

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	自身の行動が関与する物体運動の知覚に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	門野泰長
Author(English)	Yasunaga Monno
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11117号, 授与年月日:2019年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:金子 寛彦,山口 雅浩,小池 康晴,吉村 奈津江,渡邊 淳司
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11117号, Conferred date:2019/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

平成 30 年度 博士論文
自身の行動が関与する物体運動の知覚に関する研究

提出者： 門野 泰長
東京工業大学 大学院総合理工学研究科
物理情報システム専攻
指導教員： 金子 寛彦 教授

2019 年 2 月

目次

第 1 章	序論	2
1.1	はじめに	2
1.2	運動知覚	2
1.3	行動と知覚	4
1.4	行動と運動知覚	5
1.5	本研究の目的：知覚に影響する行動の要素の解明	6
1.6	まとめ	8
第 2 章	行動の意図の影響	10
2.1	実験 1	10
2.2	実験 2	20
第 3 章	行動の予測の影響	28
3.1	実験 3	28
第 4 章	行動の結果の影響	36
4.1	実験 4	36
第 5 章	総合考察	44
5.1	行動の意図の影響	44
5.2	行動の予測の影響	45
5.3	行動の結果の影響	47
5.4	行動の全体としての影響	47
5.5	今後の課題	48
第 6 章	結論	50

第 1 章

序論

1.1 はじめに

我々の知覚は、世界をそのままの形で内面へ投影したものではなく、自身が活用するのに有利な形として特徴を抽出し、再構成されたものである。例えば我々が物を掴むときには、その大きさの情報を抜き出すこと指を広げる大きさに利用しているし、着替えるシャツを探すときには色だけを見てどのシャツなのか判断をしている。このように、我々の視知覚は抽出された情報を必要に応じて参照することで成り立っている。一方我々は行動することで、外界を自身に適した形へと適応させ、また行動することで自分自身を外界に適応させている。例えば廊下を歩くときに通行の邪魔になる荷物が置いてあれば、脇に移動させてその場所を変えるし、往來を歩くときに遠方から車がやってくれば、自分自身を移動させることで危険を回避するだろう。このように我々は生活の上で、行動によって知覚される外界を変化させることもあれば、知覚した外界に応じて行動を行うこともあり、そのどちらも自然な流れの中で行っている。そのため、外界の処理された投影である知覚と自身の行動は互いに参照しあっていると考えられる。例えば行動によって知覚を補正する、あるいは知覚に応じて行動を変更するなどである。しかしその関係の中で互いがどのように影響しあっているかに関して、未だ多くは明らかになっていない。

私達の行動は手足などの運動を伴うものであるため、我々が経験する行動と知覚のインタラクションの中で最も一般的であり、より近い関係を持つ可能性が高いと考えられるので、行動と知覚の関係を明らかにする上で、行動が運動知覚に与える影響について着目することが重要である。我々は自身が行動することを通じて様々な運動を知覚しており、例えば歩くことによって視界全体にコヒーレントなオプティックフローが生じる、カップを手にとることによって視界の端から目の前まで移動する、手に持ったペン先は一見不規則な動きから自在に文字を記す、などがある。様々な要求による行動で様々な運動が観察されるが、それらの運動の知覚は行動に応じて変化するか、そして変化するならば一般化された傾向があるかを調べることで、知覚と行動のメカニズムの解明に役立つと考えられる。

1.2 運動知覚

我々は網膜上の物体像運動を検出することで、その物体の運動知覚を得ることができる。我々の運動知覚の処理過程において、最も単純な運動検出器は初期視覚野ですでに存在することが、我々と近い脳構造を持つとされるマカクザルに対する生理学的研究などから明らかである(?, ?, ?)。また、一定の範囲におけるグローバルな運動速度や方向のコーディングは MT 野の段階で行われていることが知られている。MT 野の一部の

ニューロン群はそれぞれが特定の運動方向，空間周波数，時間周波数に対する選択性を持っており，それらの応答の分布から刺激の運動方向や速度をコーディングすることができる（図 1.1, (? , ? , ?)）。

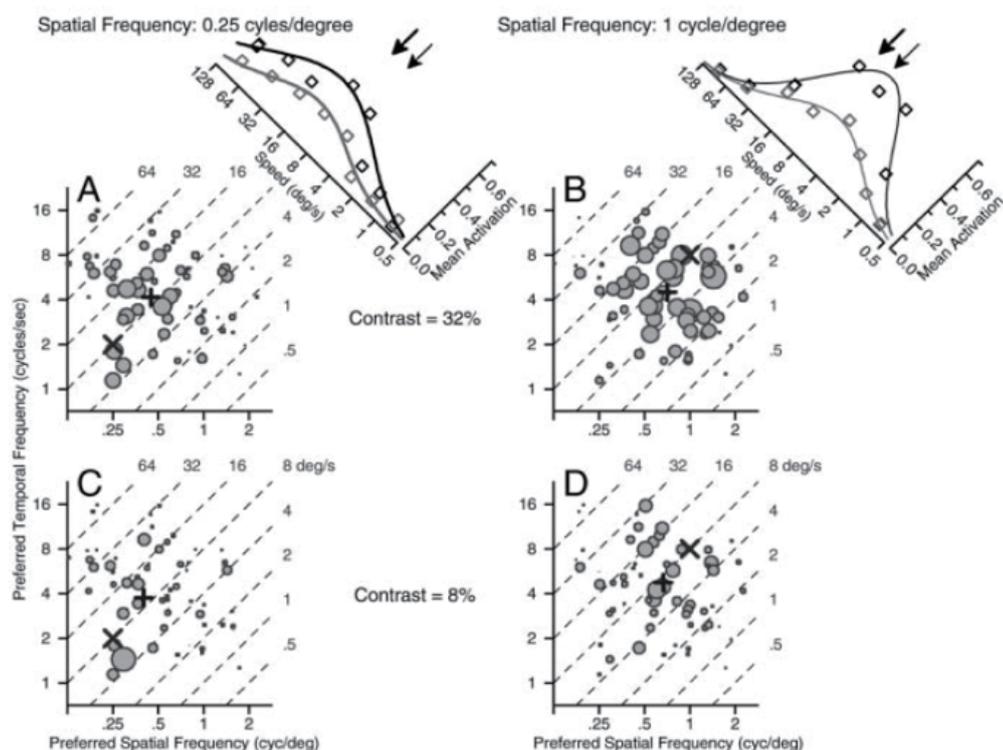


図 1.1 Priebe et al, 2004 より Figure 6. 8 deg/s の刺激を与えた際の，マカクザル MT ニューロンの応答分布 (Priebe et al, 2003 におけるデータより). 横軸と縦軸は個々のニューロンが選択性をもつ空間周波数と時間周波数の対. A と B は 32% コントラスト, C と D は 8% コントラストの刺激を与えたときの応答分布. A と C は 0.25cycle/deg の刺激, B と D は 1cycle/deg の刺激を与えたときの応答分布. x が実際に与えた刺激の時空間周波数で, + が細胞応答の重心. これを速度軸に直して平均応答をプロットしたものが右上の斜めのグラフ. シンボルの黒いのが高コントラストで薄いのが低コントラストのもの. 矢印は応答重心の空間周波数による違いを表しており, 太いほうが 1 cycle/deg, 細いほうが 0.25 cycle/deg であり, 低空間周波数のほうが速い方に重心が寄っている.

しかし，細胞の応答分布から説明されるボトムアップな最尤推定量を必ずしもそのまま知覚として決定しているわけではなく，様々なトップダウンの影響を受けると考えられる．それを説明する現象のひとつとして，我々はコントラストの低い運動刺激を観察した際に，刺激速度が遅く知覚されることが知られる (? , ? , ?) . 速度が同等の刺激においても刺激空間周波数など低次情報の違いにより MT のニューロン応答の分布が変化することはサルにおいて確かめられているが (図 1.1 右上), それはコントラスト減少による速度減少を説明するものではない. そのため, コントラスト変化に伴う速度知覚の変化を説明するのはより高次の処理である可能性がある.

1.3 行動と知覚

自身の行動と様々な視知覚が、自身の行動により変容することが知られている。自身の行動と知覚が互いに深く関係しており、両者の関係について調べた研究は特定のモダリティや特徴に限らず数多く存在する。たとえば自身をくすぐってもくすぐたくない (?、?)、自身の皮膚を押しした際の圧力の知覚が低減する (?、?)、ボタンを押ししたあとにタイムラグを持って呈示される聴覚刺激のタイミング知覚が行動に近づく方向へシフトする (?、?)、自身の行動で視覚的なフラッシュ刺激を提示したときにフラッシュラグ効果が低減する (?、?)、対象への行動（つかむ or 指差す）を目的として視覚探索を行う際にその行動に関連の特徴の探索の RT の改善 (?、?)、対象となる地点への到達手段の違い（ボールをそこまで投げる or そこまで歩く）による距離知覚の変化 (?、?)、など様々な研究が存在する。このように、自身の行動によって引き起こされた対象の変化に対する知覚が変化する例が多く知られているが、自身の行動とは自己にとってどのような条件で定義され、そしてどのような意味を持つだろうか。

1.3.1 運動主体感

ある感覚刺激に対してそれを自身の行動の結果として感じる感覚のことを運動主体感 (Sense of agency) と呼ぶ (?、?、?、?)。我々は自身の身体に対して特別な所有感を持つものと同じく、自分自身が行動した結果生じた運動や音声などの感覚刺激を直感的に自身の行動の結果であると知ることができる。自身の行動らしさが強いとき、運動主体感が強いことを意味する。

運動主体感の定量的な評価法は複数存在し、その評価方法の違いにより測定される運動主体感は性質が若干異なる。運動主体感の直接的な測定としては感覚評定としてのアンケートなどが用いられる (?、?)。だがその場合、被験者が持つ高次認識や判断が影響を与えてしまう可能性がある。例えば自身の手の動きにより物体が運動する際に、その運動が自己の行動であるか否かの判断はその場に自分一人であるか、その他に行動の行為者となりうる他者が存在するかなどによって応答が変わりうる (?、?)。一方で、高次の判断の影響を伴わない、間接的であるが実験的に計測される運動主体感は、前節で挙げられた行動特有の知覚変化の有無や、特に次節で述べる intentional binding と呼ばれる効果の大きさによって定量的に計測される。

1.3.2 Intentional binding

Intentional binding は自身の行動による時間知覚の変化である。これは Haggard ら (2002) が報告した効果であり、自身のボタン押しによって音声刺激が呈示される時、その呈示までの時間遅れが短く知覚されるという効果だった (?、?)。この効果は聴覚のみでなく、視覚など異なるモダリティでも報告されている (?、?)。この効果は行動から刺激呈示までの時間遅れが大きくなるほど効果が減少するなど運動主体感とよく相関することが知られており、実験的に測られる運動主体感の指標として用いられる場合がある (?、?、?)。Intentional binding は運動主体感と同一視される効果であるため、行動による知覚変化は Intentional binding と同一のメカニズムによって説明される可能性がある。特に時間が関係する知覚特徴の知覚（例：速度知覚）は行動による時間知覚の変化と相関を持つ可能性がある。これは例えば速度の場合、時間と距離によって定義されるため、同一距離を移動する物体の呈示時間を長く知覚するときにはその刺激の運動を遅く、呈示時間を短く近くするときにはその速度を速く知覚するといった一貫性をもつ可能性があるということである。

1.3.3 コンパレータモデル

運動主体感が生じるためには自分自身が行動することによって生じると予測される感覚入力と、実際に得られる感覚入力とが一致することが必要であると考えられている。そのメカニズムとして最もよく用いられる説明がコンパレータモデルと呼ばれるものである(?, ?, ?, ?)。これは運動の学習を説明するモデルでもある。図 1.2 に示すように、まず我々はどのような結果を生じさせるかという意図を持っており、それに応じて自身の行動を計画する。そして、自身が行動を起こす際にその運動指令から予測される神経入力と、実際に行動したことによって得られる神経入力を比較し、それらが一致していた場合に自身の行動であると知覚し、不一致の場合には自身の行動でないと知覚するというモデルである。例えば、ボタンを押すことで特定のビーブ音になるという状況を想定したときに、まずその音を鳴らすことを意図してボタンを押す動作を計画し、実際に運動指令によって手が運動しボタンを押す。そして実際に音が鳴ったときにその音が自身の運動指令から予測された音と一致した音程やタイミングであったときに、自分の行動の結果だと知覚するというものである。行動から刺激呈示までのタイムラグにより運動主体感が減少するのは、予測された行動結果に対して実際の結果が時間的にずれることにより不一致を起こすためだと解釈することができる。同様に、自身の行動から予測される刺激特徴と異なる特徴を持つ刺激の場合行動の効果が生じなくなることが知られており(?, ?, ?)、この仮説を支持している。

1.4 行動と運動知覚

1.4.1 行動と運動方向知覚

運動知覚に影響するトップダウンの影響として、実際に、投げる、掴んで動かすなど、対象とする物体の運動が自身の行動を伴う場合、自身の行動結果の運動知覚、特に運動方向の知覚は、自身の行動と一貫した運動に見えやすくなることが報告されている(?, ?, ?)。例えば Wohlshlgäer (2000) は、知覚的運動方向が曖昧になる 2 フレームの回転運動刺激を用いて、被験者がノブあるいはキーボードを操作した際に、知覚される回転方向が教示された回転方向に一致しやすくなる傾向を発見した。別の例として Mitsumatsu (2010) は Michotte の launching 刺激、これは二つのオブジェクトが互いに近づいて重なった後に離れていく刺激で stream か bounce のどちらかに見えるものだが、被験者の手の運動に対応して運動した運動刺激が手の運動に対応した運動 (stream or bounce) に見えやすくなることを発見した(?, ?)。

上記の研究の結果は運動知覚の直接的な変化ではなく、むしろ競合する解釈の選択性が行動により変化したためである可能性がある。これらの研究は二通りに解釈可能な曖昧運動の知覚確率の行動による変動であり、低次情報としてどちらの運動の情報も含んでいた。そのため、存在する低次情報の中から自身の行動と一貫する解釈を選びやすくなる、例えば手を右に回転させたときに右回転に見やすくなる、という結果となった可能性がある。

1.4.2 行動と速度知覚

先行研究から、行動することでその結果の運動方向知覚が自身の行動に即した方向へバイアスされることが示されたが(?, ?, ?)、一方で運動知覚の重要な側面の一つである速度知覚に関して、自身が行動した結果その速度知覚が変化するかは確かめられていない。そのため、行動することが運動知覚全般に影響するか、あるい

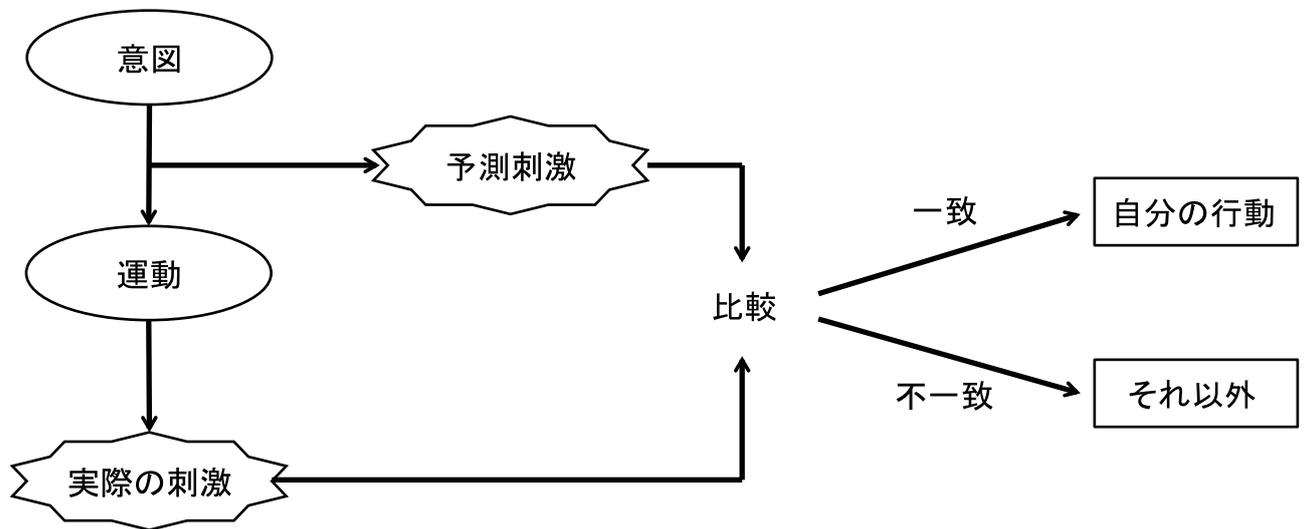


図 1.2 コンパレータモデルの概要。何らかの刺激を意図して行動を起こした際に、その運動指令のコピー（エフェレンスコピー）から予測される刺激と実際に得られた刺激を比較し、それが一致していた場合に自身の行動の結果と知覚し、不一致のときにはそれ以外の要因により生じた刺激と知覚されるとするモデル。

は方向知覚のみに限られたものであるかわからない。運動速度を一意に決定するためには運動方向が決定される必要があり、両者の従属性を考慮すると、運動知覚全般、つまり速度知覚についても行動が影響すると予想される。また前節で述べたように、行動が運動知覚そのものを変化させたのではなく、行動の選択に影響した可能性が存在する。そのため、低次情報から一義に決定可能な、対立する解釈を持たない仮現運動の知覚速度を調査する必要があるだろう。具体的には、一つの運動軌道上には一つの運動刺激のみが存在し、複数の対応点を持たない運動刺激を使用する。

1.5 本研究の目的：知覚に影響する行動の要素の解明

刺激に対して運動主体感を持つことが知覚変化の要因であるならば、知覚変化のメカニズムは行動と運動主体感を説明するモデルであるコンパレータモデルと関係を持つと考えられる。しかしコンパレータモデル自体は、行動の結果どのように知覚が変化するか説明しない。そのため、コンパレータモデルと、行動による知覚変化の関係を明らかにする必要がある。

コンパレータモデルで説明されるように、我々の行動はまず意図（目的）を持って計画され、それを実現するための運動指令信号が計画される。そして実際に身体を動作させ、結果となる感覚刺激を受け取る。そしてその感覚刺激が運動指令から予測された感覚刺激と比較して最終的な知覚を得る。このように我々の行動は複

数の段階に分けられる。しかし、それらのどの段階がそれぞれ知覚に対して影響するか、またどのように影響するかは明らかになっていない。また加えて、それ以外の高次の認識が知覚に影響する可能性がある。そのため、本研究では知覚に影響を与える行動の段階について3つに再定義をし検討を行った。

1.5.1 行動の意図

1つ目の要素は行動の意図である。我々が物体をこのように動かしたいと考えて運動させたとき、その意図に従った方向に知覚が変化する可能性がある。この観点からすると、例えば Mitsumatsu (2010) の研究では、手を運動させる際に、刺激をすり抜けるように動かすことを意図した場合に、そのように知覚しやすくなったと解釈できる。また同様に、Wohlschläger (2000) の研究では、行動時にどちらかの回転方向の刺激運動を意図したために、そのように知覚しやすくなったと解釈できる。

もし行動時に意図した刺激運動が運動知覚に影響するなら、速度知覚では行動時に意図した速度が知覚速度に影響すると考えられる。具体的には速く刺激を運動させることを意図した際には刺激を速く、遅く運動させることを意図した際には刺激を遅く知覚すると予想した。本研究では実験1, 2において、行動時の意図した刺激速度が、行動の結果生じた運動の知覚速度に影響するか調べた (図 1.3)。

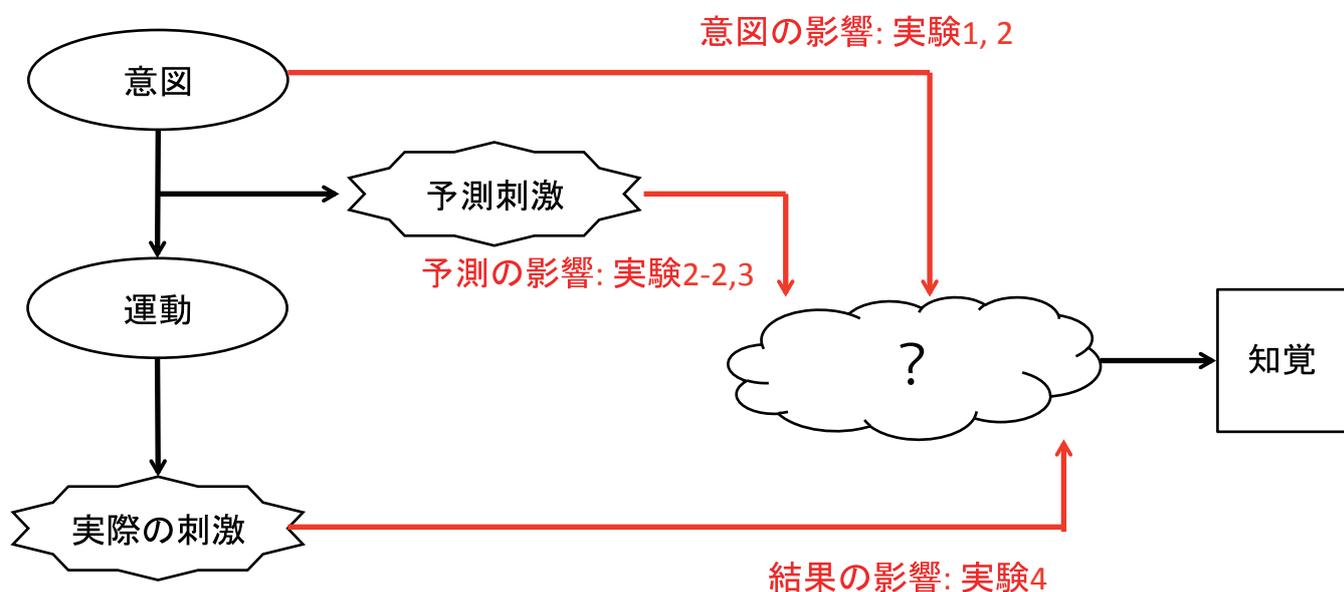


図 1.3 知覚に影響を与える可能性がある行動の各要素と、その影響を調べることを主な目的とした実験の番号の対応を表した図。

1.5.2 行動の予測

自身の運動指令からからどのような刺激が生じるか予測できるとき、その予測に従った方向に知覚が変化する可能性がある。この観点からすると、例えば Mitsumatsu (2010) の研究では、手を一直線に運動させる際に、すり抜ける運動が予測されたために、そのように知覚しやすくなったと解釈できる。また同様に、Wohlschläger (2000) の研究では、行動時にどちらかの回転方向の刺激運動を意図したために、そのように知覚しやすくなったと解釈できる。これらの研究では被験者が行う運動と刺激運動が似通っていたため、特別な学習を行うことなく、自身の行動が刺激運動の予測を生じさせたと考えられる。

行動時に予測された速度が知覚速度に影響するなら、実際に呈示される刺激より速い速度が予測された際には刺激をより速く、より遅い速度が予測された際には刺激をより遅く知覚すると考えられる。また、予測が正確な場合にはより正しく知覚されると考えられる。本研究では実験 2-2, 3 において、予測される速度の知覚への影響を調べた (図 1.3)。

1.5.3 行動の結果

上記の他に、自身の行動の結果起こった事象を観測することが、自身の行動によって生じた刺激の知覚を一貫した方向に変化させる可能性がある。先行研究において、自身の行動が成功したか否かが、成否に関連する特徴の知覚を変えると報告されている (?、?)。この研究は、テニスのレシーブを行う際にそれをうまく打ち返すことに成功した場合に、行動の対象となったボールの速度を、失敗した場合と比較して遅く知覚するというものだった。飛んでくるボールを観察してから、打ち返したボールが相手コートに正しく入るまでには時間差があるが、それにもかかわらず飛んできたボールの速度知覚が結果と一貫する方向に変化したことから、行動が関連する知覚に回顧的に影響を与えることを示唆した。

だが、このことが回顧的な影響ではない可能性がある。注意のゆらぎなどの影響で偶然刺激を遅く知覚した際に行動が成功しやすかったなどの順方向の因果関係が仮に存在した場合、見かけ上回顧的な影響が見られるが実際には違うという状況が生じうる。そのため、行動の結果による回顧的な影響が存在するか明らかにするためには、被験者の知覚のゆらぎとは無関係に決定される事象が知覚に影響を及ぼすか調べる必要がある。

もし行動の結果生じた事象が自身の運動させた物体の速度知覚に影響するなら、自身の運動させた物体の速度が速いほど生じやすい事象を観測した際に、その運動の速度を回顧的に速く知覚し、逆に遅いほど生じやすい事象を観測した際に、その運動を遅く知覚すると予想される。本研究では実験 4 において、結果の事象による回顧的な影響を調べた (図 1.3)。

1.6 まとめ

本研究では自身が行動することで、その結果運動した物体の速度知覚が変化するか調べることを目的とする。そして行動の要素として、意図、予測、回顧的影響の3つの観点から自身の行動の影響を調べた。行動において各要素を完全に分離することは難しいため、実験ごとに調べられる要素の組み合わせは異なり、その関係は表 1.1 に表される。これら各要素が知覚に与える影響から、自身が行動することが運動知覚全体、そしてその他の知覚に関してどのような意味を持つのか推察することを目的とする。

本研究は第 2 章において、実験 1 と 2 について説明し、主に自身の行動時の意図が行動結果の知覚速度に与える影響を検討した。第 3 章では行動する際の予測が結果の知覚速度に影響するか確かめると同時に、その影

響が既知の行動による時間知覚変化である Intentional binding と関係するか確認した。第 4 章では自身の行動によって生じた事象が関連する行動結果の速度知覚に対して回顧的な影響を与えるかを確認した (図 1.3)。そして第 5 章の総合考察において各要素がどのように最終的な知覚に影響するか複合的に考察する。

表 1.1 各実験において、知覚に影響を与えうる要素。その実験で効果を測ることができると考えられる要素を○で表す。実験 1-1, 実験 2-1 では主に意図と予測の影響を切り分けなかった。

		意図	予測	結果
第二章	実験 1-1	○		-
	実験 1-2	-	-	-
	実験 2-1	○		-
	実験 2-2	○	○	-
第三章	実験 3-1	-	○	-
	実験 3-2, 3-3	-	○	-
第四章	実験 4	○	-	○

第 2 章

行動の意図の影響

2.1 実験 1

実験 1 では被験者が刺激速度に関して意図を持って刺激を運動させた際に、知覚速度が意図したものに近づくか明らかにすることを目的とした。実験 1-1 では行動の全体的な影響として、被験者の手の動きとリアルタイムに実寸で一致する物体運動の知覚速度が行動時に意図した速度に影響されるか確かめた。行動の意図として、具体的な速度でなく、速い、遅いという意味付けを行うことで、画面上で動く物体の知覚速度がより速くあるいは遅く知覚されると予測した。実験 1-2 では、その知覚変化が、刺激観察時の被験者の手の運動速度による影響である可能性について検討した。

2.1.1 実験 1-1

実験 1-1 では被験者の行動としてドラッグ操作を採用した。具体的には、物体の運動方向と速度が被験者の手の運動と一致している刺激だった。この刺激を能動刺激と定義した。能動刺激を異なる意図に基づいた速度で運動させた際に、相対的な知覚速度が異なるか明らかにすることを目的とした。

被験者

実験に参加した被験者は著者を含む 11 名 (男性 10 名, 年齢 23-38, 左利き 1 名) だった。著者以外の 10 名は実験目的に対してナープだった。被験者は全員正常視力または矯正正常視力だった。実験前にそれぞれの被験者から書面でのインフォームドコンセントを得た。

実験装置

図 2.1 に実験装置の側面図を示す。実験刺激は 19 インチ CRT モニタ (1024 × 768 pixels, リフレッシュレート 120 Hz) 上に呈示された。被験者は高さ調節可能な椅子に腰掛け、眼前の衝立の隙間を通してディスプレイを観察した。ディスプレイ中央の注視点までの観察距離は 73 cm だった。

ディスプレイの手前には大型のペンタブレット (Wacom Intuos 4 PTK-840/K0, 62.3 × 46.2 cm) が設置された。被験者は利き手でペンを保持しタブレット上で左右に運動させた。このペンタブレットは衝立に遮蔽されたため、被験者は自身の手の運動を観察することはできなかった。被験者の応答は利き手と反対の手で操作されるテンキーパッドによって取得した。

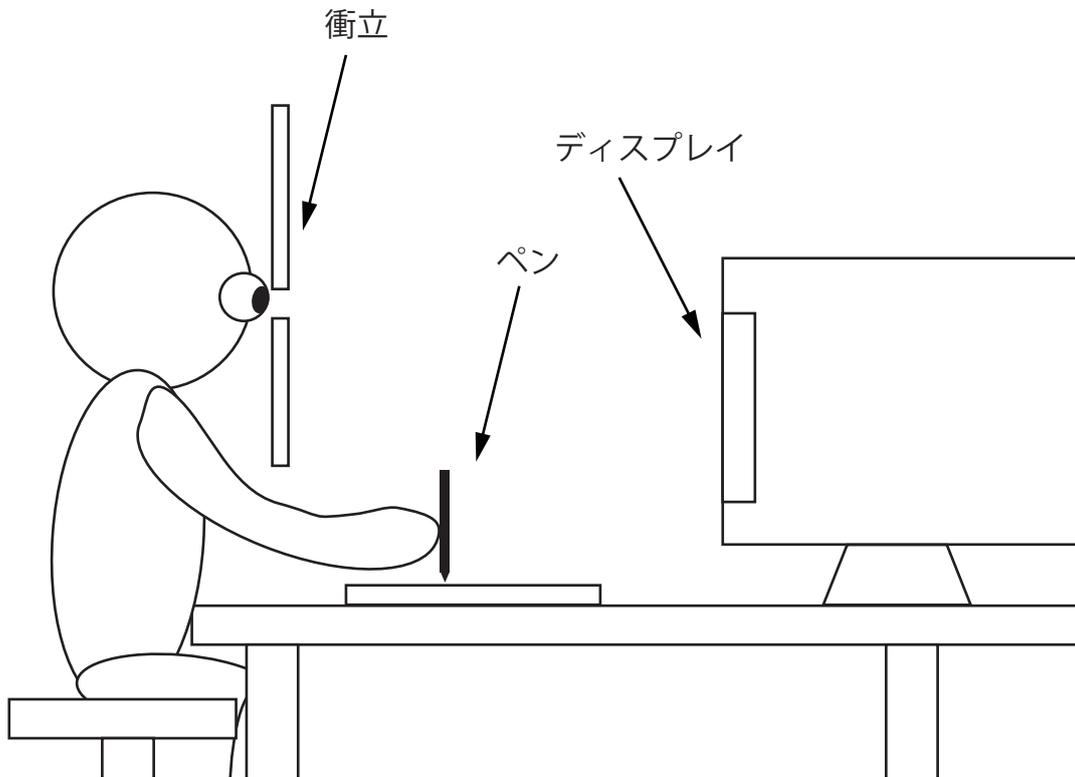


図 2.1 実験 1 装置側面図

実験刺激

図 2.2 に実験刺激の概要と 1 トライアル中の刺激呈示の時系列的フローを示す．刺激は灰色の背景 ($28.4\text{cd/m}^2, 26.6^\circ \times 19.7^\circ$) 上に呈示された．観察する運動刺激は 2 つ同時に呈示され，どちらも最大 $105\text{cd/m}^2, \sigma = 0.79^\circ$ の二次元ガウス分布状の輝度を持つガウシアンプロップであった (図 2.3)．ディスプレイ中央には固視点として直径 0.07° の白円が呈示された．二つの運動刺激はディスプレイ中心から上下 6.25° の高さに位置する水平軌道のそれぞれどちらか一方を左右に運動した．運動刺激の一方は能動刺激と定義され，リアルタイムに取得された被験者の手の左右位置に実寸で一致して運動した．もう一方の刺激はコントロール刺激であり，常に能動刺激と反対方向へ運動した．運動中の両刺激の相対位置から速度判断を行うことを防ぐため，コントロール刺激の初期呈示位置は固視点を原点として，能動刺激と点对称な位置から左右に最大 1.6° の範囲内でランダムに決定された．

応答タスクである速度比較タスクの開始位置を示すために，上下の軌道上にそれぞれの開始線が呈示された．能動刺激の開始線は固視点の左方 8° ，コントロール刺激の開始線は前述のずれに応じて固視点の右方 $8 \pm 1.6^\circ$ の範囲内の水平位置に呈示された．開始線の大きさは $0.13^\circ \times 1.3^\circ$ で運動刺激と重なった際には常に背面に呈示された．刺激呈示のためのプログラムには X-code (C プログラム開発環境, apple 社) および心理物理実験用ライブラリ Psychlops(?, ?) が用いられた．

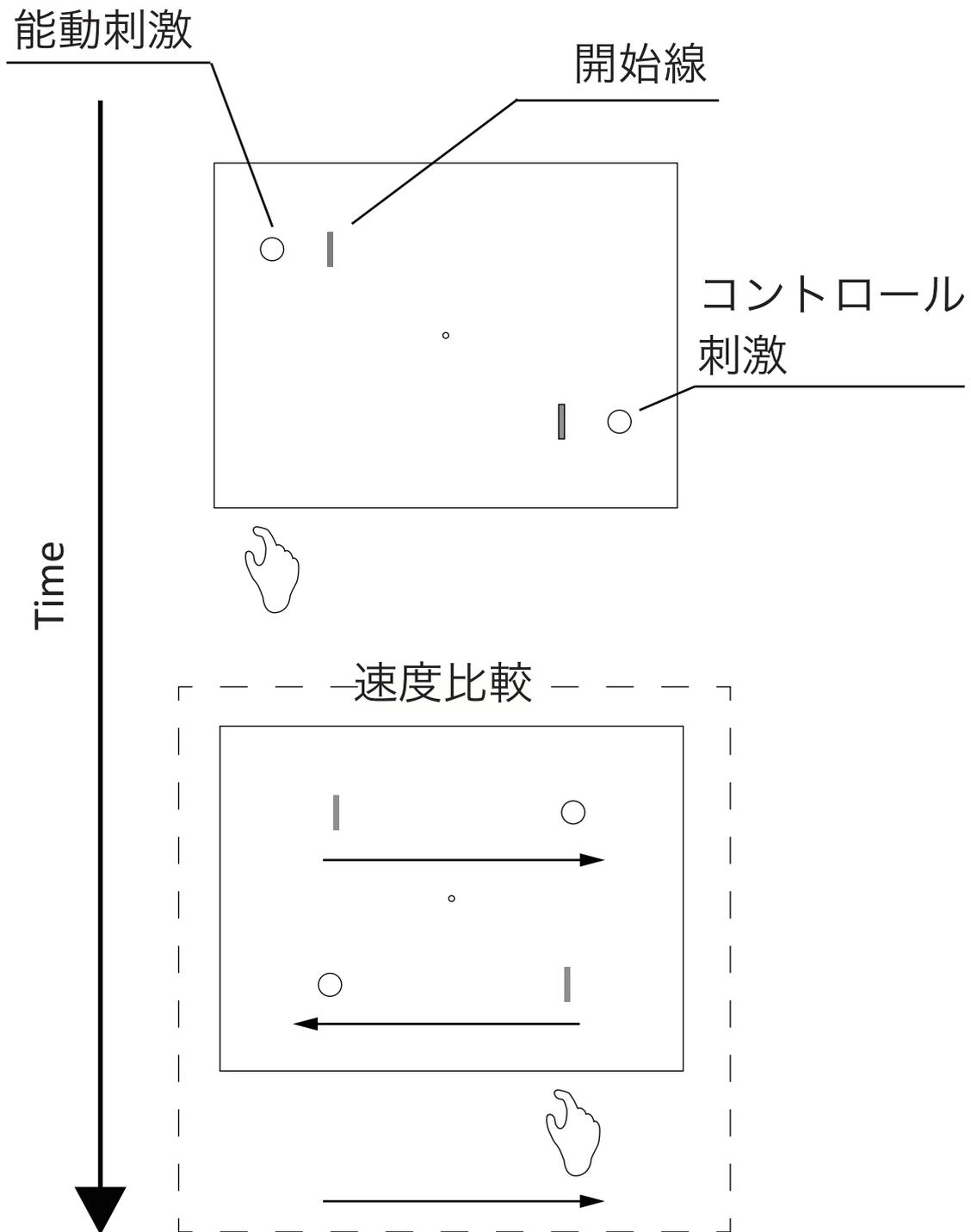


図 2.2 能動刺激が上軌道の場合の 1 トライアルの流れ。被験者が手を右に運動させると能動刺激は右に、コントロール刺激は左に運動した。被験者は開始線を越えた後の両者の速度を比較し、どちらが速いか強制二択応答した

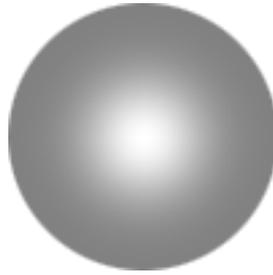


図 2.3 運動刺激であるガウシアンブロップ

手順

能動刺激が上の軌道上に呈示されたトライアルの流れを図 2.2 に示す。被験者は自身の行動と刺激運動を対応付けるため、トライアルのはじめに能動刺激を開始線の左側へ移動させた。このとき受動刺激も同時に下軌道の開始線の右側へ移動した。能動刺激が開始線より左側に移動することで開始線が赤色に変化した。この状態を準備状態と定義した。

準備状態へ移行後、被験者は速度条件ごとに異なる意図で手を右方向へ運動することで、両刺激を運動させた。両刺激はそれぞれの開始線に同時に到達した後、コントロール刺激の速度のみが上下法で決定された比率で変化した。能動刺激が開始線から右 16° を超えた時点で両刺激は同時にフェードを開始し、能動刺激が更に右 3.13° 移動した地点で両刺激は完全に消失した。その後、ブランク画面が呈示され、被験者は開始線を超えて以降の両刺激の運動速度について、速いと知覚した方の軌道をテンキーパッドで応答した。被験者が応答を終えることで次のトライアルが開始された。応答直後の手の位置に関する教示は行わなかったが、各トライアル開始時の能動刺激の初期呈示位置は概ねディスプレイ右端付近であった。トライアル開始時点で能動刺激が開始線より左に位置した場合、トライアルは準備状態から開始された。

教示速度条件は、高速、中速、低速の 3 条件であり、被験者は条件に応じた意図で能動刺激を運動させた。行動の基準となる速度は被験者ごとに異なる可能性があるため、以下の手順でそれぞれの条件速度を決定した。高速条件では各ブロックの開始前に「刺激を出来るだけ速く運動させる」よう教示され、刺激運動と対応した手の運動を 10 回行い、その速度が計測された。その後の実験トライアルではそれらと同等の速度で能動刺激を運動させるよう教示が与えられた。実験トライアルのうち事前に計測した高速条件 10 回の平均に対して標準偏差の 2 倍より遅かったトライアルは無効とされ、音声フィードバックが与えられた。低速条件の実験ブロックでは、できるだけ遅く運動させるという教示は実験進行上困難であったため、開始前に「特に何も考えずに刺激を運動させる」よう教示された状況下で刺激運動と対応した手の運動を 10 回行い、速度を計測した。その後の実験トライアルではそれらより遅い速度で能動刺激を運動させるよう教示が与えられた。実験トライアルのうち 10 回の事前計測の平均に対して標準偏差の 2 倍より速かったトライアルは無効とされ、音声フィードバックが与えられた。中速条件の実験ブロックでは 10 回の計測は実施されず、被験者は実験中「特に何も考えずに刺激を運動させる」よう教示された。

能動刺激の速度は被験者の手の速度に応じてトライアルごとに異なったため、コントロール刺激の速度は能動刺激の速度に対する比で定義された。その速度比は被験者の応答に基づいた上下法により決定され、1-up-1-down のルールに従った。ステップサイズは 5% で、被験者の応答が 3 回反転した時点で 1 つの系列を終了した。1 つの実験ブロックは 3 系列の階段からなり、すべての系列が終了した時点でブロックは終了し

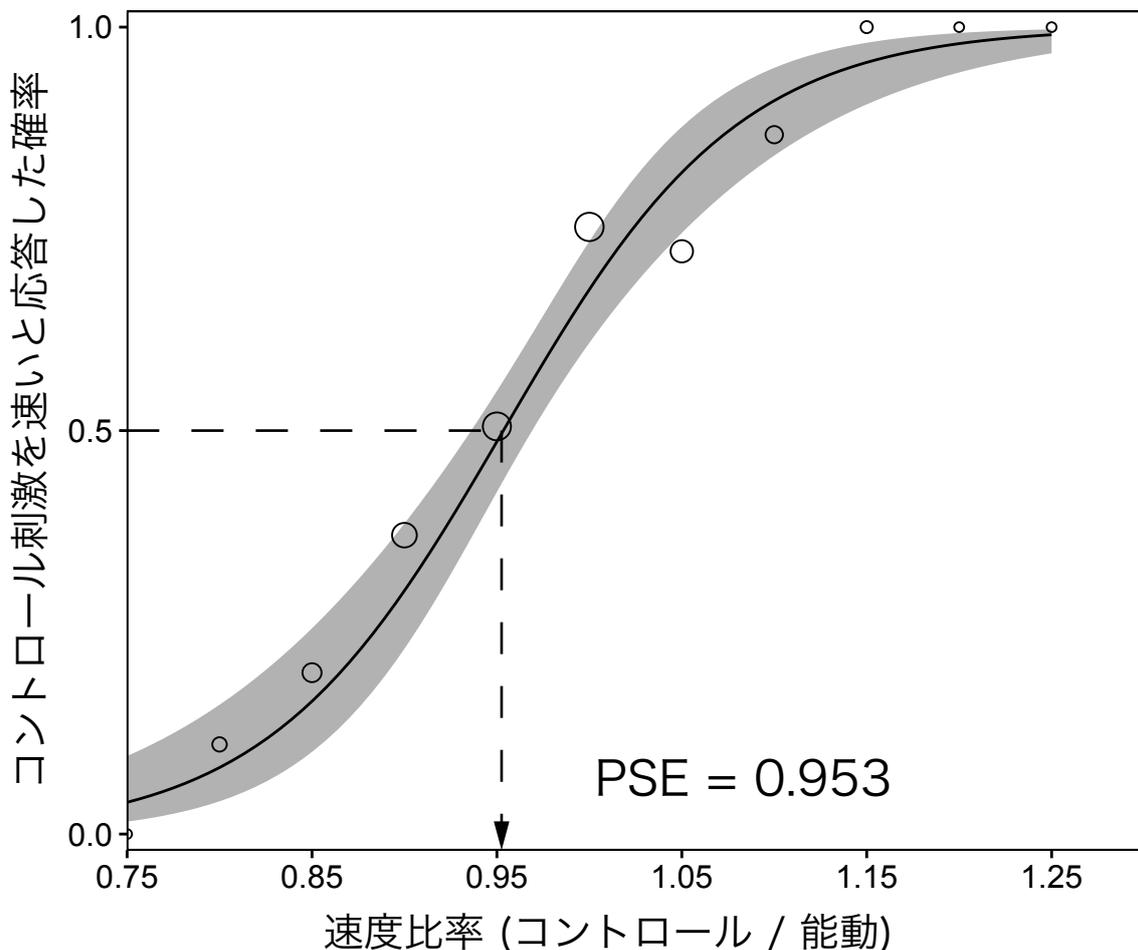


図 2.4 応答から得られた心理物理関数と PSE の算出の一例。円形のシンボルは実測値から得られた応答確率を表す。シンボルの大きさは各速度における試行数の対数値を表す。実線はロジスティック関数によるフィッティングを示し、網掛けは 95% 信頼区間を表す。この関数が 0.5 の値となる速度比を PSE と決定した。

た。3 系列の初期速度比はそれぞれランダムに決定された。1 ブロックの平均トライアル数は 101.1 回だった。

各条件で得られた応答に対し一般化線形モデルによるロジスティック回帰をおこない、コントロール刺激の速度比に対する、コントロール刺激が速かったとした応答確率を表す心理物理関数が得られた (図 2.4)。回帰曲線の応答確率が 50% となる速度比を主観的等価点 (PSE: Point of subjective equality) と定めた。これは PSE において受動刺激と能動刺激が知覚的に等速となることを意味し、PSE となる速度比の値が 1 より大きければコントロール刺激よりも能動刺激を速く知覚する傾向を示したことを意味する。PSE の算出にはオープンソースの統計解析ソフトウェアである R を使用した。能動刺激の軌道の上下と速度条件はブロック内で固定であり、繰り返しが 2 ブロックだった。その為、被験者一人につき、速度 3 × 軌道 2 × 繰り返し 2 の 12 ブロックが実施された。また、被験者ごとに実験ブロックの順序はランダム化された。

結果

1名の被験者は高速条件においてコントロール刺激の速度比率の最大値である1.5の試行においても速度判断を正しく行うことができなかつたため、そのデータを解析から除外した。

異なる速度条件において被験者の運動速度が教示通りになっていたかを確認するため、被験者ごとに各速度条件での有効トライアルにおける運動速度の平均値を算出した。そしてその結果に対して、速度条件を要因とする繰り返しあり1要因分散分析を行った。その結果、主効果は有意であり ($F(2, 18) = 68.35, p < 0.001$)、多重比較の結果すべての条件間で有意差が存在した。このことから、被験者は意図ごとに刺激の運動速度を切り替えたことが確かめられた。

図 2.5 に各条件の PSE における刺激速度比率の被験者間平均を示す。誤差棒は標準誤差を表す。各被験者の条件ごとに得られた PSE に対し、能動刺激の軌道（上下）と教示速度（高速、中速、低速）の二つを被験者内要因とする繰り返しあり2要因分散分析を実施した。その結果、軌道の上下において主効果は有意でなかった ($F(1, 9) = 0.496, p = 0.5108$)。また、教示速度に有意な主効果が存在した ($F(2, 18) = 19.39, p < 0.0001$)。多重比較をおこなったところ、高速-低速間 ($t(19) = 5.914, p < 0.001$)、高速-中速間 ($t(19) = 4.64, p < 0.001$) にそれぞれ有意差が認められた。両者に交互作用は存在しなかった ($F(2, 18) = 1480, p = 0.254$)。軌道条件間に有意差が無かつたことから、軌道を区別せずに新たに算出した各被験者の PSE を永井らの検定法 (?、?) を用いて比較した結果、10人中7人の被験者で高速条件にて低速条件より有意に PSE が大きかつた。以上の結果より、速度条件の違いによって知覚される速度が異なる、具体的には運動に対する教示速度が高速であるほど知覚速度が速くなる傾向があつた。

上記の PSE の解析では速度条件による分類は教示のみで行われたため、有意差はあつたものの、教示速度条件ごとの実際の刺激運動速度は被験者間で異なり、また被験者内でも条件ごとに偏りがあつた。その為、全被験者の教示速度条件ごとの平均刺激速度と PSE における刺激速度比率との関係を図 2.6 にプロットした。シンボルの違いは速度条件の違いを表す。横方向の誤差棒は刺激速度の標準偏差を表す。線分でつながれたデータは同一の被験者であることを示す。図 2.6 より、刺激速度が大きくなるにつれて PSE における速度比が増加する傾向が読み取れる。つまり、高速で手を動かすとき、能動刺激をより速く知覚する傾向があつた。この相関係数は 0.637 であり統計的に有意であつた ($p < 0.01$)。

考察

高速に運動する条件において他の条件と比較して知覚速度比が有意に大きかつた (図 2.5)。すなわち、自らの行動で刺激を運動させた際に、能動刺激の速度知覚は教示の違いの影響を受けたと考えられる。また、実際に被験者の手の運動速度と知覚速度の関係に着目すると、能動刺激の知覚速度が行動の速度に従って変化することが示された (図 2.6)。Mitsumatsu (2010) や Wohlschlagler (2000) による先行研究と異なり、実験 1 で用いられた刺激には運動の多義性はないため、その運動速度は物理的には一義に決定できるものであつた。それにも関わらず知覚の変化が生じたことから、行動による速度知覚の変化は運動の解釈とは異なる知覚の変化として表れたことが示唆される。だがこの知覚変化が Mitsumatsu (2010) や Wohlschlagler (2000) らの研究で見られた効果と同様の原理によるものであるかは明らかではない。

実験 1-1 において被験者の手の速度と刺激速度は一致していた。そのため、被験者の刺激速度への意図や関与と無関係に、単に刺激観察と同時に運動した手の速度が知覚を変化させた可能性がある。そのため、実験 1-2 では刺激速度と無関係な速度で手を運動させた際に、その速度の違いが刺激の知覚速度に影響するか検討した。

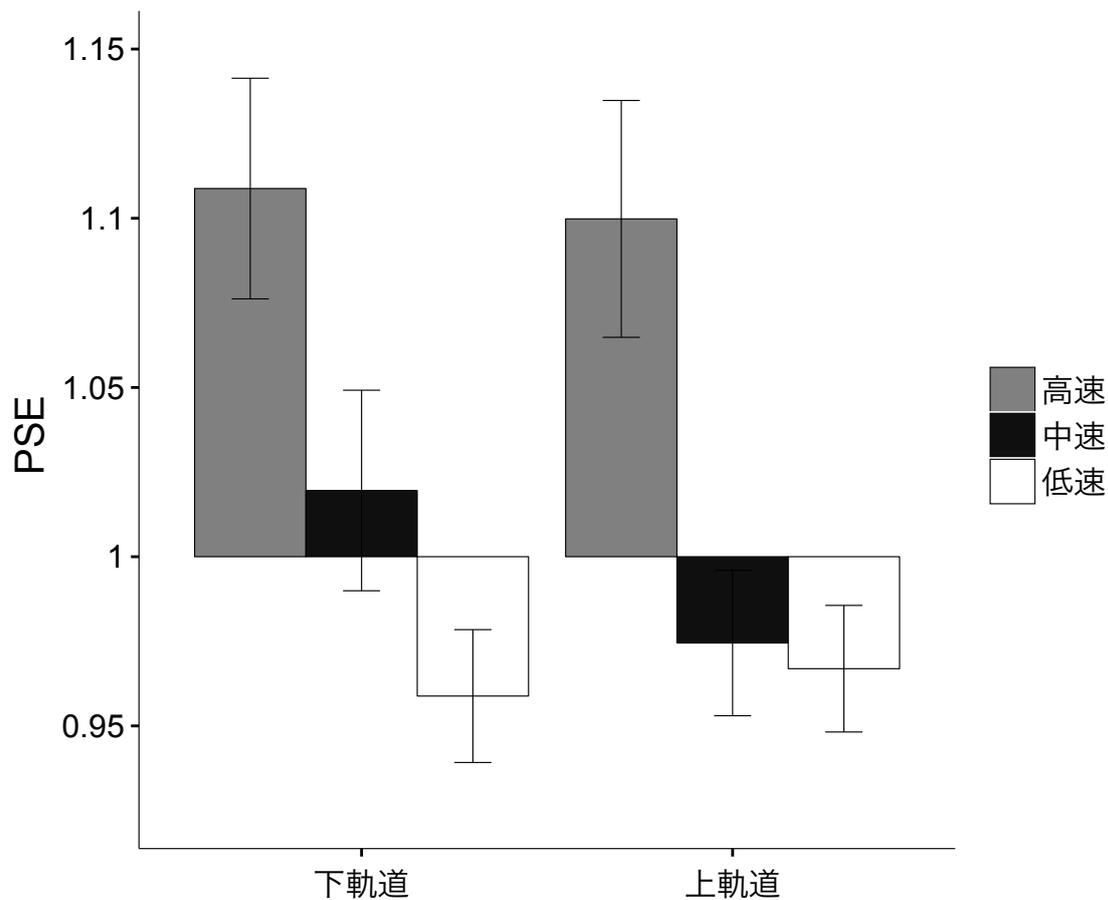


図 2.5 実験 1-1 の各条件の PSE の被験者平均. 横軸は能動条件の軌道の上下, 凡例は手の速度条件の違いを表す. 誤差棒は標準誤差を表す.

2.1.2 実験 1-2

実験 1-2 では実験 1-1 で見られた行動の効果が手の速度それ自体による影響であるか調べることを目的とした. そのため, 実験 1-2 では被験者が刺激速度に関して意図を持たない場合に, 知覚速度が手の運動速度の影響を受け変化するか調べた. 被験者の行動で運動する刺激の速度は, 被験者の手の速度と無関係にランダムで決定された. このとき, 被験者は自身の意志により刺激速度を決定することができなかったため, 刺激速度に関する意図を持たない, あるいは手の速度にかかわらず一定であった.

被験者

被験者は著者を含む 8 名 (男性 7 名, 年齢 23-39, 左利き 1 名) であり, 著者以外の 7 名は実験目的に関してナイーブであった. 被験者は全員が正常視力または矯正正常視力であった. 実験前にそれぞれの被験者から書面でのインフォームドコンセントを得た.

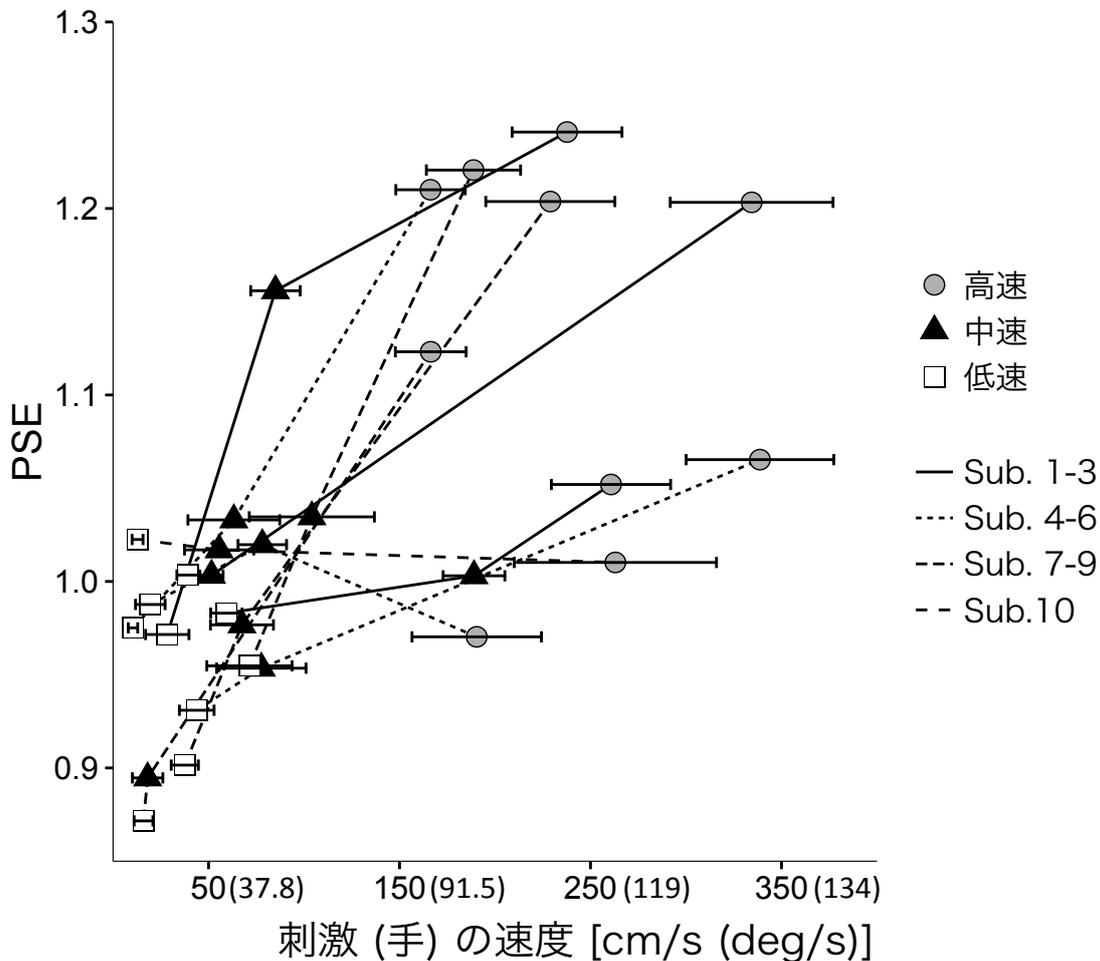


図 2.6 実験 1-1 の個人ごとの結果. 刺激（行動）運動速度に対する主観的等価点 (PSE). シンボルの違いは速度条件の違いを表す. シンボルをつなぐ線は同一の被験者であることを示し, 見やすさのため 3 人ごとに異なる. 誤差棒は各条件における手の速度の標準偏差を表す.

実験装置と刺激

実験装置, 背景刺激, 運動刺激のガウシアンプロップは実験 1-1 と同一であった. ただし, 観察距離は 63cm だった. ディスプレイ中心から左方 7.79° の位置が運動刺激の運動開始位置であった. 能動刺激の運動速度は条件ごとに固定で, 25, 75, 125, 175, 225 cm/s の 5 通りだった. それぞれの速度は視角にして $19.4, 54.4, 81.1, 100.3, 114.0^\circ/s$ に対応した. また, 被験者の手の運動速度条件は高速, 中速, 低速の 3 条件で, それぞれ 225, 125, 25 cm/s に定められた. 実験 1-1 において軌道の上下による差がみられなかったため, 実験 1-2 では能動刺激が下軌道を運動する条件のみを採用した.

実験手順

実験 1-1 と同様に被験者が能動刺激を開始線の左に動かすことでトライアルが準備状態になった. その後被験者は手の運動速度条件で定められた速度でペンを保持した手を右に運動させた. 能動刺激が開始線を越えた

後、実験 1-1 と異なり能動刺激の速度は刺激速度条件に応じた速度に変化し、等速で右方向へ運動した。同時にコントロール刺激は能動刺激速度に階段法で決定された値を掛けた速度に変化し、運動した。その後、能動刺激が 15.5° 移動した後に両刺激はフェードアウトした。被験者の手の運動と刺激の消失がともに完了した時点で固視点が消失し、被験者は上下どちらの軌道の刺激が速かったかテンキーパッドを用いて応答した。手の運動速度条件は実験ブロック内で固定であった。各ブロックのはじめにそれぞれの手の運動速度条件の規定速度である 225, 125, 25 cm/s で手を動かす練習トライアルが実施された。練習時に提示する能動刺激の速度は練習する速度と同一だった。被験者は練習用の刺激運動を手がかりとし、手の運動速度を学習した。手の運動速度が規定速度の 0.8-1.2 倍の範囲であった場合に練習トライアルを成功とし、手の速度が規定範囲より速い場合には 1000Hz、遅い場合には 500Hz のトーンが失敗のフィードバックとして提示された。練習トライアルは 30 回成功するまで繰り返された。実験トライアルにおいても失敗時に同様のフィードバックが与えられ、成功トライアルのみが解析に用いられた。

コントロール刺激の速度比率は上下法により決定された。実験ブロックは刺激速度につき 1 系列の計 5 系列の階段から成った。ステップサイズは系列開始時に 20%、2 回の応答反転により 10%、4 回の応答反転以降で 5% へと変化した。応答が 7 回反転した時点で 1 つの系列を終了した。5 通りの刺激速度条件がランダムな順で提示されるものを 1 セットとし、すべての速度条件において系列が終了するまでセットが繰り返された。1 ブロックの平均トライアル数は 121.9 回だった。

結果

刺激速度が 225cm/s のとき、2 名の被験者が低速手運動条件において、1 名の被験者が低速と中速手運動条件において、さらに 1 名の被験者がすべての手運動速度条件において速度判断を正しく行うことができず、刺激の提示範囲において応答が収束しなかったため、該当する条件のデータを欠損値とした。特定の条件において欠損が多いこと、また応答の発散の傾向に一貫性がなかったことから欠損値を MAR (Missing at Random) と仮定し、多重代入法によって PSE の値を補完した。多重代入法による欠損値の推定には R 言語の mice ライブラリを使用した (?, ?)。

図 2.7 に条件ごとの PSE における速度比 (コントロール/能動) の被験者間の平均を示す。誤差棒は標準誤差を表す。グラフより低速条件において PSE の値が大きい傾向がみられた。この傾向を統計的に確かめるため、手の速度 (低速, 中速, 高速)、刺激速度を被験者内要因とする繰り返しあり 2 要因分散分析を行った。その結果、手の速度に関して有意な主効果が存在した ($F(2, 14) = 15.302, p < 0.01$)。多重比較の結果手の低速条件において他の条件より PSE が有意に大きかった (低速-高速: $t(39) = 3.962, p < 0.01$, 低速-中速: $t(39) = 5.325, p < 0.01$)。刺激速度の主効果は有意でなかった ($F(4, 28) = 1.605, p = 0.201$)。また、手の速度と刺激速度の交互作用は有意傾向だった ($F(8, 56) = 1.917, p = 0.0753$)。以上の結果から、手の運動が低速であるときに能動刺激を速く知覚する傾向がみられたと言える。

手の速度と刺激速度間の交互作用が有意傾向であったことから、手の速度による主効果は手の速度と刺激速度が大きく異なる場合のみの影響である可能性が考えられる。このことを確かめるため、刺激速度が手の速度と一致する条件のデータのみを用いて、実験 1 と同様に繰り返しあり 1 要因分散分析を行った。その結果、手の速度に関して有意な主効果は得られなかった ($F(2, 14) = 0.213, p = 0.8106$)。また、図 2.8 に被験者ごとに手の運動速度と刺激速度が対応する場合の PSE のみを抜き出してプロットしたグラフを示す。横軸は手の実速度を、縦軸は PSE の値を示し、誤差棒は手の速度の標準偏差を示す。シンボルの形状は手の速度条件の違いを示す。グラフから手の実速度と PSE の相関係数は -0.1103 であり、有意ではなかった ($p > 0.1$)。

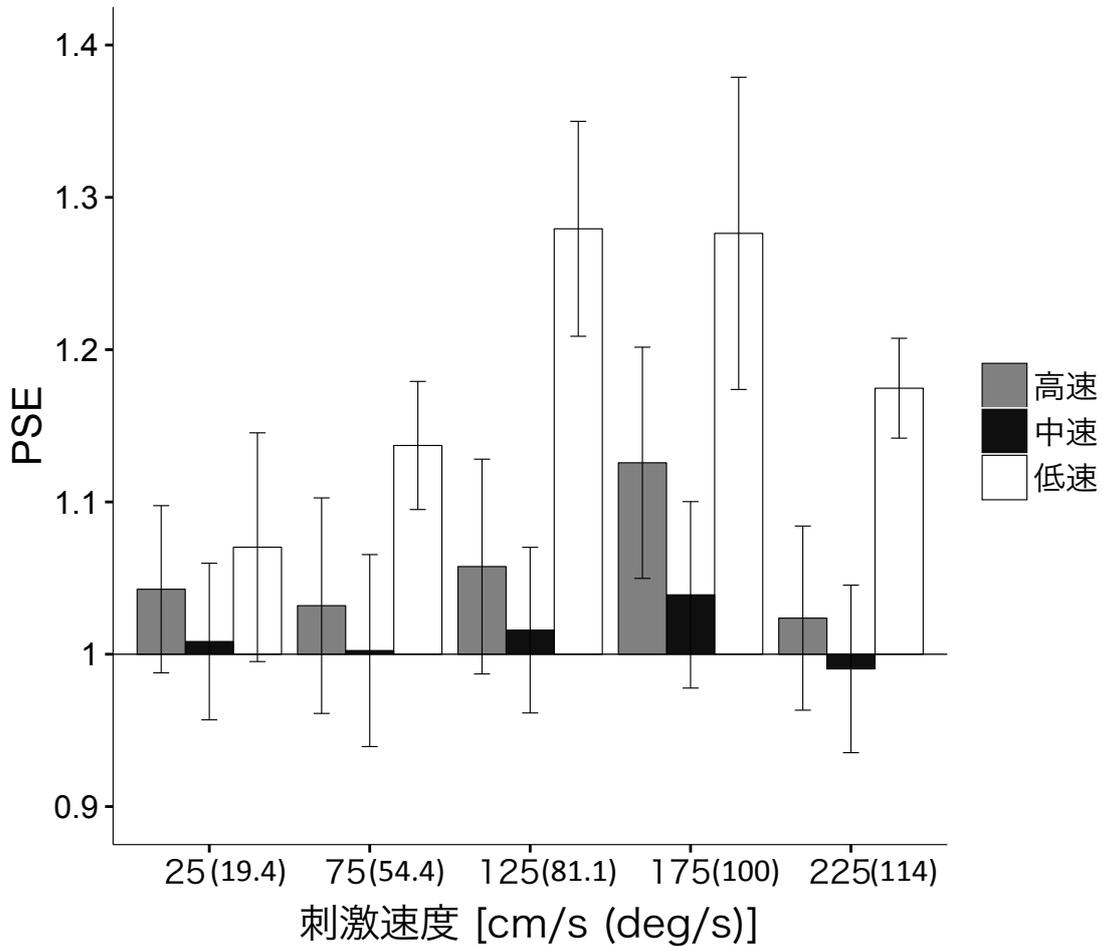


図 2.7 実験 1-2 の各条件の PSE の被験者平均. 横軸は刺激速度を示す. 凡例は手の速度条件の違いを表す. 誤差棒は標準偏差を表す.

考察

実験 1-1-と同等な, 手の速度と刺激速度が一致する条件のみに関して解析をおこなったところ, 手の速度の主効果は優位でなかった. このことから, 実験 1-1 で見られた行動の効果は少なくとも行動時の手の運動速度のみによる影響ではなく, 行動時に意図した刺激速度の違いによる影響であることが示唆された.

ただし, 被験者の行動時の手の速度が低速であるとき, 能動刺激を速く知覚する傾向が見られた. この傾向は刺激速度が手の速度と大きく異なった場合に被験者が自身の手の運動と能動刺激の速度の誤差を過大評価したことが原因である可能性がある. 一方で高速条件において刺激速度の小さいものを過小評価する傾向は見られなかった. これは高速条件において被験者の手の運動終了から刺激運動終了までに時間差があり, その間の刺激観察が誤差の影響を弱めたからだと考えられる.

実験 1-1 の結果から, 被験者の行動をリアルタイムに反映する視覚刺激を観察したとき, その知覚速度は行動時に意図する速度が速くなるにつれて速くなること, そしてその効果は刺激観察時に同時に手を動かしていたことの影響ではないことが確かめられた.

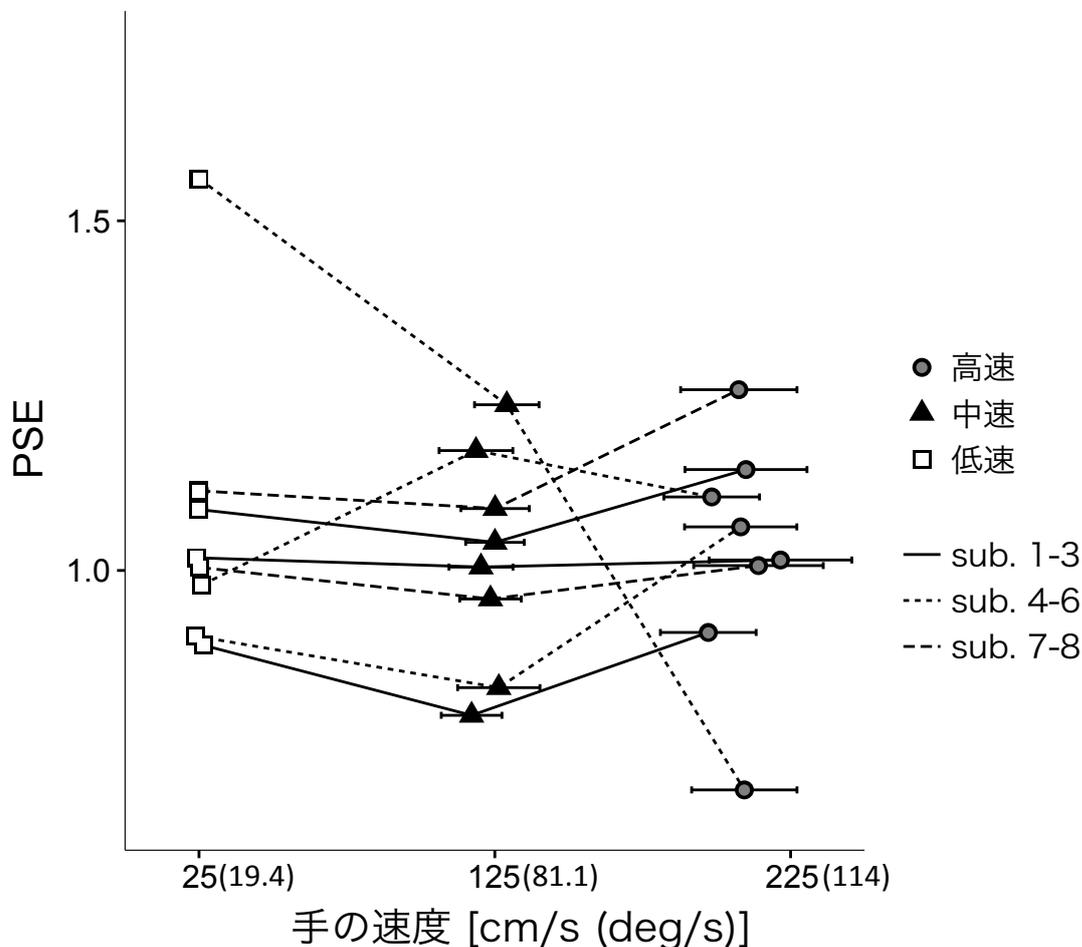


図 2.8 実験 1-2 で手の速度条件の規定速度と刺激速度が同一であった条件における個人ごとの果. 手の運動速度に対する主観的等価点 (PSE). シンボルの違いは速度条件の違いを表す. シンボルをつなぐ線は同一の被験者であることを示し, 見やすさのため 3 人ごとに異なる. 誤差棒は各条件における手の速度の標準偏差を表す.

2.2 実験 2

実験 1-1 より, 被験者のドラッグ動作と連動して運動する刺激の知覚速度は被験者が速く動かすことを意図ときに更に速くなることが分かった. また実験 1-2 より, 刺激速度が行動の速度と無関係に決定される場合には行動時の手の速度は同様の速度を持つ刺激の知覚速度に影響を与えなかった. このことから高次に意図した刺激速度が知覚速度に影響していることが示唆された.

しかし, 実験 1 で用いられたドラッグ運動は, 手の速度が物体速度とリアルタイムに一致したため, 手の動きがダイレクトに刺激運動の速度に関係するものだった. 被験者の行動時の刺激速度が影響するのは, この様にリアルタイムで自身の手の制御下にある場合にのみ限られる可能性がある. 一方で, より関与の小さい行動, 例えば指で弾くなど運動の開始のみに影響する刺激の場合でも, 意図する刺激速度によって知覚が変化す

るだろうか。そこで実験 2 において、関与の小さい行動時に意図した刺激速度が知覚速度に影響するか明らかにすることを目的とした。

2.2.1 実験 2-1 概要

実験 2-1 ではピンボールあるいはパチンコを模した、弾くことで運動する刺激を能動刺激として採用した。これは、バネで固定されたスライダのつまみを一定距離引いた後離し、スライダが元の位置に戻ると同時に、隣接する画面上の円盤刺激が運動を開始するものだった。被験者は速度条件で定められた距離スライダを引くことで、二通りの刺激速度を選択することが可能だった。

一方で、画面上で数字のカウントダウンの後に自動的に運動を開始する刺激を受動刺激と定義した。能動刺激と受動刺激の速度を比較することで PSE となる受動刺激の速度比を求め、意図の速度知覚への影響を確かめた。

その結果、自身の行動の有無による効果は有意であったが、速度条件で定められた刺激速度の効果は有意でなかった。また、交互作用は有意であり、スライダを短い距離引く低速条件において自身の行動を速く見る傾向が有意であった。

実験 2-1 と実験 1-1 で矛盾する傾向が見られた理由には複数の可能性が考えられる。一つは、行動時の手の運動が刺激速度に影響した可能性である。実験 1-2 において被験者自身の手の運動速度は知覚速度に影響しなかったが、このとき刺激速度は被験者の行動と無関係に決定されており両者に対応はなかった。そのため、刺激速度を知覚する際に手の速度が無視された可能性がある。一方で実験 2-1 実験では被験者のスライダを引く手の運動が刺激速度に対応していた。このように刺激と手の運動に対応関係がある場合のみ、手の運動が知覚に影響した可能性がある。本実験で用いられた刺激はピンボールを模した刺激なので、高速条件では後ろ向きに強い力で長いストロークをする必要があった。刺激の運動方向は前方であったので、刺激運動方向と逆方向のフィードバックが知覚速度を抑えた可能性がある。そして高速条件と低速条件でのフィードバックの大きさの違いが両者に知覚の差を生じさせた可能性がある。

もう一つの可能性は、自身の行動の履歴が知覚に影響した可能性である。我々は自身の行動とそれにより得られた結果の対応を学習し更新しているため、自身が行動することによって予測される結果はそれ以前に観察した行動結果に影響され近づくと考えられる。もし速度推定のプロセスにおいて、知覚速度が行動から予測される刺激速度を知覚の手がかりに用いているなら、それまでの行動、特に直近の自身の行動結果の刺激速度に知覚が近づいた可能性がある。つまり速い結果を観察した後には行動結果を速く、遅い結果を観察した後には行動結果を遅く知覚した可能性がある。本実験ではブロック内でのトライアル呈示順は Fast, Slow, Passive の順の繰り返しで固定されていた。そのため、直前に観察した自身の行動結果の刺激速度は条件ごとに異なり、低速の行動の前には高速の行動を、高速の行動の前には低速の行動を行った。この理由から、本実験の知覚速度変化が意図の違いによるものか、履歴効果からの予測の変化によるものか、あるいは上記の手の運動とフィードバックによるものか明らかではない。

そこで、次の実験 2-2 では二つの操作を行った。1 つ目は、各条件のトライアルの呈示順をランダム化することで行動の履歴効果を平均化した。2 つ目は、スライダ操作に加えて、ボタン押しで刺激速度を操作する行動条件を追加した。これにより、手の運動の違いが条件間でほぼ変わらない際の、意図の影響を調べた。

2.2.2 実験 2-2 概要

実験 2-1 では意図した速度条件の違いにより速度知覚が変化する傾向がみられたが、その効果は実験 1 で見られた知覚変化とは反対であった。実験 2-1 では目的とする刺激速度が異なると、被験者自身の動作や力覚フィードバックも同様に異なっていた。そのため、手の運動を含めた複合的な要因で知覚速度が変化し得る可能性がある。そこで実験 2-2 では被験者の手の運動がほぼ同一である条件でも意図が知覚速度に影響するか確かめることを目的とした。具体的には、ゲームパッドの 2 つの対応ボタンを押すことで、それぞれ速い刺激、遅い刺激が運動を開始する行動手段条件を追加した。被験者は押すボタンを選択することで刺激速度を意図することが可能であった。しかし、行動時の身体運動やフィードバックはほぼ同一であり、身体運動それ自体は刺激速度と関係しなかった。同時に、実験 2-1 で考察された履歴効果による行動結果予測の変化が知覚速度に影響するか確かめるため、呈示される速度条件の順番をランダム化した。また実験 2-1 でのコントロール条件の代わりに、能動刺激が受動刺激より先に呈示されるトライアルと後に呈示されるトライアルをランダムに同数実施することで両者の観察順の効果を同様に平均化した。

その結果、行動手段の主効果が有意であった一方、速度の効果は有意でなかった。また、交互作用は有意ではないが有意傾向だった。

また、行動から得られる予測の効果を調べるための追加の解析として、直前の自身の行動結果の速度が高速であったトライアルと低速であったトライアルで知覚速度を比較したところ、直前のトライアルが拘束条件であるときに刺激を速く知覚する傾向が見られた。

実験 2-1 では高速条件と低速条件で行動による知覚変化量に差が存在し、低速条件は知覚速度を速める傾向だった。だが実験 2-2 のスライド条件では同様の効果は見られず、むしろ、平均値は有意でないが逆の傾向を示した。行動時に意図する速度は実験 2-1 と同様であったことから、実験 2-1 で見られた知覚速度の変化は意図する速度の影響ではないことが明らかになった。そしてスライド条件における被験者の手の運動も実験 2-1 と同様であったため、手の運動やフィードバックの方向による影響ではないことが同じく確かめられた。

行動の手段により知覚される速度が異なり、スライドよりボタンで自身の行動結果を速く知覚する傾向が見られた。これはスライド操作の場合被験者が手を離す動作を行ってからバネがもとの位置に戻った後に刺激が運動を開始したことによるタイムラグの影響である可能性がある。序論で述べたように、自身の行動から刺激呈示までの間のタイムラグが大きい場合に運動主体感が減少することが知られており、本実験においてもタイムラグによる運動主体感の違いが行動手段による知覚の差の原因である可能性がある。また、行動から刺激呈示までの間のタイムラグによって時間知覚が変化することが報告されており、刺激出現までのタイムラグを短く見積もるという結束効果から intentional binding と呼ばれている。時間は物理的には速度に従属した特徴であるため、本実験で見られた速度知覚の変化がこの intentional binding の時間知覚変化と何らかの関係をもつ可能性がある。

また結果から、行動の予測による効果は行動の手段を区別しないものであった。一方で、意図による速度条件と行動条件の交互作用は有意ではないが有意傾向だったことから、行動時の意図は行動の手段に依存する可能性が存在する。このことから、行動の意図の効果と予測の効果は知覚速度に対して互いに独立した影響を与えた可能性がある。

実験 2、特にボタン操作時に意図の影響がみられなかったことから、行動による刺激速度の制御が間接的であるほど、意図の影響は減少することが確かめられた。また、その際でも行動時の予測が行動結果の知覚速度に影響する可能性が示唆された。

第3章

行動の予測の影響

3.1 実験3

実験1, 2の結果から、刺激速度をリアルタイムで操作可能なときにその知覚速度が意図した刺激速度の影響を受けることが明らかになった。また自らの行動で物体が運動を開始し、その速度を自らの行動選択で決定可能であるとき、その物体の知覚速度は過去の行動で選択した刺激速度に影響される傾向が見られた。そして両者の影響は独立である可能性が示された。

実験1-1, 2-1, 2-2では行動を行う際に、刺激速度を条件に応じて自身の行動で選択することが要求されたため、被験者は常に刺激速度に関して意図を持っていた。実験1-2では被験者の行動選択が刺激速度を決定するものではなかったため被験者は刺激速度に関する意図を持たなかったが、同時に行動から刺激速度を予測することができなかったか、あるいはその予測は不確かだった。そのため、自身の行動から刺激速度を予測することが可能な状況で、その予測が単独で知覚速度に影響するか、そしてどのように影響するか明らかでない。

そこで実験3では、行動時における運動対象の速度に関する予測が、単独で知覚速度に影響するか調べることが目的とした。そのため、被験者の行動で現れる刺激の運動速度を一種類に限り、刺激の打ち分けを廃した。この場合被験者は刺激速度を自身の意志で操作できず、行動時に意図する速度を持つことはなかった。一方で刺激速度に対する予測に関しては、刺激速度は一定であったため安定した予測を持つことができた。

3.1.1 実験3-1

実験3-1では行動から刺激呈示までの間にタイムラグによる知覚変化を見るため、行動から刺激呈示までに複数のディレイを持つ刺激について知覚速度を測定することで、その時間特性を確かめた。実験3-2ではディレイに伴う速度知覚の変化が、行動による時間知覚の変化である intentional binding と関係するかを、刺激の持続時間知覚を測り、速度知覚の変化と比較することで検討した。

被験者

実験に参加した被験者は著者を含む8名（男性6名、年齢21-33）だった。著者を除く7名は実験目的に対してナイーブであった。被験者は全員正常視力または矯正正常視力だった。実験前にそれぞれの被験者から書面でのインフォームドコンセントを得た。

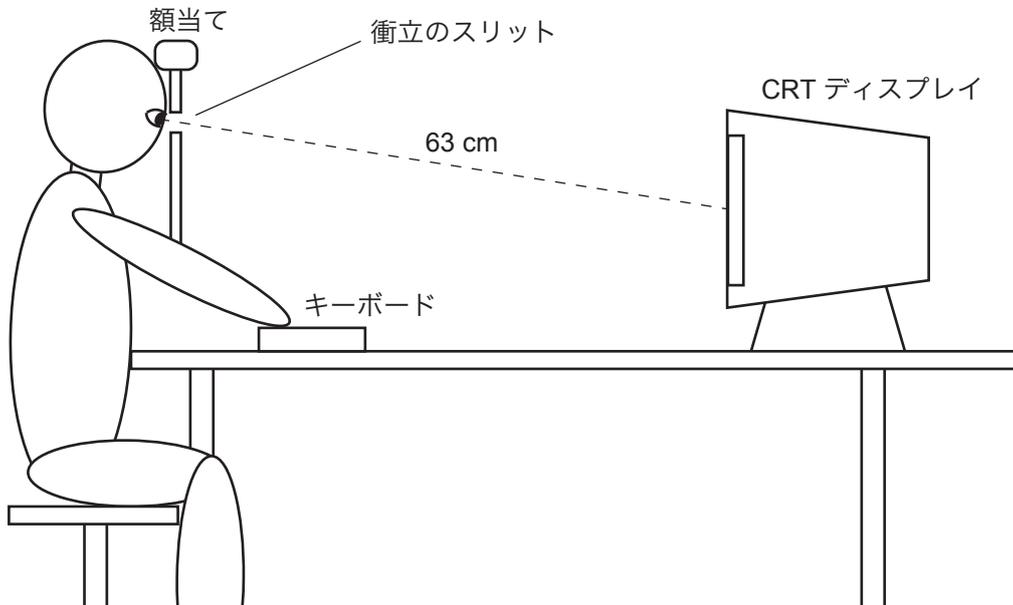


図 3.1 実験 3 装置側面図

装置と刺激

視覚刺激は 19 インチの CRT モニタ (SONY GDM-F400, 1024*768 pixels, 34.3x25.7 cm) 上に呈示された。リフレッシュレートは 120 Hz だった。観察距離は約 63 cm だった。このためモニタの視角は 30.5x23.1deg となった。被験者の頭部は固定されなかったが、被験者は衝立に空いたスリットを通してディスプレイを観察したため視距離や観察位置はほぼ一定だった。衝立とディスプレイの間隔は被験者が実験中に自身の手を観察することができないように調整された (図 3.1)。被験者の行動と応答はキーボードを用いて行われた。被験者は刺激を暗室内で観察した。

幅 0.15° の白い円状の固視点 ($90.5\text{cd}/\text{m}^2$) が灰色背景 ($15.2\text{cd}/\text{m}^2$) の中心に呈示された (図 3.2A)。輝度が $\sigma = 1.04^\circ$ のガウス関数状に変化する白い二つの Gaussian blob が順番に呈示され、水平方向に運動した。blob は、モニタ中央から左 1.5° の地点から右 1.5° の地点へとトータルで 3° 運動した。運動の軌跡は固視点の 2° 下方だった。2 つの Blob の一方は被験者のキー押しに続いて 4 つの条件 (0, 50, 150 and 500 ms) から選ばれた遅延を伴って運動を開始した。こちらを遅延刺激と定義した。運動の物理的スピードは $12.7^\circ/\text{s}$ であり、運動距離が 3° であったためその呈示時間は 237 ms だった。もう一方の Blob は被験者のキー押しからの遅延が常に 0 ms であり、こちらは遅延なし刺激と定義された。遅延なし刺激はその速度が階段法で決定された以外は同様の運動を行った。そのため遅延なし刺激の呈示時間はその速度に対応して変化した。

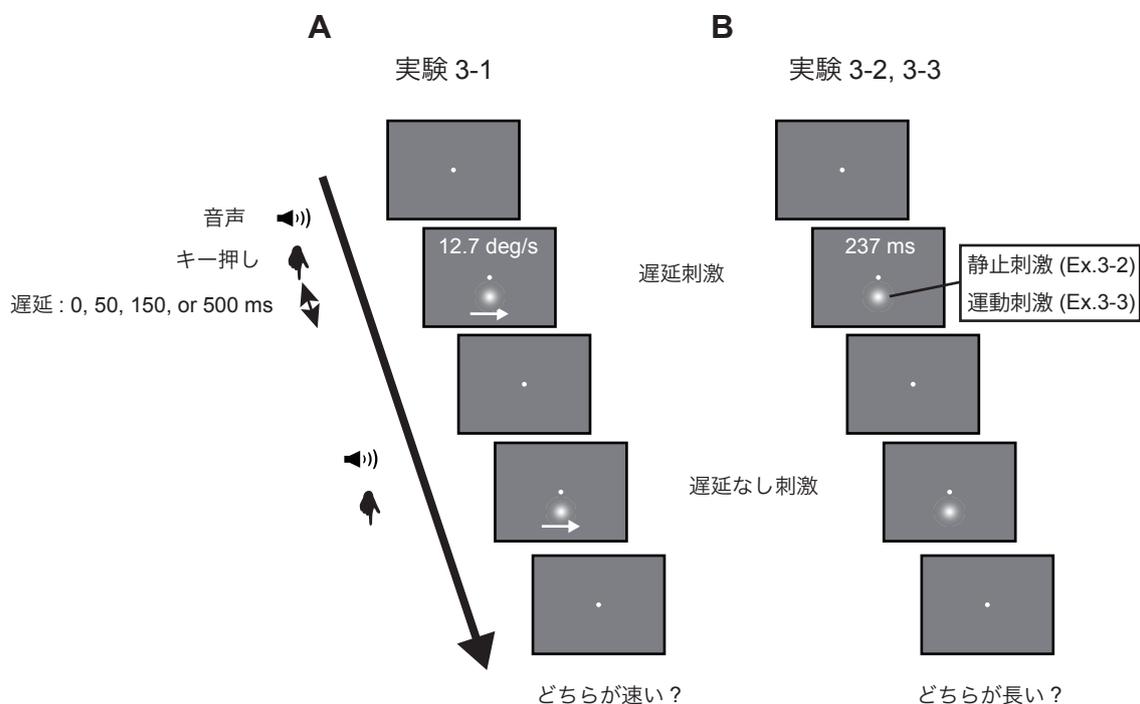


図 3.2 実験刺激とトライアルの流れ

実験手順

トライアル開始後、固視点が呈示された。被験者が go signal である音声刺激を合図にエンターキーを押すことで、遅延刺激と遅延なし刺激のどちらか一方が呈示された。その刺激が消失したのち、再び音声刺激が呈示され被験者が再びキーを押すことでもう一方の刺激が運動を開始した。遅延刺激と遅延なし刺激の呈示順がランダムであったのは応答バイアスの影響をのぞくためだった。二番目の刺激が消失した後、被験者はどちらがより速かったかをキーボードを押すことで応答した。(図 3.2A)

行動の時間知覚への影響を調べた先行研究では (?、?)、行動による知覚時間のシフト量はブロック内の平均遅延時間に影響を受けた。そのため本研究でもブロック内の平均遅延時間の影響を確かめるため、二つの実験ブロック条件を採用した。一つ目の固定条件では遅延刺激の遅延条件がブロック内で固定であった。そのためこの条件では、平均遅延時間がブロック間で異なった (0, 25, 75, and 250 ms)。もう一つのブロック条件、ランダム条件、では一つの実験ブロックにすべての遅延条件が含まれ、ランダム化された。そのため、平均遅延時間は条件間でほぼ同一 (87.5 ms) だった。

一つのブロックは 4 つのトライアル系列の階段から成った。隣接する 4 つのトライアルが一つのユニットで、トライアルでの遅延なし刺激の速度はそれぞれ 4 つの階段から選ばれ、遅延なし刺激が遅延刺激の何倍の速度で呈示されるかが決定された。すべての階段で応答が 6 回以上反転したときにそのブロックは終了した。もしひとつの系列で 6 回反転しても他の系列でそうでなかった時には、その系列はランダムな初期値で再開さ

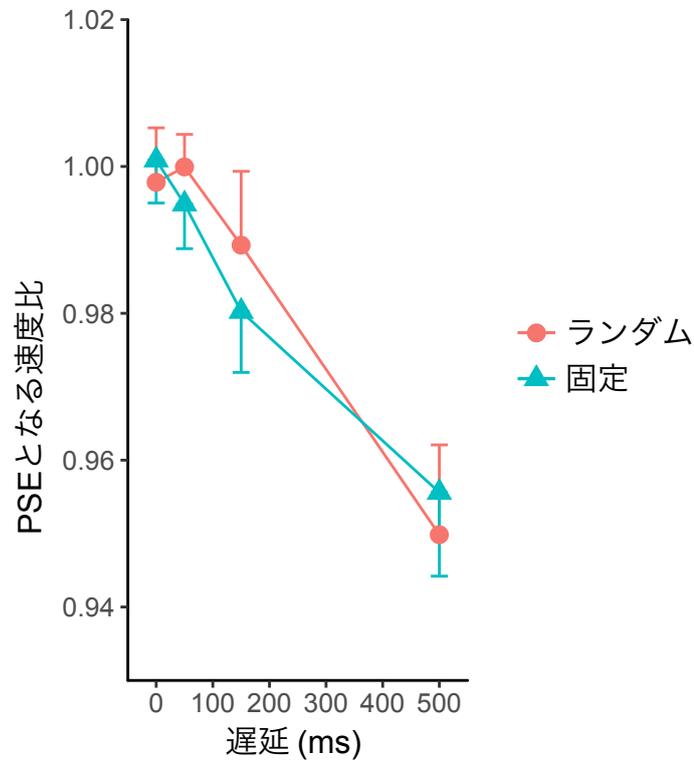


図 3.3 実験 3-1 結果

れた。これらの操作は特定の系列を連続して観察し続けることがないようにするためであった。階段法で決定される速度比の初期ステップサイズは 5%(つまりこのとき実速度では 0.635deg/s のステップサイズで遅延なし刺激の速度が変化した) 一回応答が反転したらステップサイズは 2% に変わった。三回目の反転以降は系列が再開されるまで 1% だった。1 ブロックの平均トライアル数は 66.1 回だった。

解析

集められた応答は R を用いて解析された。これまでの実験と同じく、プロビット解析によって、我々は被験者が 50% の確率で遅延なし刺激をより速いと応答する点 (PSE) での遅延なし刺激の速度倍率 (遅延なし刺激速度/遅延刺激速度) を各条件で算出した。つまり、この値が 1 より小さい場合、PSE において遅延刺激を同速の遅延なし刺激より遅く知覚する傾向があることを意味する。

結果と考察

遅延条件ごとの PSE の被験者間平均を図 3.3 に示す。横軸が遅延条件の違いを表し、縦軸が PSE となる知覚的速度の比を表す。丸のシンボルはランダム条件を、四角のシンボルは固定条件の結果を表す。誤差棒は標準誤差を表す。

ランダム、固定の両ブロック条件において、遅延時間が増加するにしたがって知覚速度 (PSE) が減少し

ている傾向をみることが出来る。また、ブロック条件による大きな差はみられない。この傾向を統計的に検討するため、この結果について、遅延、ブロック（ランダム、固定）、の二つを要因とする 2 要因の分散分析を行った。その結果、遅延について有意な主効果が得られた ($F(3, 24) = 14.982, p < 0.0001$)。ブロックに関して有意な主効果は得られなかった ($F(1, 8) = 0.100, p = 0.7610$)。また、これら二つの要因の間に交互作用はみられなかった ($F(3, 24) = 0.667, p = 0.5819$)。多重比較 (Ryan 法) を行った結果、遅延 500 ms の条件で他の遅延条件との間に有意差が見られた (0ms, $t(18) = 5.923, p < 0.0001$; 50ms, $t(18) = 5.673, p < 0.0001$; 150ms, $t(18) = 4.068, p < 0.0001$)。このことから、自身の行動に対して遅延を持って運動開始した物体の知覚速度は遅延の増加とともに減少することが明らかになった。また、遅延とブロックの間に有意な交互作用が無かったことから、ブロック内の平均遅延時間はこの効果に影響しなかったか、あるいは今回の遅延条件では効果の差を検出できなかったと考えられる。

以上の結果より、刺激速度を操作せず刺激の速度について意図を持たない行動であっても、行動から運動開始までの遅延時間を変化させることによって速度知覚の変化することが明らかとなった。しかしこの結果は実験 3 冒頭で述べたように、速度知覚の直接的な変化でなく、時間知覚の変化による間接的な結果である可能性がある (? , ? , ?)。そのため実験 3-2, 3-3 では同様な刺激条件における時間知覚の変化を調べた。

実験 3-2, 3-3 では実験 3-1 と同様の刺激呈示タイミングと呈示時間において結果の刺激それ自体の呈示時間知覚が変化するか、そしてどのように変化するか調べることを目的とした。ただし、運動物体はそれ自体の速度によって呈示時間知覚が変化することが確認されているため (? , ? , ?)、実験 3-2 では時間知覚のみへの影響を確かめるために、行動による刺激は静止刺激とした。また、実験 3-3 では実験 3-1 と同様に運動刺激を用いた。

3.1.2 実験 3-2, 3-3

被験者

実験 3-2 には著者を含む、10 人の東工大の学生と職員、23 歳から 39 歳、がこの実験に参加した。また実験 3-3 には著者を含む、8 人の東工大の学生と、22 歳から 29 歳、がこの実験に参加した。またすべての被験者は正常または矯正正常視力をもった。被験者のうち 5 名は実験 3-1 に参加し、更にそのうち 2 名が実験 3-2 に参加したが、著者以外は研究目的に対してナイーブだった。実験前にそれぞれの被験者から書面でのインフォームドコンセントを得た。

装置、刺激、手順

手順は実験 3-1 と下記の点を除いて同様であった。実験 3-2 では Gaussian blob は固視点の 2° 下方に呈示され動かなかった。被験者は 1 トライアル中に呈示される遅延刺激と遅延なし刺激を観察し、そしてどちらの呈示時間が長かったかをキーボードで応答した (図 3.2B)。遅延刺激の呈示時間は 237 ms で一定であった。遅延なしの呈示時間は遅延刺激 (237 ms) との比で定義され、階段法を使って決められた。実験 3-1 でブロック条件 (固定、ランダム) の効果の違いが見られなかったので、本実験ではランダム条件のみを実施した。

実験 3-3 では Gaussian blob は呈示中右方向へ運動した。遅延刺激と遅延なし刺激のどちらも運動速度は $12.7^\circ/\text{s}$ で常に一定だった。遅延刺激の呈示中の移動距離は常に 3° であったため、その呈示時間は 237ms で一定であった。一方で遅延なし刺激の呈示時間は移動距離が変わることで変化した。刺激の位置による判断を防ぐため、運動刺激の呈示開始位置は移動距離の $\pm 0\% - 50\%$ の間でトライアルごとにランダムに変化した。

ブロックはすべての階段が 7 回以上反転するまで続いた。最初は、遅延なし刺激の呈示時間比率の変化ス

トップサイズは 10% (実時間で 23.7 ms) だった。一回応答が反転したら 5% へと変わった。三回以上の反転の後には、7 回の反転の後新たな初期値で再び開始するまで 2% だった。ブロックの平均トライアル数は 76 回だった。

解析

実験 3-1 と同様の解析を行い、条件ごとに PSE となる時間比率を算出した。知覚時間の比率は、遅延にともなう知覚時間の変化を意味し、比が 1 より大きい時、被験者は遅延刺激を遅延なし刺激より長く知覚したことを示す。

結果と考察

実験 3-2 において被験者の内 1 名はコントロールである遅延 0 ms の条件において、PSE となる時間比の標準誤差が推定値の 10% を上回っていたため後の解析から除外した。実験 3-2, 3-3 それぞれについて各遅延条件での PSE である時間比の被験者間平均を図 3.4 に示す。横軸が遅延条件の違いを表し、誤差棒は標準誤差を表す。グラフから、どちらも遅延があるときに知覚時間が大きくなる傾向が見られる。それぞれの結果について、遅延を要因とする 1 要因の分散分析を行った。その結果実験 3-2 において遅延の主効果は有意傾向だった ($F(3, 24) = 2.562, p = 0.0785$)。また 3-3 において遅延の主効果は有意だった ($F(3, 21) = 3.159, p = 0.0469$)。また、Bonferroni 法による多重比較の結果、すべての組み合わせに有意な差は存在しなかった。

物体の運動距離が等しい場合には、物体の運動速度と呈示時間には逆数の関係が物理的に存在する。知覚速度と知覚時間の関係は必ずしも物理的な関係を満たすわけではないが (?、?)、行動による速度知覚への影響と時間知覚への影響が同じメカニズムに起因するなら、両者の結果は同様の傾向を持つと考えられる。

そのためこれら実験の比較として、図 3.5 に実験 3-1 で得られた各条件における知覚速度比と、実験 3-2, 3-3 の知覚時間から推定される各遅延条件での知覚速度 (実験 3-2, 3-3 で得られた PSE となる時間比の逆数) を共に示す。横軸は遅延条件を、縦軸は (推定) 相対知覚速度を表す。グラフから、相対知覚速度の遅延に対する推移は実験 3-1 と 3-2, 3-3 で異なっている傾向が見られる。これを量的に確かめるため、まずそれぞれの実験について以下の指数関数でフィッティングを行った。

$$ASI = a \cdot (\exp(-\text{delay}(\text{ms})/b) - 1) + 1$$

ここでパラメータ b は遅延時間がどのように影響するかに関与する曲率を決定する。このモデルでは遅延 0ms における相対知覚速度は理論的に 1 としている。 b の値が大きいほど回帰曲線が直線的であることを表し、 b が小さいほど回帰曲線が下に凸であることを表す。フィッティングはいずれも成功だった (Exp. 1 : $a = 5.895 \times 10^8, b = 6.074 \times 10^{12}, \text{adjusted } R^2 = 0.9687, F(1, 2) = 93.88, p = 0.0105, \text{AIC} = -29.3268$; Exp. 2-1 : $a = 7.701 \times 10^{-2}, b = 28.54, \text{adjusted } R^2 = 0.9853, F(1, 2) = 202.2, p = 0.0049, \text{AIC} = -29.1326$; Exp. 2-2 : $a = 4.334 \times 10^{-2}, b = 125.7, \text{adjusted } R^2 = 0.9858, F(1, 2) = 209.2, p = 0.0048, \text{AIC} = -31.9095$)。

しかし、実験 2-1 の結果について係数が非常に大きな値であったため、特に実験 1 において回帰モデルが適切でなかった可能性がある。そのため、それぞれについて以下の線形モデルによるフィッティングを同様に行った。

$$ASI = a \cdot \text{delay}(\text{ms}) + 1$$

その結果こちらもフィッティングは成功でありそれぞれの係数が得られた (Exp. 1 : $a = 1.000 \times 10^{-4}, \text{adjusted } R^2 = 0.9687, F(1, 2) = 93.88, p = 0.0105, \text{AIC} = -30.0455$; Exp. 2-1 : $a = 2.000 \times$

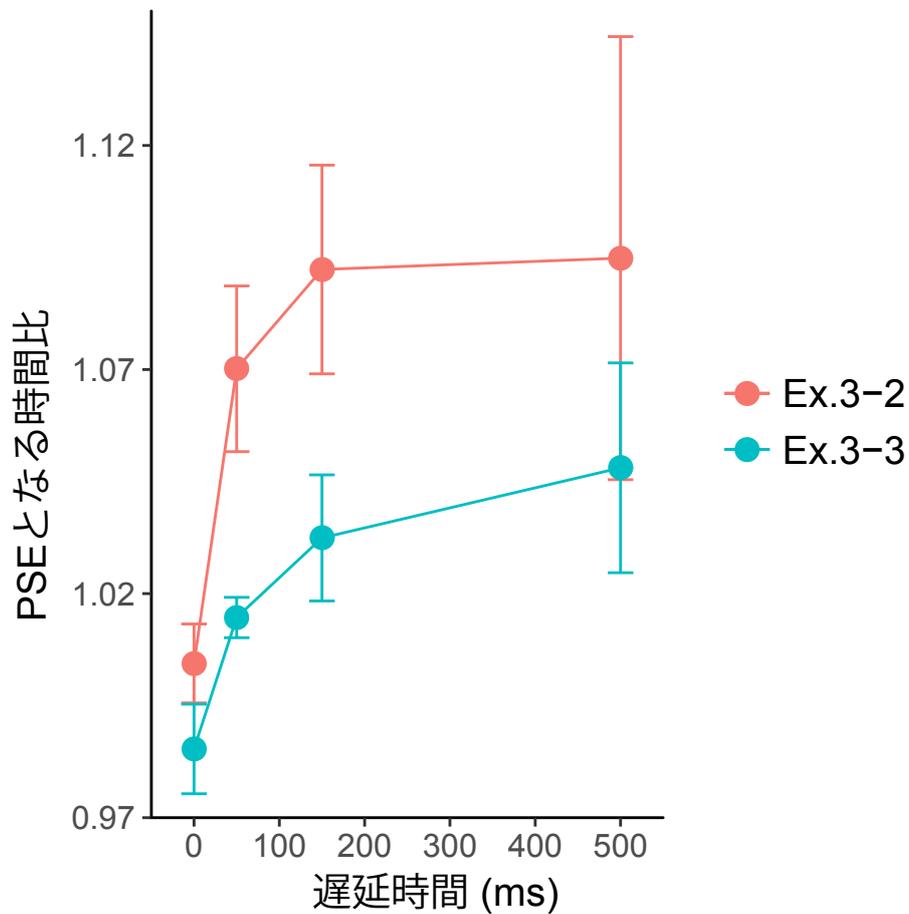


図 3.4 実験 3-2, 3-3 結果

10^{-4} , adjusted $R^2 = -0.04077$, $F(1, 2) = 0.8825$, $p = 0.4467$, $AIC = -10.5393$; Exp. 2-2 : $a = 1.000 * 10^{-4}$, adjusted $R^2 = 0.5211$, $F(1, 2) = 4.264$, $p = 0.1749$, $AIC = -19.7694$). これらの回帰から、実験 3-1 では指数回帰より線形回帰の方が AIC の値が小さかったため、線形回帰のほうが良いことがわかった。一方で実験 3-2, 3-3 では指数回帰のほうが AIC の値が小さかったため、指数回帰のほうが良いことがわかった。そのため、実験 3-2, 3-3 では遅延時間に対する知覚変化の特性が異なることが明らかとなった。

このような遅延時間に対する特性の違いは、行動の予測が与える知覚への影響が速度知覚と時間知覚で少なくともある程度独立したものであることを示唆する。また、特徴ごとに独立した影響が存在することは、行動の予測による知覚変化が知覚特徴レベルで生じていることを表し、特徴統合よりも以前の段階で知覚が変化していることを示唆している。

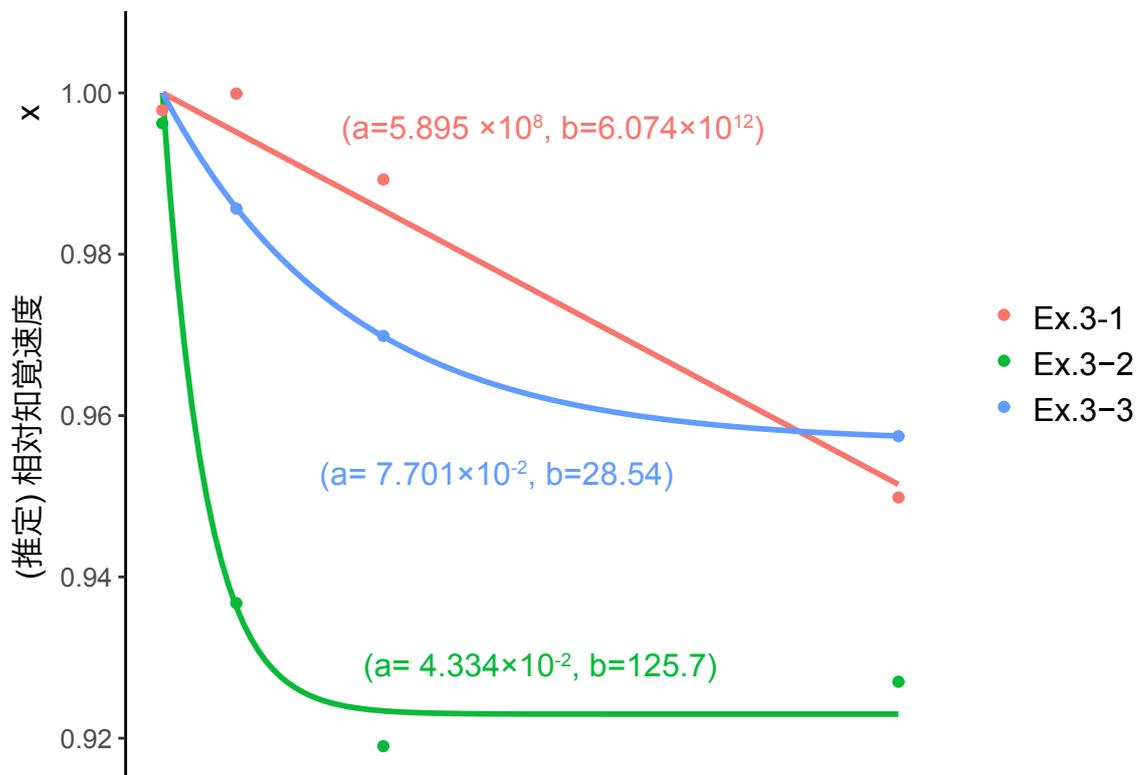


図 3.5 実験 3-1 における相対知覚速度と実験 3-2, 3-3 における推定相対知覚速度. それぞれの曲線は式 “ $ASI = a \cdot (\exp(-\text{delay}(\text{ms})/b) - 1) + 1$.” による各実験に対する指数回帰を表す.

第 4 章

行動の結果の影響

4.1 実験 4 概要

序論で述べたように、行動が関係する我々の認知はその一貫性を保つためにその後の事象によって、時間的にさかのぼって回顧的に変化する可能性が指摘されている (? , ?). Witt らの先行研究では、テニスボールを打ち返す行動が成功した場合、迫ってきたボールの速度を行動後に評価した際に、より遅く応答する傾向が見られた。つまり、ボールが遅ければ成功しやすいというような関係性と一貫した方向に知覚が変化した。これは行動の結果を観測したことが回顧的に知覚を修飾した可能性を示唆した。

そのため実験 4 では被験者自身の行動をトリガーとする運動刺激の速度と、刺激運動によってもたらされる結果事象の間に確率的な従属関係を持たせることにより、結果の事象の観測が刺激運動速度の知覚を一貫性を持つ方向に回顧的に変化させるかを明らかにすることを目的とした。先行研究と同様に、結果の事象が行動によって運動した物体の関連特徴の知覚を一貫した方向へ回顧的に補正するならば、事象の観測が知覚速度を尤度の高い方向へバイアスすると予想される。例として、刺激が高速であるときに起こりやすい事象が示されたときに、刺激の知覚速度が高速に知覚されやすくなると予想される。Witt らの研究とは異なり、刺激速度と行動の成否は純粋に確率のみに従って変化するため、知覚される速度の変化と行動の成否との間に被験者の能力を介した因果関係は存在しなかった。また、結果の事象への被験者の関与を強めるため、被験者の行動選択と運動刺激速度も同様に確率的に従属させた。このため、実験 4 では結果事象による回顧的な影響だけでなく、行動選択による意図や予測が存在すると考えられる。しかし、被験者の行動としてキー押しによる刺激運動開始を採用したこと、加えて行動による速度予測性は実験 2-2 のボタン条件より低いことから、知覚速度には独立した影響を与えないと考えられる。

具体的には、実験 4 では刺激運動によってもたらされる結果の成否の間に確率的に変動したため、被験者の認知と結果の事象は関係しなかった。行動の結果の成否が、物体運動の知覚を一貫した方向へ回顧的に変化させるならば、事象の観測が知覚速度を尤度の高い方向へバイアスすると予想される。例として、刺激が高速であるときに起こりやすい事象が示されたときに、刺激の知覚速度が高速に知覚されやすくなると予想される。

また、被験者の結果事象への関与感を強めるため、被験者の行動選択と運動刺激速度も同様に確率的に従属させた。このため、実験 4 では結果事象による回顧的な影響だけでなく、行動選択による意図が存在したと考えられる。しかし、被験者の行動として、実験 2-2 において意図の影響が見られなかったボタン押しと性質的に近いキー押しによる刺激運動開始を採用したこと、そして、行動により呈示される速度の種類が実験 2-2 より多く（後述）、行動による速度の予測が実験 2-2 のボタン条件より行いづらかったことから、行動選択単独では知覚速度に影響を与えないと予想される。

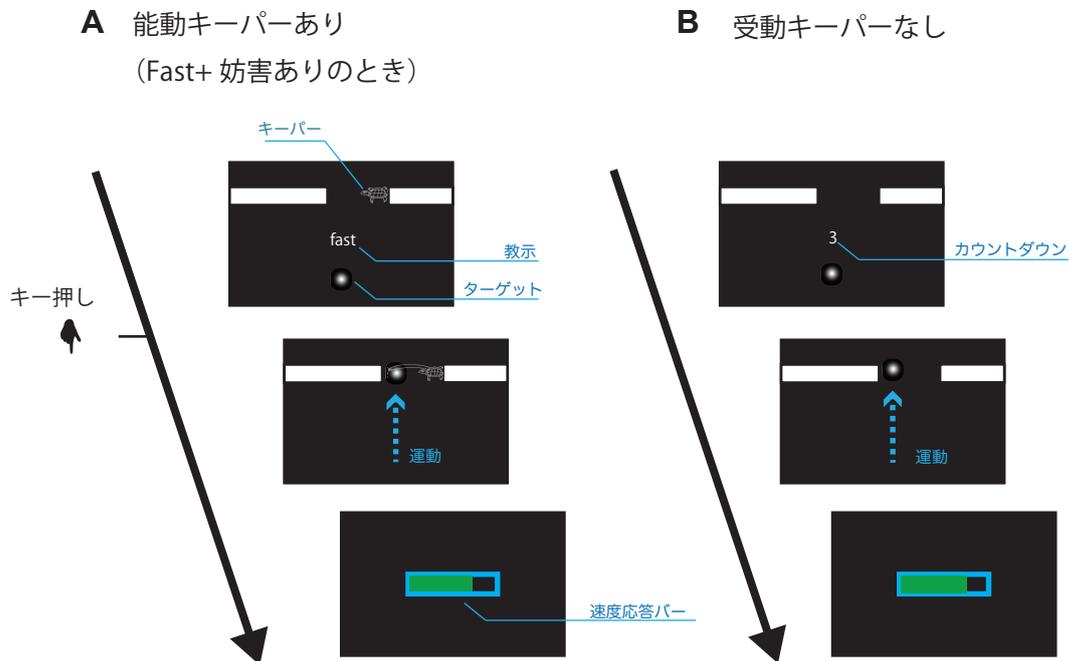


図 4.1 実験 4 のトライアルの例. A: 能動キーパーありブロックのトライアルの一例. 行動が高速で妨害されたときのトライアル. 被験者はその速度をバーの長さを操作することで応答した B: 受動でキーパーなしのブロックのトライアルの一例. 刺激はカウントダウンの後に自動で呈示された

以上の条件を実現する実験設定として、行動と結果の間に確率的なルールが存在するビデオゲーム状の視覚刺激を用いた (図 4.1)。被験者がゴールを目指して運動させた視覚刺激が、ゴールキーパーとして配置されたカメのキャラクターに妨害されずに上部の隙間を通り抜ければ行動は成功、妨害されれば失敗と定義された。運動刺激が遅いほどゴールキーパーが妨害する確率は高く設定された。このとき、亀による妨害の有無が、運動物体の知覚速度に影響するか確かめた。

その結果、応答の成否による回顧的な影響が見られなかった。また、刺激が低速の際に、知覚速度が選択した行動と一貫した方向に変化した。

実験の結果から、キーパーが存在しないときに、教示による行動選択の影響、つまり意図の影響はみられなかったが、一方でキーパーが存在するときには、その影響が存在した。つまり、キーパーが表示されているときに限り、Slow 条件で遅く Fast 条件より刺激を遅く知覚したことを意味する。本実験で用いられた行動の刺激への関与や意図は実験 2-2 のボタン条件と類似したものであり、かつ刺激速度が 7 通り存在するという確実性の低さから、教示の違いによる行動選択が知覚に影響する可能性は低いと思われた。それにもかかわらず行動選択が知覚速度を一貫した方向に変化させたことは、キーパーが呈示されたことが重要であったことを意味し、行動選択とキーパーの間に何らかの関係が存在した可能性を示唆する。ただし、結果が成否の影響を受けなかったことから、その関係は成否そのものとは無関係であったと考えられる。

また回顧的な影響について、本実験の結果から、行動結果の事象から知覚速度への回顧的な影響は見られなかった。これは Witt らの先行研究 (Witt, 2007) から予測される結果と異なるものだった。この結果を生じた理由には複数の可能性が考えられる。

第一に、回顧的な知覚変化は、被験者が積極的に問題を解決しようとする要求が生じた場合にのみ限られる可能性がある。先行研究において、被験者は常にタスクの成功を指向して行動を実行した。つまりテニスの返球タスクではリターンを正しく返すことを目標とした。本研究ではタスクの成功は定義され被験者に教えられたが、成功を推奨することはなく、被験者も決められた速度教示に従って行動を選択するのみであったため、そのための条件設定が弱かった可能性がある。そのため、被験者が自発的に片方の事象をタスクの目標として指向する条件設定においてのみ回顧的な影響が見られる可能性がある。ただし、キーパーありの条件においてのみ Fast, Slow 教示を受けた行動選択によって知覚速度が変化する傾向が見られたことから、被験者自身の行動選択とキーパーとの間に十分な関係が成立していた可能性がある。

第二に、刺激速度と結果の関係が被験者内で十分に対応付けられていなかったことが原因である可能性がある。本実験で用いられた刺激速度は 7 通りであった。この数は、被験者が物体速度を知覚する際にカテゴリ的な知覚戦略で応答を行わないようにするための設定であった。だが一方で 7 通りの刺激速度と結果事象の確率分布を正しく対応付けるためには 100 トライアルの練習では不十分だった可能性がある。ただし、実験トライアルは最低でも 1400 回実施されたため、実験中に対応の学習は可能であったと考えられる。それにもかかわらず回顧的影響がみられなかったことから、この第二の可能性は考えづらい。第三に、Witt らの先行研究でみられた知覚変化が回顧的影響によるものでなかった可能性がある。先行研究の結果に関して、テニスボールを打ち返す際に、注意のゆらぎなどの理由で偶然ボールが遅く見えた際に行動が成功しやすかったという、知覚と成否の間に順方向の因果関係が存在したことが、見かけ上結果が知覚を回顧的に補正したように見せたと解釈することが可能である。一方、本研究では被験者の知覚と結果に順方向の因果関係はなかったため、先行研究と同様の効果がみられなかった可能性がある。

第5章

総合考察

本研究は我々自身が起こした行動により運動する刺激を観察した際に、その速度知覚が変化するか、そしてそれが行動のどの要素によりどのように変化するか確かめることを目的とした。実験1, 2では主に行動時の意図の影響を、実験3では主に行動時の予測の影響を、そして実験4では行動の結果による回顧的な影響を検討した。実験1, 2から、自身の行動の関与が強いとき、結果の速度知覚が行動時に意図した方向に変化することがわかった。また、実験3から、刺激速度の予測性の高い結果の観測は自らの行動からの遅延時間が増加するにつれて変化することが明らかとなった。実験4から、自身の行動により引き起こされる事象と刺激速度が確率的に対応する際に、その知覚速度は事象による回顧的な影響を受けなかった。以下の節ではそれぞれの要素の影響について詳しく考察する。

5.1 行動の意図の影響

本研究で意図の知覚への影響が見られる可能性がある実験は、実験1-1, 実験2-1, 2-2, 実験4だった。実験1-1は被験者のドラッグ運動に追従する刺激を用い、刺激を動かす速度について高速、中速、低速の3通りの教示を用いることで被験者の速度に対する意図を変化させた。また、実験2ではスライダあるいはゲームパッドのボタンを用いて、教示により高速、低速刺激を打ち分けることで意図を変化させた。実験4ではFast, Slowの教示に応じてキーボードのキーを押し分けることで、意図を変化させた。このように、被験者の行動に対してどのようなタスク要求を課したかに応じてその意図を変化させることが可能だった。

その結果実験1-1, 実験4において行動時の意図の影響が見られた。すなわち高速に関する意図を持った際に、低速に関する意図を持った際と比較して、自身の運動させた刺激を速く知覚する傾向が見られた。これは、序論で予想したように、行動時の意図に近づく方向に知覚が変化した可能性を示唆するものだった。しかし、実験2-1, 2-2では意図の影響は見られなかった。

だが我々が行うことのできる行動は多岐にわたり、タスクの要求をクリアする範囲内で意図は様々であった可能性があるため、それぞれの意図に応じて知覚速度への影響も変化した可能性が存在する。速度を目的とするタスクに限定した場合でも、実験1-1のように速くあるいは遅く、刺激を動かすという意味的な目標を自身に課す場合もあれば、速度の意味的な解釈を持たずにある一定の速度に運動を制御するという戦略をもった可能性も存在する。実験2では二つの刺激速度条件の定義付けとして高速、低速の2条件を採用し、被験者へ行動時に与える教示としてFast, Slowの文字を呈示した。そして被験者はこの文字に従って行動を選択した。だが、実際に被験者がその刺激速度をどの程度速い、あるいは遅いと認識したかは計測しなかった。そのため、行動時の意図として速い速度や遅い速度でなく、単に刺激そのものの正確な速度を意図した可能性があっ

た。その結果、意図による速度の変化は起こらないあるいは顕著でない可能性が存在する。

また、行動タスク自体の難度に従って意図の強さが異なったことが結果の差に影響した可能性も存在する。実験 1-1 ではブロックの開始直後に教示速度条件ごとに基準となる手と刺激の運動速度が計測されたが、その際の高速条件における教示は刺激をできるだけ速く動かすというものだった。そして実験トライアルではその刺激運動速度と同等の速度の刺激運動を繰り返すよう教示された。この条件では、トライアルを繰り返すにつれて疲労が起ることからも、同等の刺激速度で運動させることは他の条件や実験 2, 行動選択と比較して難度が高かったと考えられる。そのため、被験者はより強い意図を持って刺激を運動させたと考えられる。また、実験 4 では刺激の運動を妨害するキーパーが存在した際にのみ意図の影響がみられたが、これはキーパーが存在することによって意識的あるいは無意識的にタスクの難度が上昇したように感じられた可能性も存在する。このように意図が強いときに限り自身の行動結果の刺激運動の知覚が意図に近づいた可能性がある。

本研究では行動を決定する際に目的とされる刺激状態を行動の意図として扱ったが、我々は行動を伴わずに願望あるいは目的とする刺激状態をもつ場合がある。例えば自身が馬券を買った競走馬の運動を観察する場合、速い速度の運動を望むだろう。このように、自己の関与が無くとも自身の願望に一致した状態が知覚に影響するかはわからない。本研究ではこのような受動的な意図を考慮しなかったが、今後の研究において関係性を調べる必要があると考えられる。

5.2 行動の予測の影響

本研究で行動の知覚への影響が存在する可能性があり、かつ、意図とは分離して見ることができるといった実験は、実験 2-2, 実験 3-1 だった。行動による刺激予測は、意図を持って一定の刺激速度を引き起こす行動を行う際には意図と切り分けることは難しいと考えられる。だが本研究では、被験者が刺激速度に関して意図を持たないとき、あるいは異なる速度を観測することで予測に変動が起きたときに意図から分離した、予測の独立した効果がみられると考えた。実験 2-2 では被験者はトライアルごとに意図する速度とその結果の刺激速度が異なったため、自身の行動から予測される刺激速度が変動したと考えられる。また、実験 3-1 ではキーを押すことで呈示される刺激速度はほぼ一定だったが、被験者は刺激速度を自らの意志で変化させることが出来ず、また行動タスクは単にキーを押して刺激を呈示させることであり、刺激速度はタスクの要求と無関係であったことから、実験 3-1 では被験者は刺激速度に対して意図を持たず、予測のみの影響が観測できると予想した。

その結果実験 2-2 では、行動の手段（ボタン、スライダ）と関係なく、自身の直前の行動による刺激速度が高速であったときに刺激を速く、低速であったときに刺激を遅く知覚する方向の変化が生じた。これは、序論で予想したように、行動時から予測される速度に近づく方向に知覚が変化した可能性を示唆するものだった。

運動知覚が行動から予測される方向へ変化させることは、知覚を安定させるために有効な手段だと考えられる。我々は行動を起こす際に、その意思決定や計画された運動から起こりうる結果のタイミング、強さなどがある程度正確に予測することができる。その予測が正確であればあるほど、予測に近づいた知覚は正確である可能性が高くなる。この有効性は観測のノイズが大きいときに特に大きな意味を持つ。実際に実験 2 において、自身の行動の履歴の効果として、直前に実行した自身の行動結果が速いときには次の行動の結果を速く、直前の行動が遅いときには次の行動の結果を遅く知覚する傾向が見られた。このことは自身の行動の予測が結果の知覚速度補正している可能性を示唆するものだった。

実験 3-1 では被験者のボタン押し行動により現れる刺激の行動のから刺激呈示までの遅延時間が大きくなる

ほど知覚速度が遅くなる傾向が見られた。多くの先行研究において自身の行動から対応する視覚刺激の運動までの遅延時間が大きくなるほどその刺激に対する運動主体感が減少することが示されており、そのボーダーは概ね 150 500ms と言われている (? , ? , ?)。実験 3-1 では遅延が 500ms の条件において他の条件と比較して有意に速度を遅く知覚したことから、この結果は逆に、遅延時間が長く運動主体感が弱かったと思われる刺激は受動的な刺激と同等の速度に知覚される一方で、遅延時間が短く運動主体感が強かったと思われる行動において自身の行動結果を速く知覚したと解釈できる可能性がある。ただし、実験 3-1 において行動時の運動主体感を計測しなかったため、運動主体感の定量的な解釈は可能ではなく、結論付けるには不十分であった。そのため、今後の研究において、被験者の運動主体感の主観応答を測定することで、これらの関係を調べることが可能であるかもしれない。

また、行動の予測に関連した影響として、行動と無関係な受動的な速度知覚において、我々が運動物体に対して予め持っている予測速度分布が知覚速度を補正している可能性が指摘されている (? , ?)。我々はコントラストの低い運動刺激の速度を相対的に遅く知覚することが知られているが (? , ? , ?)、Stocker らはこの減少について、我々が知覚速度を推定する際に、速度の事前確率分布を手がかりとして用い、統合を行っていると考えられることで説明できるとした。MT における速度のコーディングがニューロン応答の分布によることを序論で述べたが、神経応答の強度と分布を刺激の尤度と考えた際に、速度 0 をピークとする事前確率分布を想定したベイズ推定を行うことで知覚速度を得ているとする仮説が、コントラストの違いによる速度知覚の変化を説明できるとした。

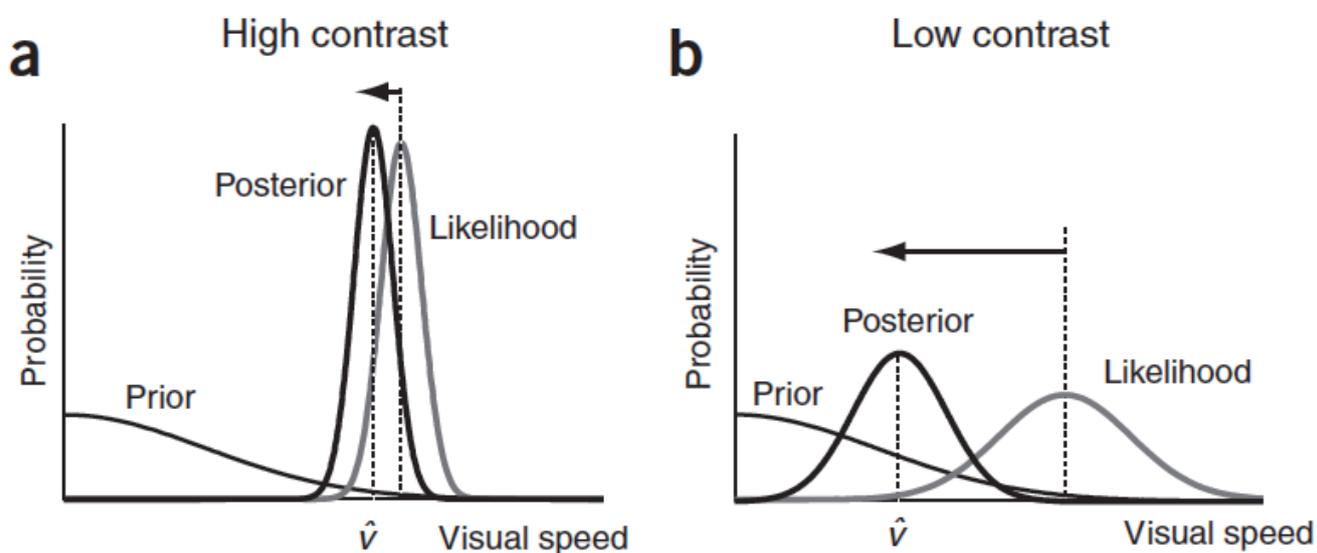


図 5.1 Stocker & Simoncelli (2006) Figure 1 より。a 刺激がハイコントラストのとき、観測されたボトムアップの情報は精度が高く、尤度の分布は急峻であるため、速度 0 を予測する事前確率手がかりの重みが相対的に小さい。b 一方で刺激のコントラストが小さいとき、観測されたボトムアップの情報の精度が低く、尤度の分布はなだらかであるため、速度 0 を予測する事前確率手がかりの重みが相対的に大きく、刺激速度を遅く知覚すると考えられる

本研究で着目した行動時の予測は Stocker らが説明する事前予測と原理的に類似した説明が可能であるが、

両者は異なるものであったと考えられる。なぜなら実験 2-2 は、自身の行動の結果の刺激運動と受動的な刺激運動の速度を比較したものであった。このとき、行動結果の運動であるか受動的な運動であるかを考慮せず直前に観察された刺激速度に知覚が影響されるかを調べたところ、影響は存在しなかった。一方で、直前の自身の行動の結果によって次の行動結果の知覚速度が受動的な刺激と比較して変化した。また、行動の手段による予測性の影響が同じであった。これらのことから、行動結果は行動結果として、受動的な刺激は受動的な刺激として、それぞれ異なる予測を持っていたと考えられる。予測が行動結果の運動と受動的な運動の二つに分けられることから、実験 2 でみられた速度知覚の変化は受動的な予測速度の変化とは異なる影響によるものである可能性が高いと考えられる。

本研究では、行動時に運動指令から予測された刺激と実際の刺激が一致する際に運動主体感を得るというコンピュータモデルに沿った形で自身の運動指令による刺激予測を想定したが、知覚速度に影響したと思われる行動時の予測が運動指令のみによって与えられたかは明らかでない。実験 1-2 では手の速度と無関係に刺激速度が変化する刺激の速度知覚を調べたが、その結果は自身の手の運動単独、つまり結果の予測を伴わない運動指令信号や体性感覚、自己受容感覚から得られる情報が単独では知覚速度に影響を与えないことを示した。しかし、行動予測の影響はそれら様々な情報が複合的に統合された結果生じたものである可能性は否定できない。

5.3 行動の結果の影響

本研究で行動の結果の影響がみられる可能性あった実験は実験 4 だった。実験 4 では被験者の行動によって生じた刺激の進行を妨害するキーパー呈示されており、被験者がキーを押すことで生じたが速度が速いほど妨害される確率が低く、遅いほど妨害される確率が高かった。刺激の進行が妨害されなかった場合を行動の成功と定義し、行動の成否が知覚された刺激速度を時間的にさかのぼって、成否と一貫した方向に変化させるかを調べた。つまり、成功した場合に刺激を速く、失敗した場合に刺激を遅く知覚する傾向がみられることを予想して実験を行った。先行研究と異なり、結果は物理的な刺激速度に確率的に従ったため、被験者の認知能力が結果の成否に影響することがなかった。そのため、もし実験 4 において成否が知覚に影響した場合、それは結果による回顧的な知覚への影響であると考えることが可能であった。

だが実験 4 において結果の成否の違いは知覚速度に影響を与えなかった。また、実験 4 において上記の通り意図の影響がみられたが、成否との間に交互作用は存在しなかった。この結果は先行研究の結果が、回顧的な影響によるものではなかった可能性を示唆するものだった。つまり、先行研究では行動時の知覚の違いが成功率の差を生じさせた可能性がある。

5.4 行動の全体としての影響

本研究では行動の 3 つの要素が、その行動によって引き起こされる運動知覚に対して、それぞれどのように影響するか検討した。実験で調べた要素の影響のまとめについて表 5.1 に示す。丸印のうち、赤字で示されるものが、実際にその実験で有意な効果が見られた要素を意味し、青字は効果が見られなかった要素を意味する。また黒字は有意傾向であった要素を意味する。本節では、各実験の結果をもとに、各々の影響が互いに関係しているかを考察し、全体的な行動の影響を考察する。

表 5.1 から、行動時の意図と予測はそれぞれ実験 3、実験 4 において単独で知覚を変化させたことがわかる。実験 3、4 はともにキーを押すことで刺激が運動を開始する行動であった。実験 3 では被験者が刺激速度に関

与出来なかったため、速度に関して意図を持たなかったが、刺激速度を予測することが出来た。実験4ではキーを押すことで刺激が生じたが、刺激速度の種類が7通りと多く予測性が低かった。また、トライアルごとに観察する刺激の速度はランダム化され解析時に平均化されたため、予測の変動は結果に関係しなかった。この二つの実験において速度知覚の変化が見られたことから、意図と予測は独立して知覚に影響すると考えられる。

また、意図と予測は行動の回顧的要素とは独立した影響であると考えられる。まず実験4ではFast, Slowの指示による影響がみられ意図の効果が確かめられたが、キーパーの結果による回顧的な効果は存在せず、また交互作用も存在しなかった。このことから意図は結果の回顧的要素とは独立であることがわかる。また、実験3で刺激速度が関与する結果事象そのものが存在しなかったが、このとき知覚の変化がみられたことから、予測は結果の回顧的要素とは独立した要素であると考えられる。

さらに、影響の範囲の広さから、行動の予測による知覚への影響は行動の意図の影響より高次の影響であることが示唆される。実験2-2において、意図した速度と行動の手段（スライド、ボタン）の間の交互作用が有意傾向であり、意図の影響が特定の行動手段に限られる可能性があった。一方で予測の影響は同じく実験2-2で見られたように、行動の手段を超えた予測としての影響が強かった。このことは予測の影響のほうが高次の影響であり、そのため影響の範囲が広がったことを意味する可能性がある。

これらのことから、自身の運動させた刺激の速度知覚に影響すると予測された3要素は少なくとも互いに独立した影響であると考えられ、そして意図の影響は予測の影響より低次の影響であると考えられる。以上の関係をもとに、行動がそれによって生じる運動知覚へ与える影響を図式化したものを図5.2に示す。この図では、行動時の意図はコンパレータモデルによる予測と刺激のマッチングより以前に独立して特徴処理に影響しているとし、得られた刺激はボトムアップの特徴処理には関与するが、結果として解釈された事象は回顧的な影響を与えないとした。

5.5 今後の課題

本研究はいくつかの課題を残している。1つ目は本研究で提案したモデルは生理学的知見に基づいたものではないため、各要素が具体的にどのような処理段階で知覚処理に影響したか明らかでないことである。そのため、知覚処理のメカニズムが明確な知覚特徴において、同じように意図や予測の影響がみられるかを確かめる

表5.1 各実験において、知覚に影響を与えうると考えられた要素とそれに対する結果。その実験で効果を測ることができると考えられる要素を丸印で表した。赤い丸印は実験の結果有意な効果が見られた要素、青い丸印は効果が見られなかった要素、黒い丸印は効果が有意傾向であった要素を表す

		意図	予測	結果
第二章	実験 1-1		○	-
	実験 1-2	-	-	-
	実験 2-1		○	-
	実験 2-2	○	○	-
第三章	実験 3-1	-	○	-
	実験 3-2, 3-3	-	○	-
第四章	実験 4	○	-	○

必要があると考えられる。特に本研究の結果から意図の知覚への影響は予測よりも低次であると考えられるため、主に初期視覚屋の反応によって決まるとされるコントラスト検出課題 (? , ? , ?) などについて、行動時の意図の影響を確かめることが必要であると考えられる。

2 点目は本研究の実験において運動主体感を明示的に測定しなかったことである。行動結果の予測の信頼性やタスク難度は運動主体感を変化させることが示されている (? , ? , ?)。そのため、本研究の結果対し、運動主体感の強度が明確な関係を持った可能性がある。しかし、本研究では実験 3 において行動と呈示刺激の間の遅延時間を操作するという、運動主体感を間接的に変化させる方法を用いたのみで、それ以外は運動主体感の定量的な測定を用いなかった。よって今後の研究において、運動主体感を直接あるいは間接的に測定し、その強度が結果の知覚速度に影響するか確かめる実験を行う必要があると考えられる。

しかし、主観的な運動主体感応答は周囲の環境の変化など高次の認知的要因によって変化することが指摘されており、Intentional binding などの心理的指標と一致しない場合があるとされている (? , ?)。また、実験 3-3 から、知覚モダリティによって行動の予測の影響が異なることが示唆されたことから、もし速度知覚の変化が運動主体感と関係した場合でも、主観的な運動主体感応答とは傾向が正確に一致しない可能性がある。そのため、運動主体感を変化させると考えられる物理的な刺激特性をより整理して実験を行う必要があると考えられる。

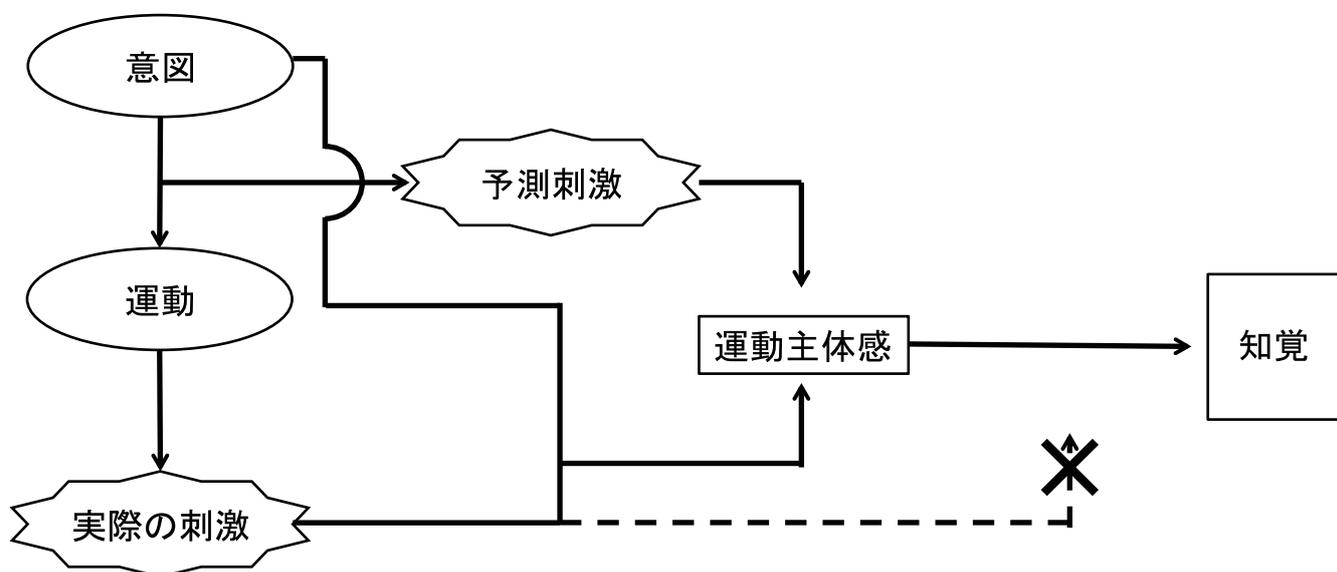


図 5.2 行動が特徴知覚に与える影響を図式化したモデル。行動時の意図はコンパレータモデルによる予測と刺激のマッチングより以前に、独立してに影響を与える。得られた刺激はボトムアップの特徴処理には関与するが、結果として解釈された事象は回顧的な影響を与えない

第6章

結論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

1. 我々が自身の行動で物体を運動させるとき、対象の運動速度に対して意図を持つことが、対象の知覚速度を意図と一貫した方向へ変化させる。つまり速い刺激速度を意図した場合により速く、遅い刺激速度を意図した場合に知覚をより遅く変化させる。ただし、それは物体運動への行動の関与が大きいときに限られる。
2. 我々の行動から得られる物体運動速度の予測は、その知覚速度を予測と一貫した方向へ変化させる、つまり速い刺激速度を予測した場合により速く、遅い刺激速度を予測した場合に知覚をより遅く変化させる。その予測は直前の自身の行動の速度に従って変動する。
3. 我々が自身の行動で物体を運動させるとき、その運動速度が結果となる事象の生起確率を変える場合、具体的には刺激の速度が速いときほど行動が成功しやすいという場合においても、その事象（成否）を観測することは知覚速度に回顧的な影響を与えない。
4. 上記3つの行動の要素が知覚に与える影響はそれぞれ独立である。また、意図の影響はその影響の及ぶ範囲が行動の手段に限られる一方で、予測の影響は行動の手段を問わないことから、意図の影響は予測の影響より低次の段階で知覚処理に影響することが示唆される。

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員である金子寛彦先生に大変多くのご支援をいただきました。研究方針から、具体的な実験方法や解析手法、結果の解釈や考察の妥当性の検討、執筆内容や発表に至るまで、研究のあらゆる面でご指導頂いたこと、大変感謝致しております。この場をお借りしてお礼申し上げます。大変ありがとうございました。

また、審査のため、ご多忙の中貴重な時間を割いていただき、研究に対してご指摘やご提案をくださいました、小池康晴先生、山口雅浩先生、吉村奈津江先生、渡邊淳司先生、大変ありがとうございました。

また、助教である久方瑠美先生には、実験方法の改善に関する提案、考察の検討、論文の執筆など大変多くのご指導をいただきました。大変ありがとうございました。

そして、研究について多くの議論や提案を頂き、実験被験者を快く引き受けてくださった金子研究室の皆様に感謝を申し上げます。

業績一覧

原著論文

1. 門野泰長, 金子寛彦 “自身の行動により生じる運動の速度知覚”, 日本バーチャルリアリティー学会論文誌, vol.22, No.1, pp.113-123, Mar. 2017
2. Yasunaga Monno, Rumi Hisakata, Hirohiko Kaneko, “Apparent speed of motion concomitant with action alters with delay”, PLOS ONE (in press, 2019)

国際会議

1. Yasunaga Monno, Hirohiko Kaneko, “Perceived speed is biased by intended voluntary action” 37th European Conference on Visual Perception, Belgrade, Serbia (Perception, 43, Supplement, 142) (2014).

国内学会・研究会

1. 門野泰長, 稲上誠, 金子寛彦, “能動的行動とその強度が速度知覚に与える影響”, 映像情報メディア学会 HI 研究会, 東京, (映像情報メディア学会技術報告, 36 (13), 9-11) (2012).
2. 門野泰長, 金子寛彦, “能動的行動が速度知覚に与える影響”, 日本視覚学会 2012 年夏季大会, 米沢 2012.7.24 7.26 (Vision, 24 (3) 134) (2012).
3. 門野泰長, 金子寛彦, “能動的行動によって生じる物体運動の速度知覚”, 電子情報通信学会 2013 年総合大会, 2013.3.21, 岐阜大学 2013.3.19 3.22 (電子情報通信学会 情報・システムソサイエティ特別企画学生ポスターセッション予稿集, p.154) (2013).
4. 門野泰長, 金子寛彦, “能動的行動によって変化する運動物体の速度知覚”, 電子情報通信学会 HIP 研究会, 新潟市 2013.7.13 (信学技報, 113(128), pp.21-24) (2013).
5. 門野泰長, 金子寛彦, “自発的行動によって生じる運動物体の速度知覚バイアス”, 日本視覚学会 2014 年冬季大会, 2014.1.23, 工学院大学 (VISION, 26(1), p.61) (2014).
6. 門野泰長, 金子寛彦, “自らの行動による物体運動の速度知覚にタスクの成否が与える影響”, 日本視覚学会 2015 年夏季大会, 2015.7.27, 東京工業大学 (VISION, 27(3), p.118) (2015).
7. 門野泰長, 金子寛彦, “自身の行動による物体の運動速度知覚への影響”, 日本視覚学会 2016 年夏季大会, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター, 2016.8.17~19 (VISION 28(3) p118) (2016).
8. 門野泰長, 金子寛彦, “行動時の意図が物体運動の速度知覚に与える影響”, 第 12 回「空間認知と運動制

御」研究会学術集会, 2017.2.24, 東海大学高輪キャンパス (第 12 回「空間認知と運動制御」研究会学術集会 冊子) (2017).

9. 門野泰長, 久方瑠美, 金子寛彦 “行動の履歴からの予測性が結果の物体運動速度知覚に与える影響” (日本視覚学会 2018 年夏季大会, 2018.8.2, 文部科学省研究交流センター)