

Title	オブジェクト知覚の解明を指して:運動錯視の実験的検討
Author(s)	小山, 俊太
Citation	
Issue Date	2020-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/17566">http://hdl.handle.net/10119/17566</a>
Rights	
Description	Supervisor:日高 昇平, 先端科学技術研究科, 修士(知識科学)

修士論文

オブジェクト知覚の解明を目指して：運動錯視の実験的検討

小山 俊太

主指導教員 日高 昇平

北陸先端科学技術大学院大学  
先端科学技術研究科  
(知識科学)

令和2年3月

## Abstract

What does it mean to see things in our daily lives? Unlike a camera, in the human visual processing, the pattern of light reflected from an object is not just processed as an array of pixels, but supplemented and inferred from the environmental contexts and our own knowledge. As a result, even the processing of pixelwise “same” stimuli can be different, depending on the context. For example, in a widely known "Rubin's Pot", which is a figure that has two areas colored black and white, different interpretations are made for the same figure depending on which of the two areas is perceived as a “figure” or “ground”. Such figures are a type of illusions called “ambiguous figures”.

Wertheimer sought to provide an explanation for the interpretation of illusions and ambiguous figures in an "experimental study of motion vision" (Wertheimer, 1923). At that time, he attempted to formulate the motion illusions using a rule called the Prägnanz (German word for terseness, or simplicity) rule, but failed to do so (Marr, 2003). In line with the work of Wertheimer, we aim to explain the human visual perception using a motion illusion as our means. As an example of a motion illusion, let us explain a well-known example of an apparent motion. When there are two light spots set apart in the space-time and these two spots blink alternately at different times, people perceive the movement of one dot, by interpreting the two light spots as one (Sato, 1991). In this phenomenon, two light spots are not treated individually, but are perceived as one, by associating the two. In our study, we call things that are not perceived only by partial features but perceived by its wholeness as "objects".

In a study on ambiguous figures, Hidaka and Takahashi (2019) gives an explanation of the illusory phenomenon of perceiving the non-existent direction of movement, using an example of an ambiguous figure called “Barberpole (a barber's sign pole)

illusion". Barberpole illusion is defined by Hidaka and Takahashi (2019) as "the perception of the motion of a straight line that occurs when looking at a straight line moving from a window on a two-dimensional plane." As an explanation of the barberpole, these authors claim that translation that associates a certain line in space and time with a line after time change is an interpretation of perception (Hidaka and Takahashi, 2019). In the case of barberpole, a certain point in a space is associated with the line after the change of the time, but since the line is a set of points, the theory can be applied to the interpretation of other ambiguous figures that are seemingly different from Barberpole illusion.

Based on this observation, we hypothesized that the correspondence of points gives an interpretation of the perceived motion of an ambiguous figure, and made a prediction concerning the perceived motion of an ambiguous figure called "slit illusion". The slit illusion occurs, for example, when observing the sunlight through the background of the tree through a gap with a certain width. In this situation, if you move your neck left and right, the difference in the width of the grid will cause the moving speed of the object consisting of a part of the background to change. It is a phenomenon that is perceived at a speed different from the neck movement speed. To explain this phenomenon, we predicted that in the slit illusion the perceived speed may be different depending on the width of the grid.

We tested this prediction by the experiment that involves the human participants. In the experiment, we investigated the change of perceived speed depending on the width of the grid of the slit illusion, and obtained results consistent with the prediction. In other words, it was suggested that the interpretation of perceived movements of an ambiguous figure is caused by the correspondence of points. The Barberpole illusion introduced earlier was an ambiguous figure that changes perception depending on the direction of movement, but the slit illusion

that we employed is an ambiguous figure that changes the speed of movement. Since motion is determined by speed and direction, it may be possible to use our theory to give explanations to the interpretation of other ambiguous figures.

# 目次

第1章 はじめに .....	1
1.1 研究の背景と動機 .....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 研究方法.....	4
1.4 論文の流れ.....	5
第2章 運動知覚の説明 .....	6
2.1 多義図形の解釈についての仮説.....	6
2.2 スリット錯視において知覚される運動.....	8
2.3 スリット錯視における知覚される速度変化の予測 .....	10
第3章 スリット錯視を用いた実験と評価.....	12
3.1 実験環境と手順.....	13
3.2 実験結果.....	15
3.3 実験結果解析 .....	20
3.3.1 4つの要因との知覚される速度の相関関係について.....	20
3.3.2 4つの要因と知覚される速度の分散分析.....	21
3.3.3 4つの要因の知覚される速度の重回帰分析 .....	21
第4章 総合議論 .....	29
4.1 研究目的と実験結果から明らかになったこと .....	29
4.2 今後の課題.....	29
第5章 結論 .....	30

# 目次

図 1	ルビンの壺, .....	1
図 2	時空間上に分布した点のグルーピング .....	2
図 3	窓越しに観察する時空間上の点の分布 .....	4
図 4	スリット錯視における時空間上の点の対応付け(条件 1) .....	7
図 5	スリット錯視における時空間上の点の対応付け(条件 2) .....	7
図 6	スリット錯視における時空間上の点の対応付け(条件 3) .....	8
図 7	遮蔽領域があるとき, ないときのスリット錯視のモデル .....	9
図 8	スリット錯視における時空間上の点の対応付け .....	10
図 9	スリット錯視の各要因について .....	12
図 10	実験で画面に提示した刺激 .....	14
図 11	実験環境と実施の様子 .....	15
図 12	背景の速さと知覚される速度の関係 .....	16
図 13	背景の速さと知覚される速度の関係 .....	17
図 14	背景の速さと知覚される速度の関係 .....	18
図 15	遮蔽領域の幅が小さい刺激 .....	19
図 16	背景速度と見かけの速度の関係 .....	20
図 17	見える領域と知覚される速度の関係(遮蔽領域=0.16cm のとき).25	
図 18	見える領域と知覚される速度の関係(遮蔽領域=0.32cm のとき).26	
図 19	見える領域と知覚される速度の関係(遮蔽領域=0.65cm のとき).27	
図 20	見える領域と知覚される速度の関係(遮蔽領域=1.3cm のとき)...	28

# 表目次

表 1	4つの統制要因と値 (水準) .....	13
表 2	4 要因を用いた分散分析の結果 .....	21
表 3	4 要因の分散分析の結果：交互作用について .....	22
表 4	4 要因の重回帰分析結果のまとめ .....	23

# 第1章 はじめに

## 1.1 研究の背景と動機

我々が、日々の生活でモノを見るとはどういうことなのか。カメラのように、モノから反射した光のパターンをセンサーで画素の配列として記録しているわけではない。カメラとは異なり、同じモノの処理が異なる場合があり、結果として知覚に違いが生じていると考えられる。例えば、図1の「ルビンの壺」とのように白い領域を“図”として知覚することで、それ以外の領域は“地”として知覚される、このとき図形には壺が描かれているよう解釈される。一方で、黒い領域を“図”として知覚したとき、それ以外の領域は“地”として知覚され、この図形には向かい合う人の横顔が描かれているよう解釈される。つまり、図形は全く変化していないが、人がどの領域を“図”として知覚するかにより、2つ以上の解釈をすることができる曖昧性を持っている。このような図形は多義図形や多義図形と呼ばれる錯視の1種である。

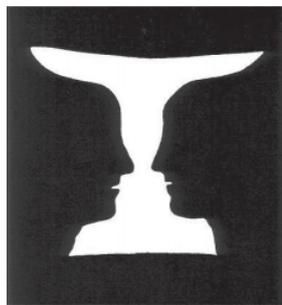


図1 ルビンの壺,  
出典：山田(2010)

人は単純にモノの情報を記録しているわけではない。人の視覚的情報処理は、網膜の感覚神経を通じた情報を脳で統合し、何らかの推論によって成立すると考えられている(Marr, 1982)。これはヘルムホルツの無意識的推論と呼ばれる。人は外界からの情報を視覚、聴覚、嗅覚など複数の受容器の情報を組み合わせることで、外界の対象を推論している。我々は、視覚のメカニズムを解明することができれば、多感覚の間の情報がどのようにして関連付けられているのかというマルチモーダルの研究にもつながるだろうと考えており、本研究では視覚について取り扱う。

また、人が持つ受容器の中で、外界から最も多くの情報を得ているとされるのが視覚である。モノを認識するとき、網膜から得た視覚像のパターンは視神経を経て大脳皮質の一次視覚野に伝えられる (Kato, 2004)。その際、人は部分的なパターンだけを知覚するだけではなく、パターンのあつまりをその全体として知覚する特徴 (ゲシュタルト知覚) をもつと考えられる (Nimi, 2016)。ゲシュタルト心理学の第一人者である Wertheimer は、「運動視に関する実験的研究」から、錯視や多義図形の解釈を説明しようと試みた (Wertheimer, 1923)。そのとき、要素に還元できない全体性を持つ対象は「最も規則的で、秩序ある安定した形態」として知覚することを示し、これを *Prägnanz* (プレグナンツ：簡潔さ) の法則と呼んだ (Wertheimer, 1923)。*Prägnanz* の法則には、The Principle of Proximity (近接の要因)、The Principle of Similarity (類似の要因) など、いくつかの要因がある。例えば、図 2 のように時空間上に点がいくつか並んでいるとき、人は主観的にペアなどをつくりだし、まとまりを知覚する (これはグルーピングとも呼ばれる)。多くの人は、近くの点同士をまとまりとして捉え、離れた場所にある点同士はまとまりとしては知覚し難いだろう (Stevenson, 2012)。

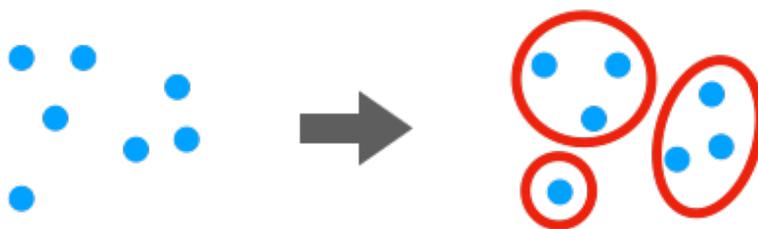


図 2 時空間上に分布した点のグルーピング

*Prägnanz* の法則は、一見ゲシュタルト知覚について説明しているように思われた。しかし、「最も規則的で、秩序ある安定した形態」とは、何を基準にして安定であると判断するかが曖昧で、厳密に決定するのは困難であるとされた。また、また、知覚する対象にどの要因を適応させているのか、その過程についての概念がないことなどが指摘されたため (Kanizsa, 野口薫 監訳, 1985)、定式化には至らなかった (Marr, 2003)。

そこで、我々は錯視を例として、運動の知覚について、説明することを目指す。運動を知覚する錯視とは、例えば、時空間上に離れて設置された 2 つの光点があるとき、この 2 つの点を交互に点滅させる。人は 2 つの光点を同一の点であると認識することで、1 つの光点の運動を知覚する仮現運動などがある (佐藤, 1991)。

この現象では、2つの光点を個別に認識しているわけではなく、2つの光点の間を対応付け、2つの光点を同一視することで1つのまとまり(全体)として知覚していると考えられる。本研究では、このように部分的特徴だけでは捉えず、全体性によって知覚される対象を「オブジェクト」と呼ぶ。

人の視覚系を外界から情報が入力され、脳で統合された情報に推論を行った結果の知覚を出力とする情報処理過程であると仮定する。このとき、仮現運動の例で示した、時空間上の離れた場所にある2つの光点の対応付けについても少し検討してみる。離れた場所にある2つの光点ではなく、2つの平行な直線 a, b 上に配置された光点が、それぞれ  $n$  個ずつあるとする。直線 a 上の全ての光点、と直線 b 上の全ての光点を交互に点滅させるとき、人は直線の運動を知覚するだろう。この場合、全ての直線 a 上の光点と全ての直線 b 上の光点の間を対応づけることで、点ではなくまとまりとして知覚していると考えられることができる。このとき、人は情報処理のコストを下げるために、直線 a 上の1つの光点と直線 b 上の1つの光点の間の対応付け方を考え、他の点の間でも同じ対応付け方をしているとみなせば、情報を圧縮することができる。我々は、視覚系の情報処理について、コストを下げるような処理が行われていると考え、オブジェクト知覚を解明することを研究の動機としている。

## 1.2 研究目的

本研究では、オブジェクト知覚の解明を目指す。そのため、運動を知覚する錯視(多義図形)を例に検討することで、ある種のオブジェクト知覚について、人の運動知覚を説明するようなモデルの構築に寄与する実験的な知見を得ることを研究の目的とする。

運動の知覚については、説明を与えようとするいくつかの研究が行われてきた。日高、高橋(2019)らは、Barberpole illusion と呼ばれる運動(の方向)を知覚する図形を例にして、知覚の説明を試みた。Barberpole (床屋のサインポール)を日高と高橋(2019)は、「2次元平面上の“窓”から移動する直線を覗いた時に生じる直線の運動知覚を指す」と定義している。また、この錯視の説明として、時空間上のある線と時間変化後の線とを対応付ける平行移動が知覚の解釈であるという説明を与えている(日高、高橋, 2019)。これに対し、我々は、Barberpole illusion とは異なる運動を知覚する錯視として、“スリット錯視”を例に知覚の説明を試みる。スリット錯視とは、簾状の格子の隙間から背景の木漏れ日を観察した状態で、左右に首を動かすと格子の幅の違いによって、背景の一部から構成さ

れるオブジェクトの動く速度が、首振りの速度とは異なる背景の速度が知覚される現象で、日高によって発見された運動錯視である(日高, personal communication, September 9, 2018).

### 1.3 研究方法

本研究では、運動を知覚する多義図形として、スリット錯視を例に、知覚される運動について検討する。まず、1.1 で述べた仮現運動の解釈と、1.2 で紹介した Barberpole illusion の解釈から、多義図形の解釈についての仮説を次の章で述べる。ここでは、まずスリット錯視についての理想的なモデルを考える。図 3(a)のように時空間上に分布した全ての点が、水平方向に同じ速度で移動する点の集まりを背景として、窓越しに観察するとき、図 3(b)のように窓内のある領域を部分的に遮蔽する。ここでは、背景を遮る領域を「遮蔽領域」と呼び、この遮蔽領域が現実世界での“格子”と対応している。背景となる分布した点の集まりが実際の運動速度よりも速い運動を知覚するのが、スリット錯視である。

スリット錯視では、なぜ遮蔽領域の幅の違いによって知覚される背景の速度が変化するのか調べるため、モデルから予測される遮蔽の幅と知覚される速度について 2 章で述べる。また、モデルでは、知覚される速度に関係する要因として、遮蔽領域の幅や他にも速度に影響を与える可能性のある要因をいくつか設定した。設定した要因を変化させたとき、人が知覚する運動の速度変化を実験によって確かめる。また、実験結果のから、設定した要因の間に関係があるのか確かめるため、分散分析を行う。次にスリット錯視で知覚される速度の変化がどの要因から説明できるのかを検討し、多義図形の解釈についての仮説を検証する。

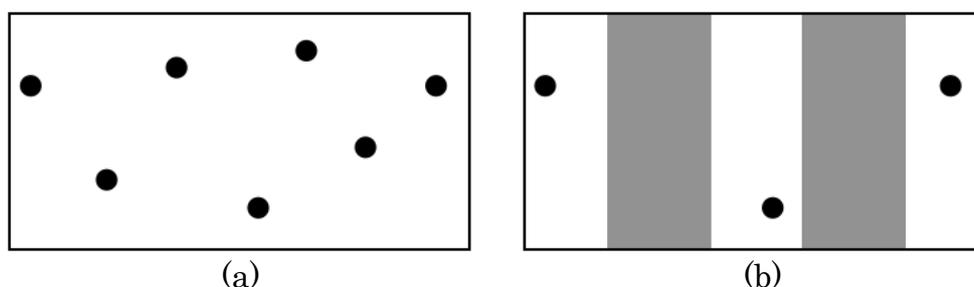


図 3 窓越しに観察する時空間上の点の分布

## 1.4 論文の流れ

本論文では、第 1 で運動知覚についての先行研究と本研究が多義図形を説明する際の方針を述べた。第 2 章では、人の多義図形の解釈についての仮説を説明し、実験で用いるスリット錯視の説明と、スリット錯視から予測される運動速度の変化について述べる。第 3 章では、スリット錯視に関する予測を確かめるため、人を対象におこった実験とその結果を示す。また、結果の分析から、知覚される速度に関係する 4 つの統制要因が知覚される速度にどのように関係していたのか述べる。第 4 章では、本研究の結果から、目的であるオブジェクト視知覚のメカニズムの解明に対してどの程度アプローチできたのか、また、今後の課題点を報告する。最後に、第 5 章で本論文の結論を述べる。

## 第2章 運動知覚の説明

### 2.1 多義図形の解釈についての仮説

人の視覚系の情報処理について、コストを下げるような処理が行われていると仮定し、運動を知覚する多義図形の解釈についての説明を目指す。

要素に分解できない全体性を知覚する運動錯視では、全ての点について同じ対応付けを行うことが前提となっているが、これは、人は情報を圧縮することで情報の処理のコストを下げると考えているためである。点の対応付けを行うとき、一つの点の間の対応付け方を平行移動として、他の点についても平行移動であると仮定すれば、個別の点の対応付け方について考えなくても同じ対応の付け方を全ての点に当てはめて考えることで、処理のコストを低くすることができる。

オブジェクト構造を持つ多義図形について、多義図形の仮説から、時空間上のある点を時間変化後の別の点と対応付けることで運動を知覚していることを示した。よって、時空間上のある点と時間変化後の点との対応の付け方が多義図形の解釈であると仮説を立てた。また、仮説が成立する条件として、次の3つがある。(1)多くの点の間の対応付けが同じである、(2) 同じ点が異なる2つ以上のベクトルを受けない、(3)点の間の対応付けがなるべく多くなるようにする。以下で、3つの条件について説明の説明を記述する。なお、3つの図4~6はそれぞれ、スリット錯視の刺激の1フレームを切り取り単純化したものである。時刻  $t=0$  に見えている点を青で示し、時刻  $t=1$  に見えている点を赤で示した。図中のグレーの部分は遮蔽領域を表す。なお、図中のベクトルは、点と点の間の対応付けを表している。時空間上のある点と時間変化後の点を同一の点であるとみなした場合、ベクトルの長さは点が単位時間あたりに移動した距離なので、速さを表す。

- (1) 多くの点の間の対応付けが同じである。

1つの点の間の対応付けが平行移動だとすれば、他の点についても同じ平行移動であると仮定することで、個別の点の対応付けについて考えなくても同じ対応付けを全ての点に当てはめて考えることができる。

図4(a)のように、時刻  $t=0$  の点と時刻  $t=1$  の点を対応付けるとき、4点の全てが平行移動であれば、異なる点の間の対応付けについて考えなくても良い。

(b)のように4点が全て同じ対応付けでなく、それぞれの点が異なる対応付けをする場合は、個々の点の間の対応付けをする必要があるが、人は情報の圧縮を行うことを前提としているので、全ての点において対応付けが同じである方がコストが低い。

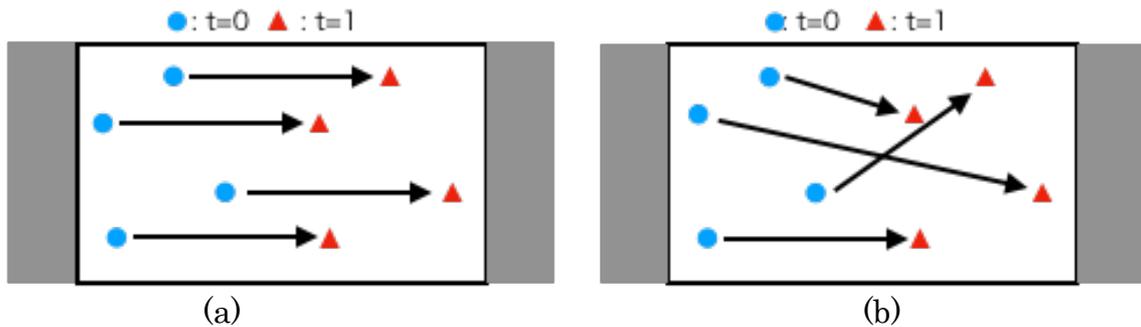


図 4 スリット錯視における時空間上の点の対応付け(条件 1)

▪(2) 同じ点が異なる 2 つ以上のベクトルを受けない。

図 5 のように、時刻  $t=0$  に見えている点を、次の時刻  $t=1$  の点に対応付けるとき、1 つの点に対して、1 つの点に対応付けるようにする。図 4(b) のように異なる 2 つ以上のベクトルを受けると、1 つの点の間の対応付けのみを考えることができず、全点の対応付けにコストがかかる。

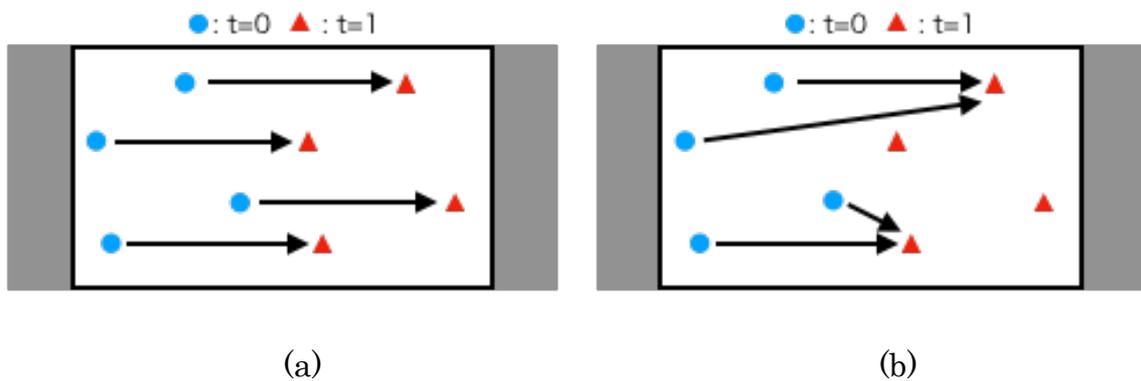


図 5 スリット錯視における時空間上の点の対応付け(条件 2)

- (3) 点の間の対応付けがなるべく多くなるようにする。  
見えている領域内での点と点の間の対応付けがなるべく多くなることで、1つ1つの点の運動としてではなく、全ての点がまとまり、面のような運動として知覚することができる。図 6(b)のように、ある点の間の対応付ける場合と対応付けない場合、どの点を対応付けるか、そして、どの点是对应付けないのか、全ての点に対して考える必要あり、コストがかかってしまう。

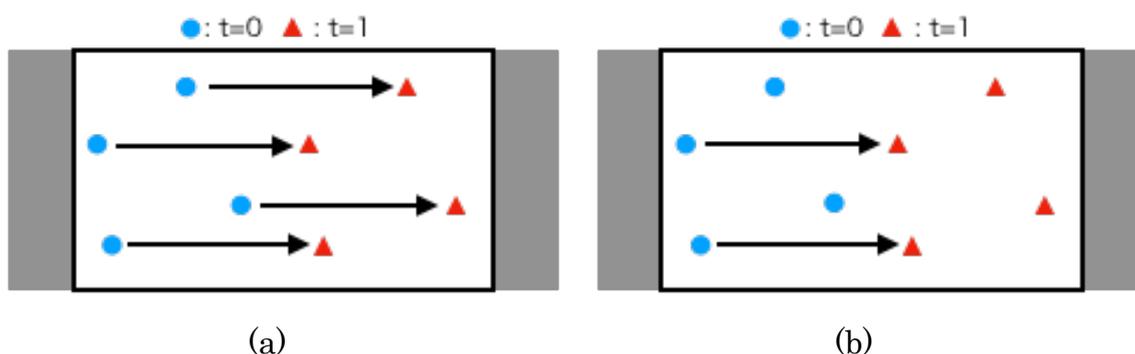


図 6 スリット錯視における時空間上の点の対応付け(条件 3)

## 2.2 スリット錯視において知覚される運動

本研究では、オブジェクト知覚の解明を目指して、運動を知覚するスリット錯視を例に、オブジェクト知覚の扱うことを 1.3 で述べた。スリット錯視は、時空間上に分布した全ての点が、水平方向に同じ速度で移動する点の集まりを背景として、窓越しに観察している状態である。そして、図 7(b)のように窓内に背景を部分的に隠すような遮蔽領域を配置することで、背景の実際の運動速度よりも速い運動を知覚する現象である。このとき、遮蔽領域は窓内にある幅を持って、等間隔に配置している。また、背景の点と同様に、全ての遮蔽領域は水平方向に同じ速度で移動する。

まず、スリット錯視では、遮蔽領域がある場合とない場合でどのように点の集まりを知覚しているのか検討する。より理想化した図 7 のようなモデルについて考える。図 7 は時間変化したときのスリット錯視のある 1 場面を想定しており、 $t=0$  に見えている点を青丸で示し、時刻  $t=1$  に見えている点を赤三角で示した。点の数と点の場所は図 7(a), (b)で同じである。また、グレーの部分遮蔽されている領域であり、(a)遮蔽領域あり、(b)遮蔽領域がない状態を表す。

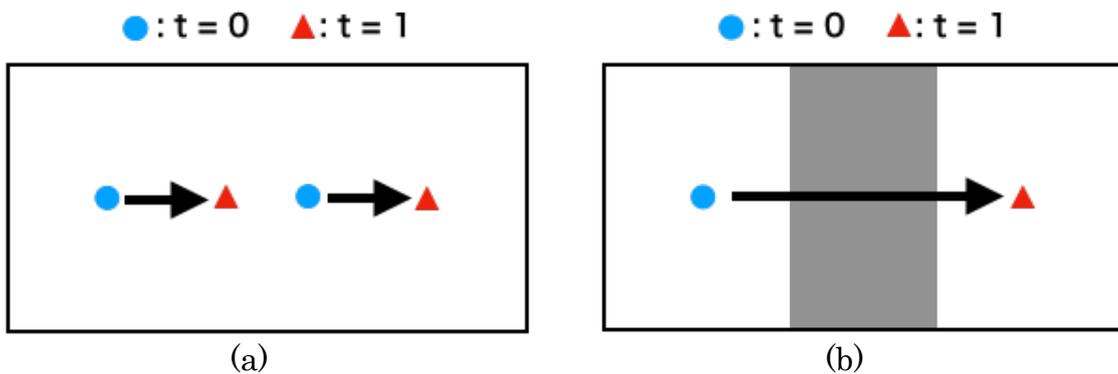


図 7 遮蔽領域があるとき、ないときのスリット錯視のモデル

スリット錯視では、窓内に  $t=0$  にある点と  $t=1$  にある点を同一の点だとみなすことで、水平方向の運動を知覚していると考えられる。つまり、異なる場所にある点を対応付けるとことで、同一視している。図中の矢印は、点の間の対応付けを表す。(a)のように遮蔽領域がない場合、時刻  $t=0$  に観測可能な点の数は 2 で、時刻  $t=1$  でも 2 つの点を観測できる。よって、それぞれの点の間の対応付けによって、運動を知覚する。一方、(b)のように遮蔽領域がある場合、時刻  $t=0$  に観測可能な点の数は 1 つで、時刻  $t=1$  に観測可能な点の数も一つである。遮蔽領域によって、その領域内には、点があるのかないのか判断することはできない。つまり、(b)では時刻  $t=0$  に観測可能な 1 つの点と時刻  $t=1$  に観測可能な 1 つの点の間を対応付けによる点の運動を知覚する。図中の矢印の長さは、単位時間当たりに点が移動した距離なので、速さを表すベクトルである。スリット錯視では、窓内の全ての点の間に対して同じ対応付けを行うことで、1 つ 1 つの点の運動としてではなく、全ての点がまとまり、1 つの面のような運動として知覚していると考えられる。

## 2.3 スリット錯視における知覚される速度変化の予測

スリット錯視は、簾状の格子の隙間から背景を覗いた状態で、左右に首を動かすと格子の幅の違いによって、背景の動く速度が実際とは異なる速度で知覚される現象である。2.2では、このスリット錯視の理想的なモデルを考えた。現象を整理すると、スリット錯視とは、時空間上に分布する点を背景として、窓越しに観察したとき、窓内の遮蔽領域の幅の違いによって、知覚される背景の速度が変化する現象である。遮蔽領域の幅によって見えない部分が速度知覚にどのように影響するか検討する必要がある。図8は時間変化したときのスリット錯視の刺激の1場面を切り取り単純化したものである。時刻  $t=0$  に見えている点を青で示し、時刻  $t=1$  に見えている点を赤で示した。さらに、遮蔽領域によって背景の点が見えない領域をグレーで表している。点の数と点がある場所は図8(a)(a')(b)(b')で同じである。

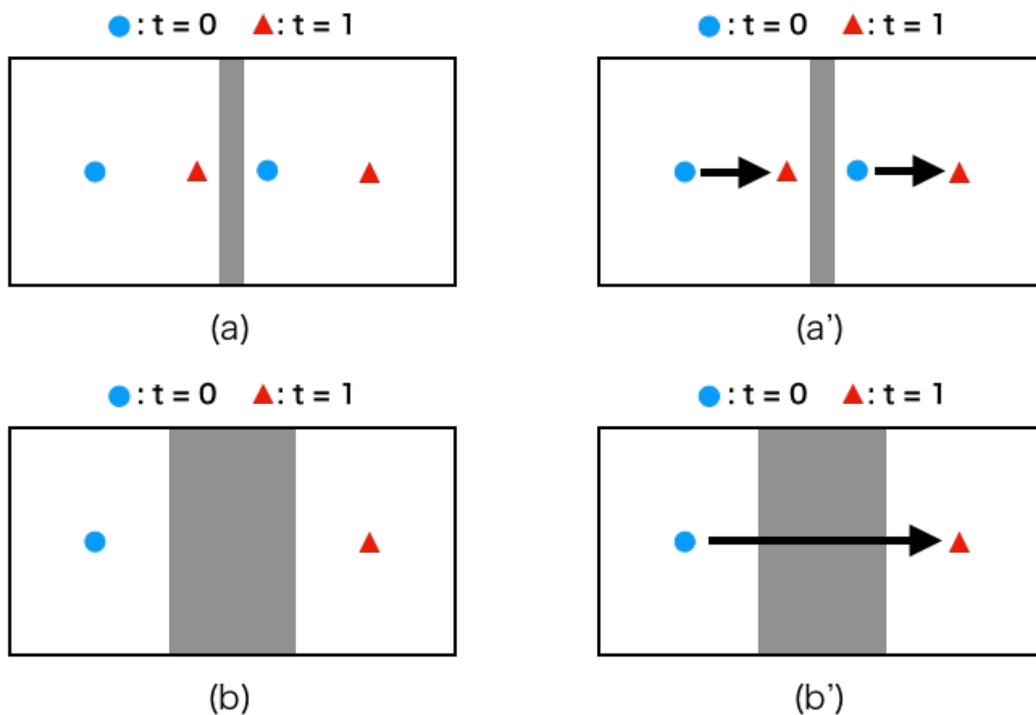


図 8 スリット錯視における時空間上の点の対応付け

図 8(a)(b)では、時刻  $t=0$  のときと時刻  $t=1$  のとき、点の数と点がある場所は同じでも、観測可能な点の数は異なる。(a)では、遮蔽領域の幅が十分狭いので、時刻  $t=0$  のときに2つの点、時刻  $t=1$  のとき2つの点を観測する。また、(b)では遮蔽領域の幅が広く、 $t=0$  のときに1つの点、時刻  $t=1$  のとき1つの点を観測する。このときの点の間の対応付けをベクトルで表しているのが図 8(a')(b')である。遮蔽領域が十分小さい場合、時刻  $t=0$  で観測される2つの点は、時刻  $t=1$  の2つの点とそれぞれ近い点の間の対応付けを行い、(b')のようなベクトルで表せる。一方で、遮蔽領域が大きい場合、時刻  $t=0$  の時点で観測可能な点は1つ、時刻  $t=1$  のときに観測可能な点は1つで、その間に対応付けると、(b')のようなベクトルで表せる。ベクトルは、異なる時刻、異なる場所にある点を同一の点であるみなしたときの速度だと言えるので、ベクトルの大きさが大きいとき、つまり、同じ時間経過の間に移動した距離が長い方が速度は速くなる。以上の試行実験から、点の数と場所が同じとき、遮蔽領域の大きさによって知覚する速度が変わるという予測を立てた。

### 第3章 スリット錯視を用いた実験と評価

本研究では、スリット錯視において遮蔽領域の大きさが変わると知覚する速度が変化するという予測を人を対象とした実験によって確かめる。

実験では、図9のように刺激を設定した。時空間上に分布する点を窓越しに観察しているとする。このとき、窓越しに観測可能な全ての点の集まりを背景とする。また、窓には背景を遮る領域が存在する。この領域によって、背景の点が観測不可能になる領域をここでは遮蔽領域と呼ぶ。また、遮蔽領域は、特定の幅をもち、等間隔で並んでいる。背景と遮蔽領域は、異なる速度、異なる幅で、水平右方向に移動している。実験では、背景が見える領域と遮蔽領域の幅を変えることによって、窓から見える点の数が変化する。

本実験では、背景の速さ(Dot\_speed)、遮蔽領域の速度(Bar\_speed)、背景が見える領域の幅(Window\_width)、遮蔽領域の幅(Bar\_width)の4つを要因として統制し、異なる要因の組み合わせで統制された刺激を実験参加者に提示して、その刺激に対して知覚した速度を回答してもらった。4要因それぞれの値をまとめたものを表1に示す。また、背景の点の大きさ、刺激領域内の点の平均的な数を一定に統制して実験を行った。

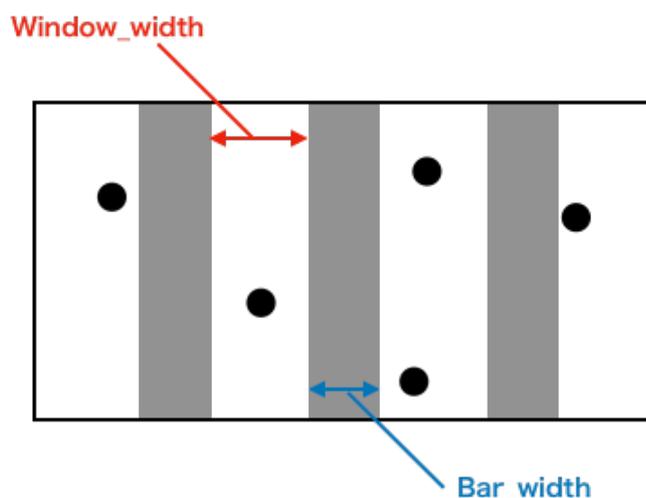


図 9 スリット錯視の各要因について

表 1 4つの統制要因と値 (水準)

要因	水準 1	水準 2	水準 3	水準 4	水準 5
背景の速度 [cm/s]	1.62	2.43	3.24	4.05	4.86
遮蔽領域の速度 [cm/s]	1.62	2.43	3.24	4.05	
見える領域の幅 [cm]	0.14	0.27	0.41		
遮蔽領域の幅 [cm]	0.16	0.32	0.65	1.30	

スリット錯視では、遮蔽領域が0.16cmのとき、窓内背景の点は比較的観測しやすいため、実際の背景の速度と知覚される背景の速度はほとんど一致するはずである。実験参加者が、刺激の背景の速度を正しく判断できているかの指標として、実験結果を確認する。

### 3.1 実験環境と手順

4つの統制要因である、[背景の速さ]、[遮蔽領域の速度]、[背景が見える領域の幅]、[遮蔽領域の幅]から、1要因ずつ選んだ刺激を1つの組み合わせとした。全組み合わせは240通りで、各統制要因の組み合わせにつき3試行を行い、1人の実験参加者は合計720試行の回答を行なった。また、本試行の前に練習として20試行を行なった。実験参加者は10人で、1人につき1試行約20分で実験を行った。

図10は、実験参加者に提示した刺激である。上部の窓に提示されるのが、速度を判断するための刺激、下部に提示されるのが速度を回答するために操作する刺激である。それぞれの刺激の提示領域は 21.6cm×10.8 cm(800×400 pixel)とした。参加者は、画面に表示される刺激の速度を手元に配置してある左右の方向キーを使って、回答用の刺激の速度を調整する。速度の範囲は、0.81～16.2cm/s であり、1段0.81cm/s で20段階変更可能である。操作する刺激の下部に調整バーを表示した。実験参加者は、1刺激ごとに手元の方向キーを操作し、速度を判断するための刺激から知覚された背景の速度と同じになるように調整

刺激の背景の速度を回答する。このとき回答された速度を実験の測定値として記録した。左の方向キーを押すと速度が遅くなり，右の方向キーを押すと速度が速くなる。初期位置は調整可能な速度範囲の中の中央値である。1つの組み合わせの刺激には回答時間を10秒に設定した。10秒経過すると，刺激は止まるので，手元にあるキーボードのスペースキーを押すことで次の刺激へと画面が切り替わる。10秒経過する前に，速度の回答が終われば，実験参加者のタイミングで次の刺激に移行することができる。

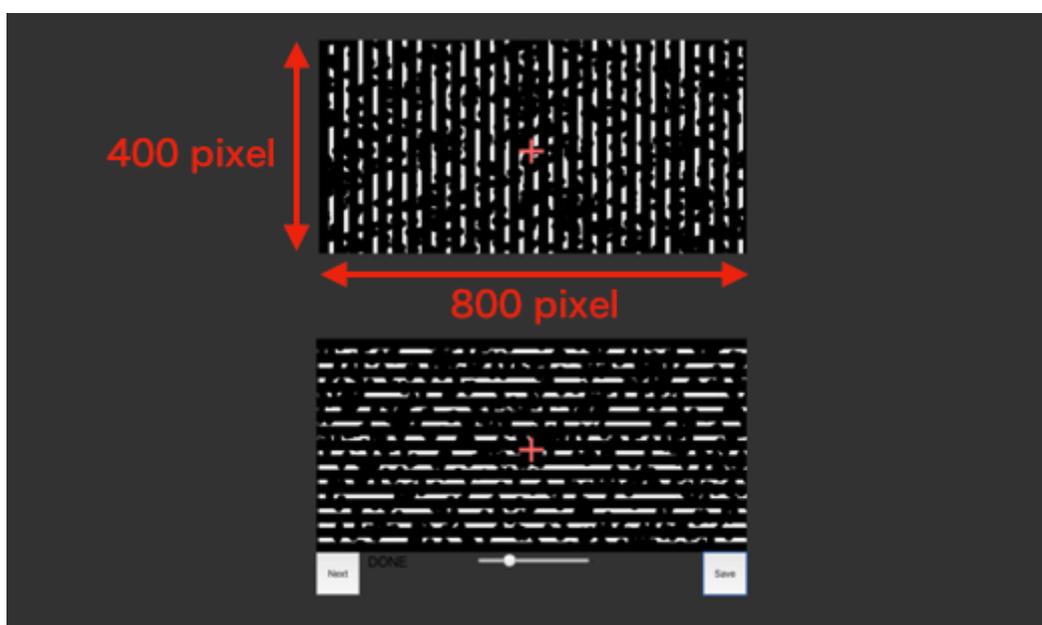


図 10 実験で画面に提示した刺激

実験参加者には，刺激の中心部に設定している注視点を見るように指示し，また，速度を判断するとき，ある1つの点に注目することや，上下の端にある点同士を見比べて速度を判断しないように指示した。実験中は図11のように顎台を用いて画面と目の距離を60cm，視角を0.26 degreeに固定した。

実験で使用したディスプレイの解像度は1920×1080で，縦横の長さは29.6cm×52.7cmである。最大輝度12cd/m<sup>2</sup>の環境で実験を行った。また，1pixelは約0.027cmである。点の直径は0.27cmに固定し，刺激領域内の点の数は，1画面あたり2,560点配置した。1画面での点の面積と背景の面積の比は，0.024%で

あり、1画面あたり点を2,560点配置した。

コントラスト比による知覚への影響を除くため、刺激領域以外の輝度を小さく設定した。また、速度を判断する刺激と回答用の刺激の平均輝度をなるべく同じにするため、回答用刺激には、速度を判断する刺激と同じ遮蔽領域の幅を持つ水平方向の線を設定した。回答用刺激にも垂直方向の線を設定してしまうと、錯視の効果が出てしまうため、水平方向にすることで必要のない運動の効果を除き、かつ平均輝度を揃えることができる。



図 11 実験環境と実施の様子

### 3.2 実験結果

実験参加者によって選択された刺激ごとの速度について、ここでは知覚された速度として記録し、そのときの窓上部に表示されている実際の速度と比較した。本実験の参加者は10人であったが、解析に用いるは8人分のデータである。内1名は実験途中で気分を悪くしてしまい、実験を中止したため、測定したデータはない。また、1名の参加者は、錯視が起こらない刺激のときに、窓内の速度

を正しく判断できていなかったため、今回はデータを用いなかった。

スリット錯視では、遮蔽領域の幅が十分小さいとき、窓内の背景の点は比較的観測しやすいため、背景の速度と知覚される背景の速度はほとんど一致するはずである。しかし、測定結果を確認したところ、1名の参加者は、背景の速度を正しく判断できているかの指標として、実験結果を確認する。

図12~14に実験結果を示す。それぞれの結果の知覚された速度は8人の平均である。破線は、背景の速度と知覚された速度が一致している場合を表す。図中の異なる色は、異なる遮蔽領域の速度に対応する。図12~14は、見える領域の幅0.16 cm、0.32 cm、0.65 cm、0.13 cmと対応した背景速度と知覚された速度の関係を表す。

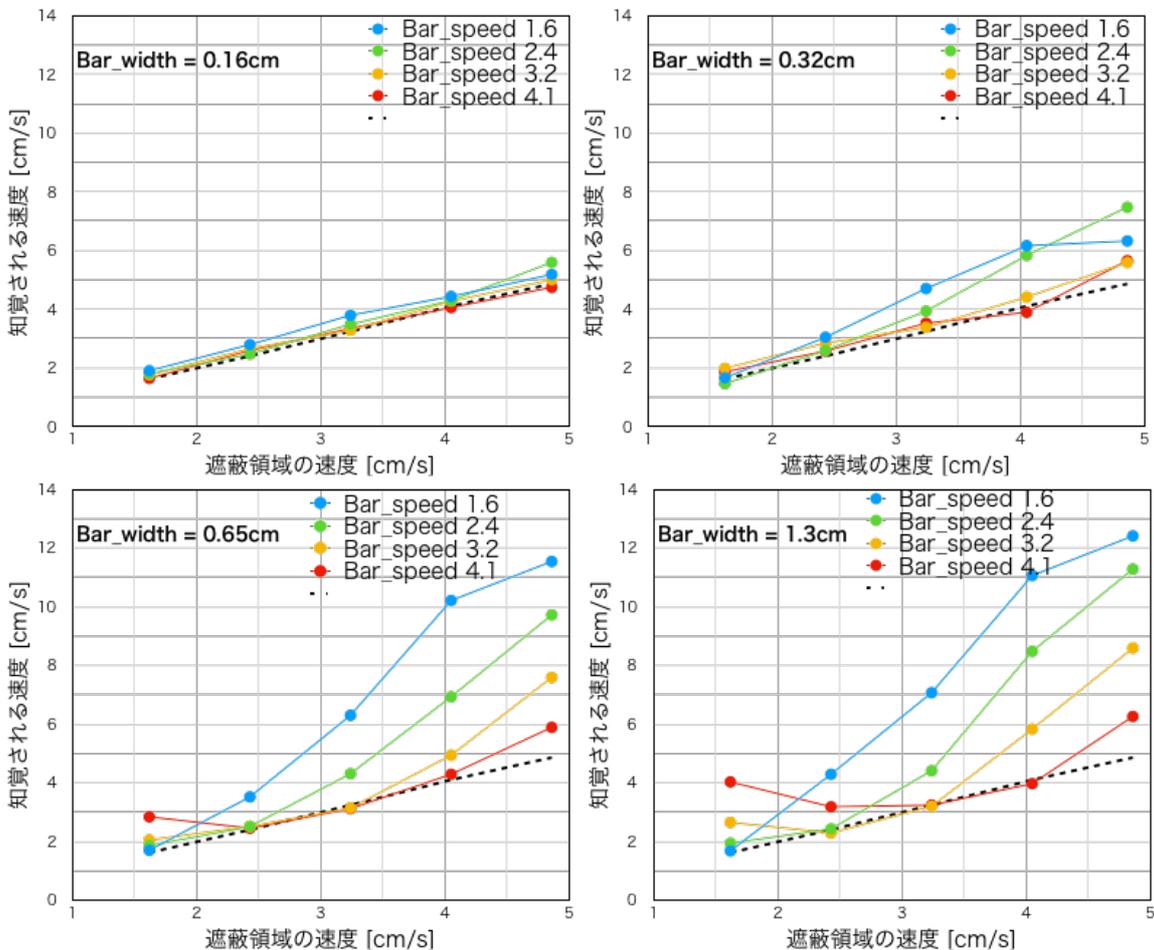


図 12 背景の速さと知覚される速度の関係  
背景の見える領域の幅0.14cmに固定。

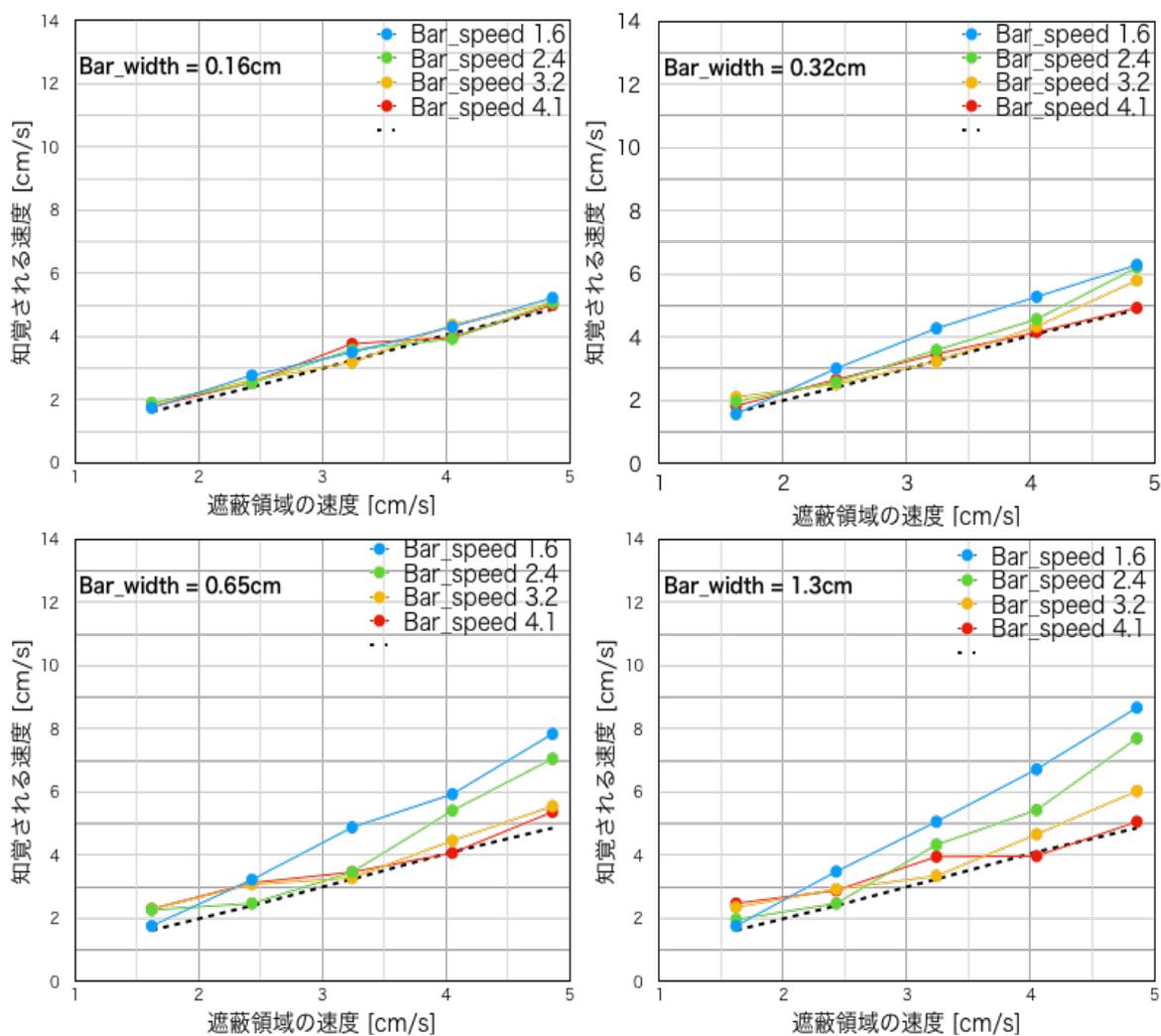


図 13 背景の速さと知覚される速度の関係  
背景が見える領域の幅0.27mに固定.

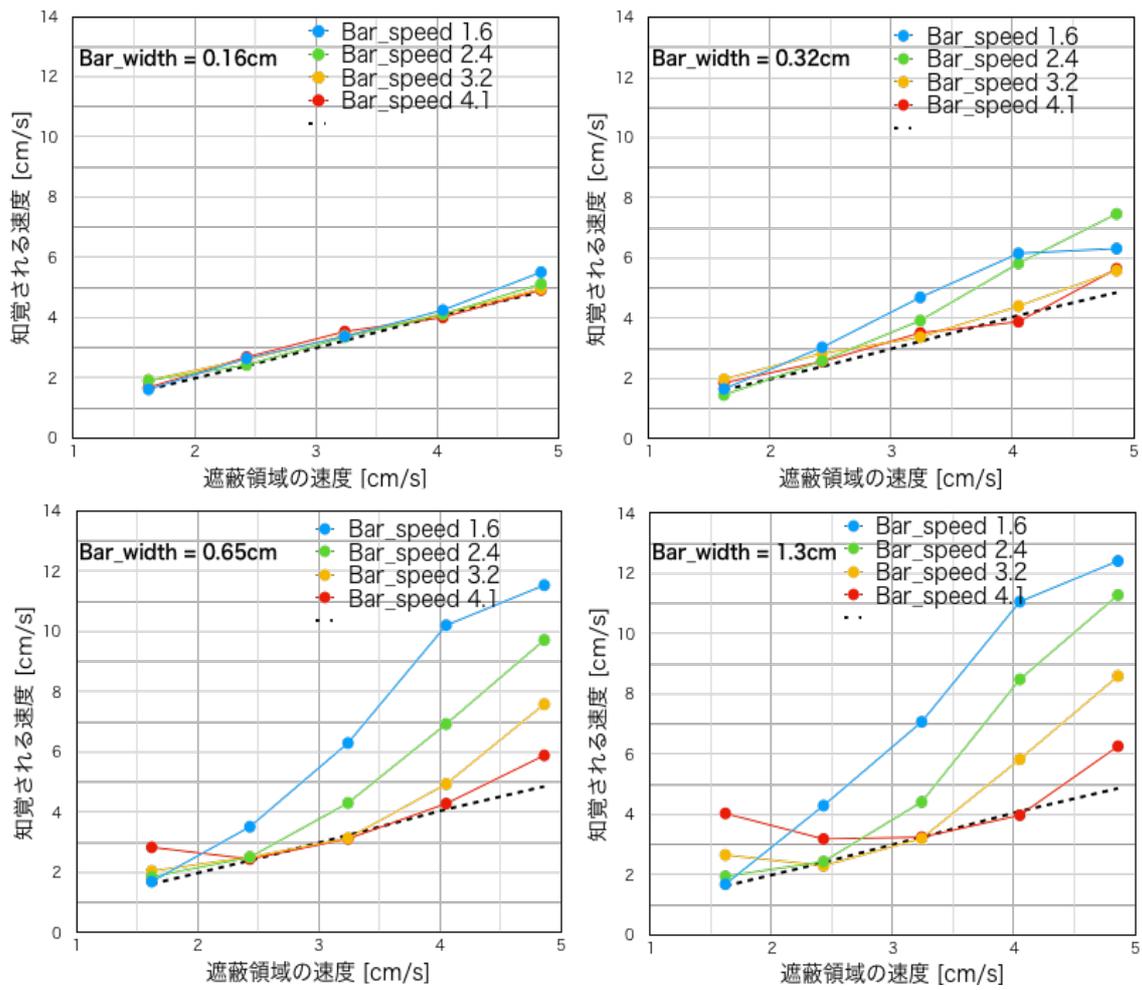


図 14 背景の速さと知覚される速度の関係  
背景の見える領域の幅0.41mに固定。

図12~14の遮蔽領域の幅が0.16cmのとき、背景の速度と知覚される速度はほとんど同じ速さである。遮蔽領域の幅が0.32cmのときは、遮蔽領域の速度によって、背景の速度よりも、知覚される速度が速くなる場合がある。遮蔽領域の幅が0.65cmと1.3cmでは、背景の速度よりも知覚される速度が速くなっていた。

遮蔽領域の幅が0.16cmと最も小さい刺激(図15参照)では、背景の点は比較的に見えやすい刺激となるため、実際の背景の速度と知覚される速度にはほとんど差はないはずである。図14~16の左上の図を見ると、ほとんど破線と一致している。したがって、結果から実験参加者は刺激の速度を正しく判断していたと言える。また、図12~13の(b), (c), (d)では、いくつかの見かけの速度が破線上にプロットされている。これは、背景の速度と遮蔽領域の速度が一致しているためである。

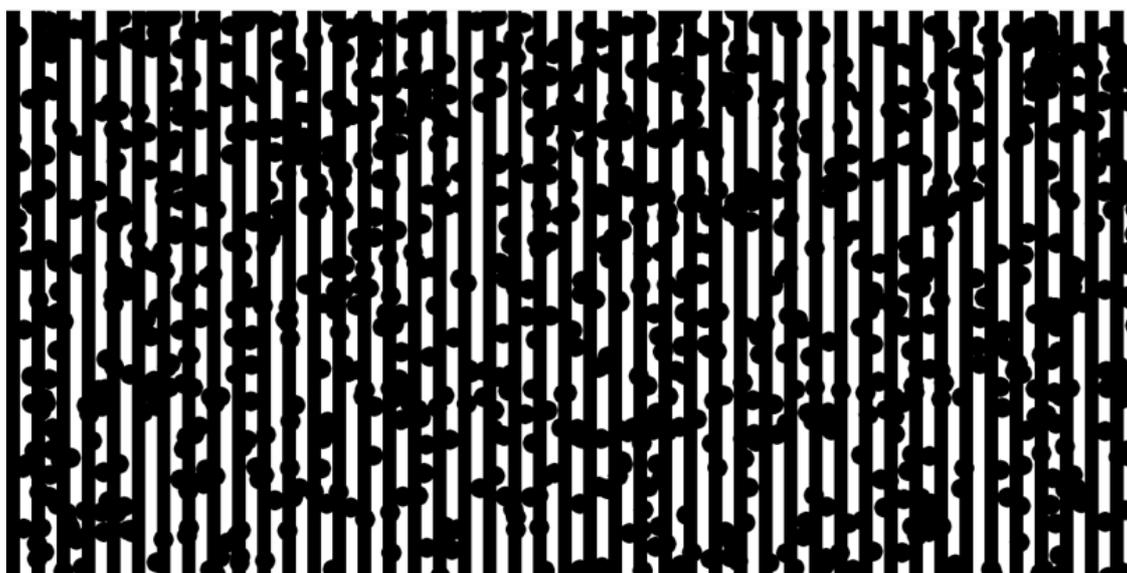


図 15 遮蔽領域の幅が小さい刺激  
背景の速度と知覚される速度が一致しやすい

### 3.3 実験結果解析

#### 3.3.1 4つの要因との知覚される速度の相関関係について

3.2の実験結果から、遮蔽領域の幅が大きい場合に知覚される速度が速くなる傾向を示していると言える。両者の関係をより詳しく分析していく。

図16は、遮蔽領域の大きさに対する見かけの速度を示しており、遮蔽領域の速度(=0.16, .24, 3.2, 4.1 cm/s)ごとに分け、見えている領域の幅は0.14cmに固定したときの実験結果を表す。図中の破線は、それぞれ遮蔽領域の幅が変化しても知覚される速度は変わらない、つまり、背景の速度と知覚される背景の速度が一致していることを示す。図16の結果からも、遮蔽領域の幅が大きくなると、知覚される速度が速くなることが示せる。一方で、遮蔽領域の速度が、背景の速度とほとんど同程度の速度なる場合には、遮蔽領域の幅が大きくなったとしても知覚される速度は、実際の背景の速度とほとんど変わらない。

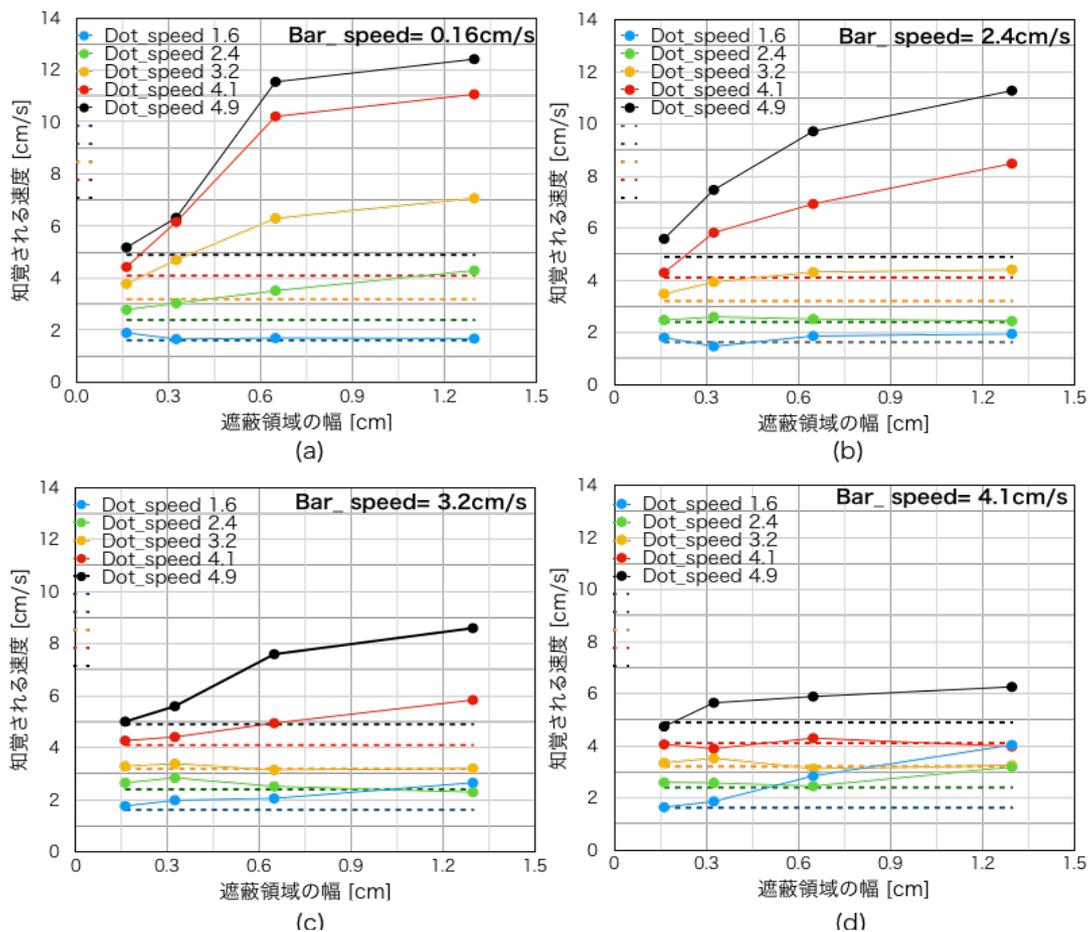


図 16 背景速度と見かけの速度の関係

見えている領域の大きさ 0.14m に固定

### 3.3.2 4つの要因と知覚される速度の分散分析

次に、4要因のそれぞれの水準が同じ平均と分散を持っていることを帰無仮説とし、水準間にばらつきがあるのか確かめるために分散分析を行なった。

表2に、4要因を用いた分散分析の結果をまとめた。この分析の従属変数は知覚される速度である。ここで有意水準  $p$  を  $p=0.05$  としたとき、4要因ともそれぞれの水準間の母平均には差があることがわかった。つまり、見える領域の幅によって、知覚される速度が変化することを示す分析結果となった。よって、遮蔽領域の幅によって、知覚される速度が変化するという予測と一致した。また、要因間の交互作用について分析結果を表3にまとめた。

表2 4要因を用いた分散分析の結果

従属変数: 知覚される速度		
要因	F	有意確率
遮蔽領域の幅 [cm]	89.139	$p < 0.05$
背景の速度 [cm/s]	907.059	$p < 0.05$
見える領域の幅 [cm]	85.608	$p < 0.05$
遮蔽領域の速度 [cm/s]	74.323	$p < 0.05$

表3から、要因3つの交互作用までは、有意水準0.05とした場合に差があることがわかった。ここで、4つの要因全ての交互作用については、0.59(有意確率)  $>$  0.05(有意水準) となり、有意な差が見られなかったが、3つの要因の間に交互作用があることは明らかなので、4つの要因の間も交互作用があると考えた。

### 3.3.3 4つの要因の知覚される速度の重回帰分析

次に4つの要因が知覚される速度にどの程度効果を与えているのか調べるために、重回帰分析を行なった。従属変数は知覚される背景の速度である。表4は分析の結果をまとめたものである。

表 3 4 要因の分散分析の結果：交互作用について

従属変数：知覚される速度		
要因	F	有意確率
遮蔽領域の幅 * 背景の速度	11.525	p< 0.05
遮蔽領域の幅 * 見える領域の幅	16.641	p< 0.05
遮蔽領域の幅 * 遮蔽領域の速度	10.249	p< 0.05
背景の速度 * 見える領域の幅	20.421	p< 0.05
背景の速度 * 遮蔽領域の速度	21.864	p< 0.05
見える領域の幅 * 遮蔽領域の速度	16.105	p< 0.05
遮蔽領域の幅 * 背景の速度 * 見える領域の幅	4.217	p< 0.05
遮蔽領域の幅 * 背景の速度 * 遮蔽領域の速度	3.457	p< 0.05
遮蔽領域の幅 * 見える領域の幅 * 遮蔽領域の速度	2.867	p< 0.05
背景の速度 * 見える領域の幅 * 遮蔽領域の速度	3.258	p< 0.05
遮蔽領域の幅 * 背景の速度 * 見える領域の幅 * 遮蔽領域の速度	0.954	0.59 > 0.05

表 4 のモデルとは、従属変数である知覚される背景の速度に関する要因を組み合わせたときの予測式である。分析結果から、見かけの速度を表す予測式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{見かけの速度} = & 1.05 + 1.34 \times \text{背景の速度} + 0.19 \times \text{遮蔽領域の幅} \\ & - 0.41 \times \text{遮蔽領域の速度} - 2.95 \times \text{見える領域の速度} \end{aligned}$$

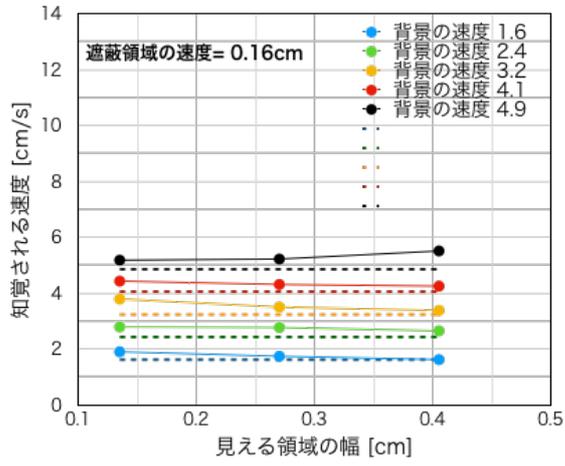
表 4 4 要因の重回帰分析結果のまとめ

モデル		係数	標準化 係数
背景の速度を要因としたモデル	(定数)	-0.36	
	背景の速度	1.34	0.7
背景の速度，遮蔽領域の幅 を要因としたモデル	(定数)	-0.914	
	背景の速度	1.34	0.7
	遮蔽領域の幅	0.91	0.18
背景の速度，遮蔽領域の幅，遮蔽領域の速度 を要因としたモデル	(定数)	0.25	
	背景の速度	1.34	0.7
	遮蔽領域の幅	0.91	0.18
	遮蔽領域の速度	-0.14	-0.17
背景の速度，遮蔽領域の幅，遮蔽領域の速度， 見える領域の幅を要因としたモデル	(定数)	1.05	
	背景の速度	1.34	0.7
	遮蔽領域の幅	0.91	0.18
	遮蔽領域の速度	-0.41	-0.17
	見える領域の幅	-2.95	-0.15

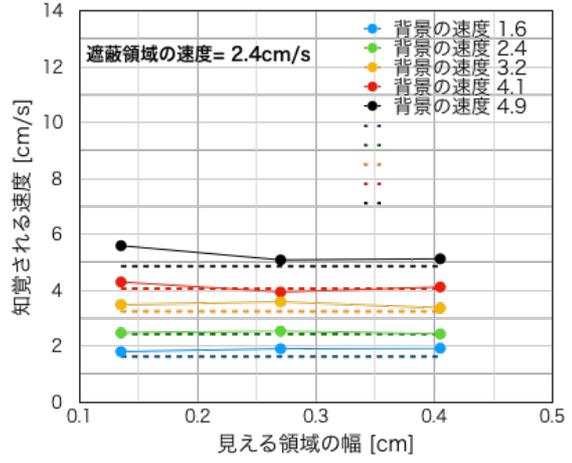
このとき、4つの要因が知覚される背景の速度にどの程度影響しているのか分析を行った。予測式の係数を比較するために、標準化した値を算出した。その結果が表4の標準化係数であり、大小関係は  $0.7(\text{背景の速度}) > 0.18(\text{遮蔽領域の幅}) > -0.17(\text{遮蔽領域の速度}) > -0.15(\text{見える領域の速度})$  の順番となった。本実験では知覚される背景の速度を実験参加者に回答してもらっているため、分析結果の背景の速度が知覚される速度に影響があることは明らかである。他の3つ要因のうち遮蔽領域の幅の標準化係数は正の値なので、遮蔽領域の幅が大きくなれば、知覚される速度は速くなることがわかり、スリット錯視に関する我々の予測と一致している。また、我々の予測では、(1)遮蔽領域の速度と(2)見える領域の幅については言及していないが、2つの要因の標準化係数が負の値として、知覚される背景の速度と関係があることを示している。次の(1)、(2)で要因が予測式に与える意味を分析する。

- (1) 遮蔽領域：遮蔽領域の速度が速くなる時、知覚される速度は速くならないことを意味する。これは、3.3.1の図16に示した実験結果を説明しており、遮蔽領域の幅が大きくなったとしても遮蔽領域の速度が背景の速度とほとんど同程度の速さであれば、知覚される背景の速度は速くならないことを示しているため、実験結果と分析結果は一致している。
  
- (2) 見える領域の幅：見える領域の幅が小さくなれば、知覚される速度は速くならないことを意味する。図17～20に、実験結果の見える領域と知覚される背景の速度との関係を遮蔽領域の幅0.16cm、0.32cm、0.63cm、1.30cmごとに分けて示した。図中の破線は、それぞれ見える領域の幅が変化しても知覚される速度は変わらない、つまり、背景の速度と知覚される背景の速度が一致していることを示す。図に示した実験結果から、見える領域の幅が大きくなっても、知覚される速度は速くならないことがわかる。図19、20では、見える領域の幅が0.13cmから0.41cmと変化するとき、知覚される速度が減少している。これは、遮蔽領域の幅が見える領域の幅よりも大きいときは、実際の背景の速度よりも知覚される背景の速度の方が速くなるが、遮蔽領域の幅が見える領域の幅よりも小さくなれば、知覚される背景の速度は、実際の背景の速度と一致する傾向となることを示している。つまり、実験結果と分析結果は一致している。

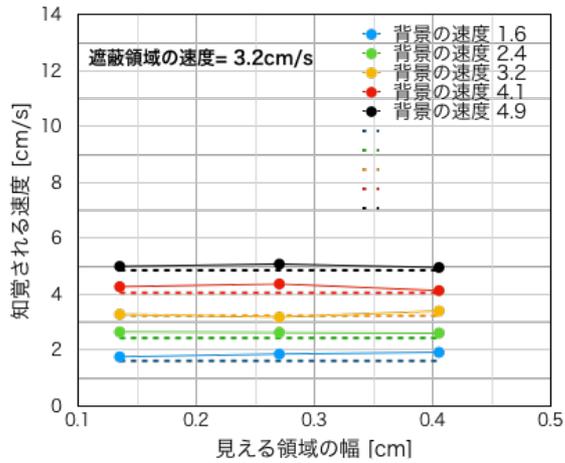
以上のことから、重回帰分析が表す、知覚される背景の予測式は実験結果を説明することが可能である。



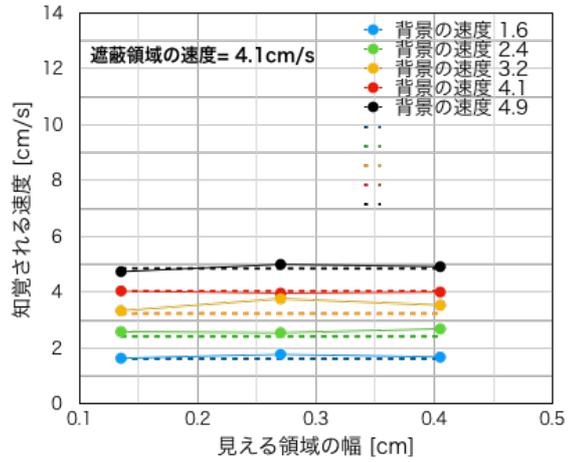
(a)



(b)



(c)



(d)

図 17 見える領域と知覚される速度の関係(遮蔽領域=0.16cm のとき)

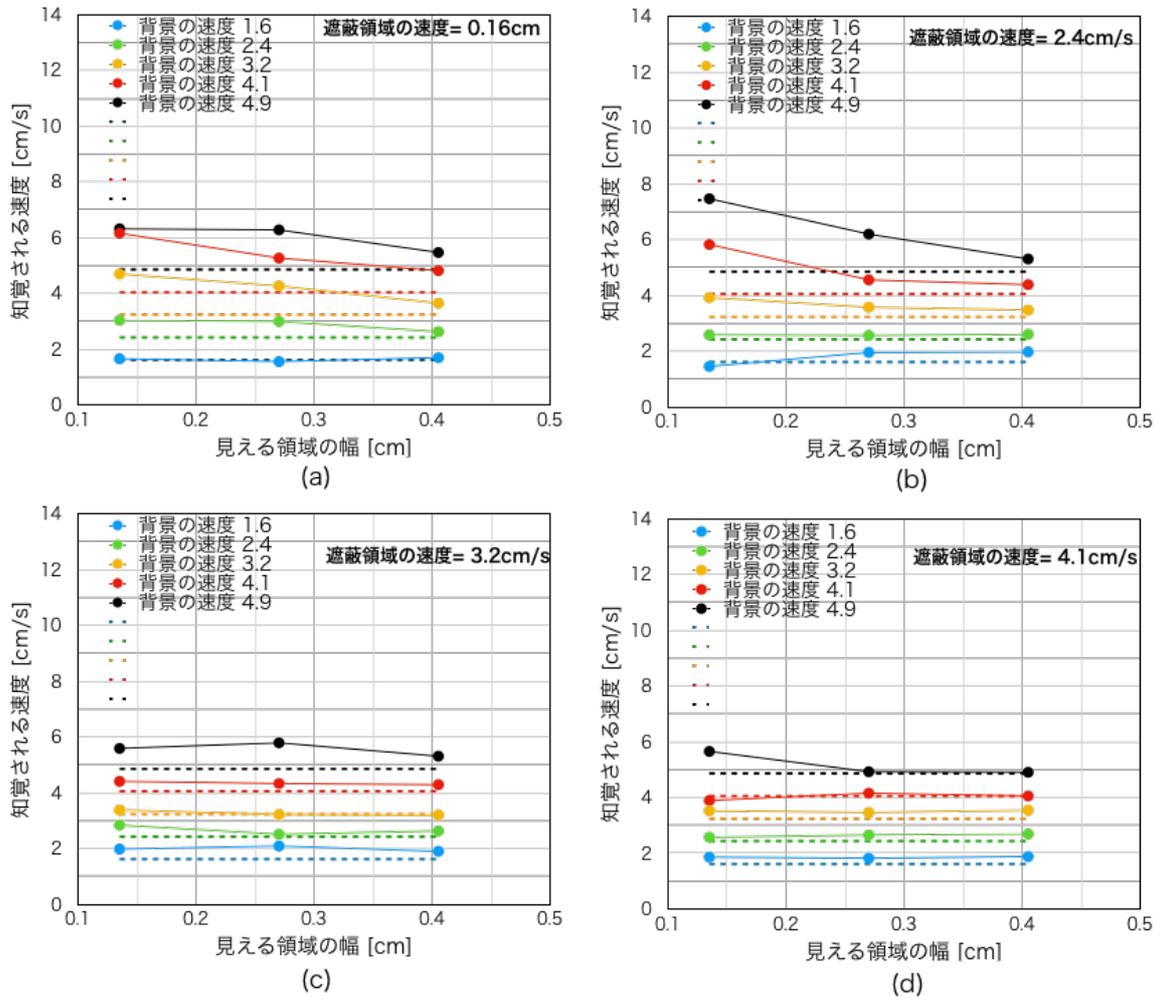
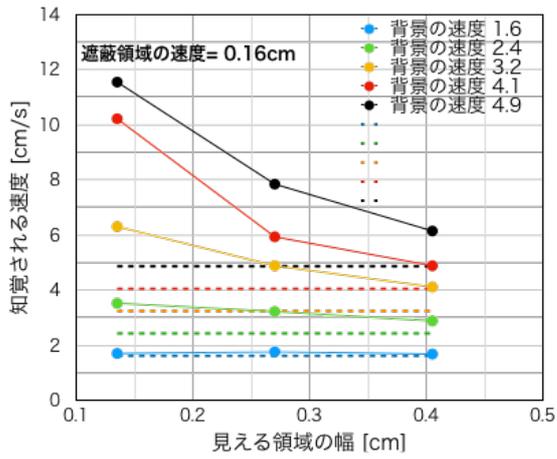
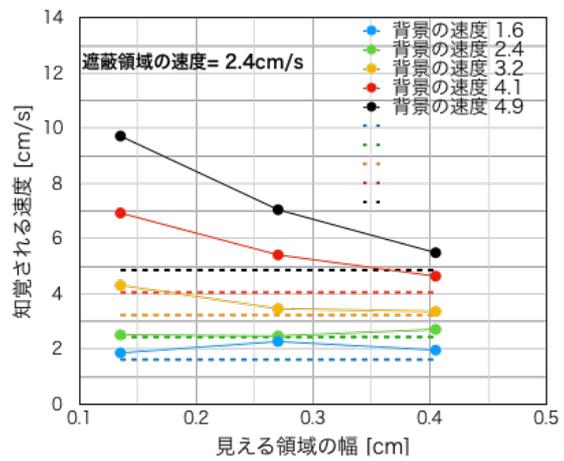


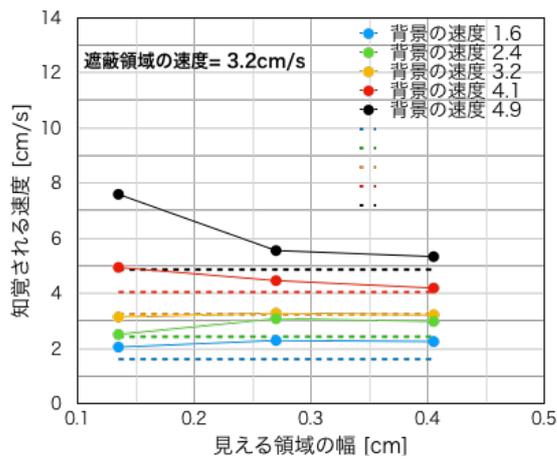
図 18 見える領域と知覚される速度の関係(遮蔽領域=0.32cm のとき)



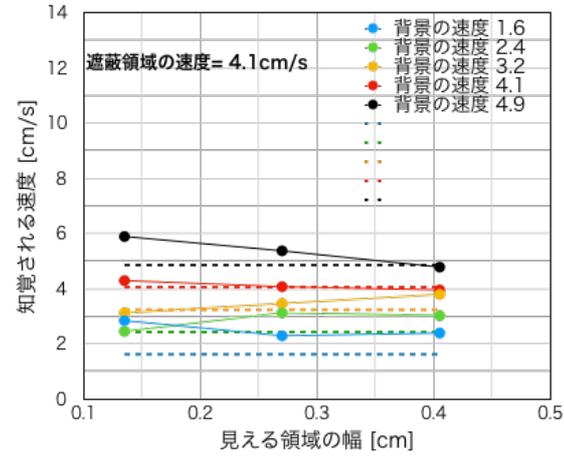
(a)



(b)

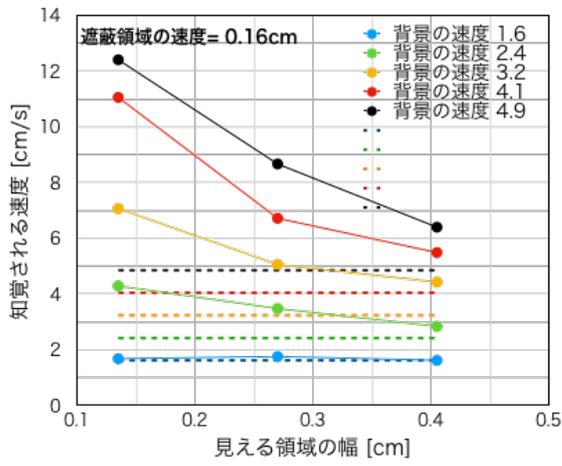


(c)

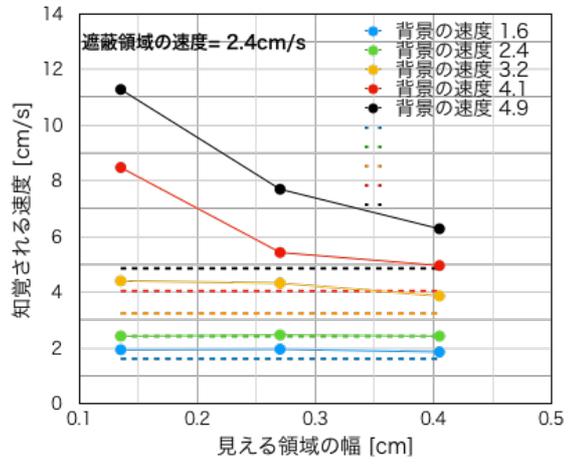


(d)

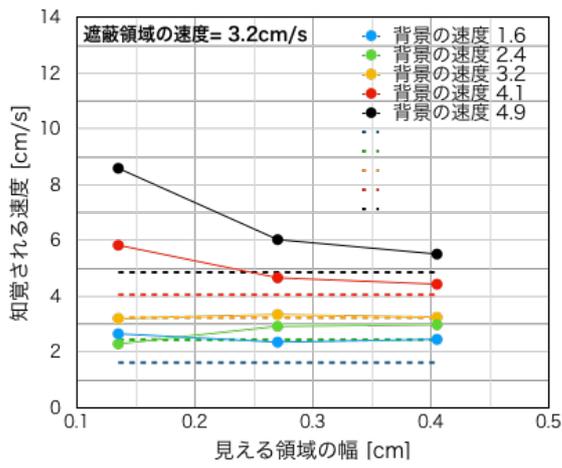
図 19 見える領域と知覚される速度の関係(遮蔽領域 = 0.65 cm のとき)



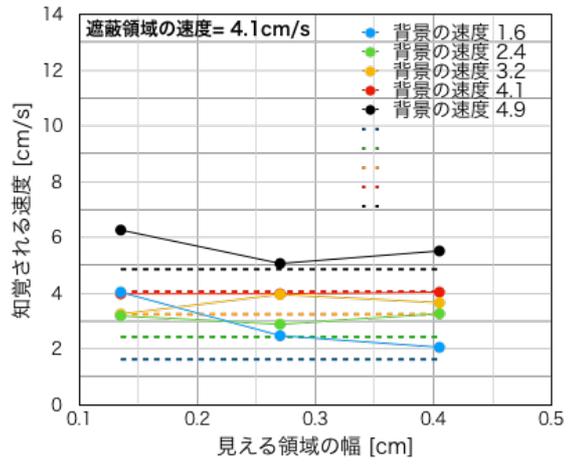
(a)



(b)



(c)



(d)

図 20 見える領域と知覚される速度の関係(遮蔽領域 = 1.3cm のとき)

## 第4章 総合議論

### 4.1 研究目的と実験結果から明らかになったこと

本研究では、オブジェクト知覚の解明を目指し、人が運動を知覚する過程を説明するモデルの構築に寄与するような、実験的な知見を得ることを研究の目的としていた。

そのために、運動錯視の例として、速度の違いを知覚するスリット錯視についての説明を試みた。まずは運動を知覚する多義図形の解釈とは、時空間上のある点と、時間変化後の点との対応の付け方であると仮説を立てた。

次に、スリット錯視では、遮蔽領域の幅によって対応付けるベクトルの長さが変わるため、知覚される背景が実際の背景の速度とは異なることを予測した。

このスリット錯視の予測について、人を対象とした実験を行った。実験の結果から、スリット錯視では、遮蔽領域の変化によって知覚される背景の速度が変化することがわかった。つまり、予測と一致する結果となった。以上より、運動錯視の1つであるスリット錯視の速度変化の知覚は、点の対応付けによるものであると示唆された。今後、本研究の仮説が今回の実験で扱った錯視とは異なる運動知覚について説明することができれば、運動知覚の解明に向けたモデルの構築に貢献することができ、本研究の目的であるオブジェクト知覚の解明に近づけると考える。

### 4.2 今後の課題

本研究では、オブジェクト知覚の解明を目指していた。これに対して、本研究結果では、ある多義図形を例に、人が運動を知覚することに対しての仮説の検証に留まった。結果としては、予測と実験から考察すると、仮説は棄却されないが、他の運動を知覚する錯視が同様に説明できるのかについては、実験を通して検証する必要がある。スリット錯視に関する予測では、錯視が起こる要因として遮蔽領域の幅についてのみ言及していたが、実験結果についての解析では、スリット錯視のモデルで設定した4つの統制要因(背景の速度、遮蔽領域の速度、遮蔽領域の幅、見える領域の幅)全てが、知覚される速度に作用していたので、今後他のも検討してモデルに含めて数値実験と人での実験の結果と比較検討することで、仮説を検証することができる。

## 第5章 結論

我々が日々モノを見るという行為について、モノの情報をそのまま記録しているわけではなく、能で統合された情報に推論を行なって成り立つ、ヘルムホルツの無意識的推論と呼ばれる過程がある(Marr, 1982)。視覚、嗅覚、味覚など、複数の受容器の情報を組み合わせて処理を行うため、全ての相互作用について調べることは困難である。よって、本研究では、その一端として視覚のゲシュタルト知覚についてメカニズム解明を目指した。この研究がマルチモーダルの研究にもつながることを期待している。

本研究の枠組みとして、ゲシュタルト構造を持つ運動錯視の解釈を説明するため、1つの運動錯視について現象をモデル化し、解釈の仮説を立てた。そして、知覚される速度の予測と人から得られた実験結果の比較を行なった。分析の結果、ゲシュタルト構造を持つ多義図形の1つであるスリット錯視においては、遮蔽領域の幅の大きさによって、知覚される速度が変化するという予測が、実験の結果から支持できることがわかった。また、知覚される速度に相関する要因は遮蔽領域の幅意外にも、今回設定した統制要因の全ての間に変相互作用があることが明らかとなった。

本研究の予測では、知覚される速度の要因として遮蔽領域の幅のみに言及しているため、他の要因を含めるような予測に修正する必要がある。今後は、本研究で実施した分析は要因間の差を見ることに留まったので、要因の水準を変えて知覚される速度を確かめるようなシミュレーションを行うことで、目指していたオブジェクト知覚の解明にも取り組んでいきたい。

## 参考文献

- [1] Emergence: The Gestalt Approach to Change.(2012). Retried January 28, 2020
- [2] 日高昇平, 高橋康介(2019). 未知領域を含むオブジェクト同定による窓問題知覚の説明. 日本認知科学会第 36 回大会論文集(O2-1)
- [3] Kato, M. (2004), Visual Information and Eye Movement Control in Human Cerebral Cortex. *Journal of National Institute of Information and Communication Technology*, Vol.51, 41-49.
- [4] Kanizsa, Gaetano. (1979). *Organization in Vision: Essays on Gestalt Perception*. NY: Praeger Pub Text.
- [5] カニツァ, G. 野口薫(訳). (1985) 『視覚の文法：ゲシュタルト知覚論』, サイエンス社.
- [6] Kanai, R., & Verstraten, F. (2005). Perceptual manifestations of fast neural plasticity : Motion priming, rapid motion aftereffect and perceptual sensitization. *Journal for Functional Aspects of Vision*, Vol.45, Issues 25-26, 3109-3116.
- [7] Kremlacek, Jan(2010)., Two sinusoids 6-1 Perceptions [mp4], <https://www.youtube.com/watch?v=IGwNmGYCrJo> (参照 2019-3-6)
- [8] Marr, D. (1982). *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. NY: W.H.Freeman & Co Ltd.
- [9] マー, D. 乾敏郎, 安藤広志.(2003), 『ビジョン-資格の計算理論と脳内表現』, 産業図書.
- [10] 新美亮輔, 上田彩子, 横澤一彦. (2016) 『オブジェクト認知: 統合された表象と理解 (シリーズ統合的認知)』, 勁草書房.
- [11] Rubin, E. (1915). *Visuell wahrgenommene Figuren*. Köbenhavn og Kristiania: Gyldendal.
- [12] Wagemans, J., Elder, H. J., Kubovy, M., Palmer, E. S., Peterson, A. M., Singh, M., & Heydt, D. V. R. (2012). A century of gestalt psychology in visual perception I. Perceptual grouping and figure-ground organization. *Journal of NIH Research*, Vol.138(6), 1172-1217.
- [13] 山田尚樹, 秋山英三. (2010), 「あいまいな図形の知覚と脳運動」 『知能と情報』 Vol.22, No.4, pp.414-418.

## 謝辞

まず、本研究を進めるにあたり、助言及び、研究環境を提供して下さった日高昇平准教授に感謝申し上げます。日高先生には、常日頃から様々なアドバイスを頂き、また、議論には多くの貴重な時間を費やして下さったことに深い感謝を申し上げます。多くのご迷惑もおかけしたことと思いますが、常に手を差し伸べて頂いた結果、私はこの修理論文を書くことができました。本当にお世話になりました。

また、同じく議論に多くの時間を割いて下さった鳥居拓馬助教授にも感謝申し上げます。加えて、鳥井先生には本研究の実験刺激の作成をして頂いたことや、シミュレーションの結果を共有して頂いたことにも、大変感謝しております。

ドクターの加藤さんにも多くの助言をいただきました。特に英語論文の理解や、研究内容ならびに論文構成についても何度も助けて頂いたことは忘れません。そして、同期である河井君、櫻井君、宮本さん、そして、一緒に課題に取り組んでくれた、岡崎さん、小熊君、亀井君、朱さん、佐々木君にも感謝を述べます。

最後に、これまで自分が選択してきたことに反対せず、その選択を精神的、金銭的に支援し続けてくれた両親にも、この場を借りて感謝の意を伝えます。