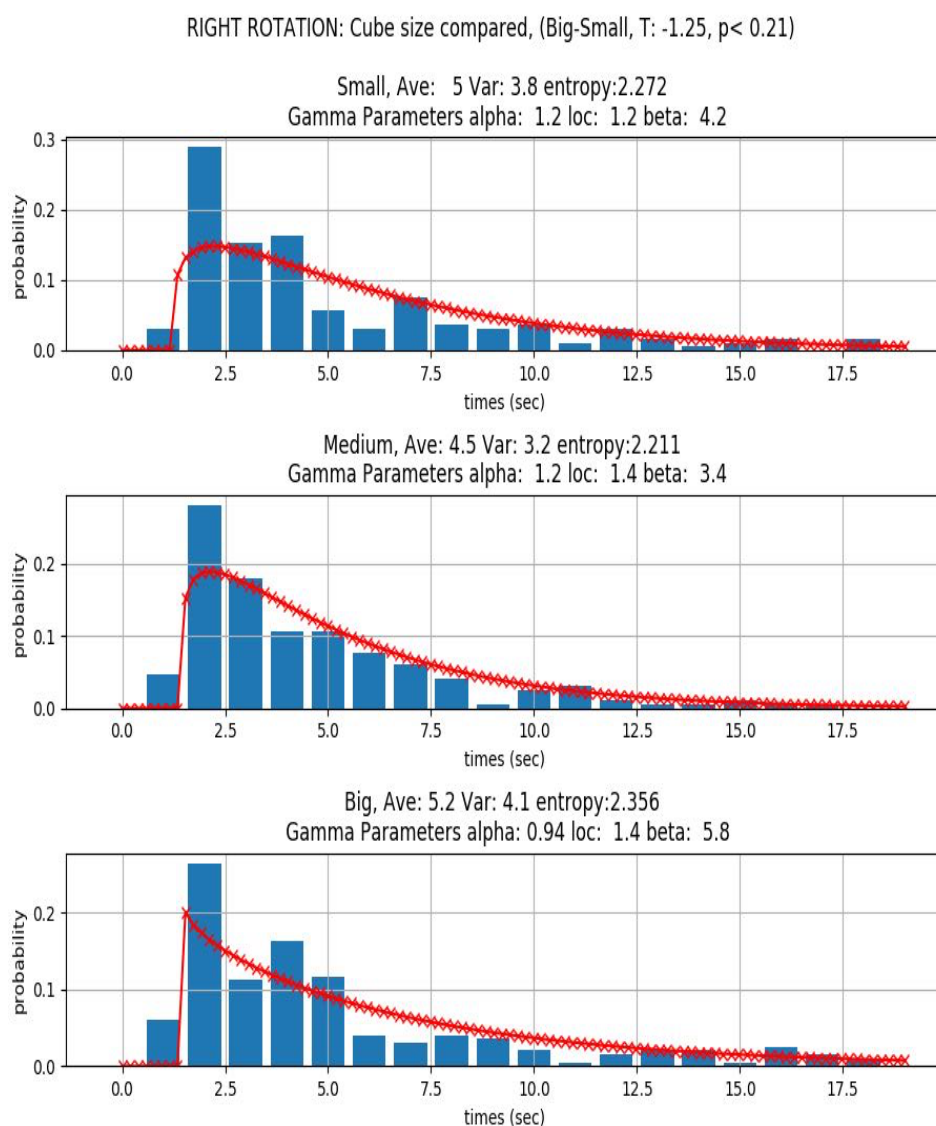


図 3-7 右回りに見えている時におけるキューブのサイズのヒストグラム

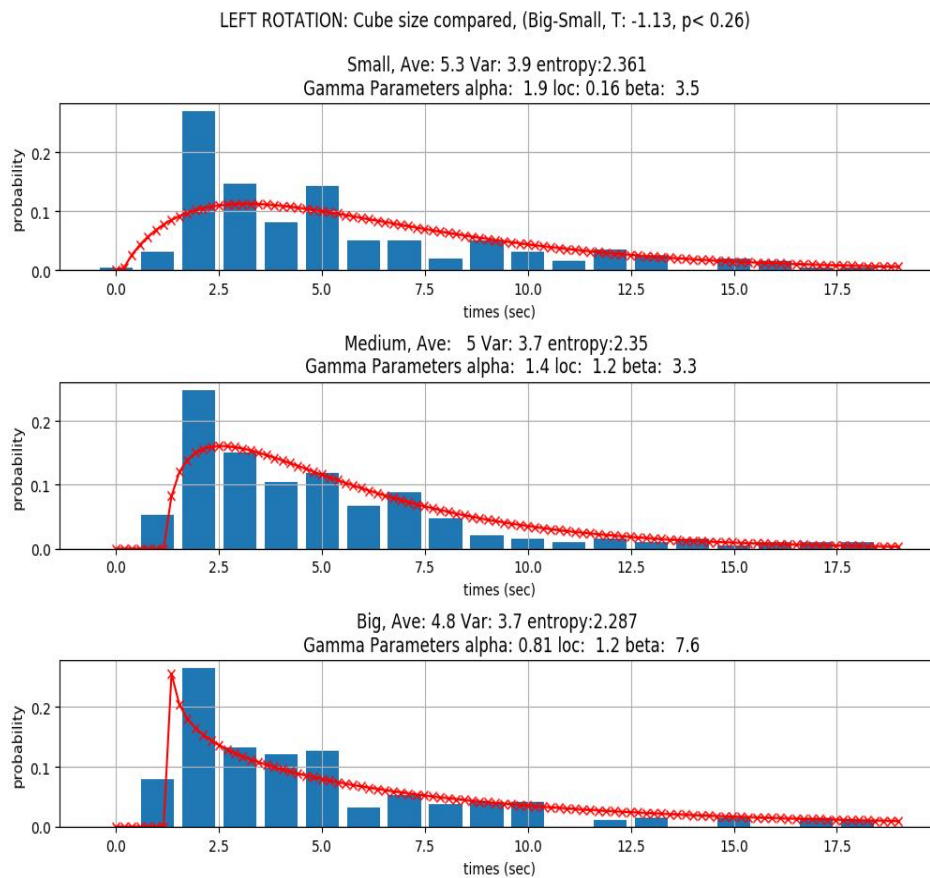


図 3-8 左回りに見えている時におけるキューブのサイズのヒストグラム

p 値 <0.05 である時に有意差があるとするので、今回のデータの中で有意差があるといえるものは図 3-5 の点のある・なしでのグラフのみであった。

また、注視点のあるグラフは全て α の値が β よりも大きい、その他のグラフは β の方が大きい値を取っている。

4 章 考察

図 3-2 のデータからは、左右それぞれの見えている時間に有意差はないことがわかる。これは実験前に立てた仮説と大きく異なった結果となった。エントロピーにも大きな変化がなく、奥行き知覚による左右の差はほぼないといえる。そのため、本研究で得られたデータは先行研究で導かれているキューブの奥行き知覚のガンマ分布には沿っていない。これは今回ネッカーキューブに加えた“回転”という動きが大きく関係していると考えられる。キューブが回転することで、静止画では存在しない線と線が重なる瞬間が一定のタイミングで現れる。この線と線の重なりで被験者は奥行きを判断し、見え方が切り替わりやすくなったことで左右の差がなくなったと言える。このことから、 x 軸方向に回転しているネッカーキューブは左右に見えている時間が同じになる。

有意差が見られたヒストグラムは、図 3-6 のみであった。各エントロピーは注視点ありがエントロピーが小さく数値は 1.7、注視点なしが大きく数値は 2.1 と、大きく差が付いている。図を見るとグラフの形は似通っているものの、1(s)付近において点があるものの方が度数が高く、要素が集中している。また、1(s)という短いインターバルの数字に差が出ていることから、注視点があるものは知覚交代時間が早くなっているといえる。このことから、注視点があることで奥行き知覚が容易になり、短い時間で知覚交代が起こるようになっていたと考えた。

次に図 3-4 と図 3-5 について考察する。図 3-4 は注視点のあるネッカーキューブでのサイズによる違い、図 3-5 は注視点のないネッカーキューブでのサイズによる違いである。図 3-4 では **small** のグラフが知覚交代時間が短く、**big** ではやや長くなっていることがわかる。それに対して、図 3-5 では有意差はあるものの知覚交代時間の傾向などの細かい違いは見られず、全体的にまばらになっているというグラフになっている。それぞれのエントロピーを見てみると、同じ図中でのエントロピー変化は大きくないものの、注視点ありのグラフのエントロピーは注視点なしに比べて小さく、ばらつきが少ない。このことは 1 章で述べたトロクスラー錯視に関わっているのではないかと考察した。注視点があるとその点、つまり中心に集中しやすく、図 1-3 でいう四隅が見えにくくなり、錯視が起こりやすくなる。頻繁に錯視が起こるということは、安定した時間で奥行き知覚が切り替わっているといえるので、エントロピーが小さくなっていると考えた。その他の要因として、注視点との大きさの関係があると考えている。2 章で実際のネッカーキューブの写真を載せているが、キューブのサイズが変化しても注視点の大きさは変化しない。そのため、**small** のキューブではキューブに対しての注視点

が大きく、影響を受けやすかったのではないかと考えられる。

本研究の反省点として、被験者数や試行回数が少なかったことと、左右のキーボードを交互で押している時に、被験者が間違えて左右逆であったり二回連続で同じキーを押している可能性があることが挙げられる。二回連続でキーを押してしまった時はそのデータを削っているので、間違えた分データが少なくなってしまう。改善方法として、被験者を増やすことと、キーを間違えないよう分かりやすく設定することが挙げられる。

5章 まとめ

奥行き知覚の変化による錯視の情報を定量化するために被験者12人に対してネッカーキューブを用いた研究を行った。実験には、3種類のサイズで回転するネッカーキューブおよび中心に注視点のある回転するネッカーキューブを作成し、使用した。その結果、仮説とは大きく異なる、右方向に回転しているように見えている時間と左方向に回転しているように見えている時間には有意差がないという結果となった。このことから、静止画では起こらないキューブの線と線の重なりが、回転するキューブでは一定のタイミングで起こり、それが安定的な見え方を引き起こすと考えた。

また、注視点の有無において有意差が見られることがわかった。この注視点のあるものとないものに注目すると、注視点があるものは、注視点がないものよりもエントロピーが小さくなっていた。このことから、注視点があることで視線が安定し、一定のタイミングで知覚交代が起こりやすくなると考察した。また、3種類のサイズは注視点のある際にサイズによってはトロクスラー錯視を起こすほか、注視点の大きさとの兼ね合いで見え方が変化した。

今回の実験の反省点として、被験者数が少なかったことでデータ一つの比重が大きくなってしまったこと、キーの押し間違いによるデータの損失が考えられること、被験者一人一人の見えやすさに大きくばらつきがあったことなどが挙げられる。改善点として、被験者を増やすこと、間違いにくい左右のキーの分け方を検討することなどが考えられる。

注視点の存在が奥行き知覚に大きな影響を及ぼすということは、日常において利用が可能である。無意識のうちに集中する点があることで奥行きを判断しやすくなれば、乗り物の運転で奥行き知覚の誤認でスピードを出しすぎたり事故になるのを防げたり、映像を正しく認識できることでテレビ・映画界に新しい技術が生まれることが期待される。

6章 謝辞

本研究を行うにあたって、ルジェロ・ミケレット先生には研究内容からテーマ決め、発表スライドの添削、卒業論文に関してなど非常にお世話になりました。深く感謝いたします。

また、多くのアドバイスをいただいた研究室の先輩方、切磋琢磨してくれた同期の皆様にも感謝いたします。

最後に、忙しい中時間を割いて研究に協力していただいた皆様、本当にありがとうございました。

関わってくださった全ての方々に感謝の意を示し、謝辞といたします。

7章 参考文献

- [1]北岡明佳 (2013) 「だまされる視覚」,pp14-23,化学同人.
- [2]村田勉、柳田敏雄 (2001)「視覚的意識のゆらぎの背後にある脳の量子的状態と確率ダイナミクス」, pp139-146,日本神経回路学会誌.
- [3] 奥村和則 (2008)「発散的創造技法を用いた空間補完モデルの研究」, 岐阜市立女子短期大学(55).
- [4] J.MASON, P.KASZOR, C.BOURASSA (1972) 「Perceptual Structure of the Necker Cube」, pp.54-56, NATURE VOL.244 ,(1973) .