

眼間時差により生じる奥行き・運動知覚に関する研究

荻谷 光晴

システム情報工学研究科

筑波大学

2008年 3月

概要

ヒトが外界を認識する時、そのほとんどを視覚情報に頼っている。視覚系は、網膜より得られる2つの2次元情報を基に、これを選択・処理することで知覚を構成している。様々な網膜像情報を統合することによって、色・形・奥行き・運動など複数の物体属性を知覚する。特に、実環境では曖昧な情報だけしか得られないことが頻発するが、視覚系は曖昧な情報から尤もらしい知覚を生じさせる。従来、奥行きや運動の知覚について、多くの研究が生理学的・心理物理学的に行われている。しかし、曖昧な情報から瞬時に尤もらしい知覚を生じさせる皮質メカニズムはよく判っていない。また、曖昧情報からどのような知覚が生成されるのか定性的・定量的に調べられていない。

曖昧な情報から尤もらしい知覚を生じさせるメカニズムは、生体の情報処理系の主要な特徴である頑健性の基礎となっていると考えられる。頑健性は、現在の工学技術が最も苦手とする特性であり、生体の頑健性実現のメカニズムを理解することは、これからの工学技術の発展にも重要な示唆を与えると考えられる。このメカニズムを解明するためには、視覚情報からどのような知覚特性が生成されるのかを検討する必要がある。

本研究は、視覚系において、曖昧な視覚情報からどのような奥行きや運動の知覚が生じるのか解明することを目的としている。具体的には、曖昧な両眼性情報が与えられたときの奥行き・運動知覚について心理物理学的に検討する。心理物理実験では、両眼視差・運動・面・遮蔽等複数の視覚情報を同時に制御して、視覚系がどのようにして奥行き・運動知覚を構成しているかを検討する。

視覚系が奥行き知覚を構成する手がかりとして、両眼視差がよく知られている。両眼視差には、空間視差と眼間時差が存在する。空間視差は、水平方向の像差が左右眼網膜上へ同時刻に与えられる視差情報である。この視差情報から奥行き知覚を構成するメカニズムは、従来から広く研究されている。眼間時差は、空間的な像差を持たないが時間遅れを生じて左右眼網膜上へ与えられる曖昧な視差情報であり、この視差情報から生じる奥行き・運動知覚についてはまだ良く知られていない。本研究では、この眼間時差から生じる運動・奥行き知覚に注目する。心理物理学的手法によって、その知覚特性を明らかにし、さらにその皮質メカニズムの理解へとアプローチする。曖昧な眼間時差により生じる奥行き・運動知覚を検討するために、スリット視に両眼視差を用いる心理物理

実験を提案した。これにより、眼間時差・運動・面・遮蔽の視覚情報を制御可能である。特に、幅が 1pixel のスリット の背後で、移動する視覚物体を呈示することで、空間視差を含まない純粋な眼間時差だけの視覚情報を厳密に制御することを可能にした。

心理物理実験の結果、曖昧な眼間時差により奥行き知覚が生じることを明らかにした。また面連続性・図形的特徴など複数の奥行き手がかりが存在する場合、奥行き弁別精度が向上することを明らかにした。曖昧な眼間時差だけでは、奥行きと運動方向を一意に決定できないが、眼間時差による知覚が固視点より奥として解釈されるというバイアスがあることにより、運動方向が決定可能であることを示した。眼間時差から生じる奥行き・運動知覚の定量的評価により、眼間時差が約 100ms まで、両眼間の視覚刺激は融合可能であり、眼間時差に比例した奥行き量が生じることを明らかにした。しかし、物体の速度については眼間時差に依存しないことを明らかにした。これらのことは、曖昧な眼間時差だけでは奥行きと速度を同時に決定できない共変性を持つにも関わらず、視覚系が速度を適当に決めることで奥行きを優先して決定するメカニズムを持つことを示す。以上のことは、初期視覚(V1)領域で奥行きと運動が同時に符号化し処理されているという生理学実験の報告に一致する。この初期視覚メカニズムが、曖昧な視覚情報から瞬時に尤もらしい知覚を生じさせる皮質メカニズムの第1段階を担っていることが示唆される。

目次

概要	i
第1章 緒言	1
1.1. はじめに	1
1.2. 研究背景	2
1.3. 関連研究	6
1.4. 本論文の構成	7
第2章 スリット視における空間視差・眼間時差の奥行き知覚	10
2.1. はじめに	10
2.2. 提案手法	10
2.3. 実験環境	13
2.4. 空間視差により生じる奥行き知覚	15
2.5. 眼間時差により生じる奥行き知覚	21
2.6. 空間視差と眼間時差の混合情報, 眼間時差について注目した奥行き弁別の解析	26
2.7. おわりに	29
第3章 眼間時差により生じる奥行き知覚に対する図形的特徴・面情報の影響	31
3.1. はじめに	31
3.2. 眼間時差により生じる奥行き知覚に対する図形的特徴の影響	31
3.3. 眼間時差により生じる奥行き知覚に対する面情報の影響	35
3.4. 眼間時差だけを持つ RDS 刺激により生じる奥行き知覚	37
3.5. 眼間時差だけの奥行き知覚と図形的特徴・面情報の影響と議論	39
3.6. おわりに	42
第4章 奥行き知覚に関するその他のパラメータの影響	43
4.1. はじめに	43
4.2. 眼間時差のオンセット・オフセット呈示順序に関する奥行き知覚への影響	43
4.3. RDS の刺激構成要素の奥行き知覚への影響	47
4.3.1. RDS を構成する各点の呈示時間の奥行きへの影響	49
4.3.2. RDS 全体の呈示時間の奥行きへの影響	50
4.3.3. 図形的対称性が奥行きに及ぼす影響	51
4.3.4. RDS 点密度の奥行きへの影響	52
4.3.5. 刺激サイズによる奥行き知覚への影響	52
4.4. おわりに	54
第5章 眼間時差により生じる奥行き知覚と運動方向知覚の関係	55
5.1. はじめに	55
5.2. 奥行きと運動方向の共変性	55

5.3.	それぞれの視覚刺激により生じる運動方向知覚.....	56
5.4.	おわりに	60
第 6 章	奥行き知覚と運動方向知覚に対する遮蔽の効果.....	61
6.1.	はじめに	61
6.2.	不可視な遮蔽物条件下において眼間時差により生じる知覚.....	61
6.3.	矛盾した遮蔽物条件下における眼間時差により生じる知覚.....	65
6.4.	おわりに	69
第 7 章	眼間時差により生じる奥行き知覚の定量評価.....	71
7.1.	はじめに	71
7.2.	面情報を持つ視覚刺激により生じる奥行き知覚の定量評価.....	71
7.3.	RDS 刺激により生じる奥行き知覚の定量評価.....	74
7.4.	おわりに	76
第 8 章	眼間時差により生じる速度知覚.....	77
8.1.	はじめに	77
8.2.	眼間時差により生じる速度知覚の弁別.....	77
8.3.	おわりに	79
第 9 章	眼間時差により生じる速度知覚の定量評価.....	80
9.1.	はじめに	80
9.2.	眼間時差により生じる速度知覚の定量評価.....	80
9.3.	おわりに	83
第 10 章	速度知覚に対するリファレンスの影響.....	85
10.1.	はじめに	85
10.2.	リファレンス速度の範囲に対する速度知覚の影響.....	85
10.3.	おわりに	88
第 11 章	眼間時差により生じる速度知覚に対するリファレンス速度の時間変化の影響.....	89
11.1.	はじめに	89
11.2.	リファレンス速度範囲の時間変化に対する速度知覚.....	89
11.3.	おわりに	92
第 12 章	結言	93
12.1.	議論・今後の課題	93
12.2.	本研究のまとめ・結論	99
	謝辞	103
	参考文献	104
	自著論文	107

目次

図 1-1	Pulfrich Effect の概要	4
図 1-2	スリット視の概要	5
図 2-1	提案手法で用いるスリットと呈示刺激のプログラム実装上の関係	12
図 2-2	被験者が実際に観察する刺激像	12
図 2-3	呈示刺激に対して多数存在する解釈の例	13
図 2-4	スリット視の実験環境	14
図 2-5	水平スリットを用いた実験の呈示刺激概要	17
図 2-6	水平スリットを用いた実験の環境・刺激詳細	17
図 2-7	水平スリットの背後に空間視差が呈示された時の両眼入力画像	18
図 2-8	水平スリットを用いた運動・静止刺激実験のパラダイム	18
図 2-9	空間視差により生じる奥行き弁別の棄別	20
図 2-10	鉛直スリットを用いた実験の環境・刺激詳細	22
図 2-11	鉛直スリットを用いた運動・静止刺激実験のパラダイム	23
図 2-12	眼間時差により生じる奥行き弁別の棄別	25
図 2-13	空間視差, 眼間時差による奥行き弁別の棄別—運動刺激	28
図 2-14	空間視差, Da Vinci Stereo による奥行き弁別の棄別—静止刺激	28
図 2-15	眼間時差に注目した奥行き弁別の解析	29
図 3-1	眼間時差と面情報を持つ視覚刺激実験	32
図 3-2	眼間時差と面情報を持つ視覚刺激実験のパラダイム	33
図 3-3	四角形の視覚刺激より生じる奥行き弁別の棄別	34
図 3-4	図形的特徴の奥行き知覚への影響	34
図 3-5	線画視覚刺激	35
図 3-6	線画刺激より生じる奥行き弁別の棄別	36
図 3-7	円・ひし形刺激と線画刺激の奥行き弁別の棄別	37
図 3-8	RDS 刺激を用いた実験	38
図 3-9	RDS 刺激より生じる奥行き弁別の棄別	39
図 3-10	円・ひし形と RDS 刺激の奥行き弁別の比較	39
図 3-11	各視覚刺激の奥行き弁別の棄別	41
図 4-1	自然界における異なる眼間時差を持つオンセット・オフセットの順序	44
図 4-2	オンセット・オフセットをシフトさせた実験条件	44
図 4-3	オンセット・オフセットシフト実験環境	45
図 4-4	オンセット・オフセットシフト実験パラダイム	45
図 4-5	オンセットシフト実験の奥行き弁別の棄別	46
図 4-6	オフセットシフト実験の奥行き弁別の棄別	47

図 4-7	オンセット・オフセットシフト実験の奥行き弁別比較.....	47
図 4-8	RDS 構成要素実験環境.....	48
図 4-9	RDS の分布範囲.....	48
図 4-10	RDS 構成要素実験パラダイム.....	49
図 4-11	RDS 構成要素の各点の呈示時間の違いに関する奥行き弁別 (6.7, 33.5ms).....	53
図 4-12	RDS 全体の呈示時間の長さの違いに関する奥行き弁別.....	53
図 4-13	RDS の呈示範囲の図形的対称性に関する奥行き弁別.....	54
図 4-14	RDS の点密度の違いに関する奥行き弁別.....	54
図 5-1	奥行き・運動方向の共変性.....	56
図 5-2	運動方向判断実験環境.....	57
図 5-3	運動方向判断実験パラダイム.....	57
図 5-4	円・ひし形に対する運動方向判断.....	58
図 5-5	四角形刺激に対する運動方向判断.....	58
図 5-6	RDS 刺激に対する運動方向判断.....	58
図 5-7	各視覚刺激に対する運動方向判断.....	59
図 6-1	不可視スリット実験の概要.....	62
図 6-2	不可視スリット実験刺激詳細.....	63
図 6-3	不可視スリット実験パラダイム.....	63
図 6-4	不可視スリットの奥行き弁別.....	64
図 6-5	不可視スリットの運動方向判断.....	65
図 6-6	矛盾スリット実験概要.....	66
図 6-7	矛盾スリット実験刺激詳細.....	67
図 6-8	矛盾スリット実験パラダイム.....	67
図 6-9	矛盾スリットの奥行き弁別.....	68
図 6-10	矛盾スリットの運動方向判断.....	69
図 7-1	四角形刺激による奥行き知覚の定量評価実験概要.....	73
図 7-2	四角形刺激による奥行き知覚の定量評価実験パラダイム.....	73
図 7-3	眼間時差より生じる奥行き知覚の定量評価 (四角形刺激).....	74
図 7-4	RDS 刺激の実験刺激詳細.....	75
図 7-5	RDS 刺激の奥行き知覚の定量評価実験パラダイム.....	75
図 7-6	眼間時差より生じる奥行き知覚の定量評価 (RDS).....	75
図 8-1	速度弁別実験における RDS 刺激.....	78
図 8-2	速度弁別実験環境.....	78
図 8-3	速度弁別実験パラダイム.....	79
図 8-4	奥行き・速度弁別の比較.....	79
図 9-1	速度評価実験刺激詳細.....	82

図 9-2	速度の定量評価実験パラダイム	82
図 9-3	眼間時差から生じる速度知覚の定量評価 (左-負符号, 右-正符号)	83
図 9-4	眼間時差から生じる速度知覚の定量評価	83
図 10-1	速度評価 (リファレンス平均速度 2.1deg/s, 範囲 0.7~3.5deg/s)	87
図 10-2	速度評価 (リファレンス平均速度 2.8deg/s, 範囲 1.4~4.2deg/s)	87
図 10-3	速度評価 (リファレンス平均速度 3.5deg/s, 範囲 2.1~4.9deg/s)	87
図 10-4	リファレンス速度範囲と知覚速度	88
図 11-1	リファレンス平均速度変化実験.....	90
図 11-2	低速から高速へ変化する条件での速度知覚 (2.1 → 2.8deg/s).....	91
図 11-3	高速から低速へ変化する条件での速度知覚 (2.8 → 2.1deg/s).....	91
図 12-1	生理実験により報告された V1 細胞: 単眼・両眼性プロファイル.....	97
図 12-2	4つの両眼性プロファイル	98
図 12-3	V1 細胞のプロファイルにより導出可能な 3 仮説.....	98
図 12-4	眼間時差入力に対する 2通りの奥行き・運動方向解釈.....	99
図 12-5	2つの制約条件により導かれる奥行き・運動知覚の生成メカニズム.....	99

表目次

表 2-1	実験環境における各刺激輝度	14
表 2-2	水平スリット(幅 3.3')における形状判別[%]	20
表 2-3	水平スリット(幅 3.3')における各呈示部位に対する奥行き弁別 [%]	21
表 2-4	鉛直スリット(幅 3.3')における形状判別 [%]	24
表 2-5	鉛直スリット(幅 3.3')における各呈示部位に対する奥行き弁別 [%]	25
表 3-1	各視覚刺激を用いた奥行き弁別結果に対する Two way ANOVA	41

第1章 緒言

1.1. はじめに

外界には多数の曖昧な視覚情報が存在する。視覚系は、膨大で曖昧な情報を選択・処理することで知覚を構成している。特に実環境では曖昧な情報だけしか取得できない状況が頻発するが、視覚系は瞬時に尤もらしい知覚を構成する。この視覚系の情報処理メカニズムはもっとも優れたシステムであると言われているが、未だ解明されてない部分が多く存在する。この視覚システムが、曖昧な視覚情報を基にどのような知覚特性を生成するかについても、定性的かつ定量的に調べられていない。曖昧な情報から瞬時に尤もらしい知覚を生じさせるメカニズムは、生体システムの主な特徴である頑健性の基礎となると考えられる。頑健性は、現在の工学技術が最も苦手とする特性であり、生体の頑健性実現のメカニズムを理解することは、これからの工学技術の発展にも重要な示唆を与えるものと考えられる。そして、このメカニズムの解明のためには、曖昧情報からどのような知覚特性が生じるかを解明する必要がある。

視覚系のメカニズム解明のための近代的な取り組みは、16～17世紀に始まり20世紀以降の急速な科学技術の発展により、様々な分野で進歩を遂げている。情報科学・工学の技術向上に伴い、心理物理学研究では、視覚情報に対する厳密な視覚刺激の生成・制御や生体応答を取得することを可能としている。生理学研究では、細胞レベルでの構造・機能の探求が可能となり、視覚刺激に対する脳皮質の電気応答記録や解析を可能としている。心理物理学・生理学研究の知見から、生体システムを模した計算論的モデルの構築を可能としている。このように様々な分野による研究の相互関係が、視覚系の処理メカニズムの解明と優れた処理メカニズムの構築を可能とする。心理物理学的アプローチは、視覚系の処理メカニズムの解明における基礎段階を担っている。

本研究は、視覚系において、曖昧な視覚情報からどのような奥行きと運動の知覚が生成されるのか心理物理学的に解明することを目的としている。知覚特性について調べるためには、その生成メカニズムについて注目する必要がある。生理学の知見から、初期視覚 V1 皮質領域において、曖昧な視覚情報による奥行きと運動を同時に符号化する事が可能な 2 次構造を持つ細胞の存在が報告されている[1][2][3][4][5]。このことから、頑健性メカニズムの基礎は初期視覚 V1 皮質領域で既に存在すると考え、初期視覚の奥行

きと運動知覚に注目する。特に曖昧情報な眼間時差から生じる奥行きと運動の知覚特性を心理学的手法により明らかにし、その皮質メカニズムの理解へとアプローチする。

1.2. 研究背景

視覚系が用いる奥行き手がかりは、大きく分けて3つに分類できる。奥行き量と奥行き方向の2つの情報を持つベクトル手がかり、奥行き量だけを持つスカラー手がかり、奥行き方向だけを持つオーダー手がかりである。一般的に奥行き手がかりとしてよく知られている両眼視差は奥行き量と奥行き方向を持つベクトル手がかりである。遮蔽（重なり）は複数物体の相対的な奥行き関係だけを与えるのでオーダー手がかりである。

奥行き手がかりとして知られる両眼視差には、2つのタイプが存在する。1つは空間視差で、Wheatstone が19世紀に報告した視差情報であり、水平方向の像差が左右眼網膜上へ同時刻に与えられるとその像差の大きさに依存した奥行き量を生じる[6]。この視差情報から奥行き知覚を構成するメカニズムは、従来から広く研究されている[7][8][9]。空間視差から奥行き知覚を生じる視覚刺激の1つに Random Dot Stereograms(RDS)がある[10]。RDSは単眼像では形態情報が存在しないが、両眼融合すると輪郭のある面を持った奥行き知覚を生じる。両眼融合後に輪郭が生成されるため、RDSは純粋な網膜像差だけを持つ奥行き手がかりである。両眼視差のもう1つのタイプは、眼間時差(Interocular Time Delay : ITD)である。眼間時差は空間的な像差を持たないが、時間遅れを生じて左右眼網膜上へ与えられる曖昧な視差情報であり、この視差情報から生じる奥行き・運動知覚についてはまだ良く知られていない。

厳密な意味では眼間時差ではないが、眼間時差を持つ視覚刺激を用いた現象として Pulfrich Effect がある[11][12][13][14]。前額平行面上を水平方向に単振動している刺激を観測する時、片眼だけ減光フィルタを通して刺激を観測する場合を考える（図 1-1）。減光フィルタを通して観測する眼の刺激は、もう一方で観測される刺激の輝度より低くなるため、左右眼間の刺激像の伝達速度に遅延が生じる。つまり同時刻で処理される刺激像について考えると、減光フィルタを通して観測している眼の像は、現時刻の刺激位置ではなく過去に呈示された刺激位置となるので、左右眼で空間視差が生じる。これにより奥行き知覚が生じて、刺激の軌道は、前額平行面上の単振動ではなく、楕円運動と

して知覚される。つまり Pulfrich Effect は、ある時刻・位置に呈示された刺激像が左右眼で異なる輝度を持つために処理遅延が起こり、結果として空間視差が生じる事で奥行き知覚を与えるという現象である。

遮蔽は、単眼性手がかりとして知られている。実際には単眼画像だけでは物体の前後関係を決定できないが、この手がかりは適当な仮定において奥行きオーダーを規定する。実世界では、物体の全体像が見えているという状況はほとんどない。複数物体が存在する場合、それらの像には重なりが生じ、その画像特徴である遮蔽関係から奥行きの順序（前後関係）を規定する。奥行きオーダーの規定は、局所的に行われており、この処理は視覚系の比較的初期の段階で行われていると考えられている。

遮蔽が存在すると、運動する視覚物体の全体像は一部分の連続呈示に分割される。このとき、その視覚物体の面情報を再構成する現象がある。これはスリット視と呼ばれている[15]。幅の狭いスリットから、運動物体を観測する場合、刻々と呈示される情報は視覚刺激の面の一部分でしかなく、観測者はその情報だけからでは物体の全体像を推測することは難しい。しかし、スリットの背後を物体が適当な速度で運動すると、物体の全体像を知覚することが可能である。面情報の再構築は、局所的な呈示部位だけでは全体像の予測が非常に困難である複雑形状の場合でも可能であることも報告されている。

実世界では、遮蔽物により観測視覚物体の像が、単眼にだけ呈示される場合や左右眼で異なる物体形状になる場合がある。このような場合でも、視覚系は物体の奥行き知覚を構築できる。この現象を Da Vinci Stereo という[16]。Da Vinci Stereo から生じる奥行き知覚についてはいくつか報告がある[17][18]。Da Vinci Stereo は両眼遮蔽手がかりと解釈されており、ベクトル手がかりと考えられている。つまり、奥行き量と奥行き方向についての情報を与える。

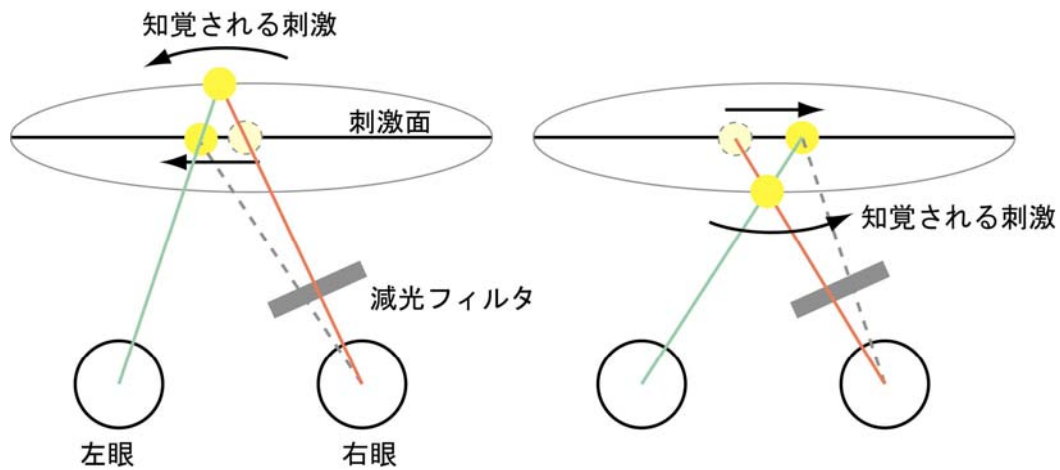


図 1-1 Pulfrich Effect の概要

右眼に減光フィルタを用いた場合の説明。左図は、刺激面上を左に運動する刺激を観測する場合。同時刻に左右眼で処理される刺激は、左眼では現時刻に刺激面上に呈示されている像（黄色円）を処理し、右眼では減光フィルタにより輝度が低下した刺激を観測しているために伝達速度が遅れ、過去に呈示された像（黄色の点線円）を処理する。結果、知覚される刺激は刺激面より奥の位置で楕円運動しているように見える（楕円軌道上の黄色円）。右図は、刺激面上を右方向に運動する刺激を観測する場合である。左図と同様の理由で知覚される刺激は、刺激面より手前の楕円運動に見える。

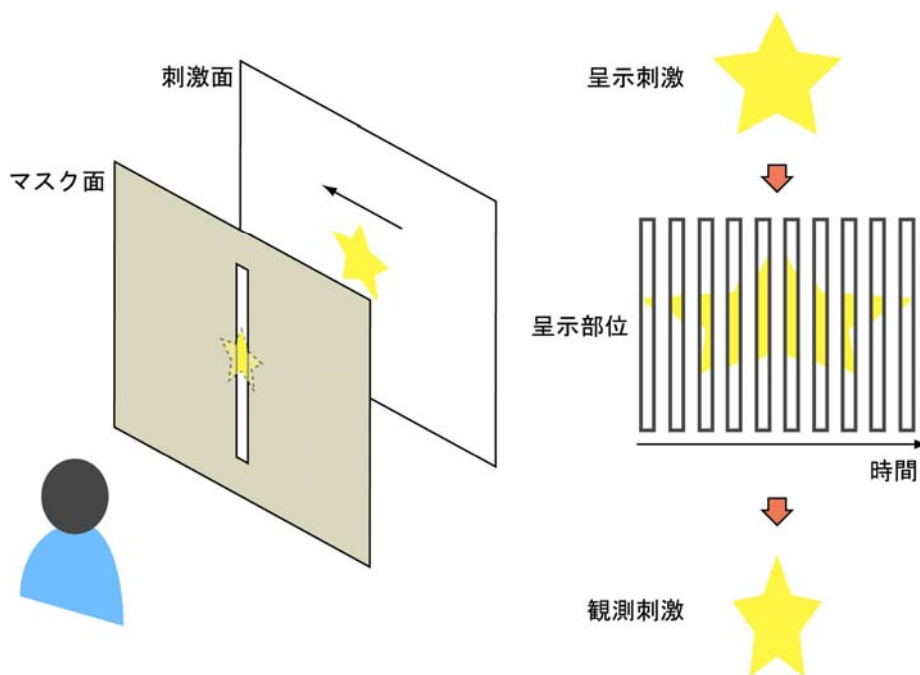


図 1-2 スリット視の概要

幅の狭いスリットの背後に複雑な特徴を持つ視覚刺激が適当な速度で運動すると、刻々と呈示される視覚刺激の局所部位からは全体像を推測することが困難であるにもかかわらず、スリット周辺で全体像が再構成された視覚刺激を知覚することができる。

奥行きと運動情報の脳における処理・伝達経路について記述する。奥行き・運動情報は脳の大細胞系を経て背側経路を伝達する。網膜から入力された信号は、神経節細胞、LGNの大細胞系投射によりV1に至る。大細胞系は、大きな受容野を持つため時間分解能が高く、空間分解能が低い。そのため、刺激の細かな形態特徴・色検出には向かないが、視覚刺激の速い運動検出に有利であり運動情報を伝達する。V1以降の背側経路は、大きく分けて2つに分類される。1つはV2の広線条領域、V3、MTを経由して、MST、VIPなどを通り7野に向かう運動情報を処理している経路である。もう1つは、V3A、PO(V6)を経由してLIP、cIPSに向かう経路で物体位置や3次元構造を処理している。奥行きに関して、これらの経路上のV1・V2において次のような細胞が存在する。固視点よりも近い刺激に反応する細胞 (near 細胞)、固視点よりも遠い刺激に反応する細胞 (far 細胞)、固視点付近で活動が増加する細胞 (zero turned excitatory)、固視点付近で活動が

減少する細胞(zero turned inhibitory)である。MTにおいて、約 2/3 の細胞が両眼視差にも選択性を示し、V1・V2 の細胞と同様に上記のような4つタイプが発見されている[19]。運動に関しては、V1 のIVb 層で方向選択性細胞が発見されている。V1 細胞は局所的な運動に選択的である。MT の細胞の 90%ほどが運動方向選択性を示し、V1 細胞のように局所運動に選択的な細胞とパターン全体に選択的な細胞が存在する[20][21]。

1.3. 関連研究

眼間時差に注目した心理物理学研究として、Ross[22], Tyler[23]がそれぞれ動的な RDS を用いた実験を報告している。Ross は、固視点の周囲にノイズパターンとして動的な RDS (RDS を構成する各点は Pulfrich Effect のように左右眼像で遅延が生じている) を呈示したところ、遅延が 50ms 以内では固視点付近にノイズ面が知覚され、70ms 以上ではノイズ面が固視点の背後に知覚されると、眼間時差により生じる奥行き知覚のオーダーについて報告をしている。Tyler は、片眼に減光フィルタを使用し動的 RDS を観測する実験から、固視点の周囲を回転する RDS 刺激の知覚が生じると報告している。この実験で知覚された各点の運動と奥行きの関係は Pulfrich Effect と同様である。例えば、左眼に減光フィルタを設置した場合、固視点より手前の奥行きでは左方向に運動する回転を観測し、反対に固視点より奥の場合では右方向に運動する回転が観測されると、奥行き知覚のオーダーと運動の関係について報告している。この結果から、Tyler は奥行きと運動の知覚が同一の工程で生じているのではないかと示唆している。彼らの報告は共に、奥行きオーダーについての検討だけで、眼間時差を厳密に制御した体系的・定量的なアプローチは行っていない。

Pulfrich Effect に類似した現象に対する生理学的知見も多く存在する。Anzai らは、ネコの線条皮質 (エリア 17/18) において、時空間 2 次構造を持つ両眼性複雑型細胞が多数存在することを報告している[1]。Pack らは、マカクザルの V1 と MT において、同様に時空間的に傾きを持つ細胞が存在することを報告している[2]。このことから、彼らは、初期視覚において奥行きと運動が同時に符号化されているのではないかと主張している。これに対し Read らは、初期視覚における奥行き・運動の同時符号化機構は存在しないと主張している。その根拠として、ネコの線条皮質で発見された時空間 2 次構造

を持つ細胞は、マカクザルの V1 ではほとんど発見されていないとし、つまりマカクザルの V1 では奥行きと運動の同時符号化はされていないと述べている[24][25]。Pulfrich Effect に類似した現象に関する生理学的なメカニズムについての議論はまだ決着していない。

1.4. 本論文の構成

本研究では、眼間時差から生じる奥行きと運動の知覚を解明することを目的とする。本論文の構成を以下に述べる。

第 2 章では、眼間時差により生じる奥行き知覚について検討するために、スリット視を用いた実験を提案する。スリット視に空間視差を用いることで、眼間時差・運動・遮蔽・面情報を制御する。この手法を用いて、スリット視において空間視差・眼間時差から生じる奥行きの弁別が可能であるかどうかを検討する。テスト刺激として空間視差や眼間時差を持つ円・ひし形を用いる奥行き弁別実験を行う。実験結果から、スリット視において空間視差や眼間時差から奥行き知覚が成立することを示す。第 3 章では、第 2 章で用いたテスト刺激に存在した眼間時差以外の情報(図形的特徴・明示的な面情報)が、奥行き知覚に影響を与えるかどうかについて検討する。実験では、テスト刺激として、図形的特徴だけを持つ円・ひし形の線画刺激、オンセット・オフセットにだけ眼間時差を持ち明示的な面を持つ四角形、眼間時差だけを持つ RDS 刺激の 3 つ刺激を用いて奥行き弁別について検討する。実験結果から、図形的特徴・面情報は奥行き弁別の精度を向上させる効果があること、これらの情報が存在しなくても奥行き知覚が成立することを示す。第 4 章では、第 3 章で用いた四角形や RDS 刺激が持つ眼間時差以外の視覚情報(眼間時差のオンセット・オフセットの呈示順序、RDS 刺激の構成要素)について注目する。これらの情報の奥行き知覚への影響を検討する。その結果、これらの情報が奥行き知覚の生成には影響を与えないことを示す。このことから、純粋な眼間時差だけで奥行き知覚が成立することを示す。第 5 章では、眼間時差から運動方向知覚が決定可能かどうかを検討する。実験の結果から、視覚系において理論的には曖昧な眼間時差だけから奥行きと運動方向を決定することができないにも関わらず、眼間時差から運動方向が一意に決定できることを示す。第 6 章では、第 5 章で得られた結果を受けて、眼間時

差により生じる奥行きや運動方向の知覚が遮蔽情報の影響によるものかどうか検討する。このことを検討するために、遮蔽情報を明示的に与えない不可視スリットを用いる実験を行う。その結果、不可視スリット条件下においても明示スリット条件下と同様の知覚が生じることから、遮蔽情報の影響が無いことを示唆する。更に遮蔽の影響を検証するために、眼間時差から左右方向の運動が生じると仮定して、その方向とは矛盾する上下方向の手掛かりを与えるスリットを用いる実験を行う。実験結果から、この条件下においても左右方向の運動を知覚するため、遮蔽の影響はなく眼間時差により運動方向が決定していることを示唆する。これらのことは、視覚系が曖昧な情報から奥行きと運動方向を同時に決定し、眼間時差の刺激は常に奥にあると解釈することを示唆する。第7章では、相対的な奥行き知覚に注目する。眼間時差は、空間視差と同様に奥行き弁別が可能であるため、奥行き量を持つと考えられる。実験では、既知の奥行き量を持つ空間視差と比較することで、眼間時差から生じる奥行き知覚について定量的に評価する。その結果、奥行き量は約 100ms まで眼間時差に比例することを示す。第8章では、眼間時差により生じる速度知覚について検討する。視覚系が眼間時差だけから奥行きと速度を同時に決定できないこと、かつ奥行き量が眼間時差に依存することから、速度は眼間時差に依存しないと考えられる。このことから、眼間時差により生じる速度の弁別が不可能であると考え、心理物理実験により検討する。実験の結果から、知覚される速度の弁別が不可能であることを示す。第9章では、眼間時差から生じる速度の定量評価を行う。第8章の結果により相対的な速度弁別が不可能なことから、実際に知覚される速度は眼間時差に依存せず一様になると考えられる。ここでは、眼間時差からどのような知覚が生じるのか速度の定量評価を行う。その結果、知覚される速度は眼間時差に無関係であることを示す。第10章では、眼間時差から生じる速度と明示的な速度の関係について検討する。第9章で得られた結果から、知覚される速度は明示的な速度を持つリファレンスの影響を受けると考えられる。リファレンス速度の呈示範囲を変化させた実験により、実際に影響を受けるのかどうか心理物理実験により検討する。実験の結果、眼間時差からは速度の情報が与えられないため、知覚速度は眼間時差に依存せず、リファレンスの速度を参照していることを示す。第11章では、眼間時差により生じる速度において、明示的な速度の影響が時間的にどのくらい早く応答するのか検討

する。第 10 章の結果において、知覚される速度がリファレンスの平均速度の影響を受けることから、平均速度が時間経過と共に変化した場合に知覚速度も変化するのかどうか検討する。実験の結果、知覚される速度は早い段階で時間的に変化したリファレンス速度に追従することを示す。最後に第 12 章で、本論文の心理物理実験から得られた結果を生理実験の知見と比較し、視覚系の知覚メカニズムについて議論し、今後の課題を述べる。そして本論文の結果をまとめ結論を述べる。

第2章 スリット視における空間視差・眼間時差の奥行き知覚

2.1. はじめに

本研究では、眼間時差から生じる奥行き・運動の知覚について心理物理学的に解明することを目的としている。眼間時差から生じる知覚特性を検討するためには、眼間時差の厳密な制御が不可欠である。実世界に存在する視覚刺激は、複数の視覚属性（形態情報・運動情報）や奥行き手がかり（単眼手がかり・両眼遮蔽）を所持している。これらの複数情報が眼間時差に与える影響を考慮する必要もあるため、複数情報を制御する必要がある。従来研究では、眼間時差を呈示する手法として、動的な RDS を用いた実験が用いられているが、上記の条件を満たすものではない[22][23]。

本研究では、眼間時差の厳密な制御を行い、かつ複数の視覚情報を同時に制御する手法として、スリット視に両眼視差を持つ刺激を用いる心理物理実験を提案する。従来研究では、スリット視における両眼視差から生じる知覚特性について検討されていない。本章では、スリット視条件下で両眼視差から奥行き知覚が生じるかどうかを心理物理実験により検討する。実験結果により、空間視差・眼間時差の両方で奥行き知覚が成立することを示す。

2.2. 提案手法

提案手法では、ステレオスコープを用いて、左右眼に別々の刺激像を呈示する。これにより両眼視差を持つ視覚刺激の呈示が可能である。幅が 1pixel の鉛直スリットの背後で、空間視差を持つ刺激をスリットに対して垂直軸方向で等速直線運動させる（図 2-1, 図 2-2）。スリットから観測できる視覚刺激は、時系列順には幅 1pixel の局所部位でしかないため、水平方向の網膜像差である空間視差は存在しない。呈示される視差情報は、実験設定上の刺激速度から計算される眼間の時間差情報だけが与えられる。つまり眼間時差である。実験環境は、視覚刺激の速度を一定とし、空間視差を変化させることで、眼間時差を厳密に制御する。

スリット視では、時系列順に呈示される視覚刺激の局所部位から、全体の視覚刺激が

再構成可能である。つまり提案手法では視覚刺激の持つ面情報を制御することが可能である。局所部位の図形的特徴が眼間時差に与える影響、もしくは全体像の再構成に対する眼間時差の寄与、更には面情報の影響を検討することが可能である。

幅 1pixel のスリットから呈示される視覚刺激は、ある時刻に注目すると局所部位だけが静止刺激として呈示されており、運動情報が存在しない。円のような連続面を持つ視覚刺激がスリットの背後を運動する場合、局所部位は運動情報を持たないのだから、理論的には幅 1pixel の視覚刺激の伸縮として観測される。RDS のように刺激面が不連続に構成されている場合、順に呈示される局所部位も不連続になり、結果、点刺激の点滅として観測される。このように提案手法では、明示的な運動情報を与えない。つまり、純粋な眼間時差から生じる運動について検討するが可能である。また、提案手法ではスリットを遮蔽物として呈示する。遮蔽情報は奥行きオーダー手がかりとなることから、スリットの方角・輝度などを変数と用いれば、様々な遮蔽条件に対する眼間時差からの知覚特性が検討可能である。以上のように、スリット視において両眼視差を持つ視覚刺激を用いるという提案手法は、眼間時差・運動・遮蔽・面情報を同時に制御することが可能である。

提案手法では、マスク面と同一面（ディスプレイ上）に刺激を呈示する。理論的には、この手法により呈示される曖昧な眼間時差は多数の解釈が存在する。図 2-2 で示すように、左眼への入力の方が先行して呈示される場合を考えてみる。RDS 刺激の奥行きと運動方向に注目すると、大別して 2 つの解釈が存在する。1 つは、遮蔽物より奥にあり左方向に運動する場合であり、もう 1 つは遮蔽物より手前にあり右方向に運動する場合である（図 2-3 参照）。また、奥行きと運動速度に注目すると、RDS 刺激の奥行きが遮蔽物に近いという解釈を適用するならばその速度は遅い解釈されるが、奥行きの解釈が遮蔽物から離れるにしたがってその速度も比例して速く解釈される（図 2-3 参照）。このように曖昧な眼間時差から生じる奥行きと運動の知覚には共変性が存在する。つまり、理論的には奥行き・運動方向・運動速度は、曖昧な眼間時差だけでは決定できない。それでも視覚系はこの曖昧な視覚情報だけからでも奥行き・運動の知覚を生成する。本研究では、このような手法を用いて視覚情報を制御し、純粋な眼間時差だけから生じる奥行き・運動知覚について心理物理学的に検討する。

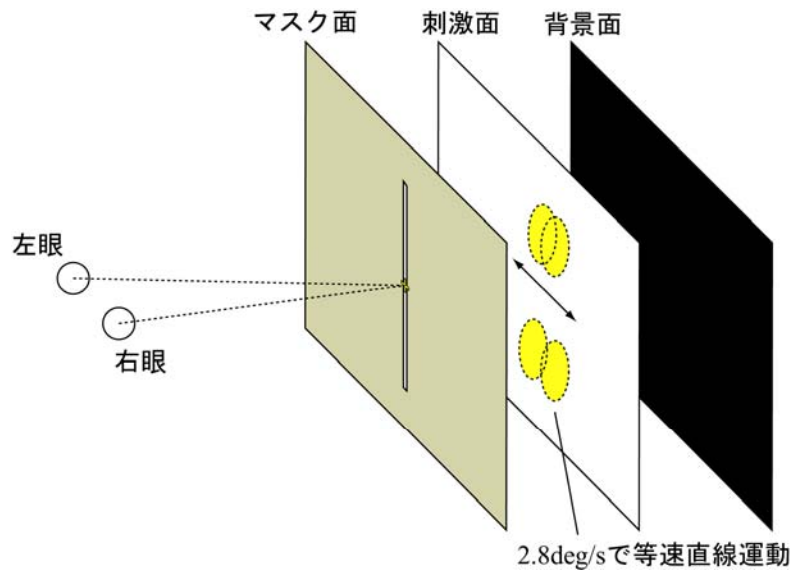


図 2-1 提案手法で用いるスリットと呈示刺激のプログラム実装上の関係

便宜上、マスク面と刺激面を分けて描いているが、実際にはマスク面と刺激面は同一平面上にある。刺激は、スリットの中に局所部位として呈示される。(観測者からの実際の見えは図 2-2 を参照)

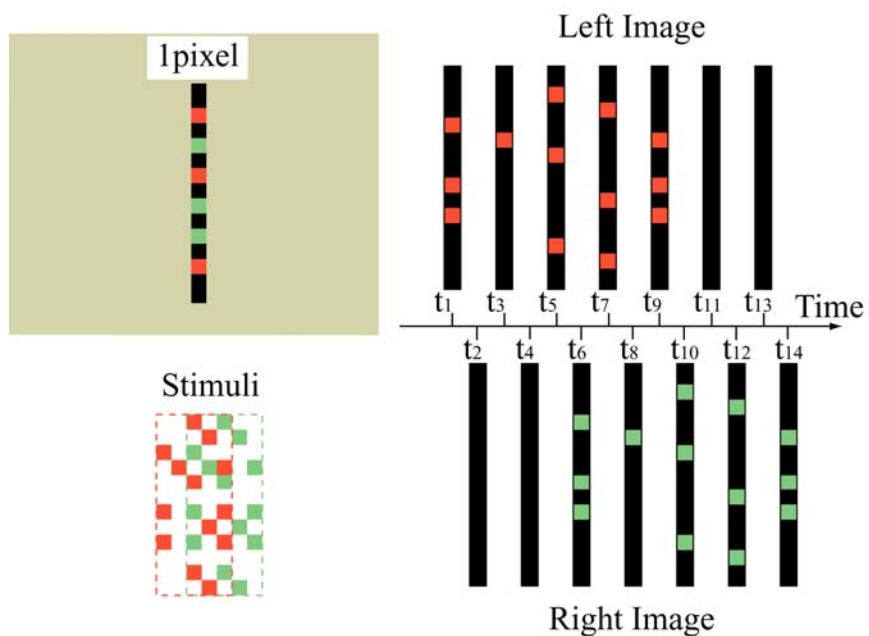


図 2-2 被験者が実際に観察する刺激像

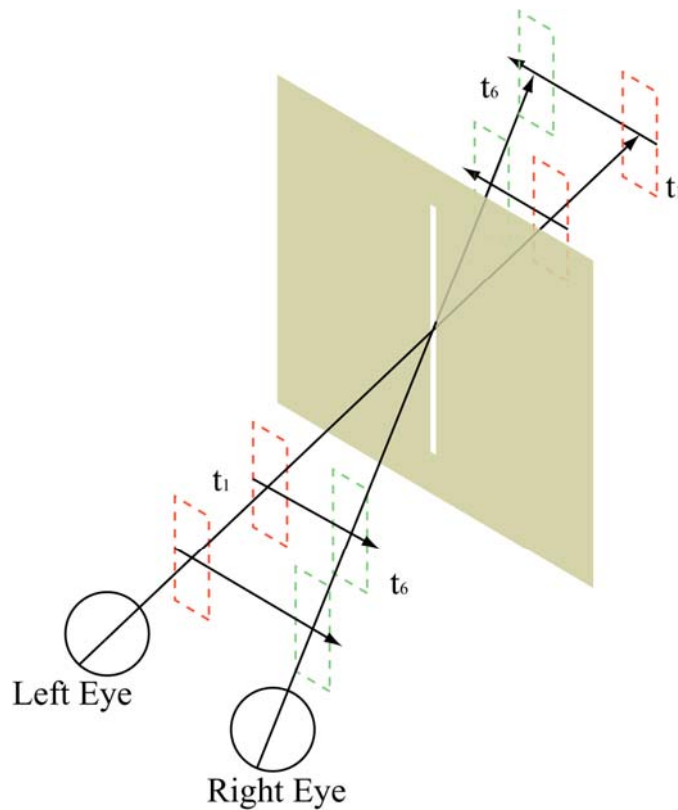


図 2-3 呈示刺激に対して多数存在する解釈の例

2.3. 実験環境

本論文では、前節で記述した提案手法により眼間時差から生じる奥行き・運動知覚について心理物理学的に検討する。ここでは、第2章以降の実験環境について記述する。

全ての心理物理実験は暗室で行った。被験者からディスプレイ（刺激面）までの距離は1.2mとした（図2-4参照）。刺激呈示面は、前額平行面上に設置し、その中心が被験者の正中面にあり、かつ両眼の視線と水平になるように調節した。このとき被験者から見たディスプレイ呈示画面の大きさは、視野角 $15.5 \times 11.7 \text{deg}$ ($375 \times 290 \text{mm}$)となる。ディスプレイ画面の解像度は 848×636 で、1pixelのドットは視野角 $1.1 \times 1.1'$ である。ディスプレイ上の刺激色は、単色（黄色）を用いた。したがって、画面に呈示される各刺激は輝度だけが異なる。ディスプレイはリフレッシュレート 150Hz で制御し、1フレーム毎に左眼用または右眼用画像を描画する。液晶シャッター付きステレオスコープは、コンピュータに接続している外部出力赤外線センサによりフレーム切り替えのタイミ

ングを取得し、画像切り替えに合わせて左右眼の液晶シャッターを開閉する。被験者はこの液晶ステレオスコープを通して、片眼それぞれ 75Hz の画像を観測する。

被験者は、裸眼または矯正視力で正常な視力を持つ成人した男性もしくは女性で行った。各実験における1セットの所要時間は異なり 5~30 分程度である。1日に行う実験は2セット以下とし、セット間には休憩を挟み疲労が蓄積しないように配慮した。実験機器の詳細を以下に示す。

- ・ディスプレイ：Clinton Monoray
- ・ビデオカード：VSG2/5 (Cambridge Research Systems Ltd.), Nvidia Quadro FX1000
- ・液晶シャッター付きステレオスコープ：(Nu Vision 60GX, MacNaughton Inc.)

表 2-1 実験環境における各刺激輝度

	ステレオスコープ装着時	裸眼
テスト刺激・固視点	20 cd/m ²	66cd/m ²
スリット	1.2 cd/m ²	7 cd/m ²
背景	0 cd/m ²	0 cd/m ²

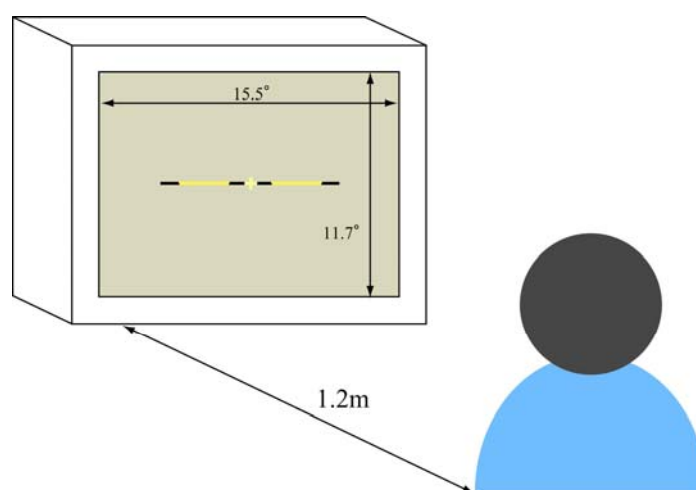


図 2-4 スリット視の実験環境

2.4. 空間視差により生じる奥行き知覚

スリット視において両眼視差を持つ刺激を呈示した研究は、これまで行われていない。提案手法を用いて、眼間時差から生じる知覚特性について検討するためには、スリット視の基礎となる知覚現象を抑えておく必要がある。基礎についての疑問は以下である。

- (1) 既知の奥行き量を持つ空間視差を与えた場合、奥行き知覚は成立するのか？
- (2) 空間視差を持ちスリットの背後を運動する視覚刺激から生じる奥行き知覚と、刺激呈示過程の静止した局所部位から生じる奥行き知覚とでは、知覚の精度・閾値に違いが生じるのだろうか？
- (3) スリット視において、報告されている局所部位情報からの面の再構成は、両眼視差を持つ刺激の場合でも成立するのか？

これらの疑問について検討するために、2つの異なる空間視差を持つ円・ひし形の刺激を水平方向のスリットの背後で上下に並行移動させる運動刺激実験と、運動過程のある時刻の局所部位だけを呈示する静止刺激実験を行った。提起した3つ疑問に対する実験の利点と結果の予測を以下に示す。

- (i) 横幅が十分長い水平方向のスリットを用いることで、常に空間視差が呈示可能である。もしスリット視において空間視差からの奥行き知覚が成立するならば、異なる空間視差を持つ2つの視覚刺激から生じる奥行きの弁別が可能である。
- (ii) 運動刺激実験・静止刺激実験の結果から知覚の違いを検討可能である。もし、それぞれの刺激から生じる知覚特性が異なるのであれば、奥行き弁別の精度・閾値の違いが生じるはずである。
- (iii) 両眼視差を持つ視覚刺激の場合でも、スリット視における面の再構成が可能であるならば、円・ひし形の刺激形状が判別可能である。

実験内容について記述する。実験概要、刺激の詳細を図 2-5、図 2-6 に示す。運動刺激実験では、図 2-6(a)に示す水平なスリットを遮蔽物として用いた。水平スリットの横

幅は十分広く、空間視差が呈示可能である。縦幅は 3pixel(3.3')とした。テスト刺激は、円またはひし形を用いた (図 2-6(b))。水平スリットの背後に、異なる空間視差を持つ 2 つ円もしくはひし形を上下に並行移動させた。円・ひし形刺激の運動過程において観測できる刺激像は、スリットを通して見える局所部位だけとなる。テスト刺激の観測部位の例を図 2-7 で示す。図 2-7 で示すように、同時刻において常にテスト刺激の同一部位が水平方向にずれて呈示される。つまり、常に空間視差が呈示される。つまり常に空間視差が呈示される。テスト刺激の運動速度は 2.8deg/s とした。2 つ同時に呈示されるテスト刺激の運動方向は、常に同方向であり、形状も同一形状である。各試行では、運動方向が上下ランダムであり、刺激形状も円またはひし形のどちらかをランダムに呈示した。実験中に選択される運動方向・形状は等しく設定した。実験で呈示するテスト刺激の空間視差は、常に刺激面より奥と設定した。2 つ同時に呈示されるテスト刺激のどちらか一方の空間視差は固定で 4.4'とし、もう一方は 5.5, 7.7, 9.9, 12.1, 14.3'の 5 段階とした。被験者には、異なる空間視差を持つ 2 つのテスト刺激のどちらがより手前に知覚されたか、二者択一強制選択で回答させた。また 5~11 試行毎に一度、呈示刺激の形状が、円とひし形のどちらであったか二者択一強制選択課題をさせた。1 セットは各パラメータに対し 40 試行で合計 200 試行とした。

静止刺激実験の場合は次の通りである。テスト刺激は、図 2-6(b)、図 2-7 で示す 3 つの局所部位のうちどれかがランダムに静止状態で呈示される。各部位の呈示頻度は等しく設定した。被験者は、奥行き弁別課題だけを行い形状判断は行わなかった。それ以外の条件は運動刺激実験と同様に行った。呈示部位を 3 つタイプに分けた理由は、それぞれの部位の図形的影響の違いを調べるである。

実験パラダイムは、図 2-8 のように構成した。各試行では、300ms マスク画面を呈示し、テスト刺激を呈示した。テスト刺激の呈示時間は、静止刺激では 120ms、運動刺激では約 680ms とした。その後、被験者には 2 つ同時に呈示されるテスト刺激の奥行き弁別を二者択一強制選択で回答させた。運動刺激実験の場合、この後、ランダムで刺激形状判別課題を行わせた。被験者は、裸眼または矯正により正常な視力を有する成人した男女の 4 名で行った。

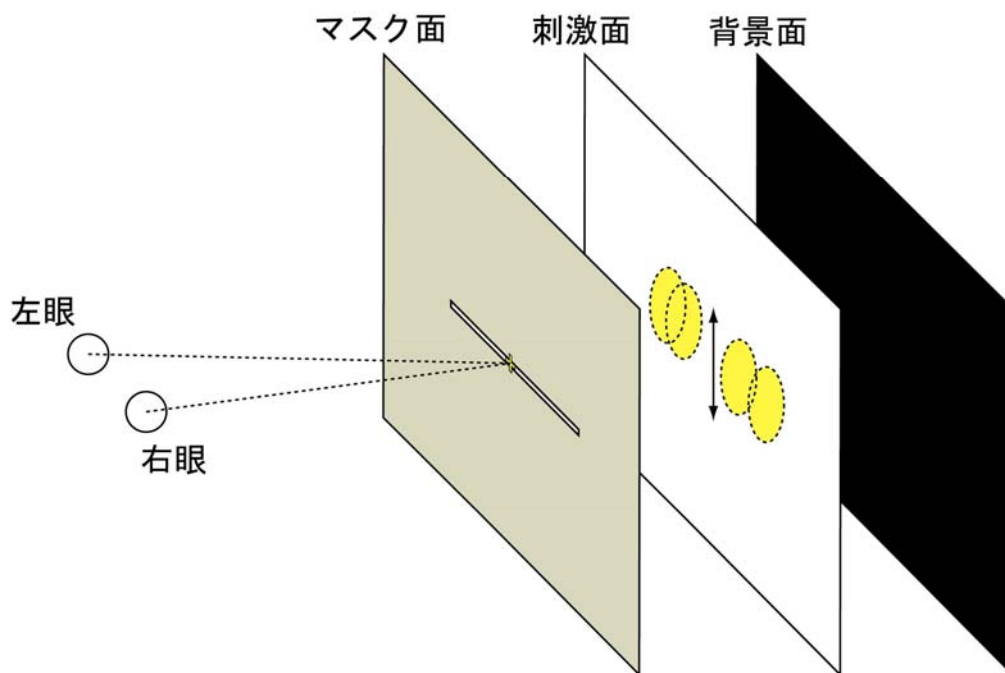


図 2-5 水平スリットを用いた実験の呈示刺激概要

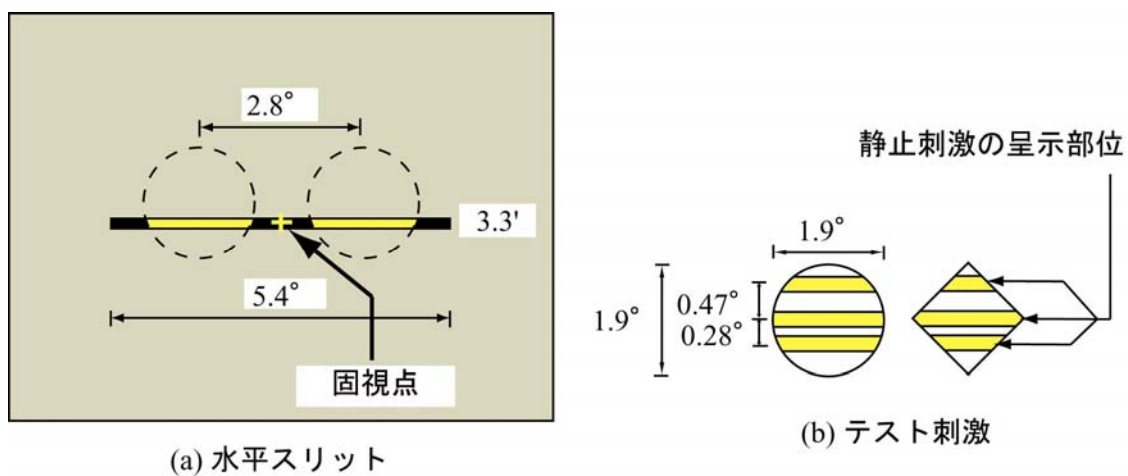


図 2-6 水平スリットを用いた実験の環境・刺激詳細

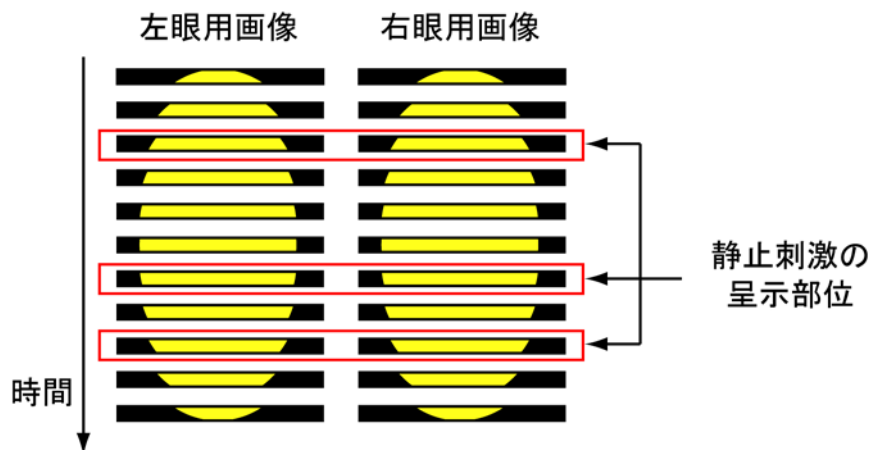


図 2-7 水平スリットの背後に空間視差が呈示された時の両眼入力画像

水平スリットの背後で、円刺激が上方方向に運動した場合の時系列に沿った呈示部位

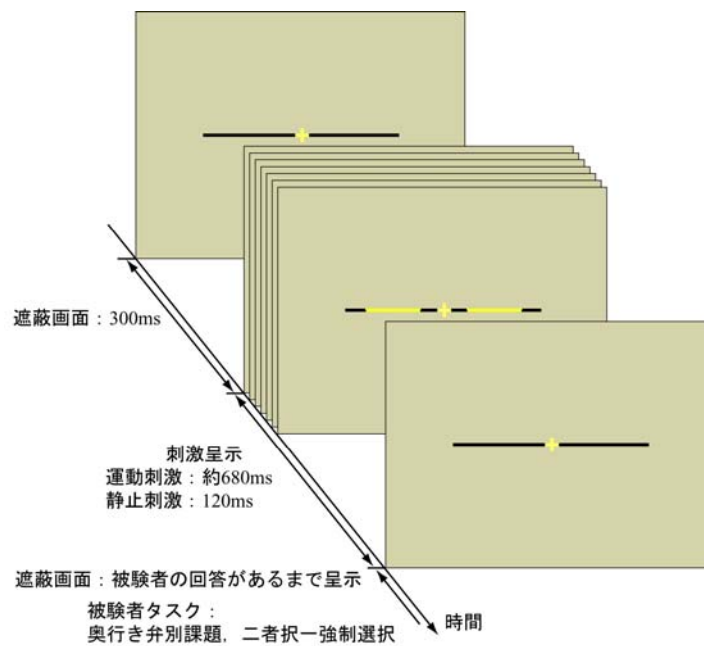


図 2-8 水平スリットを用いた運動・静止刺激実験のパラダイム

運動刺激実験における形状判別課題の結果を表 2-2 に、運動・静止刺激の奥行き弁別課題の結果を図 2-9 に示す。静止刺激の呈示部位別の奥行き弁別の正答率は、表 2-3 に示す。表 2-2 では、各被験者の円またはひし形が呈示された場合の正答率[%]と、そ

それぞれの平均値・標準偏差を示している。図 2-9 のグラフの横軸は、2 つ同時に呈示された空間視差の相対的な差を視野角[min]で示している。縦軸は正答率[%]で、空間視差の小さい方が手前であると回答した場合を正答とした。プロットデータは被験者 4 名の平均値で、赤い円が運動刺激の結果であり、青の三角が静止刺激の結果である。エラーバーは被験者間の標準偏差である。プロットデータに対する各被験者の重みは 40 試行である。表 2-3 は、静止刺激の呈示部位別の正答率[%]を示し、各部位における被験者の正答率と平均値・標準偏差を示している。表 2-2, 表 2-3, 図 2-9 の正答率のチャンスレートは全て 50% である。

表 2-2 から 1 人の被験者を除いて、形状判別の正答率が高い。特に 4 人中 2 人は正答率が 100% を示している。図 2-9 のグラフから、運動刺激・静止刺激共に全ての空間視差において正答率が高い。特に、空間視差が 1.1' 以外は、ほぼ 100% の値になっている。1.1' の場合でも、運動刺激では約 90%、静止刺激では約 80% と高い値である。表 2-3 から、静止刺激の奥行き弁別は、呈示部位に関係なく正答率が高いことが分かる。これらの結果から、始めに提起した疑問に対する結論が導かれる。

- (I) スリット視において、異なる空間視差を持つ 2 つの視覚刺激から生じる奥行きの弁別が可能であった。つまりスリット視条件下において、空間視差から奥行き知覚が成立する。
- (II) 運動刺激・静止刺激から生じる奥行きの弁別の精度・閾値には、違いが見られなかった。つまりスリット視において、空間視差を持つ運動刺激により生じる奥行き知覚と、静止刺激により生じる奥行き知覚は同等である。
- (III) 円やひし形といった刺激形状の判別が可能であった。つまりスリット視において両眼視差を持つ刺激の場合でも、面知覚の再構成は成立する。

奥行き弁別について、空間視差が 1.1' の場合に精度が低下する原因は、スリットの有無に関わらず奥行き弁別が困難なためである。また奥行き弁別の閾値に関しては、実験の結果、すくなくとも空間視差 1.1' までは弁別可能であることが明らかになった。運動刺激と静止刺激の奥行き弁別閾・精度に差が見られない理由は次のことが考えられる。

空間視差は非常に強力な奥行き手がかりであることので、幅の狭いスリットから呈示されるわずかな視差情報だけでも、奥行き知覚が十分成立するためである。

この節では、スリット視における基礎的な知覚特性について心理物理学的に検討した。実験の結果、スリット視において両眼視差から奥行き知覚が成立することを明らかにした。またスリット視の基本現象である、面知覚の再構成が成立することを示した。空間視差から生じる奥行き知覚は、静止刺激でも運動刺激と同等の奥行き弁別が可能であることを示した。

表 2-2 水平スリット(幅 3.3')における形状判別[%]

	YH	MK	HN	MO	平均	標準偏差
円	100	66.67	100	100	91.67	16.7
ひし形	100	92.86	100	85.71	94.64	6.84
平均	100	80.77	100	92	93.19	9.10
標準偏差	0	18.5	0	10.1	2.1	

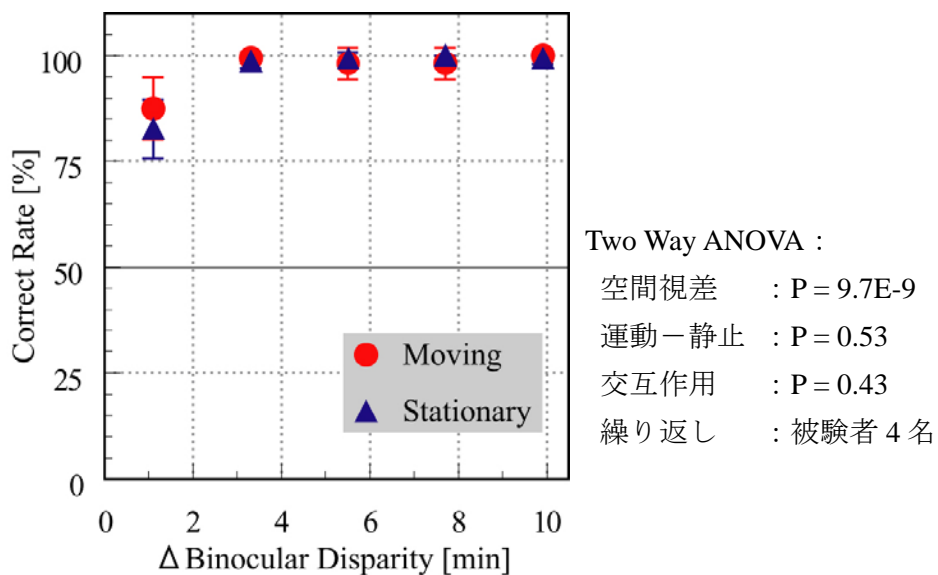


図 2-9 空間視差により生じる奥行きの弁別

表 2-3 水平スリット(幅 3.3')における各呈示部位に対する奥行き弁別 [%]

	YH	MK	HN	MO	平均	標準偏差
中心	98.34	98.34	90	96.67	96.88	6.25
17[<i>min</i>]	98.34	93.34	100	93.34	98.53	2.94
28[<i>min</i>]	98.34	91.67	96.67	96.67	98	4
平均	98.34	94.45	95.55	95.56	97.80	1.66
標準偏差	0	3.47	5.10	1.92	1.17	

2.5. 眼間時差により生じる奥行き知覚

スリット視条件下においても、空間視差により奥行き知覚が成立することを 2.4 で示した。ここでは提案手法を用いて、眼間時差から生じる奥行き知覚について検討をする。鉛直スリットを用いることで、空間視差は眼間時差に置換される。スリットは 3pixel(3.3')の鉛直スリットを用いた。テスト刺激に設定した空間視差は 4.4'以上であるので、スリットが無い場合に左右眼融合する刺激部位は同時刻に呈示されない。実験は、2.4 と同様に運動刺激実験と静止刺激実験の 2 つを行った。静止刺激実験は、局所部位から生じる奥行き知覚と検討するために行った。

この節では、眼間時差から生じる奥行き知覚について検討する。もし眼間時差から奥行き知覚が生じるのであれば、運動刺激実験において奥行き弁別が可能である。静止刺激実験では眼間時差は呈示されないが、左右眼の入力像の形状が異なる Da Vinci Stereo が呈示される[16]。Da Vinci Stereo から奥行き知覚が生じることは明らかにされている。そこで、静止刺激と運動刺激からの生じる奥行き知覚の精度・閾値と比較し、眼間時差により生じる奥行き知覚について検討する。

実験刺激の詳細を図 2-10 に示す。実験では、幅 3.3'の鉛直スリットの背後に、異なる空間視差を持つ 2 つ視覚刺激を並行移動させ、奥行き弁別が可能であるかどうか検討した。実験パラダイムは図 2-11 に示した通りである。テスト刺激の条件は 2.4 と同様で、形状は円・ひし形の 2 タイプを用いた。どちらか一方が空間視差 4.4'で、他方が 5.5~14.3 まで 2.2'間隔に 5 段階設定した。運動刺激実験の場合、空間視差が眼間時差に置換される。眼間時差の大きさは、固定視差では±33.5ms となり、もう一方の眼間時

差は、それぞれ ± 46.9 , ± 60.3 , ± 73.7 , ± 87.1 , ± 100.5 ms となる。ただし、2 つ同時に呈示される視覚刺激が持つ眼間時差の符号は、常に同符号である。眼間時差の符号は、正の場合、左眼像の入力が右眼象より時間的に先行して呈示される場合と設定した。眼間時差の値は、片眼に呈示された画像が、もう一方の眼に対してどれだけ遅延があるかを示している。静止刺激の場合は眼間時差ではなく、左右眼の刺激像が異なる Da Vinci Stereo となる。

被験者には、2 つ同時に呈示されるテスト刺激のどちらが手前に見えたか二者択一強制選択で回答させた。運動刺激実験では、5~11 試行毎に形状判別について二者択一強制選択課題を行わせた。

2.4 の実験環境と異なるのは、運動刺激の場合では、刺激の呈示時間が空間視差の大きさに依存して変化する。空間視差 $4.4\sim 14.3'$ に対してそれぞれ約 $710\sim 780$ ms となる。静止刺激の場合では、呈示部位が左右眼で異なる Da Vinci Stereo が生じている。呈示時間は 2.4 と同様で常に 120 ms とした (図 2-10 参照)。被験者は、矯正により正常な視力を持つ成人した男女の 4 名で行った。静止刺激・運動刺激実験において、各被験者の奥行き弁別課題はそれぞれ 200 試行とした。

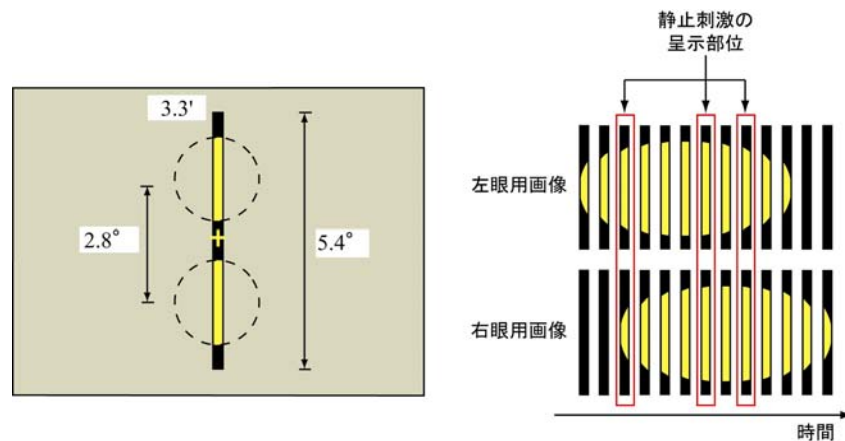


図 2-10 鉛直スリットを用いた実験の環境・刺激詳細

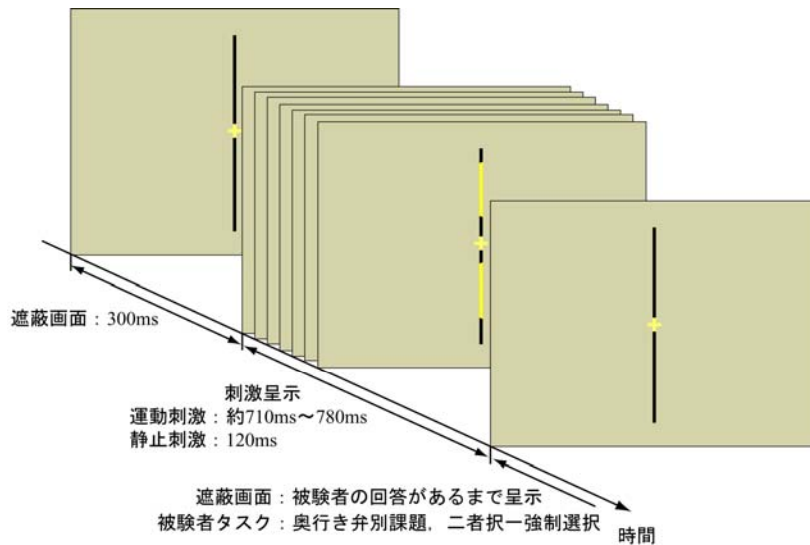


図 2-11 鉛直スリットを用いた運動・静止刺激実験のパラダイム

運動刺激実験における形状判別結果を表 2-4 に示し，奥行き弁別結果を図 2-12 に示す．静止刺激実験における呈示部位別の正答率は表 2-5 に示す．図 2-12 の横軸は，第 1 次軸に 2 つ同時に呈示したテスト刺激の空間視差の相対的な差[min]を示し，第 2 次軸に運動刺激実験の場合にだけ呈示される眼間時差の差の絶対値[ms]を示している．縦軸は正答率[%]で，2 つ同時に呈示される刺激のうち，空間視差が小さいテスト刺激をより手前と回答した場合を正答とした．プロットデータは被験者 4 名の平均値，エラーバーは被験者間の標準偏差である．プロットに対する各被験者の重みは 40 試行である．表 2-4，表 2-5，図 2-12 は共にチャンスレートは 50%である．

表 2-4 より，全ての被験者で形状判別の結果はほぼ 100%である．特に，MO を除く 3 名の被験者では完全に正答率が 100%となっている．図 2-12 から，運動刺激実験における奥行き弁別の結果は，眼間時差の差が $\pm 13.4\text{ms}$ の場合を除いた 4 条件において，90%以上の高い正答率になっている．これに対して静止刺激実験の結果では，高くても正答率は 75%程度となっている．また眼間時差の差が小さくなるにつれて，正答率も下がっている．静止刺激実験の呈示部位別の正答率は，表 2-5 より，呈示部位が刺激の中心以外では，平均で約 77%程度となっている．中心部分では，正答率は 38%とチャンスレートを下回っている．

空間視差の差が 1.1' の場合（眼間時差 $\pm 13.4\text{ms}$ ）は，前述したとおりスリットの有無

に関わらず、奥行き弁別が困難であるため正答率がチャンスレートに近い。眼間時差から生じる奥行き弁別の正答率は、 $\pm 13.4\text{ms}$ を除いて90%以上と高いことから、眼間時差が小さくても奥行き弁別が可能であり精度も高いことが分かる。閾値については、精度は低いですが、眼間時差 $\pm 13.4\text{ms}$ でも弁別可能である。Da Vinci Stereoにより生じる奥行き弁別の精度は、眼間時差に比べて15~30%程低い。つまり、眼間時差が呈示されたことにより奥行き弁別の精度が向上したことが明らかである。

この節では、眼間時差により生じる奥行き知覚について心理物理学的に検討した。その結果、眼間時差から奥行き知覚が生じることを示した。また、形状判別が可能であることから、眼間時差を持つ視覚刺激においても、面知覚の再構成が成立することを示した。静止刺激において呈示されるDa Vinci Stereoでも奥行き弁別が可能であるが、眼間時差から生じる奥行き弁別と比較すると精度が低い。つまり、眼間時差から生じる奥行き知覚により奥行き弁別の精度が向上することを明らかにした。

表 2-4 鉛直スリット(幅 3.3')における形状判別 [%]

	YH	MK	HN	MO	平均	標準偏差
円	100	100	100	87.5	96.88	6.25
ひし形	100	100	100	94.12	98.53	2.94
平均	100	100	100	92	98	4
標準偏差	0	0	0	4.68	1.17	

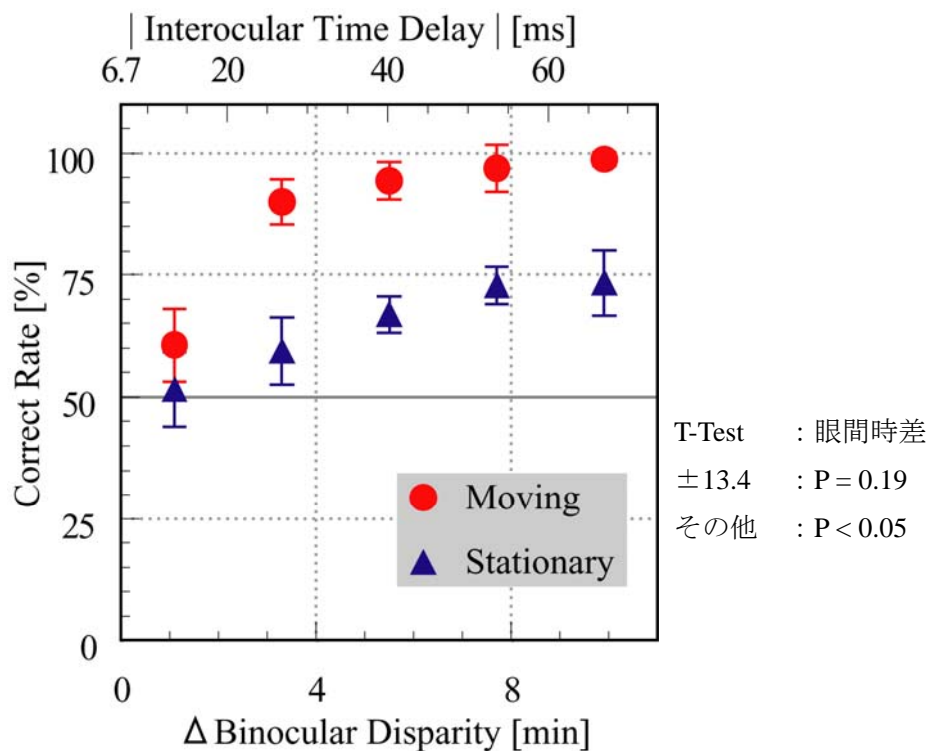


図 2-12 眼間時差により生じる奥行き弁別

表 2-5 鉛直スリット(幅 3.3')における各呈示部位に対する奥行き弁別 [%]

	YH	MK	HN	MO	平均	標準偏差
中心	37.31	41.79	32.84	44.03	38.99	4.96
17[min]	77.61	88.06	80.6	76.12	80.6	5.31
28[min]	71.21	69.70	78.79	80.3	75	5.32
平均	62.04	66.52	64.08	66.8	64.86	1.66
標準偏差	21.7	23.3	27.1	19.8	22.58	

2.6. 空間視差と眼間時差の混合情報，眼間時差について注目した奥行き弁別の解析

スリット視条件下において，空間視差・眼間時差の両方が奥行き知覚を成立させることを明らかにした．ここで1つの興味深い事象が考えられる．空間視差が眼間時差に完全に置換されるスリット条件ではなく，空間視差と眼間時差の情報が混合されている場合の知覚はどうなるだろうか？このような状況は，スリット幅が変化すると生じる．もし眼間時差と空間視差の奥行き精度に大きな違いが無いのであれば，スリット幅に依存することなく奥行き弁別が可能であり，その精度も低下しないと予想される．ここでは，特に明確な奥行き知覚を与える空間視差と，眼間時差から生じる奥行き知覚では精度の違いがあるのか注目することで，眼間時差により生じる奥行き知覚について更に詳しく検討する．

提案手法では，スリット幅を広いものから徐々に狭めていくことで，ほぼ空間視差だけの視覚刺激から，混合状態，眼間時差だけの刺激へと変化させることができる．特にスリット幅が 1pixel の場合は完全な眼間時差だけの視覚刺激になる．

実験は鉛直スリットを用いて行った．鉛直スリットの幅は，視野角 1.1, 3.3, 6.6, 14.3' の4段階とした．この4つのスリット条件において 2.5 と同様に実験を行った．実験の刺激詳細・環境・パラダイムは 2.5 の図 2-10, 図 2-11 を参照．テスト刺激に設定した眼間時差は，一方は固定で $\pm 33.5\text{ms}$ (4.4') とし，他方は相対的に $\pm 13.4, \pm 26.8, \pm 40.2, \pm 53.6, \pm 67\text{ms}$ (5.5, 7.7, 9.9, 11, 14.3') の5段階とした．2つ同時に呈示されるテスト刺激が持つ眼間時差の符号は常に同符号とした．眼間時差の符号は正の場合，左眼に入力像が先行する場合とした．例えば，眼間時差 33.5ms の場合では，左眼に先に呈示された画像が 33.5ms 遅れて右眼に呈示されることになる．

図 2-13 と図 2-14 に運動刺激・静止刺激実験の結果を示す．横軸は鉛直スリット幅 [min] を示す．縦軸は奥行き弁別の正答率 [%] である．プロットデータは被験者 4 名の平均値，エラーバーは被験者間の標準偏差である．プロットデータの暖色 (赤) から寒色 (青) は，2つ同時に呈示した視覚刺激の眼間時差の差 [ms] (空間視差の差 [min]) を示している．各プロットに対する被験者の重みは 40 試行である．チャンスレートは 50% である．

図 2-13 より，運動刺激実験ではスリット幅が狭くなっても，全ての条件において奥行き弁別の正答率はほとんど低下していない．正答率の高さに関しては，眼間時差の差が±13.4ms の場合を除き約 90%以上となっている．特にスリット幅 1.1'の場合でも正答率は高い状態を維持している．図 2-14 より，静止刺激実験の結果では，全ての眼間時差の差のパラメータにおいて，スリット幅に大きく依存しており，幅が小さくなるほど正答率も低下している．また正答率の高さについても，ほとんどが 75%以下と運動刺激実験に比べると低い．

以上のことから，眼間時差と空間視差の奥行き知覚にはそれほど大きな違いはないと言える．またスリット幅が 1pixel(1.1')の完全な眼間時差となっても奥行き知覚が成立することが明らかになった．静止刺激の Da Vinci Stereo では，スリット幅が狭くなるにつれて奥行き弁別の精度も低下することが明らかになった．

図 2-15 は，図 2-13 と図 2-14 の結果を眼間時差にだけ注目してプロットし直したデータである．横軸の第 1 次軸は眼間時差の絶対値[ms]を示し，縦軸は正答率[%]を示している．第 2 次軸は空間視差が生じている場合，どれだけ空間視差の対応部位が呈示されているのかを視野角[$^{\circ}$]で表している．図 2-15 から，空間視差が呈示される場合は，運動刺激・静止刺激共に正答率が高い．これに対して空間視差は呈示されずに眼間時差が呈示される場合，静止刺激の正答率は低下するが，運動刺激の正答率は約 90%以上と非常に高くほとんど低下しない．

以上の結果から，眼間時差の奥行き知覚と空間視差の奥行き知覚は，ほぼ同等の奥行き弁別の精度であることが明らかになった．Da Vinci Stereo による奥行き知覚は，眼間時差の奥行き知覚より精度が低いことが明らかになった．つまり，眼間時差だけから生じる奥行き知覚は，運動過程で刻々と呈示される静止刺激の局所部位だけから生じる Da Vinci Stereo の奥行き知覚より精度が良く，奥行き知覚を向上させることを明らかにした．

この節では，明確な奥行き知覚を与える空間視差と，眼間時差から生じる奥行き知覚では精度の違いがあるかどうかについて注目することで，眼間時差により生じる奥行き知覚について更に詳しく検討した．実験の結果，眼間時差から生じる奥行き知覚はスリットの幅に依存せず奥行き弁別精度が高いことを示した．空間視差から生じる奥行き知覚の

弁別精度と比較しても同等に精度が高いことを明らかにした。これに対して、Da Vinci Stereo から生じる奥行き知覚はスリット幅に依存して弁別精度が低下することを示した。このことは眼間時差の奥行き知覚に比べて精度が低いことを示す。この2つの事実から、眼間時差の奥行き知覚はDa Vinci Stereo の静止した局所部位からの奥行きの弁別より高精度であり、奥行き知覚を向上させることを示した。

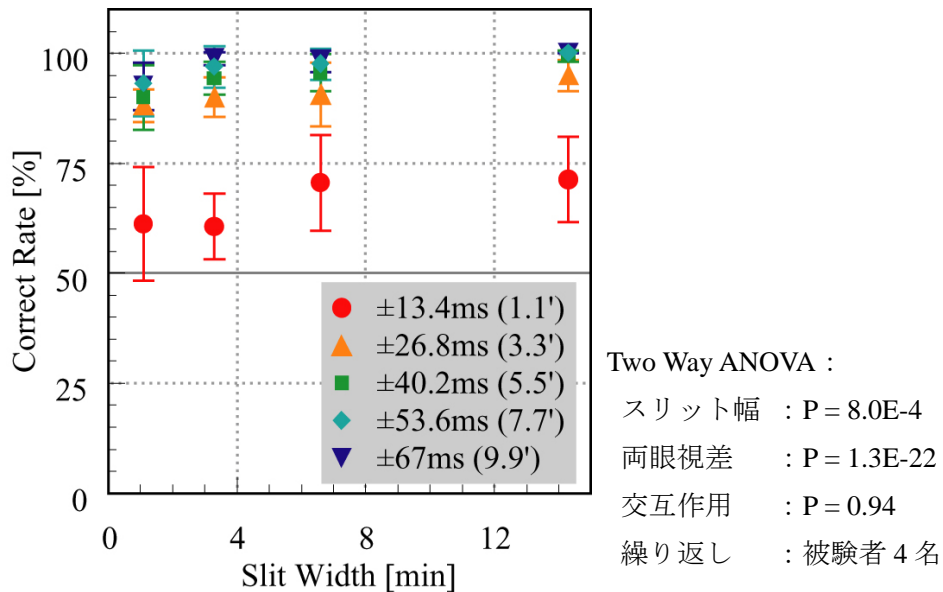


図 2-13 空間視差, 眼間時差による奥行きの弁別—運動刺激

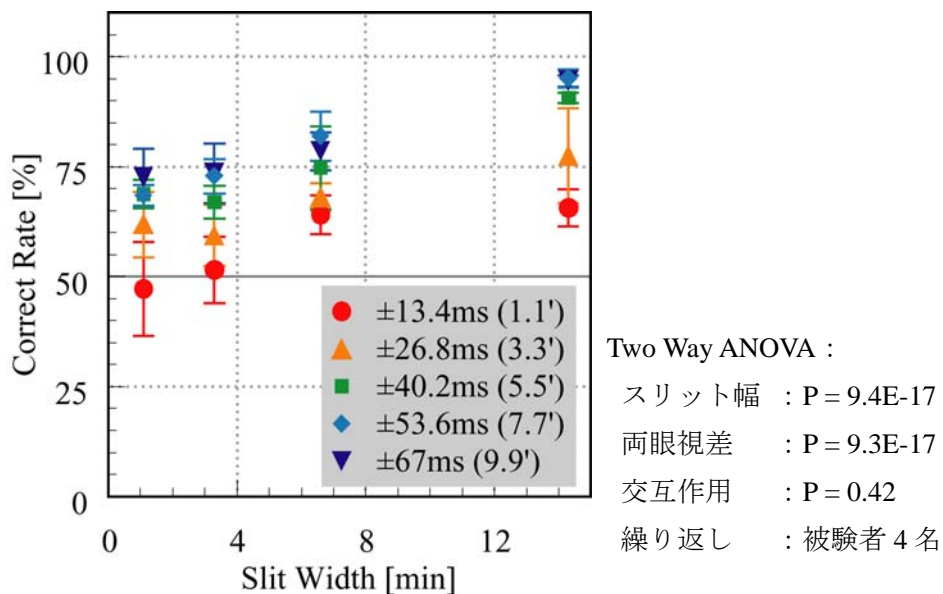


図 2-14 空間視差, Da Vinci Stereo による奥行きの弁別—静止刺激

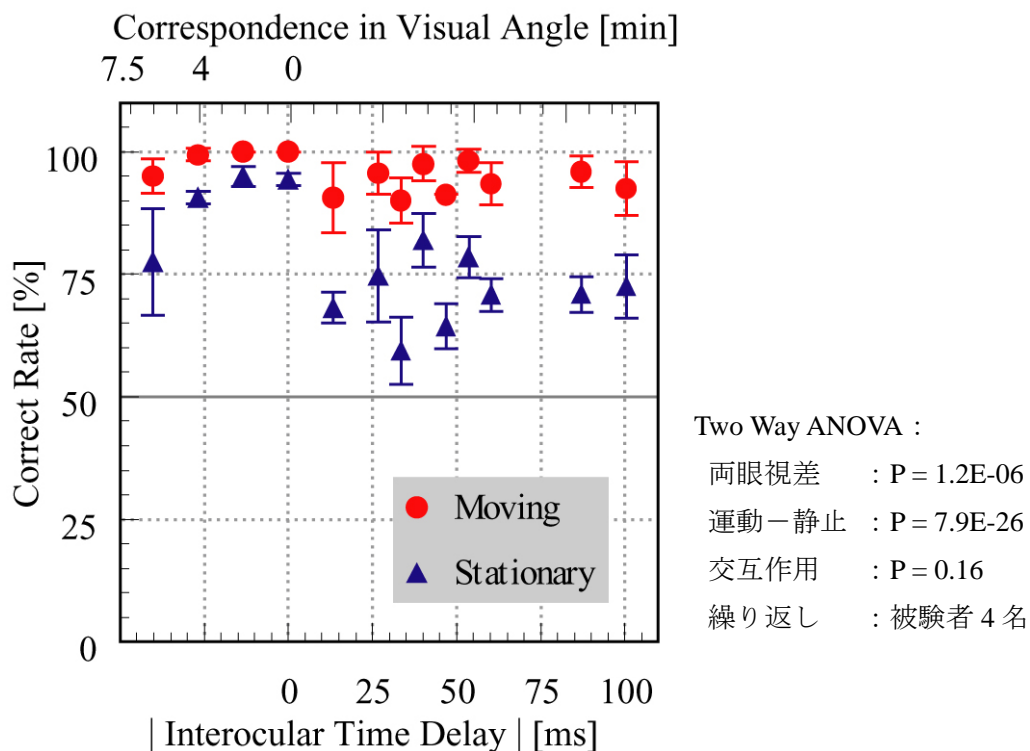


図 2-15 眼間時差に注目した奥行き弁別の解析

2.7. おわりに

本章では、眼間時差の厳密な制御を行い、かつ複数の視覚情報を同時に制御する手法として、スリット視に両眼視差を持つ刺激を用いる心理物理実験を提案した。従来の研究では、スリット視において両眼視差から生じる知覚について検討されていない。そこで、奥行き知覚が生じるかどうかを心理物理実験により検討した。心理物理実験の結果、スリット視において空間視差・眼間時差の両眼性情報は共に奥行き知覚を与えることを明らかにした。また、両眼視差をもつ視覚刺激でも、スリット視の現象である局所部位からの面の再構成が生じることを明らかにした。

スリット視において、空間視差から生じる奥行き知覚では、運動刺激・静止刺激のどちらであっても同等の奥行き弁別精度であること、その精度が非常に高いことを明らかにした。また奥行き弁別の閾値は、すくなくとも空間視差の差が視野角 1.1'まで弁別可能であることを明らかにした。眼間時差については、空間視差から生じる奥行きの弁別と同程度の非常に高い精度があることを明らかにした。奥行き弁別については、眼間時差の差が 13.4ms とわずかな差であっても弁別可能であることを明らかにした。特に、

スリット幅が 1pixel(1.1')の眼間時差だけが与えられる条件下であっても、奥行き弁別の精度・閾値にはほとんど変化が無いことを示した。また眼間時差から生じる奥行き知覚は、静止した局所部位から生じる **Da Vinci Stereo** の奥行き知覚より高精度であり、奥行き知覚を向上させることを示した。これらのことは、眼間時差から生じる奥行き知覚は、空間視差と同様に有効な奥行き手がかりであることを示している。

第3章 眼間時差により生じる奥行き知覚に対する図形的特徴・面情報の影響

3.1. はじめに

第2章では、スリット視において、空間視差や眼間時差が奥行き知覚を与えること、スリット視現象として知られる面知覚の再構成が生じることを示した。第2章で用いた視覚刺激は円やひし形であるため、図形のエッジ部分に特徴的な情報が含まれている。図形内部が等輝度のため明示的な面情報も存在する。図形的特徴・面情報は直接的な奥行き手がかりではないが、眼間時差は図形のエッジ部分に生じるため、図形的特徴が奥行き知覚に影響を与える可能性がある。また明示的な面情報も、スリット視では物体の面情報が再構成されるため、奥行き知覚に影響を与える可能性がある。本章では、図形的特徴・明示的な面情報が奥行き知覚に影響を与えるかどうかについて注目し、心理物理学的に検討する。

実験結果により、図形的特徴・明示的な面情報が存在すると奥行き弁別の精度が向上することを示す。しかし図形的特徴もしくは明示的な面情報だけでは奥行きの精度向上が見られないことを示す。そして図形的特徴・明示的な面情報が無い場合でも、眼間時差だけから奥行き知覚が生じることを示す。

3.2. 眼間時差により生じる奥行き知覚に対する図形的特徴の影響

円やひし形はエッジ部分に特徴的な図形情報が存在する。幅 1pixel(1.1')のスリット背後で運動させると、運動過程の局所部位呈示において、図形的特徴が線分の伸縮として表現される。この伸縮は左右眼像で眼間時差の分だけずれて呈示されるため、視覚系が左右眼像の対応問題を解く場合、有効な視覚情報であると考えられる。眼間時差の情報は、空間視差と同程度の奥行き知覚を与えるので、この伸縮情報は必要ないと考えられる。この節では、図形的特徴が無く明示的な面情報を持つ刺激により生じる奥行き知覚について調べる。これにより眼間時差を持つ刺激の図形的特徴の効果について検討する。

図形的特徴を持たず明示的な面情報を持つ刺激として四角形を用いる。幅 1pixel(1.1')のスリットの背後に空間視差を持つ四角形の刺激を運動させても線分の伸縮は存在しない、つまり図形的特徴が無い眼間時差が呈示される。左右眼像に注目すると、このとき呈示される眼間時差は、刺激呈示開始時のオンセットと刺激の呈示終了時のオフセットとしてだけ呈示される（図 3-1 参照）。刺激の呈示開始から終了までは、明示的な面により、等輝度の連続した刺激として呈示される。このような刺激を用いて、図形特徴のない眼間時差から生じる奥行き知覚について心理物理学的に検討する。もし図形的特徴が奥行き知覚の精度を向上させるのならば、図形的特徴を持たない場合、図形的特徴がある刺激（明示的な面をもつ円・ひし形）よりも精度が低下すると考えられる。

実験は、図 3-1 に示すスリット条件とテスト刺激を用いた。実験パラダイムを図 3-2 に示す。スリット幅は 1pixel(1.1')である。スリットの背後に呈示される四角形のテスト刺激の眼間時差は、どちらか一方は $\pm 33.5\text{ms}$ 、もう一方は ± 46.9 、 ± 60.3 、 ± 73.7 、 ± 87.1 、 $\pm 100.5\text{ms}$ とした。2つ同時に呈示されるテスト刺激は、常に同符号の眼間時差を持つ。眼間時差の符号は、正の時、左眼への入力画像が先行する場合とした。被験者のタスクは、スリットの背後で並行移動する 2 刺激のどちらがより手前に見えたかを二者択一強制選択で回答することである。被験者は、矯正により正常視力を持つ成人男女の 3 名であり、各パラメータにつき 96 試行、合計 480 試行のタスクを行った。

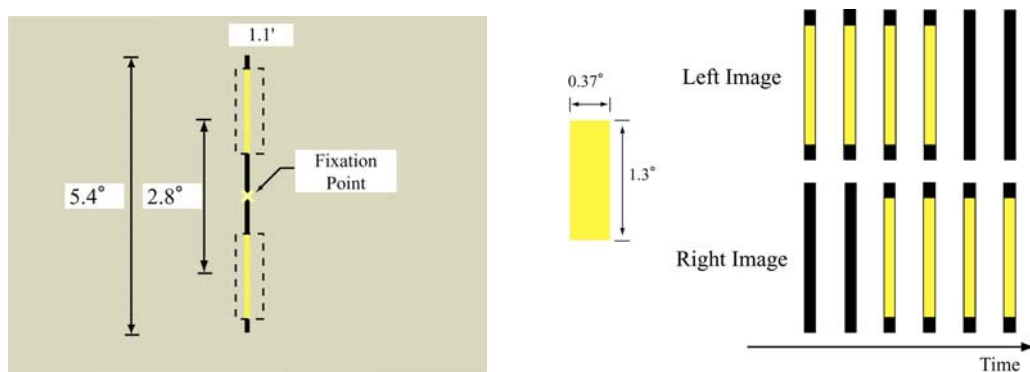


図 3-1 眼間時差と面情報を持つ視覚刺激実験

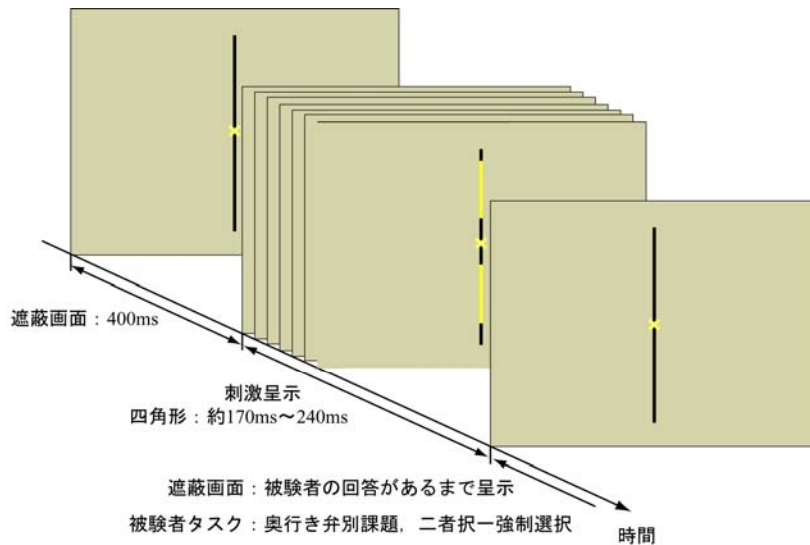


図 3-2 眼間時差と面情報を持つ視覚刺激実験のパラダイム

実験結果を図 3-3 に示す. 横軸は 2 つ同時に呈示されたテスト刺激の眼間時差の差の絶対値[ms]を示し, 縦軸は正答率[%]を示す. 正答は, 2 つのテスト刺激のうち眼間時差が小さい方をより近いと回答した場合とした. プロットデータは被験者 3 名の平均値で, エラーバーは被験者間の標準偏差である. 赤のデータは眼間時差(ITD)が正の場合, つまり左眼入力像が右眼より先行している場合である. 青のデータは右眼が先行している場合である. プロットデータに対する各被験者の重みは 96 試行である. チャンスレートは 50% である. また, 図形的特徴と明示的な面情報を持つ円・ひし形の結果との比較を図 3-4 に示す. フォーマットは図 3-3 と同様である. プロットデータは, 眼間時差の符号は関係なく両方の結果を含んだ平均・標準偏差を示している.

図 3-3 より, 眼間時差の差が $\pm 13.4\text{ms}$ を除いた 4 つの条件において正答率が 75% 以上と正答率が高い値を示している. 眼間時差の異符号に関して, 奥行き弁別に違いは見られない. 図 3-4 より, 円・ひし形の図形的特徴が存在する視覚刺激からの奥行き弁別と図形的特徴がない四角形刺激の奥行き弁別の結果を比較すると, 四角形刺激の奥行き弁別の正答率は, $\pm 26.8, 40.2\text{ms}$ で明らかに低下している. そのほかの 3 点ではそれほど差は見られない. 弁別閾については差は見られない.

実験結果から, 図形的特徴がなく眼間時差がオンセットとオフセットでしか呈示されな

い四角形の刺激でも奥行き知覚が成立することが明らかになった。ただし、図形的特徴と明示的な面情報を持つ円・ひし形の場合と比較すると、図形的特徴が無い四角形の刺激では奥行き精度の低下が見られた。弁別閾については差が無かった。このことから図形的特徴は奥行き弁別の精度に影響を与える可能性があることが示唆された。

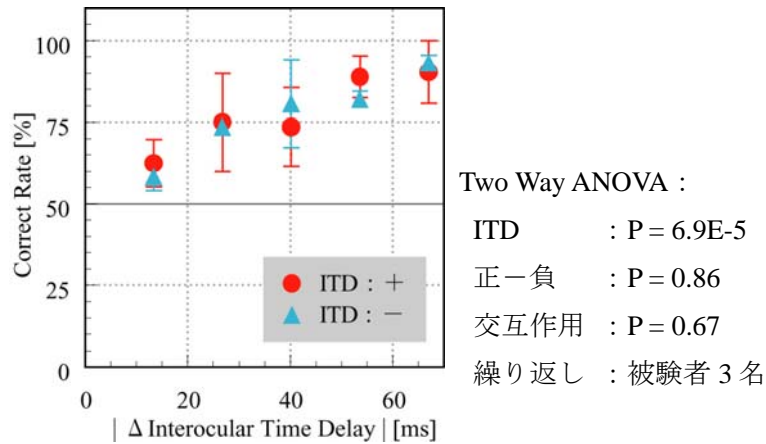


図 3-3 四角形の視覚刺激より生じる奥行き弁別の精度

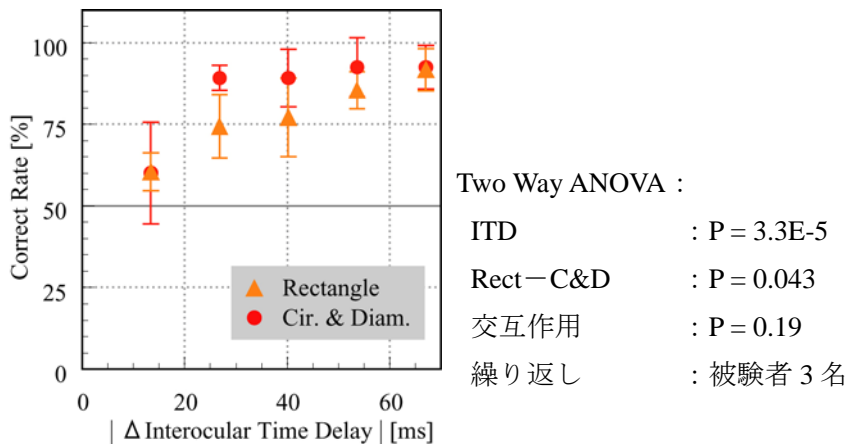


図 3-4 図形的特徴の奥行き知覚への影響

3.3. 眼間時差により生じる奥行き知覚に対する面情報の影響

スリット視において、視覚刺激の面情報は、奥行き知覚に影響を与える可能性がある。なぜならば、スリット視では、物体の面情報が再構成されるからである。面が再構成されることで、観測者が面を認識し奥行き知覚の精度が向上する可能性がある。明示的な面の効果を排除するために、線画の円・ひし形の視覚刺激を用いた。これにより明示的な面情報の奥行き知覚の効果を検討する。

実験刺激の詳細を図 3-5 に示す。実験は、テスト刺激が線画であることとスリット幅が 1pixel(1.1')であること以外は 3.2 と同様に行った。実験パラダイムについても、呈示刺激が線画であること以外は、3.2 と同様なので図 3-2 を参照、ただし線画刺激の呈示時間は約 710ms~780ms である。実験では、同形状で異なる眼間時差情報を持つ 2 刺激をスリットの背後で並行移動させる。眼間時差は一方を±33.5ms とし、他方を±46.9, ±60.3, ±73.7, ±87.1, ±100.5ms の 5 段階とした。被験者のタスクは、2 つ同時に呈示される視覚刺激のどちらがより手前に見えたか二者択一強制選択で回答することである。被験者は矯正により正常視力を持つ成人男性で実験を行った。5 段階設定した各パラメータに対して、それぞれ 48 試行で計 240 を 3 セット行った。

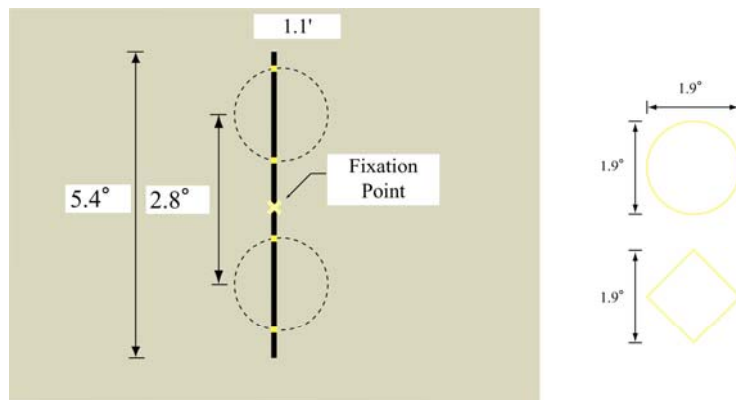


図 3-5 線画視覚刺激

実験結果を図 3-6 に示す。横軸は眼間時差の差を絶対値[ms]で表している、縦軸は、正答率[%]である。正答は、眼間時差の絶対値が小さい視覚刺激を手前と回答した場合

とした。プロットデータは、3セットの平均値で、エラーバーはセット間の標準偏差である。チャンスレートは50%である。また、図形的特徴と明示的な面情報をもつ円・ひし形の結果との比較を図 3-7 に示す。フォーマットは図 3-6 と同様である。ただし、プロットデータは、眼間時差の符号は関係なく両方の結果を含んだ平均・標準偏差を示している。

図 3-6 より、正答率がほとんどの条件において 75%以上の高い値になっている。眼間時差の符号の正負では差は見られなく、眼間時差の差が大きくなるほど正答率が上昇している。図 3-7 より、図形的特徴・明示的な面情報を持つ円・ひし形刺激の奥行き弁別と、図形的特徴だけを持つ線画刺激の奥行き弁別の正答率を比較すると、ほとんどの条件において、線画の場合に正答率の低下している。

以上の結果から、図形内部に明示的な面情報が存在しなくても、奥行き弁別が可能であることが明らかになった。しかし、図形的特徴・面情報の両方の情報をもつ円・ひし形刺激と比較すると、図形的特徴だけしかない線画刺激では奥行き弁別の精度が低下した。弁別閾値については差が出なかった。これらのことから明示的な面の情報は奥行き弁別の精度に影響を与える可能性があることが示唆された。

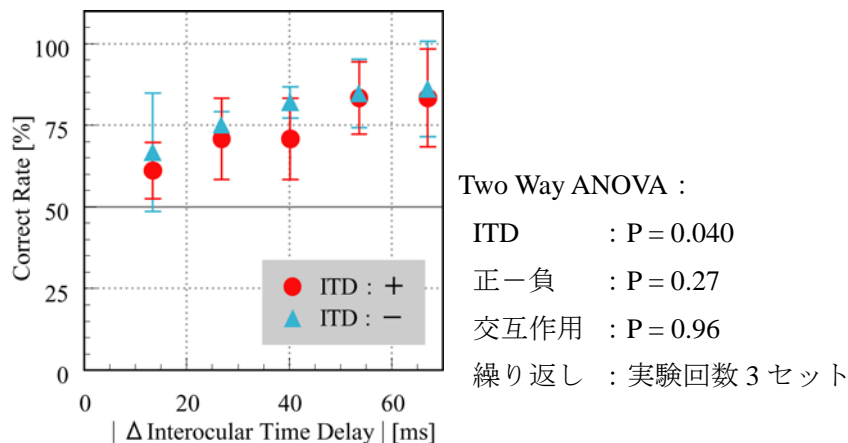


図 3-6 線画刺激より生じる奥行き弁別

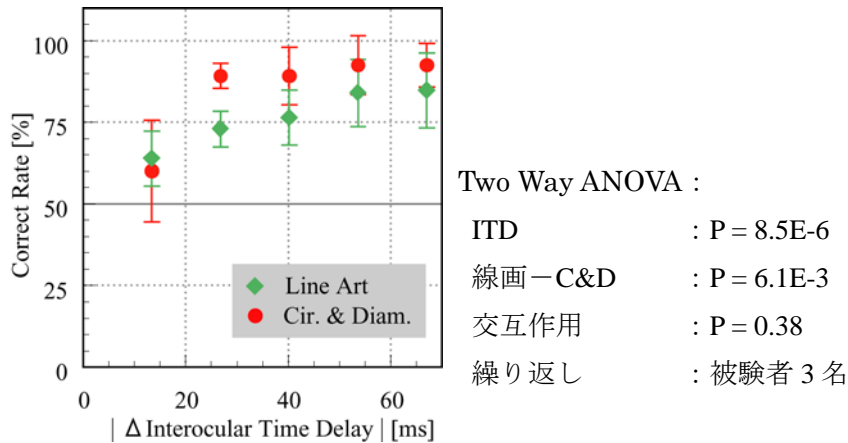


図 3-7 円・ひし形刺激と線画刺激の奥行き弁別

3.4. 眼間時差だけを持つ RDS 刺激により生じる奥行き知覚

ここまでの節では、図形的特徴・面情報を持つ刺激について検討してきた。では、これらの情報が無い、眼間時差だけの情報しか持たない視覚刺激から生じる奥行き知覚はどのようなものだろうか？そこで眼間時差だけの奥行き知覚について検討する。

図形的特徴・明示的な面情報を持たない刺激として、RDS 刺激を用いる。RDS 刺激は、エッジ部分に図形的特徴も無ければ明示的な面情報も持たない。しかし、各点に同様の空間視差を設定すれば、その視差情報を基に面情報が構築される。もし図形的特徴や明示的な面情報が必要ないのであれば、眼間時差だけでも奥行き知覚が生じるはずである。

実験は 3.2, 3.3 と同様に行った。実験では図 3-8 に示すスリットと RDS 刺激を用いた。実験パラダイムは、同一なので図 3-2 を参照。RDS を構成する点の大きさは 2×2 pixel ($2.2 \times 2.2'$) とした。スリット幅が 1 pixel なので実際に呈示されるドットの大きさは 1×2 pixel ($1.1 \times 2.2'$) となる。RDS の構成要素の点密度は 7% と設定した。2 つ同時に呈示される RDS 刺激は、スリット背後で並行移動した。一方の RDS には眼間時差 ± 33.5 ms で、他方は ± 46.9 , ± 60.3 , ± 73.7 , ± 87.1 , ± 100.5 ms とした。同時に呈示されるテスト刺激の持つ眼間時差の符号は同符号である。正の場合は、左眼への入力が右眼より先行する場合とした。被験者は、スリットの背後で並行移動する 2 刺激のどちらがより手前

に見えたかを二者択一強制選択課題を行なった。被験者は矯正により正常視力を持つ成人男性の3名で、各パラメータに96試行、合計480試行を行った。

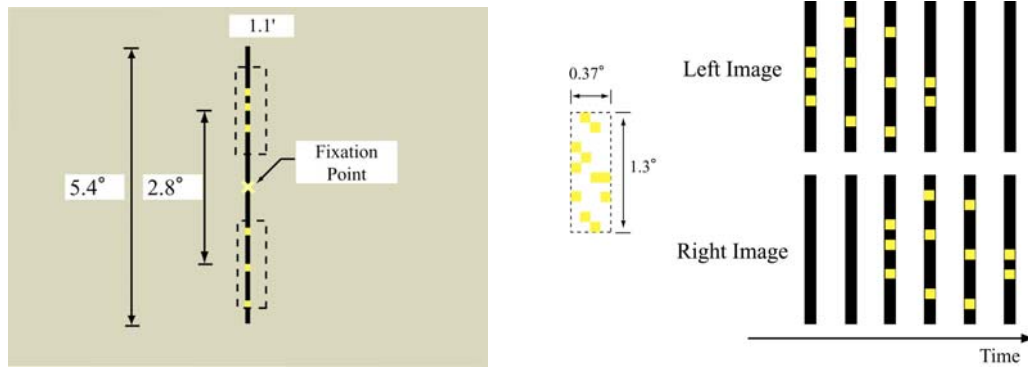


図 3-8 RDS 刺激を用いた実験

実験結果を図 3-9 に示す。横軸は眼間時差の差の絶対値[ms]で、縦軸は正答率[%]である。プロットデータは被験者3名の平均値で、エラーバーは被験者間の標準偏差である。データポイントに対する被験者1名あたりの重みは96試行である。チャンスレートは50%である。図 3-10 は、図形的特徴・面情報を持つ刺激と比較したグラフである。フォーマットは図 3-9 と同様である。

グラフより眼間時差の差が±13.4ms 以外の条件において、正答率が75%以上となっている。眼間時差に符号については、正答率に差が見られなかった。

これらの結果から、眼間時差だけから奥行き知覚が生じることが明らかになった。幅が1pixel(1.1')のスリットの背後に異なる眼間時差を持つ刺激が呈示された場合、その奥行きを弁別が可能であることが明らかになった。RDS 刺激は、図形的特徴・明示的な面情報は存在しない。つまり、奥行き知覚にはこれらの情報が必要ないことが示された。したがって、眼間時差だけが連続して呈示されることで奥行き弁別が可能である。

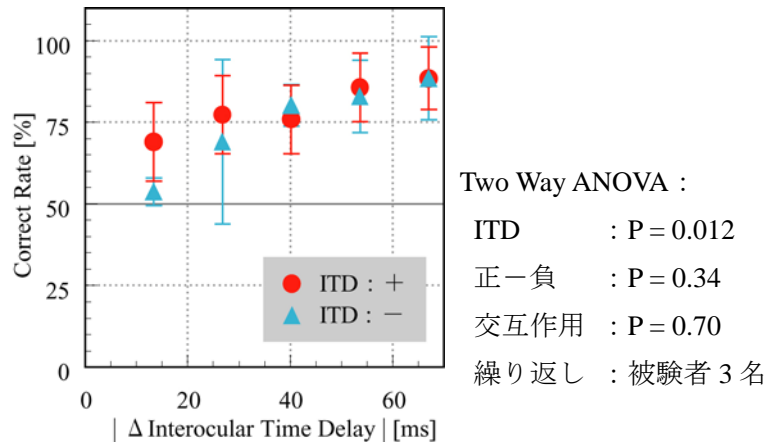


図 3-9 RDS 刺激より生じる奥行き弁別の比較

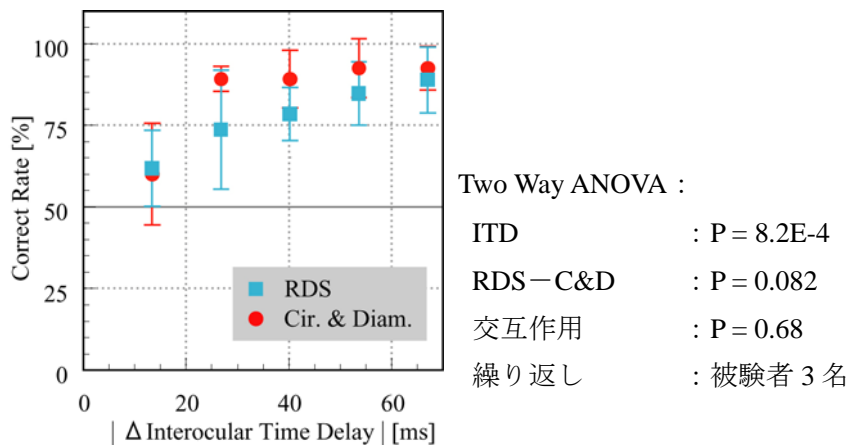


図 3-10 円・ひし形と RDS 刺激の奥行き弁別の比較

3.5. 眼間時差だけの奥行き知覚と図形的特徴・面情報の影響と議論

3.2 では図形的特徴がない場合を、3.3 では明示的な面情報が無い場合、そして 3.4 では、両方の情報がない純粋な眼間時差だけの奥行き知覚について検討した。これらの結果と、図形的特徴・明示的な面情報からの奥行き知覚を比較して、図形的特徴・明示的な面情報の奥行き知覚への影響について検討する。また視覚情報の連続性に注目して、面の連続性と眼間時差の連続性の奥行き知覚への影響について考察する。

円・ひし形、四角形、線画、RDS 刺激の持つそれぞれの特徴を次に述べる。円・ひ

し形は、図形的特徴・明示的な面を持つ。視覚情報の連続性については、面と、図形のエッジ部分が刻々と伸縮するため、エッジに存在する眼間時差の情報の連続性を持つ。四角形の刺激は、連続性がある明示的な面を持つ。眼間時差はオンセットとオフセットでだけ呈示される。線画は、図形的特徴を持つ。連続性は図形の伸縮による眼間時差の連続性を持つ。RDS 刺激は、眼間時差だけが連続的に呈示される。

これらの視覚刺激から生じる奥行き弁別について図 3-11 にまとめて示す。グラフのフォーマットはこれまでの図と同様である。またこれら 4 つのタイプの奥行き弁別についての Two Way ANOVA の結果を表 3-1 にまとめた。

図 3-11 を見ると、全ての刺激において傾向が同じで、 $\pm 13.4\text{ms}$ の条件を除き正答率が高い値を示している。また、4 タイプすべての刺激において、眼間時差の差が $\pm 13.4\text{ms}$ の条件では、正答率が約 60% となっている。

詳しく検討するために表 3-1 を用いて解析する。有意差については 10% 水準で行った。全ての ANOVA 結果において、眼間時差 (ITD) について有意差有りとなった。つまり眼間時差の差の絶対値に依存して奥行き弁別の精度が高くなることがわかる。次に、円・ひし形の刺激と四角形、線画、RDS の刺激を用いた実験結果を解析した結果について検討する。円・ひし形の実験結果と四角形、線画、RDS の実験結果では、有意差有りとなった。図 3-11 より、円・ひし形の正答率がほかの 3 タイプに比べて高い値になっているのがわかる。四角形、線画、RDS の ANOVA 結果に注目すると、これらの視覚刺激から生じる奥行き弁別の正答率には有意な差があるとは言えないこと結果になっている。つまり、四角形、線画、RDS の奥行き弁別において同程度の正答率が得られている。

以上の結果をまとめると、まず純粋な眼間時差だけからでも奥行き弁別が可能であることが明らかになった。図形的特徴・明示的な面情報の両方が存在すると奥行き弁別の精度が向上することが示唆された。しかし、どちらか一方しか存在しない場合は、奥行き弁別の精度が向上しない。弁別閾については、特に差が生じないことが示唆された。また、明示的な面情報の連続性が呈示される場合、眼間時差の情報がオンセット・オフセットだけであっても、眼間時差が連続して呈示される場合と同程度の奥行き知覚が成立することが明らかになった。これは、オンセットで生じた眼間時差の奥行きが面の連

続性により補間されるからだと考えられる。

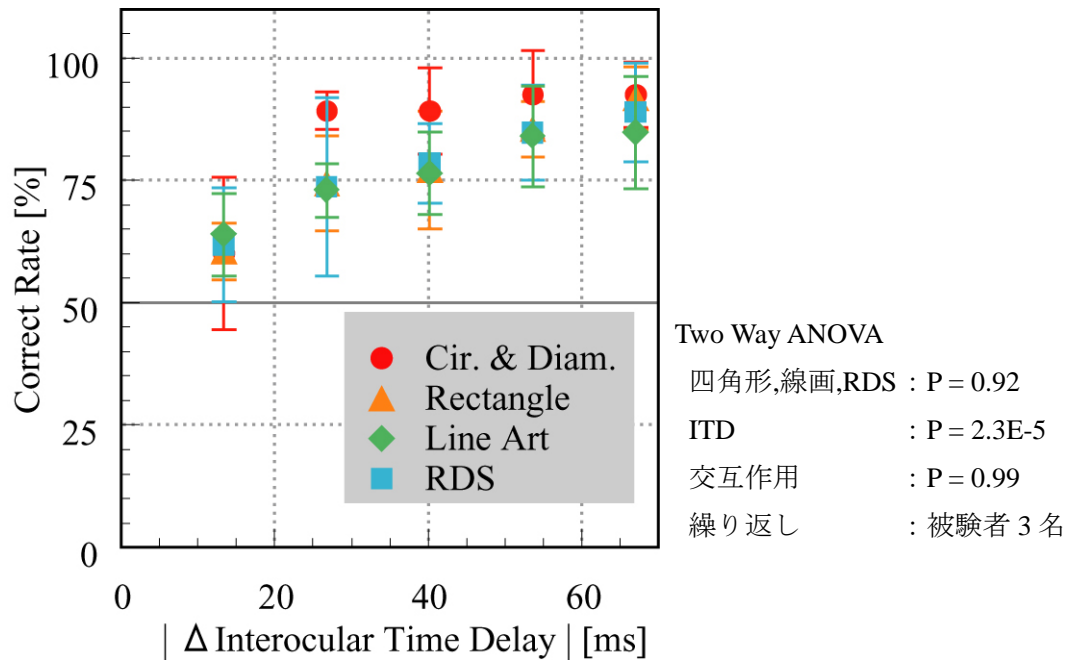


図 3-11 各視覚刺激の奥行き弁別

表 3-1 各視覚刺激を用いた奥行き弁別結果に対する Two way ANOVA

	連続情報	円	四角形	線画	RDS
		ひし形			
円	面, 図形特徴	—	有意差あり	有意差あり	有意差あり
ひし形	眼間時差				
四角形	面	有意差あり	—	×	×
線画	図形特徴	有意差あり	×	—	×
	眼間時差				
RDS	眼間時差	有意差あり	×	×	—

注：×;有意差があるとはいえない

3.6. おわりに

この章では、眼間時差の奥行き知覚に対する図形的特徴と面情報の影響について検討した。その結果、次のことが示された。

- (1) 純粋な眼間時差だけの情報からでも奥行き知覚が生じる。
- (2) 図形的特徴・明示的な面情報の両方が存在すると奥行き弁別の精度が向上する。しかし、弁別閾は変化しない。
- (3) 図形的特徴もしくは明示的な面のどちらかの情報が存在しても、奥行き弁別の精度・閾値は変化しない。
- (4) 眼間時差がオンセット・オフセットにだけしか与えられなくても、明示的な面情報があれば、眼間時差が連続して呈示される場合と同程度の奥行き弁別が可能である。これは面情報の連続性により奥行き知覚の補間が生じているからではないかと考えられる。

第4章 奥行き知覚に関するその他のパラメータの影響

4.1. はじめに

ここまでの章で、図形的特徴・面情報・眼間時差情報を制御して奥行き知覚について検討してきた。その結果、純粋な眼間時差だけから奥行き知覚が生じることを明らかにした。特に眼間時差の連続情報（明示的な面の連続性による眼間時差の補間も含む）が呈示されることで、奥行き知覚が生じていると考えられる。しかし、この連続情報以外にも、奥行き知覚に影響を与えうる視覚刺激の要素が存在する。四角形の刺激では、オンセット・オフセットの呈示順序そのもので、奥行き弁別が行える可能性がある。RDSでは、刺激を構成するパラメータが奥行き知覚に影響を与えるかもしれない。これらの要素が奥行き知覚に影響を与えるかどうか心理物理学的に検討する。

実験の結果から、次のことを示す。

- (1) 眼間時差のオンセット・オフセットの呈示順序は、奥行き知覚に影響を与えない。
- (2) RDS の刺激構成要素の各点の呈示時間、図形的対称性、RDS 全体の呈示時間、点密度、図形サイズは奥行き知覚に影響を与えない。

4.2. 眼間時差のオンセット・オフセット呈示順序に関する奥行き知覚への影響

スリットの背後に四角形の刺激が呈示される場合、眼間時差は刺激呈示開始のオンセットと刺激の呈示終了のオフセットにだけ呈示される。この2点で眼間時差が呈示されるだけでも奥行き知覚が生じることをここまでの章で示したが、オンセット・オフセットの呈示条件については詳しく検討していない。眼間時差がオンセット・オフセットにだけ含まれていることから、この2つの呈示タイミング順序が奥行き知覚に影響を与える可能性がある。そこで、オンセットまたはオフセットの呈示タイミングを変化させる実験を行い、奥行き知覚に影響を与えるか心理物理実験により検討をする。

3.2 の実験では、2 つ同時に呈示されるテストのオンセット・オフセットの関係を図4-1のように設定した。これは、自然界において、異なる奥行きを持つ2つの物体がス

リットの背後で並行移動するとき観測される2つのオンセットまたは2つのオフセットの呈示順序と同一である。つまり、スリットの背後でより手前にある物体のオンセットは、より奥にある物体より必ず遅れて呈示される。オンセットでは反対に、より手前にある物体が必ず先に呈示される。この呈示順序の秩序を崩すために次のような条件の実験を構築した。オンセットの順序を崩す実験（図 4-2 (a)）と、オフセットの順序を崩す実験（図 4-2 (b)）である。これらの実験により2つの視覚刺激のオンセットの順序、またはオフセットの順序が変化した場合の奥行き知覚について検討する。もし、眼間時差の大きさではなく、2つの眼間時差のオンセット・オフセットの呈示順序により奥行きを判断しているのであれば、オンセット・オフセットの呈示順序が入れ替われば奥行き弁別の結果が変化することになる。

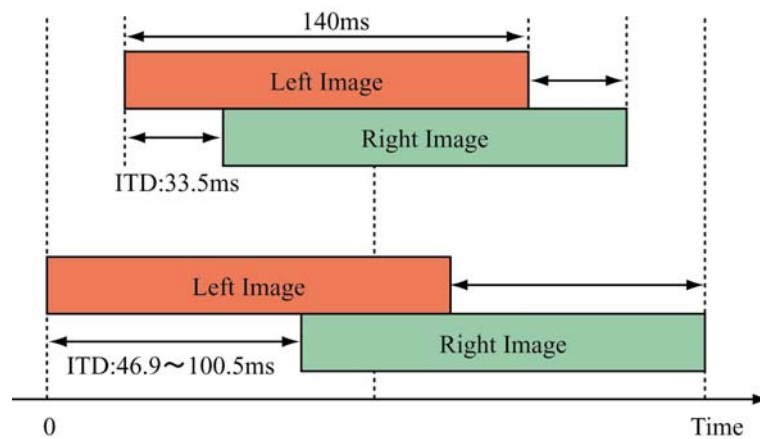


図 4-1 自然界における異なる眼間時差を持つオンセット・オフセットの順序

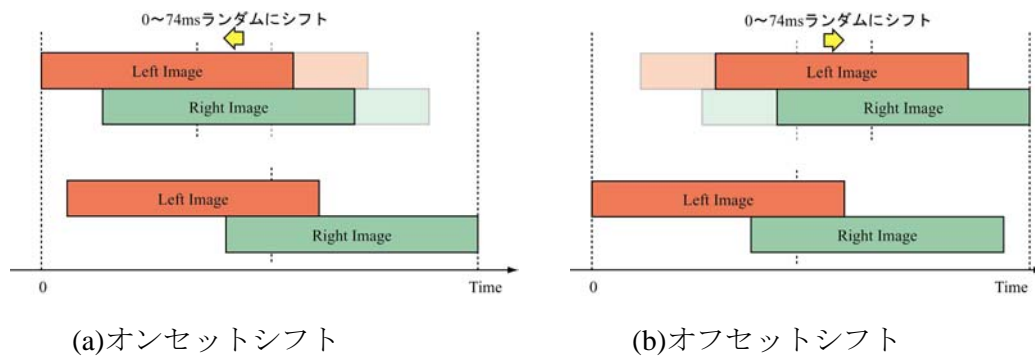


図 4-2 オンセット・オフセットをシフトさせた実験条件

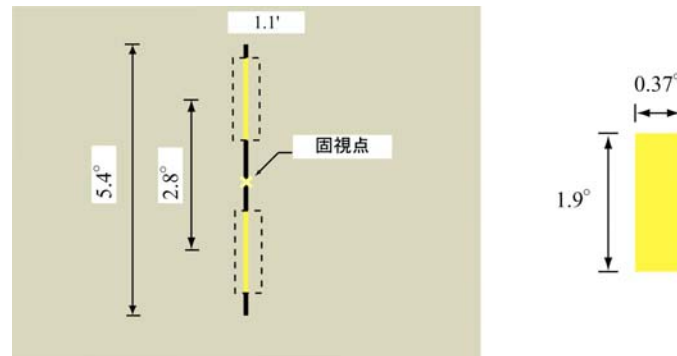


図 4-3 オンセット・オフセットシフト実験環境

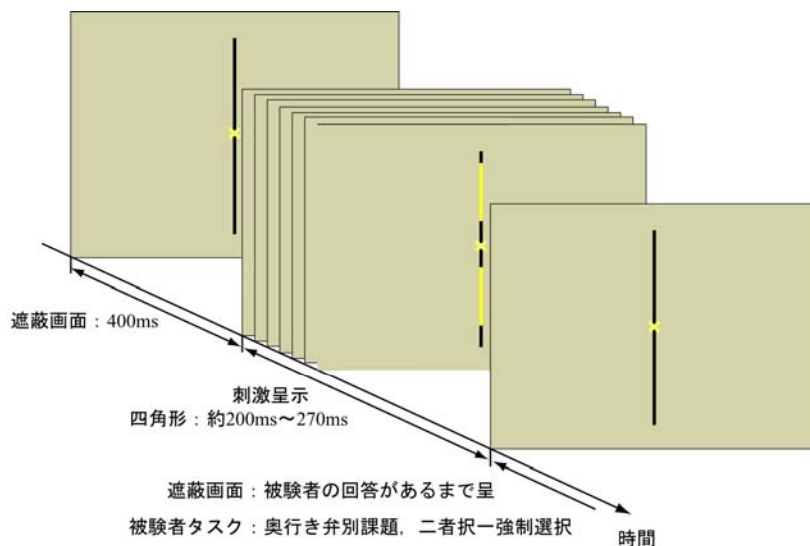


図 4-4 オンセット・オフセットシフト実験パラダイム

実験刺激の詳細，パラダイムを図 4-3，図 4-4 に示す．実験では，異なる眼間時差を持つ 2 つの四角形のテスト刺激を幅 1pixel のスリットの背後に呈示した．眼間時差は一方を $\pm 33.5\text{ms}$ と設定し，他方は ± 46.9 ， ± 60.3 ， ± 73.7 ， ± 87.1 ， $\pm 100.5\text{ms}$ の 5 段階に設定した．眼間時差の符号は常に同符号で，正の場合は左眼画像が先行する．2 つの刺激の呈示タイミングは，オンセットの順序がランダムになる条件 (図 4-2(a)) と，オフセットの順番がランダムになる条件 (図 4-2(b)) を設定した．

被験者タスクは，2 つ呈示される視覚刺激のどちらがより手前に見えたか回答することである．被験者は裸眼または矯正することで正常な視力を持つ成人男性 3 名で行った．

実験の結果を図 4-5, 図 4-6 に示す. それぞれの実験結果を比較したグラフを図 4-7, に示す. 横軸は眼間時差の差を示し, 縦軸は正答率を示す. プロットデータは, 被験者 3 名の平均でエラーバーは被験者間の標準偏差である. チャンスレートは 50% である.

図 4-5, 図 4-6 の結果から, ほとんどの条件において 75% 以上の正答率を示している. 眼間時差の符号別について奥行き弁別の精度に差は見られない. 図 4-7 の結果から, オンセットの実験においてだけ奥行き弁別の精度の低下がみられるが, 全ての条件において, 奥行き弁別そのものは可能であることがわかる.

オンセット・オフセットの提示順序を変化させた実験結果から, 奥行き弁別が可能であることから, 提示順序は奥行き弁別を行う戦略に用いられていないということが明らかになった. つまり, 提示順序は奥行き知覚の生成に影響を与えないことが明らかになった. ただし, オンセットの提示順序は奥行き弁別の精度に影響を与えることが示唆された.

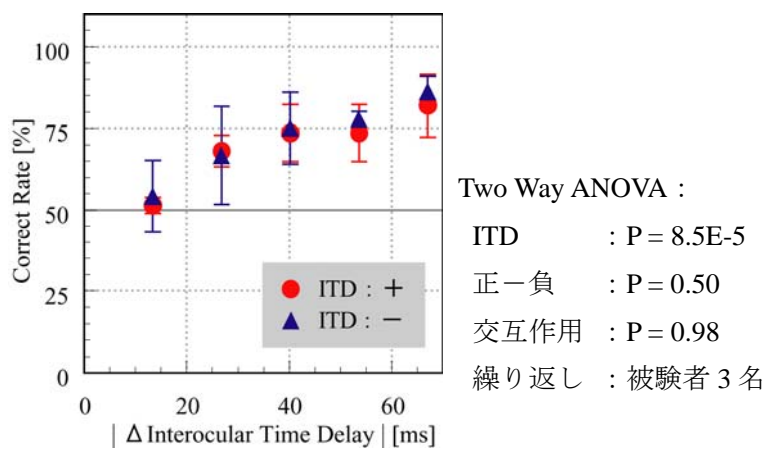


図 4-5 オンセットシフト実験の奥行き弁別

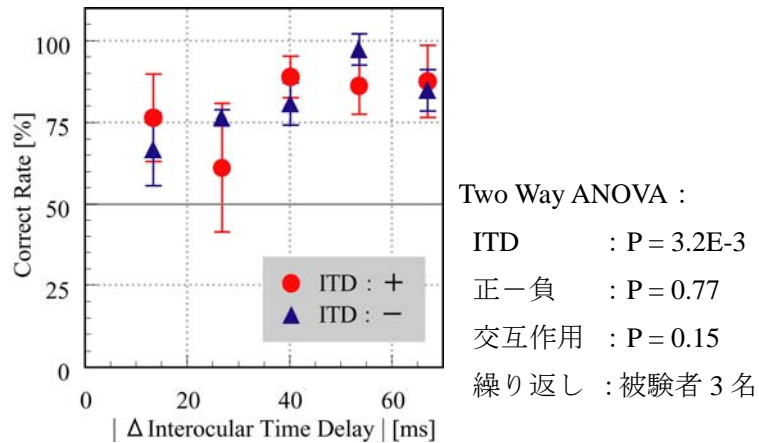


図 4-6 オフセットシフト実験の奥行き弁別

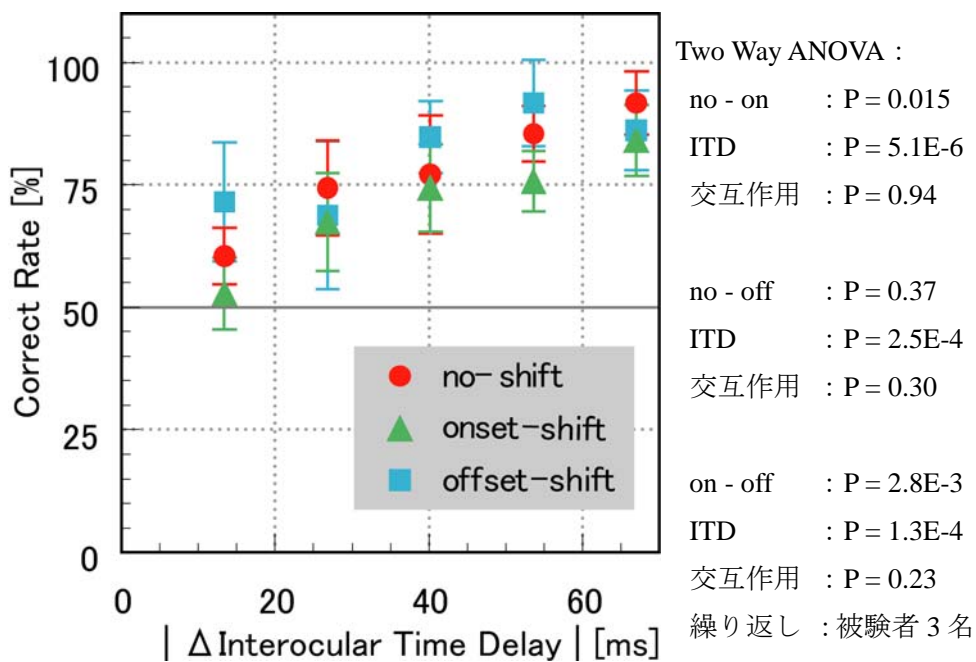


図 4-7 オンセット・オフセットシフト実験の奥行き弁別比較

4.3. RDS の刺激構成要素の奥行き知覚への影響

RDS を用いた実験により、眼間時差だけが与えられれば、奥行き知覚が生じることを示した。しかし RDS の刺激構成要素が持つ視覚情報の奥行き知覚への影響についてはまだ詳しく検討していない。構成要素として、RDS の構成要素の各点の呈示時間、

刺激全体の呈示時間，図形の対称性，点密度，分布範囲のサイズがある．これらの要素をパラメータとした心理実験により，奥行き知覚に影響を与えるかどうか検討する．

全ての実験は図 4-8 に示した環境を用いた．実験パラダイムは，各実験でテスト刺激の呈示時間が異なること以外は同様である（図 4-10 参照）．各実験に用いた RDS の分布範囲を図 4-9 に示した．RDS の点密度は 7% とした（ただし 4.3.4 の RDS の点密度に関する実験は除く）．被験者は，矯正により正常な視力を有する成人した男女 3 名で行なった．被験者は，各実験において，5 段階設定した眼間時差に対して，48 試行，合計 240 回を 1 セットとし，2 セット行なった．

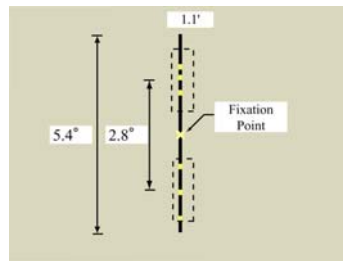


図 4-8 RDS 構成要素実験環境

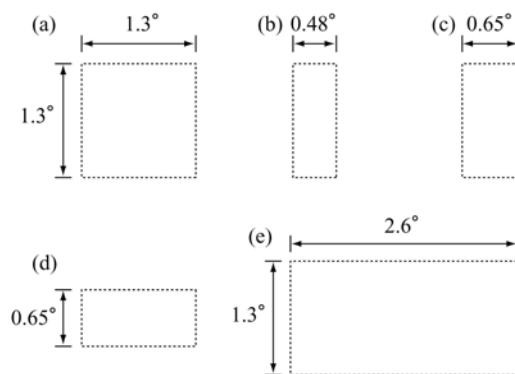


図 4-9 RDS の分布範囲

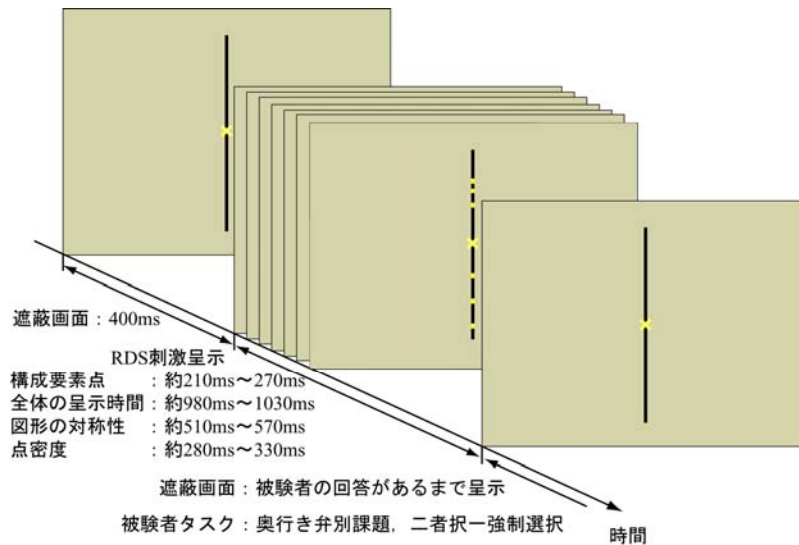


図 4-10 RDS 構成要素実験パラダイム

4.3.1. RDS を構成する各点の呈示時間の奥行きへの影響

RDS を構成するの各点の呈示時間が奥行き知覚に影響を及ぼすかどうかについて検討する。点自体の呈示時間そのものが奥行き手がかりとなりえるのであれば、呈示時間が変化することによって奥行き知覚にも変化が生じるはずである。このことを検討するために、実験では、眼間時差は等しいが構成要素の点の呈示時間が異なる 2 つの RDS を用いて奥行き弁別を行った。もし点の呈示時間が影響するのであれば、奥行き弁別が可能である。

実験では、スリット幅 1pixel の背後で 2 つの RDS 刺激を並進させた。RDS 刺激の分布範囲は共に $0.48 \times 1.3 \text{deg}$ である (図 4-9b)。2 つ RDS 刺激を構成する点の呈示時間は、どちらか一方は 6.7ms とし、もう一方は 33.5ms とした。2 つの RDS 刺激が持つ眼間時差は、常に同一であり、 ± 33.5 , ± 46.9 , ± 60.3 , ± 73.7 , $\pm 87.1 \text{ms}$ の 5 段階からランダムに設定した。点の呈示時間が長い RDS は明るく見える。従来の研究から、輝度の高い刺激が手前に見えることが知られている。輝度の影響をなくすために、2 つの RDS 刺激の見かけの明るさが同等になる輝度値を心理物理学実験により測定した。実験ではその輝度値を用いた。

被験者は、2 つ同時に呈示される RDS のどちらがより近くに見えたか、奥行き弁別

を二者択一強制選択で回答した。被験者は矯正により正常な視力を有する成人男女3名で行なった。実験は、各パラメータに対して48試行、合計240試行を1セットとして2セット行なった。

図4-11に結果を示す。横軸は2つのRDS刺激の眼間時差の絶対値[ms]を示し、縦軸は正答率[%]を示している。正答率は、構成要素の点の呈示時間33.5msの刺激が近いと回答した場合を正答とした。エラーバーは、被験者3名の標準偏差である。図4-11より、2つのRDS刺激が持つ眼間時差がどの値でも、奥行き弁別の正答率がほぼチャンスレートの50%になっている。

実験の結果から、RDSの構成要素の各点の呈示時間に違いがある場合でも、眼間時差が同一であれば、奥行き弁別はできないことが明らかになった。これは、構成要素の点自体の呈示時間の長さに関係なく、眼間時差によって生じる奥行き知覚が決定することを示す。つまり、構成要素の点の呈示時間は奥行き知覚に影響を与えないことが明らかになった。

4.3.2. RDS全体の呈示時間の奥行きへの影響

奥行き知覚は眼間時差の連続性が重要であることを3.5で示した。このことから、RDS自体の呈示時間が長くなれば奥行き手がかりがより確かなものとなる可能性がある。また奥行き知覚が時間的な足し合わせにより明確な奥行きになるのであれば、RDS全体の呈示時間が変化すると、知覚される奥行きも変化する可能性はある。このことを検討するために、呈示時間だけが異なる2つのRDSを用いて、奥行きを判断する実験を行った。

実験環境は4.3.1これまでと同様である(図4-8, 図4-10参照)。RDS刺激の構成要素の各点の呈示時間は6.7msとした。眼間時差は常に等しく、 ± 33.5 , ± 46.9 , ± 60.3 , ± 73.7 , ± 87.1 msの5段階からランダムに設定した。RDS刺激の分布範囲は、どちらか一方を 1.3×1.3 degとし、他方を 2.6×1.3 degとした(図4-9a,e参照)。見かけの明るさは2つのRDS刺激が同等の明るさに見えるように輝度の調整を行った。被験者は、2つ同時に呈示されるRDS刺激のどちらがより近くに見えたか奥行き弁別について二者択一強制選択で回答した。

実験結果を図 4-12 に示す。縦軸は 2 つの RDS に設定した眼間時差[ms]である。縦軸は正答率[%]で、RDS 分布範囲 $2.6 \times 1.3\text{deg}$ の刺激が近いと回答した場合を正答とした。エラーバーは、被験者 3 名の標準偏差である。図 4-12 より、どの眼間時差においても、正答率はチャンスレートの 50%になっている。

以上の結果から、全体の呈示時間が異なる 2 つの RDS から生じる奥行き弁別はできないことが明らかになった。つまり、RDS 全体の呈示時間は奥行き知覚に影響を与えないことが明らかになった。これは奥行き知覚が全体の呈示時間の長さに依存しないことを示す。

4.3.3. 図形的対称性が奥行きに及ぼす影響

ヒトが物体を認識するとき、図形の対称性は重要な手がかりである。幅 1pixel のスリットの背後に RDS が呈示される場合、その縦幅を確認できるが横幅を確認できない。このような条件下で、図形の対称性が影響するならば、横幅は縦幅とほぼ等しいと認識するかもしれない。もしそうであるならば、縦幅と横幅が異なる RDS 分布範囲を用いた場合、横幅が伸縮して認識される。その結果、異なる奥行きに知覚される可能性がある。この節では、同一の眼間時差を持ち、分布範囲の横幅が等しく縦幅が異なる 2 つの RDS 刺激を用いて、奥行き弁別実験を行った。

実験環境は図 4-8、図 4-10 を参照。2 つの RDS 刺激の点の呈示時間は、共に 6.7ms である。眼間時差は常に等しく、 ± 33.5 , ± 46.9 , ± 60.3 , ± 73.7 , $\pm 87.1\text{ms}$ の 5 段階からランダムに設定した。同時に呈示される RDS の分布範囲は、どちらか一方が $1.3 \times 0.65\text{deg}$ であり、他方は $1.3 \times 1.3\text{deg}$ とランダムに設定した (図 4-9a,d 参照)。設定輝度は、2 つ RDS 刺激の見かけの明るさが同等になるように調整した。被験者は、2 つ同時に呈示される RDS のどちらがより近くに見えたか、奥行き弁別について二者択一強制選択で回答した。

実験結果を図 4-13 に示す。横軸は 2 つの RDS 刺激の眼間時差[ms]を示し、縦軸は正答率[%]を示している。正答率は、RDS 分布範囲 $1.3 \times 1.3\text{deg}$ の刺激が近いと回答した場合を正答とした。エラーバーは、被験者 3 名の標準偏差である。図 4-13 より、どの眼間時差の場合でも、奥行き弁別の正答率がほぼチャンスレートの 50%になっている。

これらの結果から、RDS の分布範囲の縦幅が異なっても、2 つ RDS の持つ眼間時差が等しければ、奥行き弁別はできないことが明らかになった。つまり、図形の対称性を基に視覚刺激の大きさを推測しておらず、図形の対称性は奥行き知覚に影響を与えないことが示唆された。

4.3.4. RDS 点密度の奥行きへの影響

眼間時差は RDS 刺激の各点要素により視覚情報として呈示される。このことから RDS 刺激の点の要素数が異なると奥行き知覚が異なる可能性がある。つまり、RDS 刺激の点密度の違いが奥行き知覚に影響する可能性がある。このことを検討するために、異なる点密度を持つ 2 つの RDS 刺激を用いて奥行き弁別実験を行った。点密度の違いにより異なる奥行きが生じるならば奥行き弁別が可能である。

実験環境、RDS の構成要素の呈示時間、眼間時差は 4.3.3 と同様である。RDS の分布範囲は、共に $0.65 \times 1.3\text{deg}$ とした (図 4-9c)。実験では、点密度だけが異なる 2 つの RDS を同時に呈示した。点密度は一方を 7% とし、もう一方を 14% とした。また 2 つ同時に呈示される RDS 刺激の見かけの明るさが等しくなるように輝度の調整を行った。被験者は 2 つ同時に呈示される RDS 刺激のどちらがより近くに見えたか、二者択一強制選択で回答した。

実験結果を図 4-14 に示す。縦軸は、2 つの RDS 刺激に設定した眼間時差[ms]である。縦軸は正答率[%]で、高密度の RDS 刺激をより手前に見えた場合を正答とした。エラーバーは、被験者 3 名の標準偏差である。図 4-14 を見ると、2 つ RDS 刺激の眼間時差がどの条件でも、奥行き弁別の正答率は、チャンスレートの 50% になっている。

以上のことから、RDS の点密度が異なっても、眼間時差が等しい場合は奥行き弁別ができないことが明らかになった。つまり、点密度は奥行き知覚に影響を与えないことが明らかになった。

4.3.5. 刺激サイズによる奥行き知覚への影響

実世界では、視覚刺激のサイズも奥行き知覚に影響を与える場合がある。同じ大きさの物体の場合、より手前にあるものがより大きく見えるからである。そこで、RDS 分

布範囲の図形的形状は等しいが、大きさが異なる場合、奥行き知覚に変化があるかどうかをこれまでの実験結果から考察する。4.3.2 では $1.3 \times 1.3 \text{deg}$ と $2.6 \times 1.3 \text{deg}$ の刺激を用いた。4.3.3 では、RDS 分布範囲が $1.3 \times 1.3 \text{deg}$ と $1.3 \times 0.65 \text{deg}$ の刺激を用いた。つまり、相似関係にある図形（4.3.2 の長方形と 4.3.3 の長方形）を同一の正方形と比較して奥行き弁別の検討実験を行った。これらの結果は、図 4-12、図 4-13 に示している。2つの異なる RDS の奥行き弁別の結果、共にほぼチャンスレートになっている。このことから、相似関係にある 4.3.2 の長方形 ($2.6 \times 1.3 \text{deg}$) と 4.3.3 の長方形 ($1.3 \times 0.65 \text{deg}$) の分布範囲をもつ RDS を用いて奥行き弁別実験を行っても、チャンスレートになることは明らかである。したがって、RDS の呈示範囲サイズは奥行き知覚に影響しないことが示された。

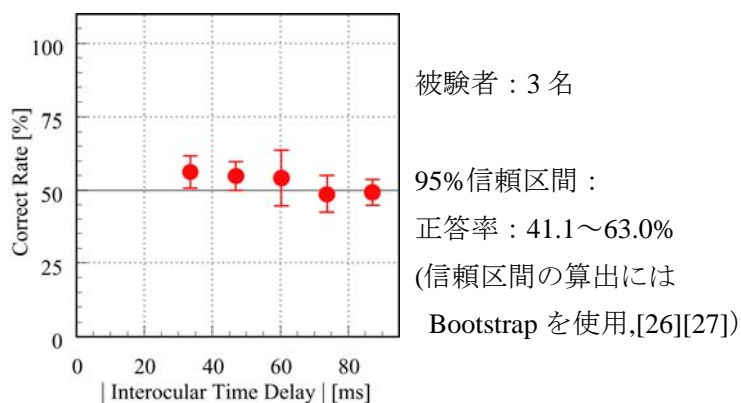


図 4-11 RDS 構成要素の各点の呈示時間の違いに関する奥行き弁別 (6.7, 33.5ms)

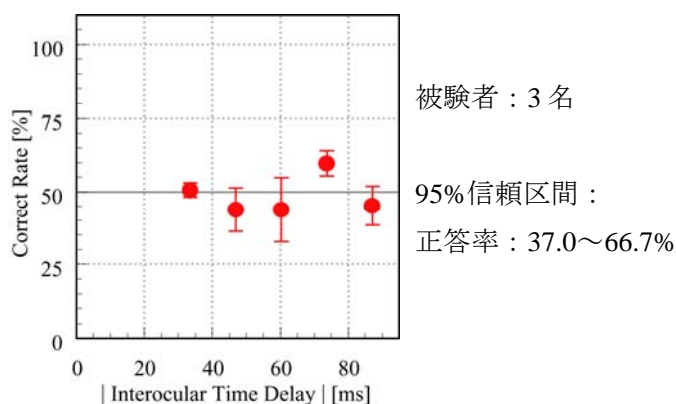


図 4-12 RDS 全体の呈示時間の長さの違いに関する奥行き弁別

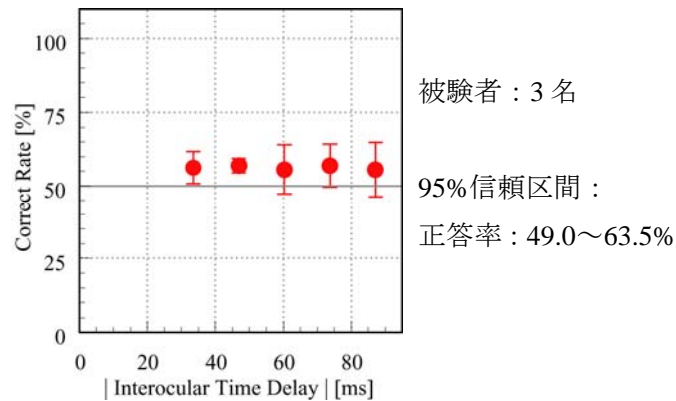


図 4-13 RDS の呈示範囲の図形的対称性に関する奥行き弁別

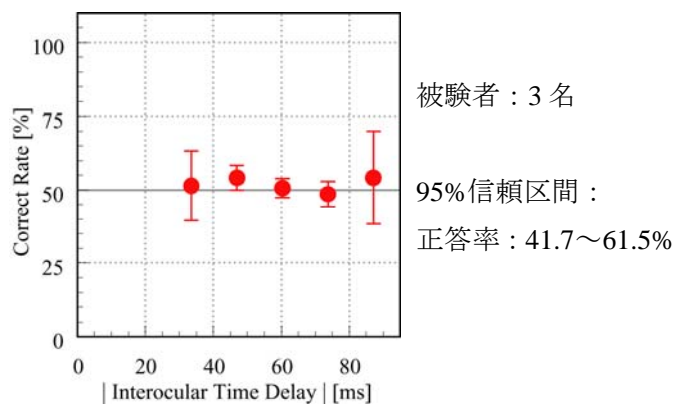


図 4-14 RDS の点密度の違いに関する奥行き弁別

4.4. おわりに

この章では、様々な視覚刺激を用いて、眼間時差以外の視覚情報が奥行き知覚に影響を与えるかどうか心理物理実験により検討した。

その結果、次のことが示された。

- (I) 眼間時差のオンセットもしくはオフセットの呈示順序は、奥行き知覚の生成に影響を与えない。ただし、オンセットは奥行き弁別の精度に影響を与える。
- (II) RDS の構成要素である各点の呈示時間・全体の呈示時間・呈示範囲の図形的対称性・点密度・分布範囲サイズは、奥行き知覚に影響を与えない。

これらのことから、純粋な眼間時差だけが奥行き知覚に影響を与えていることを示す。

第5章 眼間時差により生じる奥行き知覚と運動方向知覚の関係

5.1. はじめに

外界において、観測物体に眼間時差が生じる場合は、観測者が静止しているのであれば物体が観測者に対して運動している時である。このことから、眼間時差は奥行き情報を与えるだけではなく、運動方向の情報も与えていると考えられる。また、奥行きと運動方向が常に一緒に与えられるということは、視覚系の処理において、奥行きと運動方向が何らかの関係を持ち処理されているのではないかと推測される。

この章では、視覚系において眼間時差が奥行きと運動方向両方手がかりを与えるかどうかについて心理物理学的に検討する。実験では、図形的特徴を持つ視覚刺激である円・ひし形と、図形的特徴の無い四角形、RDS 刺激を用いて、眼間時差が運動方向の知覚を生じさせるかどうかについて検討する。その結果から、どの視覚刺激においても、眼間時差により奥行きだけではなく運動方向も決定できることを示す。

5.2. 奥行きと運動方向の共変性

幅 1pixel のスリットにおいて、眼間時差を持つ視覚刺激について考えると 2 通りの奥行きと運動方向の解釈が存在する。それを図 5-1 に示す。刻々と変化する左右眼への入力像について考える。スリットより奥に存在し左方向に運動している場合と、スリットより手前に存在し右方向に運動している場合では、全く同じ順序で同じ局所部位が左右眼に入力される。これは呈示される視覚刺激に関わらず全ての刺激で同様に生じる。このことから、理論的には、眼間時差だけでは奥行きと運動方向は決定できない。しかしながら、これまでの章の実験結果で示したとおり、様々な視覚刺激において奥行き知覚が生じることを明らかにした。これらの結果では、奥行きは常にスリットより奥として知覚されていた。このことから、眼間時差から生じる運動方向知覚も、常にスリットより奥にあるという解釈から得られる運動方向に規定されるのではないかと考えられる。この仮説が正しいかどうかについて、心理物理実験で検討する。

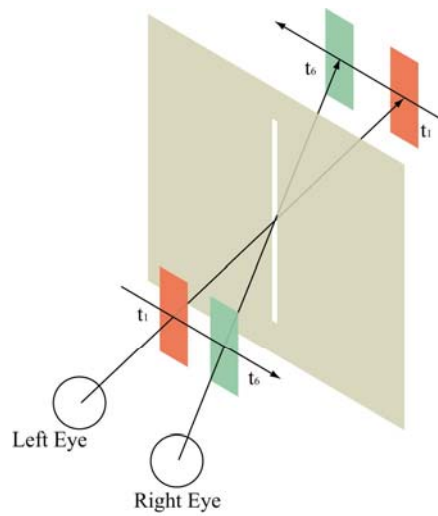


図 5-1 奥行き・運動方向の共変性

5.3. それぞれの視覚刺激により生じる運動方向知覚

眼間時差だけを持つ視覚刺激は、幅 1pixel(1.1')のスリットの背後に呈示される。そのため、単眼視条件において、運動方向手がかりは存在しない。例えば、幅 1pixel のスリットから観測できる呈示刺激は、円・ひし形刺激では線分の伸縮として知覚され、四角形の場合は線分が出現・消失するだけとなり、RDS 刺激では点の点滅が知覚される。このように、単眼視では幅 1pixel のスリットにおいて運動方向を決定することはできない。しかし、左右眼で視覚刺激を観測する場合、眼間時差が存在するので左右眼への入力時間が異なる。そのため、運動方向が決定することが可能であると考えられる。そこで、眼間時差を持つ刺激を用いて、運動方向が判別できるかどうか心理物理実験により検討した。また、奥行き知覚との関係も調べるために、同時に奥行き弁別についても検討した。

テスト刺激は、円とひし形、四角形、RDS の 3 タイプを用いた。実験環境を図 5-2 に示す。実験パラダイムを図 5-3 に示す。実験では、幅 1pixel のスリットの背後に、同一形状で異なる眼間時差を持つ 2 つの視覚刺激をスリットの背後で等速直線運動させた。全ての実験において、眼間時差は一方を $\pm 33.5\text{ms}$ とし、他方を ± 46.9 , ± 60.3 , \pm

73.4, ± 87.1 , ± 100.5 ms とした. 同時に呈示される 2 つの視覚刺激が持つ眼間時差の符号は常に同符号で, 正の時は左眼に対する入力刺激が右眼より時間的に先行して呈示される場合とした. 眼間時差の値は, 一方の眼に呈示される画像が, 他方の眼に対してどのくらいの時間だけ遅れて呈示されるかを示している. 被験者には 2 つ同時に呈示される刺激のどちらがより手前に見えたかを二者択一強制選択で回答させ, その後 2 つの刺激が共に左右のどちらに運動したかを二者択一強制選択で回答させた. 被験者は裸眼または矯正により正常視力を持つ成人男性 3 名で行った. 被験者のタスクは, 各実験の各パラメータにつき 48 試行, 合計 240 試行を 1 セットとし, 2 セット行なった.

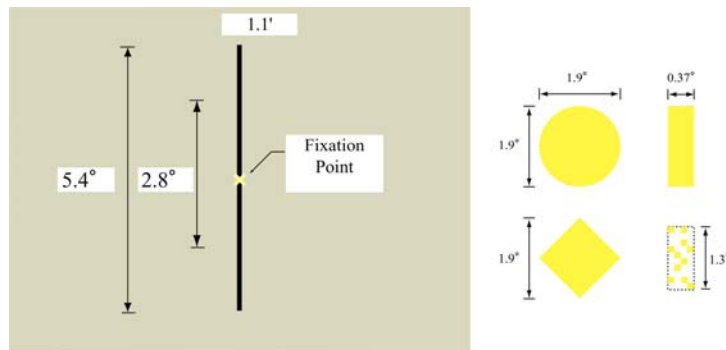


図 5-2 運動方向判断実験環境

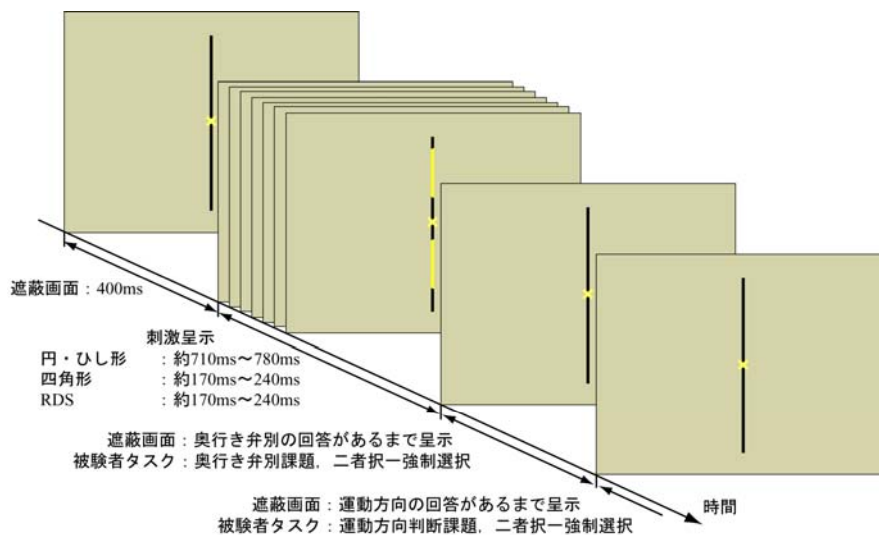


図 5-3 運動方向判断実験パラダイム

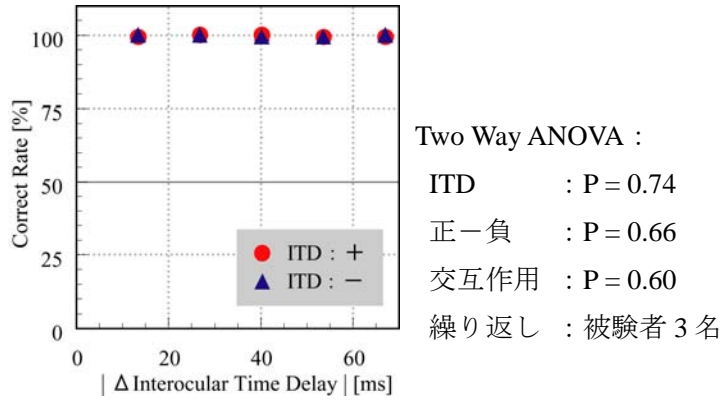


図 5-4 円・ひし形に対する運動方向判断

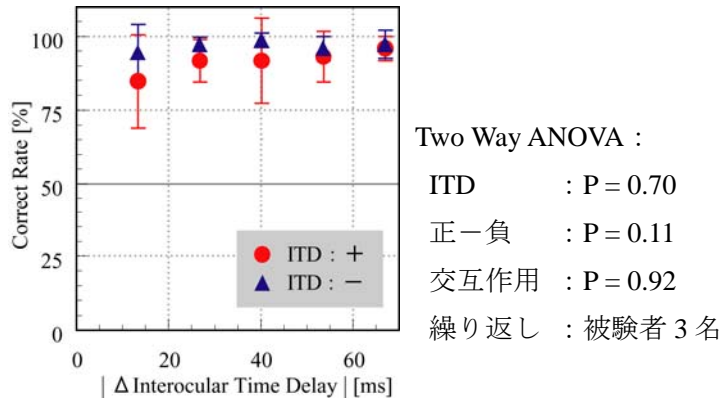


図 5-5 四角形刺激に対する運動方向判断

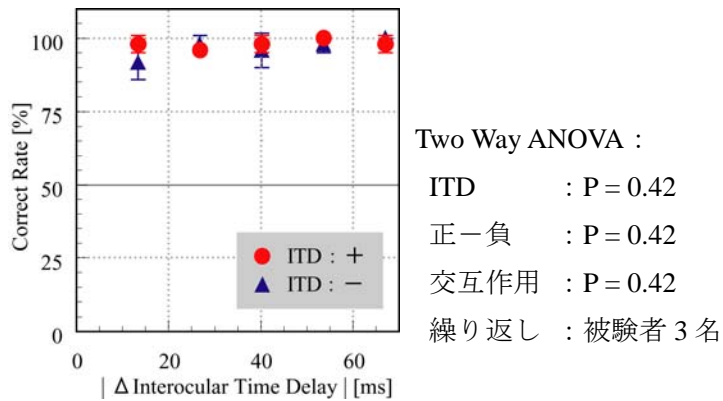


図 5-6 RDS 刺激に対する運動方向判断

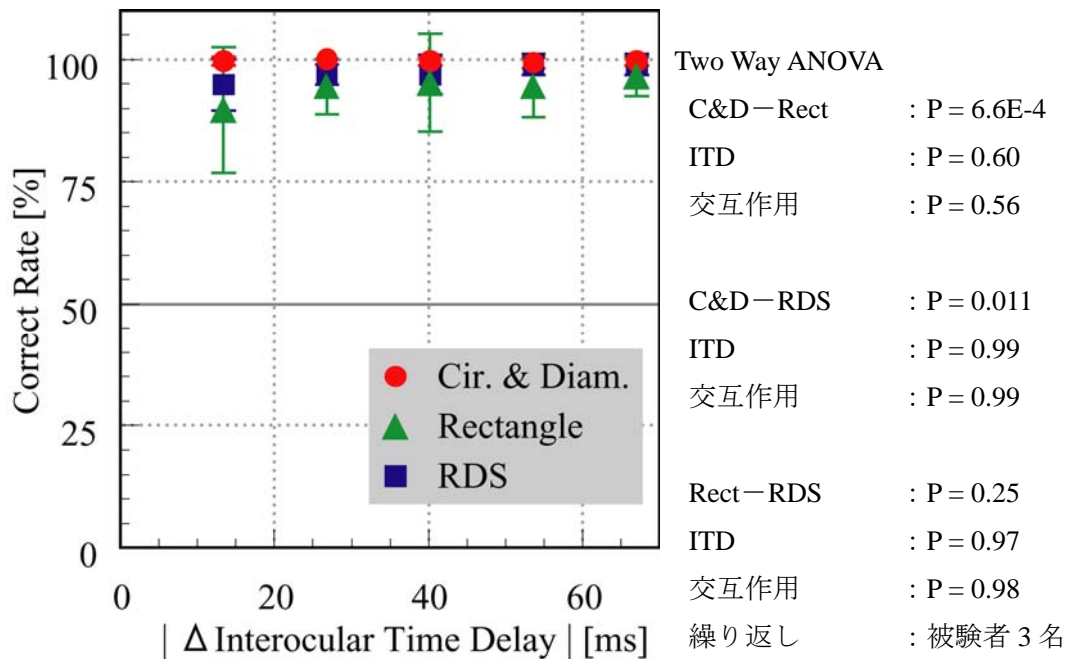


図 5-7 各視覚刺激に対する運動方向判断

はじめに、奥行き知覚の結果はこれまでの章とほぼ同様の結果になったので、運動方向判断の結果だけを掲載する（奥行き弁別については図 3-11 を参照）。各実験の眼間時差の符号別の結果を図 5-4, 図 5-5, 図 5-6 に示す。眼間時差の符号を平均した結果を図 5-7 に示す。グラフの横軸は、眼間時差の差を絶対値[ms]で示している。縦軸は正答率[%]を示しており、左眼が先行する正の眼間時差が呈示された場合は左方向と回答した場合を正答とし、負の場合は右方向を正答とした。つまり、刺激がスリットの奥にあると解釈した場合の運動方向を正答とした。プロットデータは、被験者 3 名の平均値でエラーバーは被験者間の標準偏差である。チャンスレートは 50%である。

図 5-4, 図 5-5, 図 5-6 のグラフから、どの視覚刺激でも全ての眼間時差の条件に対して正答率がほぼ 100%となっている。また、眼間時差の符号別の正答率にも差は見られない。図 5-7 より、それぞれの運動方向判断の正答率では、図形的特徴・明示的な面を持つ円・ひし形の場合がほぼ 100%と非常に高い値になっている。四角形・RDS についても、ほぼ 90%以上と正答率が高い。円・ひし形と四角形・RDS の正答率では差が見られる。

以上の結果から、眼間時差から運動方向知覚が生じることが明らかになった。運動方向判断の精度については、眼間時差の大きさに依存せず、ほぼ正答率が 100%となる。図形的特徴・明示的な面情報を持つ円・ひし形の運動方向判断の精度に比べて、明示的な面情報だけの四角形・どちらも持たない RDS 刺激の精度は低くなっている。運動方向判断の精度が眼間時差の大きさに依存しないことは、奥行き弁別の精度で見られた関係とは一致しないが、図形的特徴・明示的な面情報の両方を持つ刺激の判別精度の方が、他のものより精度が高いことは、奥行き弁別の関係と一致する（図 3-11 参照）。運動方向知覚の精度が、奥行き弁別のように眼間時差の大きさに依存しないのは、運動方向決定には、どちらの眼に像が先に入力されたのかだけを判断すればよいから非常に高いと考えられる。

運動方向の正答率は、スリットの背後で運動していると考えた場合の方向を正答と設定した。その結果、全ての視覚刺激においてほぼ 100%の正答率を得た。この結果から、視覚系が、刺激をスリットより奥で運動していると解釈しているということが明らかである。これは、5.2 で説明したとおり、理論的にはスリットの手前とスリットの奥の両方の解釈が存在するにも関わらずにである。このことから、スリットという遮蔽物の存在が常に奥行きがスリットより奥であるという解釈が妥当と処理されている可能性がある。もしくは、眼間時差により生じる知覚は常に奥というバイアスの基で運動方向を決定して可能性もある。

5.4. おわりに

この章では、眼間時差だけから運動方向の知覚が生じるかどうかについて検討した。その結果、眼間時差の情報から運動方向が一意に決定されることを示した。運動方向判断の精度は非常に高く、眼間時差の大きさに依存しない。図形的特徴・面情報の両方が存在する場合、それらの視覚情報が無い場合に比べて精度の向上があることを示した。

眼間時差だけからは、奥行きと運動方向について共変性が存在するが、遮蔽物のオーダー手がかりにより視覚物体がスリットより奥にあると規定することで、一意に決定している可能性がある。もしくは眼間時差により生じる知覚は常に奥というバイアスの基で運動方向を決定している可能性もある。

第6章 奥行き知覚と運動方向知覚に対する遮蔽の効果

6.1. はじめに

ここまでの章で、スリット視条件下において、純粋な眼間時差だけから奥行き知覚と運動方向知覚が生じることを示した。曖昧な眼間時差だけでは奥行き・運動方向が決定できないにも関わらず、視覚系は一意に決定できる。これは、眼間時差により生じる奥行きが常に奥という解釈を用いることで成り立つ。このことから、スリット視条件下では、遮蔽物の情報が大きく影響を与えているのではないかと考えられる。もしくは、遮蔽の影響はなく、そもそも眼間時差により生じる知覚が奥にバイアスがある可能性もある。この2つのどちらの予測が尤もらしいのだろうか？このことを検討するために、次のような2つの実験を考案した。1つ目は、明示的な遮蔽が存在しない場合である（不可視スリット）。2つ目は、眼間時差を与える左右の運動方向と遮蔽が与える運動方向の手がかりが矛盾したスリットを用いた場合である（矛盾スリット）。もし遮蔽の影響がないのであれば、不可視スリットと明示スリットの場合に生じる知覚は同様となるはずである。また、矛盾スリットにおいても眼間時差から生じる左右方向の運動が知覚されるはずである。この章では、この2つの実験により遮蔽情報が奥行き知覚に影響を与えているかどうか心理物理学的に検討する。

心理物理実験の結果、不可視の遮蔽物を用いた場合でも、明示的なスリットがある場合と同様の知覚が生じることを示す。このことは遮蔽の影響が無いことを示唆する。また自然界ではありえないような矛盾した遮蔽物を呈示した場合でも、奥行き知覚・運動知覚が生じることを示す。特に、運動方向が左右に知覚されることから、遮蔽の影響は無く、眼間時差により運動方向が生じていることを示唆する。このことは、眼間時差から生じる知覚は常に奥にバイアスがあり、運動方向は左右に知覚されることが示唆する。

6.2. 不可視な遮蔽物条件下において眼間時差により生じる知覚

もし眼間時差により生じる知覚が遮蔽の影響を受けないのならば、スリットが不可視になった場合でも、明示的なスリットがある場合と同様に知覚が生じると考えられる。

実験では不可視スリット条件下において、奥行き・運動方向の知覚が生じるかどうか心理物理実験により検討する。実験では、スリットの輝度を 0cd/m^2 と設定した。図 6-1 に示すように、スリットの存在は目視できないが、固視点上に幅 1pixel で鉛直方向に長いスリットがあり、背後を運動するテスト刺激が見えるように実験を構築した。不可視のスリット、背後に呈示するテスト刺激の詳細を図 6-2 に示す。

実験パラダイムを図 6-3 に示す。実験は、幅 1pixel のスリットの背後に、2 つ異なる眼間時差を持つ RDS 刺激を並行移動させた。2 つの RDS 刺激は、スリット背後で等速直線運動する。上下同時に呈示される RDS 刺激の一方は $\pm 33.5\text{ms}$ の眼間時差を持つ。他方は、相対的に ± 13.4 , ± 26.8 , ± 40.2 , ± 53.6 , $\pm 67\text{ms}$ の 5 段階に設定した。眼間時差は、正の場合を左眼への入力の方が右眼より先行する場合と設定した。2 つの RDS 刺激が持つ眼間時差は常に同符号とした。被験者のタスクは、2 つ同時に呈示される RDS 刺激のどちらが手前に見えたか奥行き弁別について二者択一強制選択で回答することと 2 つの RDS 刺激が共に左右どちらに運動したか二者択一強制選択で回答することである。被験者は、裸眼または矯正により正常な視力を有する成人男性 3 名で行った。実験の試行回数は、各パラメータにつき 48 試行、合計 240 試行である。

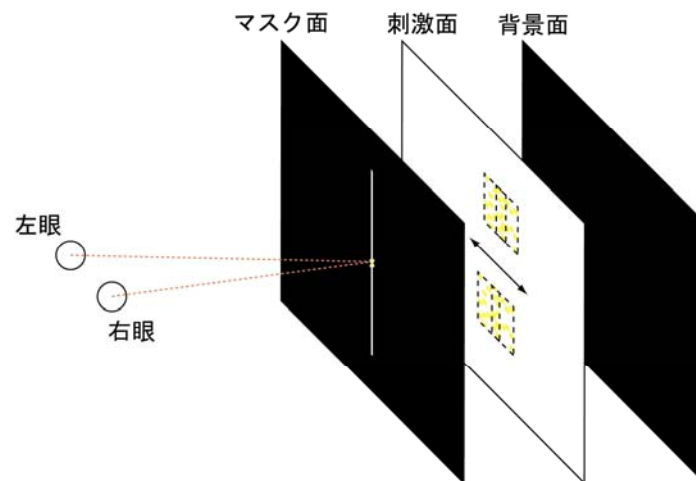


図 6-1 不可視スリット実験の概要

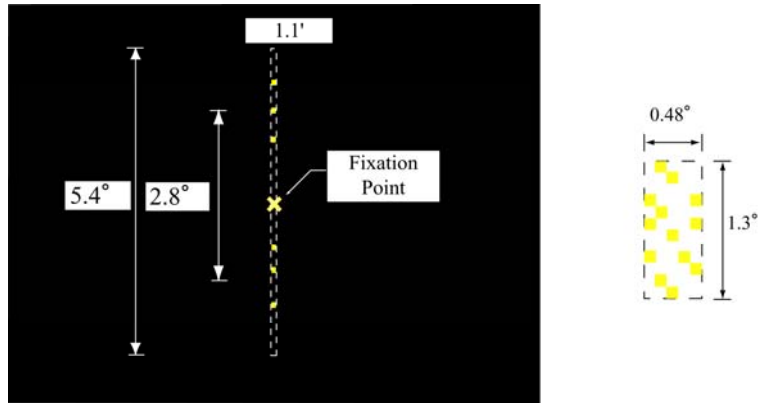


図 6-2 不可視スリット実験刺激詳細

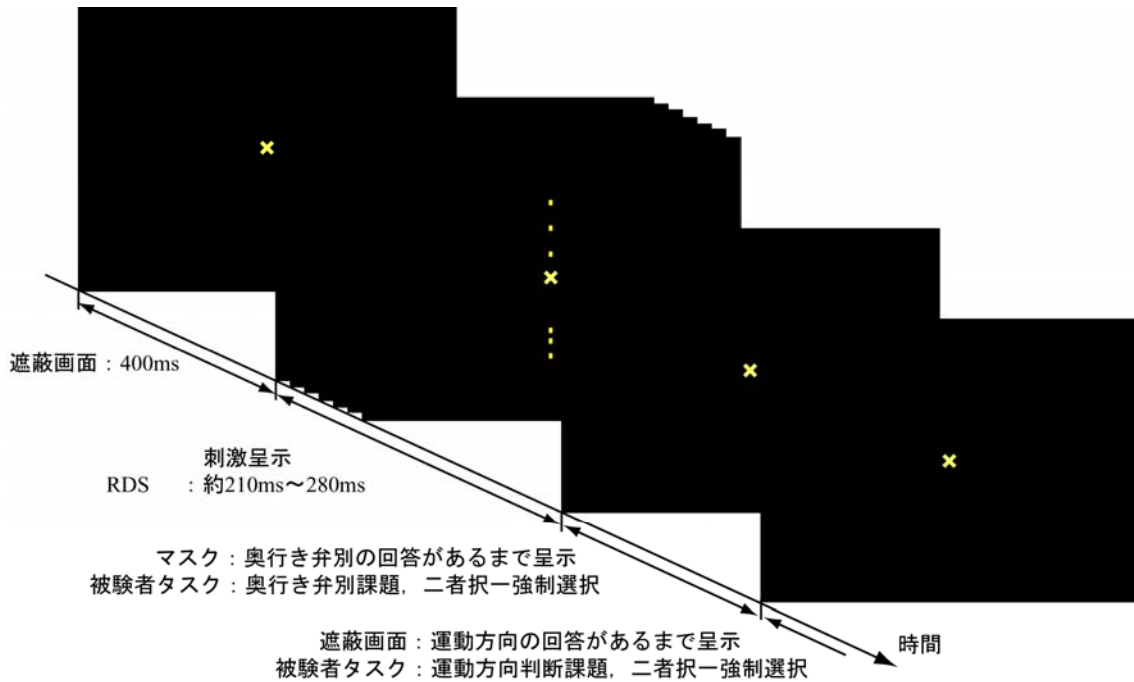


図 6-3 不可視スリット実験パラダイム

実験結果を図 6-4, 図 6-5 に示す. 比較のためにそれぞれのグラフにはスリットが可視条件の実験結果もプロットした. 横軸は 2 つ RDS 刺激が持つ眼間時差の差の絶対値 [ms]を示す. 縦軸は正答率[%]を示し, 図 6-4 の奥行き弁別結果では, 眼間時差が±33.5ms である刺激をより手前と回答した場合を正答とした. 図 6-5 の運動方向判断で

は、眼間時差が正のときは左方向と回答した場合を正答とし、眼間時差が負のときは右方向と回答した場合を正答とした。つまり刺激がスリットより奥であるときの運動方向を正答とした。グラフのプロットデータは被験者3名の平均値でエラーバーは被験者間の標準偏差である。チャンスレートは50%である。

図6-4のグラフより、奥行き弁別については、不可視の遮蔽スリットであっても、眼間時差の差の絶対値が±13.4msを除き、正答率が約70%以上になっている。可視条件に比べると正答率が低くなっている。図6-5のグラフより、運動方向判断については、遮蔽が不可視であっても、全ての条件において正答率が約85%と正答率が高い。可視条件と比べると正答率が高くなっている。

以上のことから、遮蔽情報が不可視の場合でも、眼間時差から奥行き知覚が生じることが明らかになった。ただし、可視のスリットの場合と比べると奥行き弁別の精度が低下する。また運動方向知覚も生じることが明らかになった。運動方向判断の精度については、可視の遮蔽情報の場合よりも精度の高いという結果になった。

これらことから、眼間時差は遮蔽情報が可視でも不可視でも関係なく奥行き知覚・運動方向知覚を与えることが明らかになった。また、不可視のスリットであっても、奥行き・運動方向ともに、スリットより奥として知覚されている。このことから、遮蔽情報の影響は無いことが示唆される。ただし、不可視の遮蔽物の存在を推測している可能性がある。つまり、呈示刺激が固視点の上下で出現・消失が鉛直線上で連続するために、その左右に遮蔽物が存在するのではないかという予測もできる。

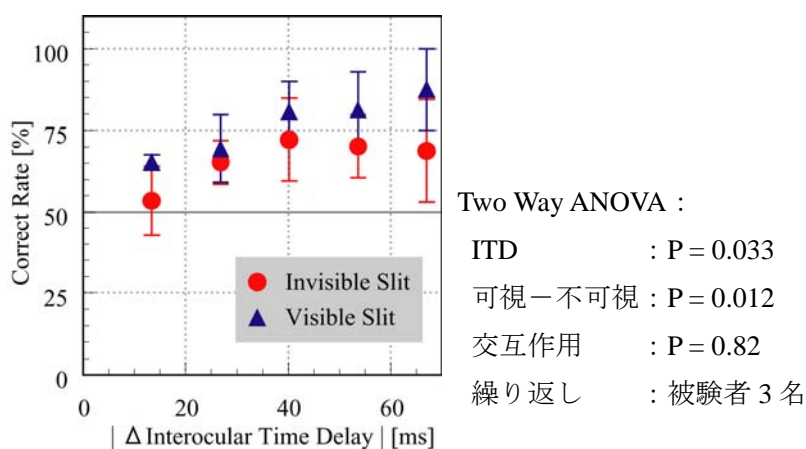


図 6-4 不可視スリットの奥行き弁別

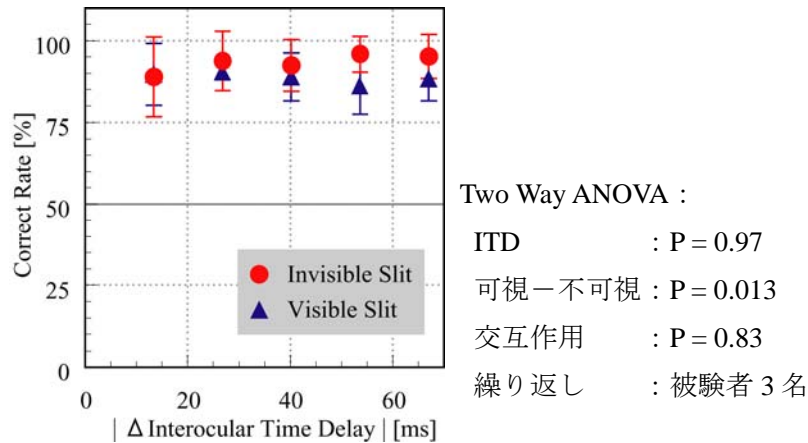


図 6-5 不可視スリットの運動方向判断

6.3. 矛盾した遮蔽物条件下における眼間時差により生じる知覚

遮蔽物が不可視条件であっても、奥行き知覚・運動方向知覚が成立することが明らかになった。このことは遮蔽の影響が無いことを示唆する。ただし、視覚系が不可視の遮蔽物を推測している可能性もある。実験では、RDS 刺激の出現・消失の位置が鉛直方向で揃っているために、暗にその位置に不可視のスリットが存在することを視覚情報として与えている。では、実際には、眼間時差による知覚は遮蔽の影響を受けるのだろうか？眼間時差は左右方向の運動手がかりを与えると考えられる。そこで、これに対して遮蔽情報が上下方向の手がかりを与える実験を考案した。つまり、眼間時差の運動方向手がかりと遮蔽情報の与える運動手がかりが矛盾する不自然な人工条件の実験である。もし遮蔽情報が眼間時差により生じる奥行き知覚に影響を与えないのであれば、遮蔽が矛盾している場合でも、明示スリット（矛盾のないスリット）と同様の奥行き知覚が生じ、運動方向も左右に知覚されるはずである。

実験は、図 6-6、図 6-7、図 6-8 に示すように構築した。スリットを水平方向に配置し、プログラムの際には空間視差を持つ RDS 刺激を上下に等速直線運動させる。このとき、スリットから呈示される視覚情報は、左右眼の眼間時差に置換される。つまり、鉛直スリットがあるときと同様に眼間時差が呈示可能である。眼間時差は左右方向の運動手がかりであるので、明示的な水平スリットの遮蔽情報が与える上下方向の運動手がかり

りとは矛盾する．このような実験条件下で，眼間時差の奥行き知覚と運動方向知覚がどのように生じるか心理物理実験により検討した．実験の条件は，スリットが水平の可視のものであること以外は，6.2の実験と同様に行った．同時に呈示される2つのRDS刺激のうち，一方の眼間時差は $\pm 33.5\text{ms}$ で，他方は，相対的に ± 13.4 ， ± 26.8 ， ± 40.2 ， ± 53.6 ， $\pm 67\text{ms}$ の5段階に設定した．被験者には，2つ同時に呈示されるRDS刺激のどちらがより手前に見えたか二者択一強制選択で回答させた．また運動方向については，2つのRDS刺激が左右どちらに運動して見えたか回答する実験と上下どちらに運動して見えたかを回答する実験を行った．これは，視覚系において，眼間時差により得られる運動方向の情報（左右方向）と遮蔽情報により得られる運動方向（上下）のどちらの知覚が生じているのかを検討するためである．被験者は，裸眼または矯正により正常な視力を有する成人男女3名で行った．実験の試行回数は，各パラメータにつき48試行，合計240試行である．

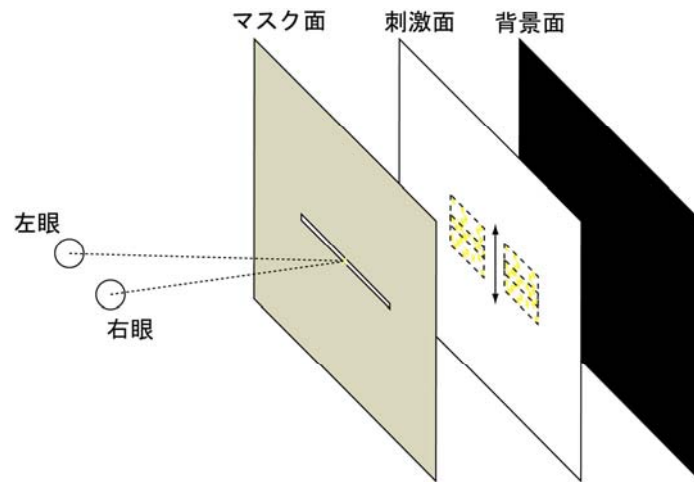


図 6-6 矛盾スリット実験概要

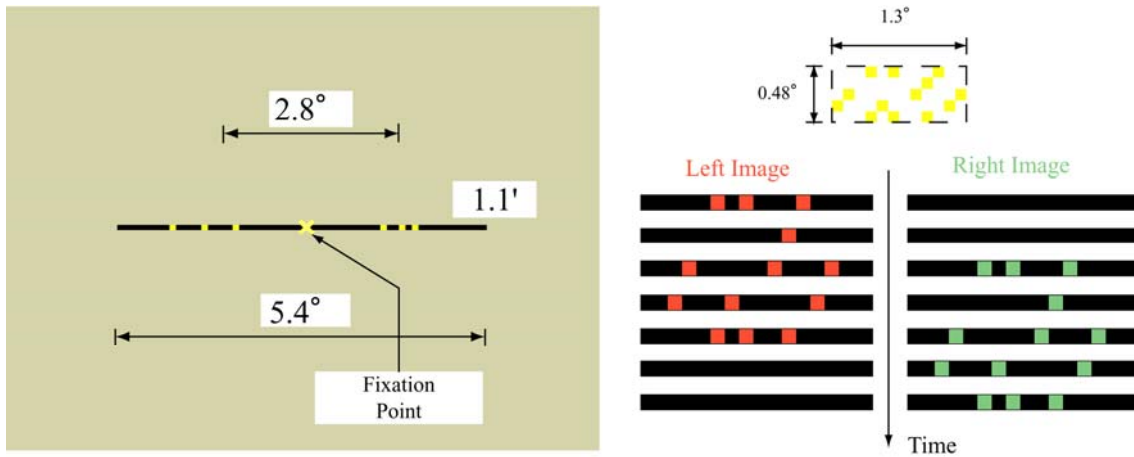


図 6-7 矛盾スリット実験刺激詳細

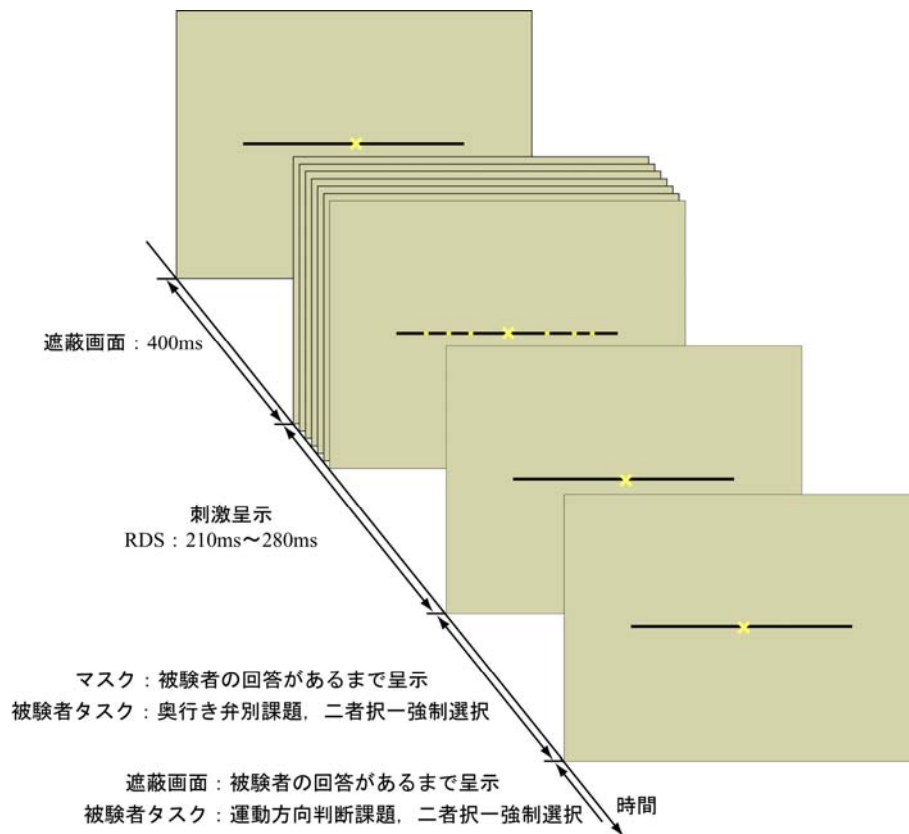


図 6-8 矛盾スリット実験パラダイム

実験結果を図 6-9, 図 6-10 に示す. 比較のために鉛直スリットの実験結果もプロットした. 図のフォーマットは 6.2 の実験と同様で横軸は眼間時差の差の絶対値[ms]を示し, 縦軸は正答率[%]を示す. 図 6-10 の縦軸の正答率は, 左右の運動方向を回答させた実験 (赤) では, 眼間時差が正の場合に左方向と回答したときを正答とした. 上下の運動方向を回答させた実験 (緑) では, 眼間時差が正の場合に下方向と回答したときを正答と設定した.

図 6-9 より, 矛盾したスリットの場合でも, 正答率が 75%以上と高い値になっている. 遮蔽条件が矛盾しない可視の鉛直スリットの場合の正答率と比較しても差が見られない. 図 6-10 より, 運動方向を上下に回答させた場合, 正答率はほぼチャンスレートの 50%になっている. それに対し, 左右方向に回答させた場合は, 約 60~70%の正答率を示している.

以上の結果から, 遮蔽条件が矛盾していても, 眼間時差から奥行き知覚が生じることが明らかになった. 奥行き弁別の精度は, 遮蔽条件が矛盾しない場合と変わらないことが示された. 運動方向に関しては, 遮蔽情報から推測される上下運動ではなく, 眼間時差情報から与えられる左右方向の運動知覚が生じることが明らかになった. しかし, その精度は非常に低かった.

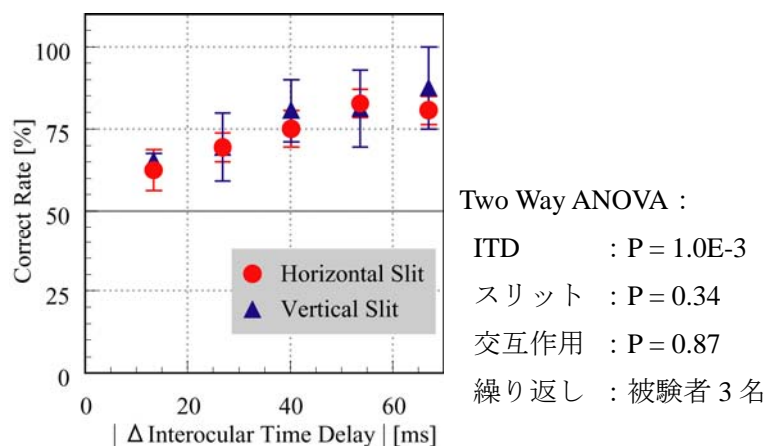


図 6-9 矛盾スリットの奥行き弁別

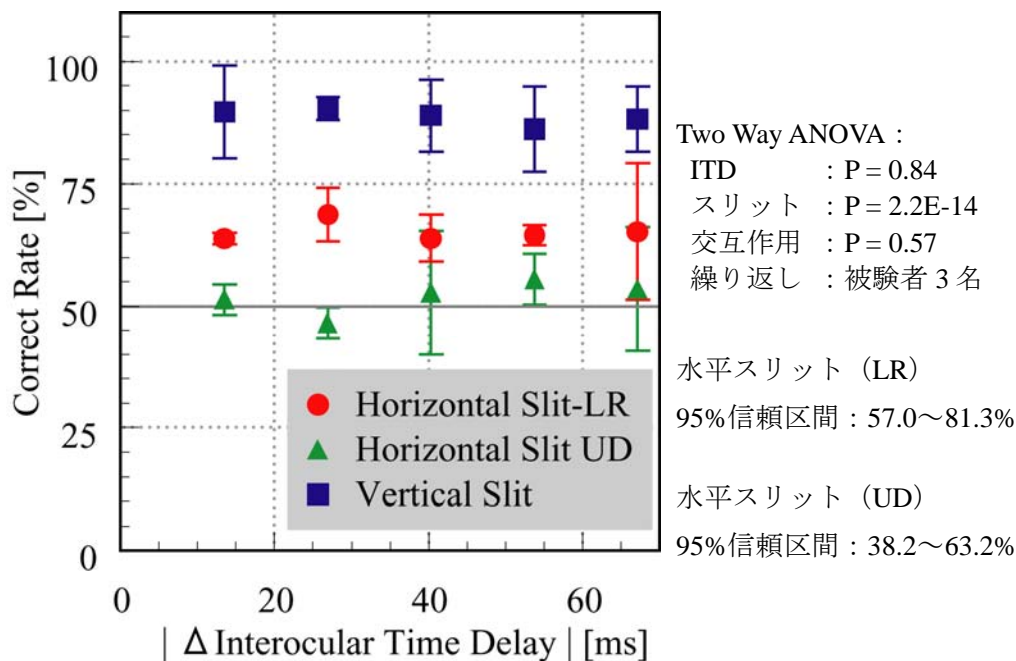


図 6-10 矛盾スリットの運動方向判断

6.4. おわりに

この章では、遮蔽情報が眼間時差により生じる奥行き知覚や運動方向知覚に影響を与えるかどうかについて検討した。遮蔽情報の影響が無いのであれば、明示的なスリットがある場合と無い場合で同様の結果が得られると予測される。また、眼間時差から生じる運動方向は左右と知覚されると考えられる。そこで、遮蔽情報は上下方向の運動手がかかりを与える矛盾した実験を行った。もし遮蔽情報が影響を与えないのであれば、運動方向は左右に知覚されると予測される。このように、不可視な遮蔽条件と遮蔽情報が眼間時差と矛盾した条件の実験を構築して、遮蔽情報の奥行き知覚・運動方向知覚への影響を心理物理学的に検討した。

その結果、不可視の遮蔽条件では、明示的なスリットと同様の奥行きと運動方向知覚が生じることが明らかになった。矛盾した遮蔽条件でも、奥行きについては矛盾のないスリット（明示スリット）と同様の知覚が生じることが明らかになった。運動方向については、遮蔽の与える上下方向には知覚されず、眼間時差が与える左右方向の知覚が生じることが明らかになった。

不可視の遮蔽条件の結果は、眼間時差の運動方向は左右に知覚されることを示す。そ

して運動方向は、固視点（スリット）より奥の解釈を基に決定されることを示唆する。このことは、眼間時差による知覚は奥にバイアスがある可能性を示唆する。遮蔽情報と眼間時差が矛盾している場合の結果からも、遮蔽の影響は無いこと、眼間時差から生じる奥行きは常に奥に解釈されることを示唆する。ここで左右方向の判断精度が低いのはきわめて人工な刺激であるからである。

以上の結果と前章の第5章の結果から、視覚系では眼間時差を持つ刺激を常に奥であると解釈することが示唆される。このことにより曖昧な眼間時差を持つ共変性を一意に決定する。つまり、視覚系は眼間時差は常に奥と解釈することで頑健なシステムを構築している可能性を示唆する。

第7章 眼間時差により生じる奥行き知覚の定量評価

7.1. はじめに

ここまでは、眼間時差から生じる奥行きの相対的な知覚について検討してきた。その結果、眼間時差だけから生じる奥行きの弁別が可能であることを示した。

従来の研究では、眼間時差により生じる定量的な奥行き知覚について検討されていない。これまでの章で示したように、眼間時差の差による相対的な奥行きの弁別が可能であることから、眼間時差より生じる奥行き量を定量的に測定することが可能であると考えられる。本研究では、眼間時差だけから生じる奥行き知覚を定量的に測定するために、既知の奥行き量を持つ空間視差をリファレンスとして測定する実験を提案した。空間視差を持つ刺激と眼間時差を持つ刺激を同時に呈示し、比較することで眼間時差のもつ奥行き量を評価できる。奥行き量測定では、テスト刺激として四角形と RDS 刺激を用いた。これらは、第3章でどちらも同等の奥行き弁別の精度・閾値を持つことが示されていることから、同適度の奥行き量を持つと考えられる。

実験の結果、眼間時差より生じる奥行き量は、既知の奥行き量を持つ空間視差と比較可能であり、眼間時差の大きさに比例した奥行き量を持つことを示す。

7.2. 面情報を持つ視覚刺激により生じる奥行き知覚の定量評価

明示的な面を持つ四角形刺激は、眼間時差がオンセット・オフセットにだけに呈示される。その間は連続面により奥行きが補間されると考えられる。この視覚刺激による眼間時差の奥行きを定量的評価するために、既知の奥行き量をもつ空間視差 (Wheatstone Stereo) の刺激と比較する実験を行った。実験の概要・パラダイムを図 7-1, 図 7-2 に示す。上部のスリットには、眼間時差を持つテスト刺激を呈示した。下部スリットは、十分大きなスリット幅を設定することで、常に空間視差を持つテスト刺激を呈示可能とした。このような実験条件で、恒常法により奥行き量の測定を行った。

実験は、テスト刺激の持つ眼間時差情報として、 ± 46.9 , ± 73.7 , ± 100.5 ms の3つをランダムに呈示した。リファレンス刺激の空間視差は、0~22min まで 2.2min 間隔の 11

段階でランダムに呈示した。リファレンス刺激の空間視差は、固視点の 0min を基準として、常に固視点より奥に設定した。リファレンス刺激は静止状態で呈示した。被験者には、2つ同時に呈示されるテストとリファレンス刺激のどちらが手前に見えたか、二者択一強制選択で回答させた。被験者は矯正により正常視力を持つ成人した男女3名で行った。実験は、11段階のパラメータに対して10試行、3つの眼間時差に対して行う合計330試行を1セットとした。このセットを各被験者4セット行い、11段階のパラメータに対して40試行のデータ、計1320試行のデータを取得した。恒常法により得た実験結果を Logistic Psychometric Function で Curve Fitting し、50% Threshold を求めた。Curve Fitting 時に用いた式を以下に示す。

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp[-a(x - b)]}$$

求めた 50% threshold の結果を図 7-3 に示す。横軸は、テスト刺激が持つ眼間時差の絶対値[ms]を示している。縦軸は、空間視差を視野角[min]で示している。図中に示した対角線（灰色）は、眼間時差と空間視差の奥行き量が 1 : 1 の関係を示す位置を表している。エラーバーは、Curve Fitting 時の残差標準偏差である。

図 7-3 から、全ての被験者において、眼間時差に比例して奥行き量が増加していることが分かる。被験者 MO に関しては、眼間時差情報より生じる奥行き量が、空間視差情報からのものと 1 : 1 の関係に近くなっている。その他の被験者については、眼間時差が ±46.9, ±73.7ms の場合に対角に近くなっている。

以上の結果から、眼間時差情報より生じる奥行き量は、空間視差情報から生じる奥行き量と同程度に奥行き量が生じることが明らかになった。

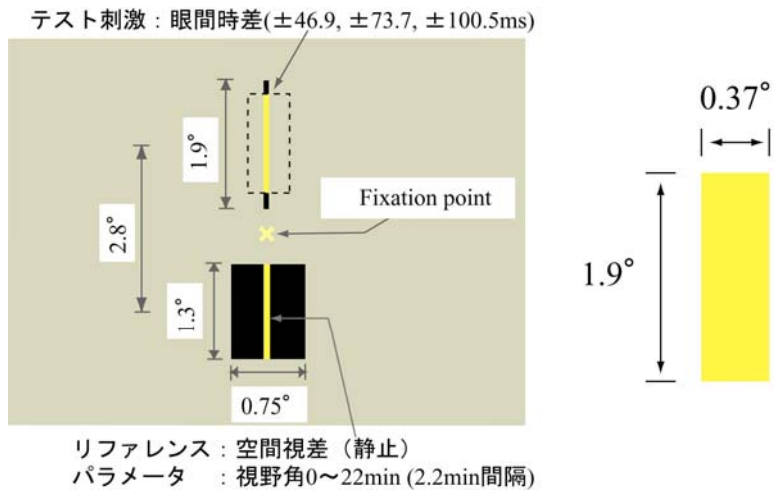


図 7-1 四角形刺激による奥行き知覚の定量評価実験概要

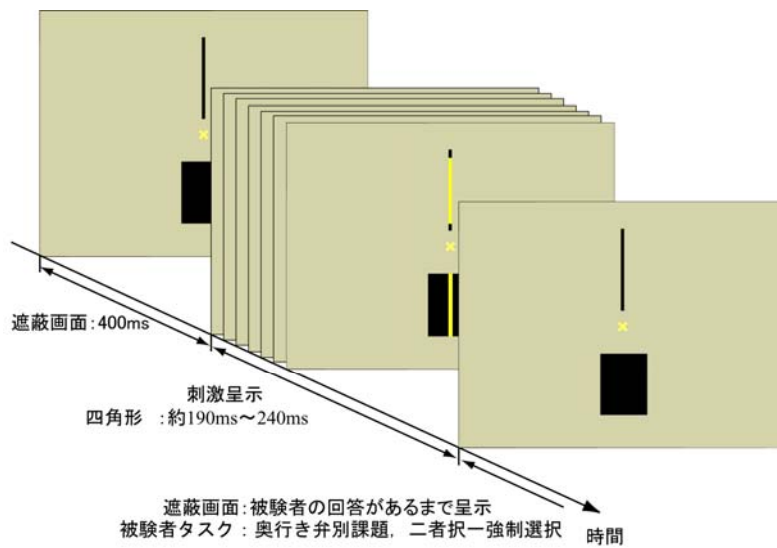


図 7-2 四角形刺激による奥行き知覚の定量評価実験パラダイム

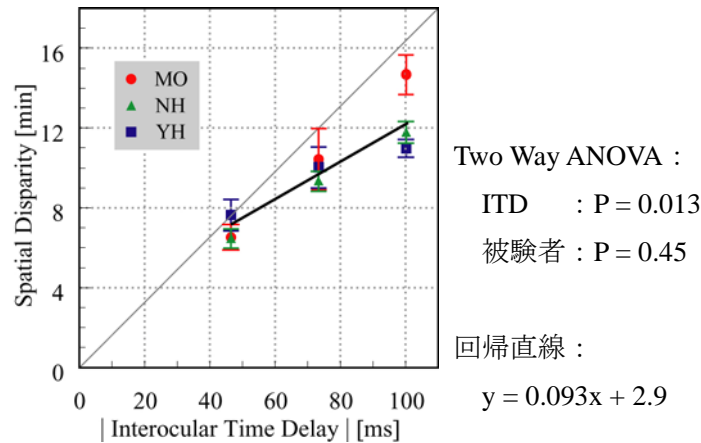


図 7-3 眼間時差より生じる奥行き知覚の定量評価（四角形刺激）

7.3. RDS 刺激により生じる奥行き知覚の定量評価

前節では、眼間時差を持つ四角形刺激が空間視差と同程度の奥行き量を持つことを示した。四角形刺激と同等の奥行き弁別が可能な RDS 刺激も同様に奥行き量をもつと考えられる。そこで、RDS 刺激を用いて定量的に奥行き量を測定する。

実験は 7.2 と同様に行った。実験環境・パラダイムを図 7-4、図 7-5 に示す。RDS 刺激の持つ奥行き量は恒常法により測定した、眼間時差は、 ± 33.5 、 ± 46.9 、 ± 60.3 、 ± 73.7 、 ± 87.1 、 $\pm 100.5\text{ms}$ の 6 段階を設定した。リファレンスの空間視差は 0~22min まで 2.2min 間隔の 11 段階とした。被験者には 2 つ同時に呈示されるテスト刺激とリファレンス刺激のどちらがより手前に見えたか二者択一強制選択で回答させた。

実験結果を図 7-6 に示す。横軸は眼間時差の絶対値[ms]を示し、縦軸は空間視差[min]で示している、正はスリットより奥を示す。プロットデータは Logistic Function で Curve Fitting し 50% Threshold の値を示している。エラーバーは Curve Fitting 時の残差標準偏差である。

図 7-6 のから分かるように、全ての被験者において、眼間時差が増加するにつれて、知覚される奥行き量も増加している。つまり、眼間時差の奥行き量は空間視差の既知の奥行き量と比較可能であることが明らかになった。また眼間時差が約 100ms までは、両眼融合が可能であることを示した。

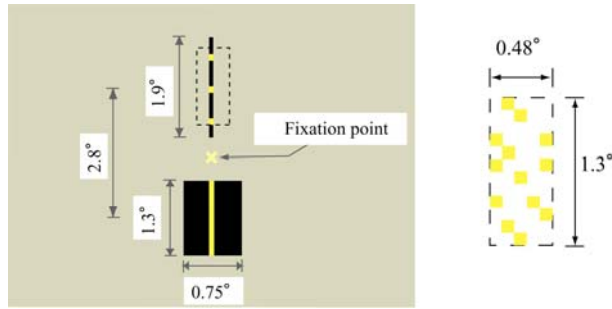


図 7-4 RDS 刺激の実験刺激詳細

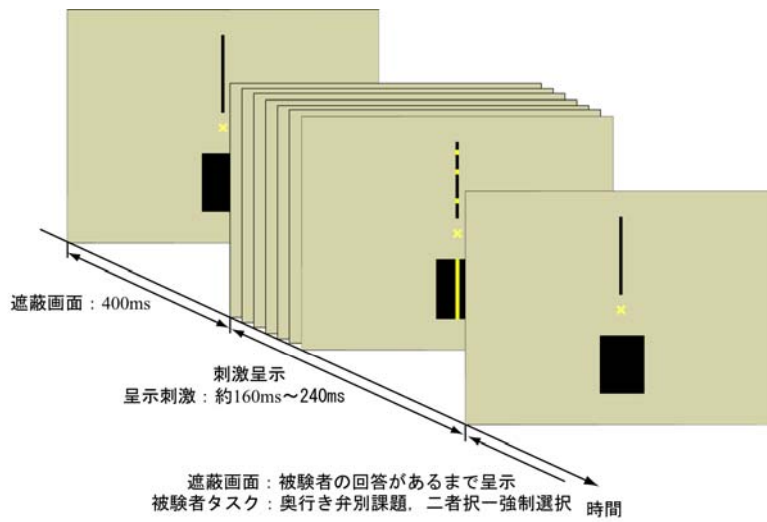


図 7-5 RDS 刺激の奥行き知覚の定量評価実験パラダイム

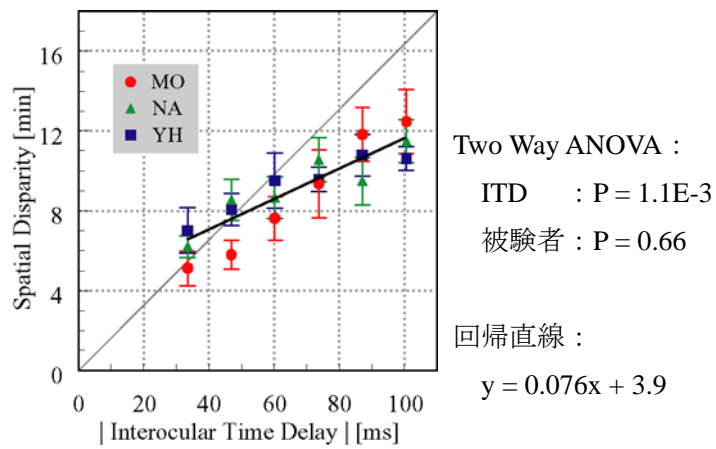


図 7-6 眼間時差より生じる奥行き知覚の定量評価 (RDS)

7.4. おわりに

この章では、眼間時差情報から生じる奥行き量について定量評価実験を行った。評価する視覚刺激としては、オンセット・オフセットにだけ眼間時差が与えられる四角形刺激と、眼間時差情報だけが連続して与えられる RDS 刺激を用いた。これらの視覚刺激は、共に奥行き弁別が可能であることから、既知の奥行き量を持つ空間視差との比較実験が可能であると考え、心理物理的に定量的な奥行き量測定実験を行った。

実験結果、四角形・RDS 刺激共に眼間時差に比例した奥行き量を持つことを明らかにした。特に、眼間時差情報だけを持つ RDS 刺激からでも奥行き量が生じること、その奥行き量は、既知の空間視差情報の量とほぼ同等であることを示した。このことから眼間時差が約 100ms 以下まで、両眼間の視覚刺激は融合可能であり、眼間時差に比例した奥行き量が生じることを明らかにした。

第8章 眼間時差により生じる速度知覚

8.1. はじめに

これまでの章で、スリット視条件下において、眼間時差だけから奥行き知覚・運動方向知覚が生じることを示した。また眼間時差から生じる奥行き量が既知の空間視差の奥行き量とほぼ同等であることを明らかにした。

幅が 1pixel のスリット視条件下では、空間視差は眼間時差に置換される。この空間視差から眼間時差への置換は、理論的には空間視差の水平方向の網膜像距離を、スリットの背後で運動している速度で除算することで得られる。しかし、実際には空間視差も運動速度も明確ではないため、この式を簡単に解くことはできない。それでも視覚系は、眼間時差が与えられると奥行き知覚を生成する。この奥行き量は、眼間時差に依存することから、視覚系では、速度知覚が眼間時差に無関係に生成されると考えられる。本研究では、眼間時差だけから奥行き知覚が成立することから、速度知覚は眼間時差に依存しないという仮説について心理物理学的に検討する。

実験の結果により、眼間時差により知覚される速度は、眼間時差に依存せず速度弁別が不可能であることを示す。

8.2. 眼間時差により生じる速度知覚の弁別

視覚系において、眼間時差だけが与えられた場合、知覚される速度は眼間時差に依存しないという仮説を検討するために、眼間時差から生じる速度の弁別実験を行う。もし仮説が正しいならば、異なる眼間時差を持つ 2 つ視覚刺激の速度弁別は不可能である。

実験環境・パラダイムを図 8-1, 図 8-2, 図 8-3 に示す。実験では図 8-1 で示した RDS 刺激を用いた。RDS 刺激の点の分布範囲は $0.48 \times 1.3\text{deg}$ で、点密度は 7% とした。図 8-1 は、RDS 刺激がスリット背後を左方向に運動した場合の例を示している。実験では、異なる眼間時差を持つ 2 つの RDS 刺激を幅 1pixel のスリットの背後で並進させた。RDS 刺激の眼間時差はどちらか一方は $\pm 33.5\text{ms}$ であり、他方は ± 46.9 , ± 60.3 , ± 73.7 , ± 87.1 , $\pm 100.5\text{ms}$ の 5 段階に設定した。被験者には 2 つ同時に呈示される RDS 刺激のどちらがより速く運動して見えたか二者択一強制選択で回答させた。また比較のために奥行き弁別についても二者択一強制選択で回答させた。被験者は矯正により正常視力を持

つ成人男女 3 名で、実験は、5 段階のパラメータに対し 48 試行、合計 240 試行を 1 セットとして、2 セット行なった。

実験結果を図 8-4 に示す。横軸は眼間時差の差の絶対値[ms]を示し、縦軸は正答率[%]を示している。正答率は、速度弁別の場合、眼間時差の絶対値の小さい方がより速く運動したと回答した場合を正答とした。奥行き弁別では眼間時差の絶対値の小さい方がより手前に見えたと回答した場合を正答とした。プロットデータは被験者 3 名の平均値でエラーバーは被験者間の標準偏差である。チャンスレートは 50% である。

図 8-4 のグラフより、相対的な眼間時差が大きいほど奥行き弁別の正答率は高くなっている。それに対して速度弁別では、ほぼチャンスレートの 50% になっている。つまり異なる眼間時差をもつ 2 つの RDS 刺激から、相対的な奥行き弁別は可能であるが、速度弁別はできないことが明らかになった。

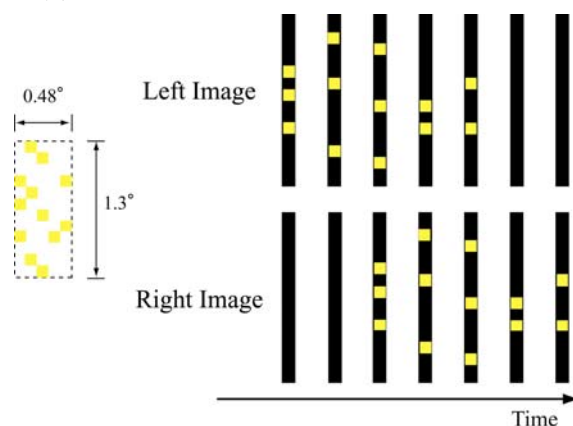


図 8-1 速度弁別実験における RDS 刺激

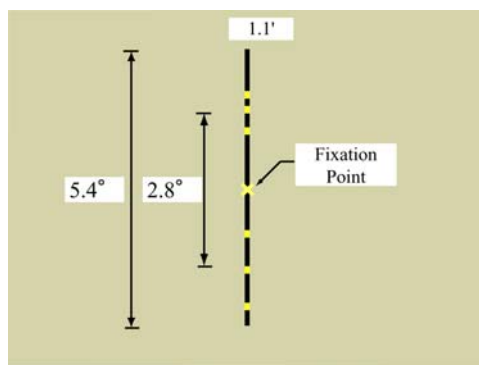


図 8-2 速度弁別実験環境

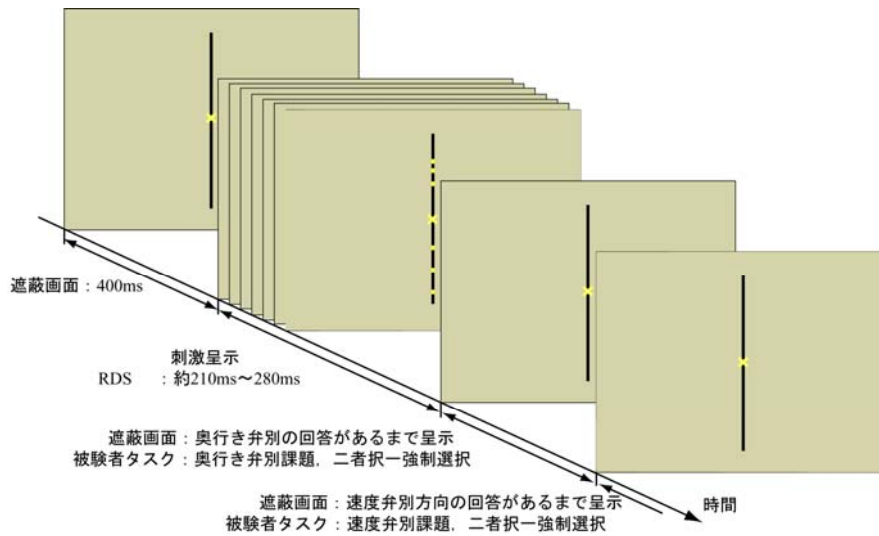


図 8-3 速度弁別実験パラダイム

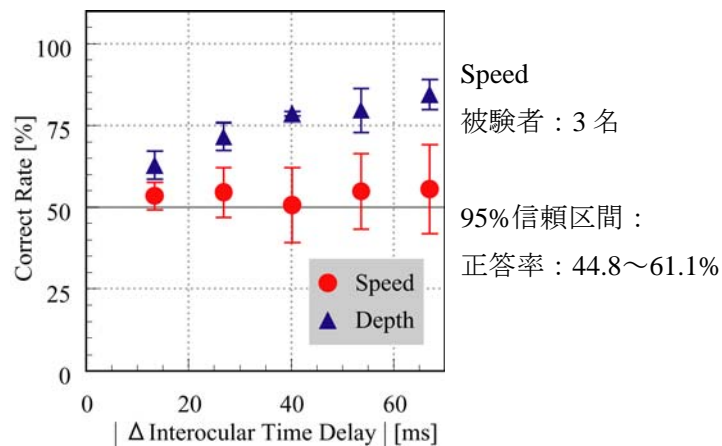


図 8-4 奥行き・速度弁別の比較

8.3. おわりに

眼間時差は、奥行きと運動情報の両方を与えると考えられる。しかし、曖昧な眼間時差からは、奥行きと運動速度を同時に決定できない。眼間時差から奥行きが生じることから、速度については眼間時差に依存しないという仮説を立てた。つまり、速度の弁別は不可能であると考え、心理物理学的に検討した。

実験結果、眼間時差から生じる速度知覚の弁別はできないことが明らかになった。これは、眼間時差より生じる速度知覚が、眼間時差に依存しないことを示唆する。

第9章 眼間時差により生じる速度知覚の定量評価

9.1. はじめに

これまでの章で、眼間時差だけが与えられる条件下で、速度弁別はできないが奥行き弁別が可能であることを示した。また眼間時差から生じる奥行き量は、既知の空間視差と比較可能であり、眼間時差に依存にした奥行き量が生じることを示した。

眼間時差だけが与えられるスリット視条件下では、奥行きと速度には密接な関係が存在する。なぜならば、ある速度で運動する物体の空間視差が、速度に依存した眼間時差に置換されるからである。2つの物体が同一速度で並進し異なる空間視差を持つ場合ならば、眼間時差は異なることになる。もしくは2つの物体が同一の空間視差で速度が異なる場合でも、眼間時差が異なる。つまり、眼間時差だけが与えられる条件下では、奥行きと速度が同時には決定できない。もし奥行きか速度のどちらかを眼間時差により決定するならば、他方は眼間時差に依存しないと考える必要がある。これまでの章で眼間時差に依存した奥行き知覚が生じることから、視覚系において、速度は眼間時差に依存せずに決定されると考えられる。本研究では、この仮説を検討するために、眼間時差だけから生じる速度知覚を定量的に測定する評価実験を行う。もし仮説が正しいのならば、眼間時差の大きさに無関係に速度知覚が生じるはずである。

実験結果から、眼間時差だけが与えられた場合、速度は眼間時差に依存せずに知覚されることを示す。このことは、視覚系が、眼間時差から奥行き知覚を優先して決定していることを示唆する。

9.2. 眼間時差により生じる速度知覚の定量評価

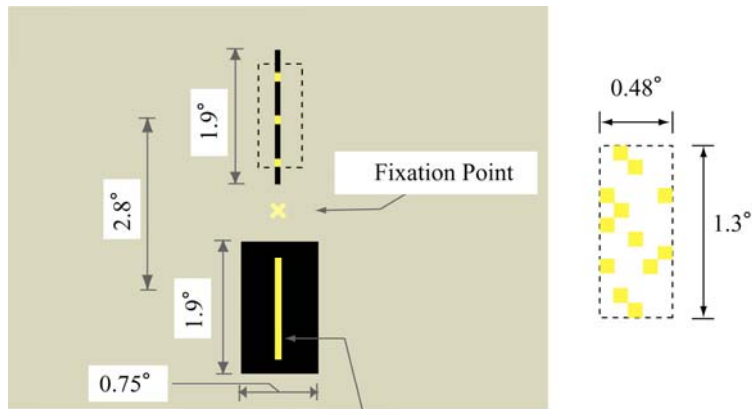
実験刺激の詳細・パラダイムを図 9-1, 図 9-2 に示す。上部スリットは幅 1pixel であり眼間時差だけをもつ刺激を呈示できる。下部スリットはリファレンス刺激の速度が明示できるように十分幅を広くした。明示的な速度を持つリファレンスと比較し、恒常法を用いて、眼間時差から生じる速度を定量的に評価した。RDS 刺激の眼間時差は、 ± 33.5 , ± 60.3 , ± 87.1 ms と ± 20.1 , ± 46.9 , ± 73.4 , ± 100.5 ms の 2 通りで 3 段階と 4 段階

を設定した。眼間時差が正の場合は、左眼像が先行する場合とした。7段階の眼間時差に対してリファレンス刺激の速度を 1.4~4.2deg/s まで 0.25deg/s 間隔で 11 段階呈示した。またリファレンス刺激の空間視差は 0min に設定した。リファレンス刺激の運動方向はテスト刺激の眼間時差が正の場合、左方向に運動させ、負の場合は右方向に運動させた。被験者は、2つ同時に呈示されるテスト刺激とリファレンス刺激のどちらがより速く運動して見えたか二者択一強制選択で回答した。被験者は、矯正により正常な視力を有する成人した男女の3名である。各被験者は、3段階、もしくは4段階の眼間時差に対する11段階のパラメータに対して10試行、それぞれ計330、もしくは440試行を1セットとし、4セット行った。この2通り設定した実験を行った。

実験結果を眼間時差の符号別で図 9-3 に、まとめたものを図 9-4 に示す。グラフは Logistic Function で Curve Fitting し 50% Threshold の値を計算した結果をプロットしたものである。横軸は RDS 刺激の眼間時差[ms]を示している。縦軸はリファレンス刺激の速度[deg/s]を示している。リファレンス速度の正は左方向で、負は右方向の運動を示す。エラーバーは Curve Fitting 時の残差標準偏差である。グラフの灰色直線はリファレンス刺激の呈示範囲の平均値である 2.8deg/s の速度の位置を示している。

図 9-3 から分かるように、眼間時差の符号に関わらず知覚された速度はほぼ一様である。図 9-4 より、眼間時差の符号が反転すると知覚される速度も反転することがわかる。また速度の大きさは、眼間時差の正負に関係なくほぼ等しいことが分かる。この速度はリファレンス刺激の呈示速度範囲の平均速度の値に近い。

このことから眼間時差だけが与えられる条件下において、速度は眼間時差に依存せず知覚されることが明らかになった。



リファレンス：視差0 min（左右に運動）
 パラメータ：速度，1.4～4.2 deg/s (0.25間隔)

図 9-1 速度評価実験刺激詳細

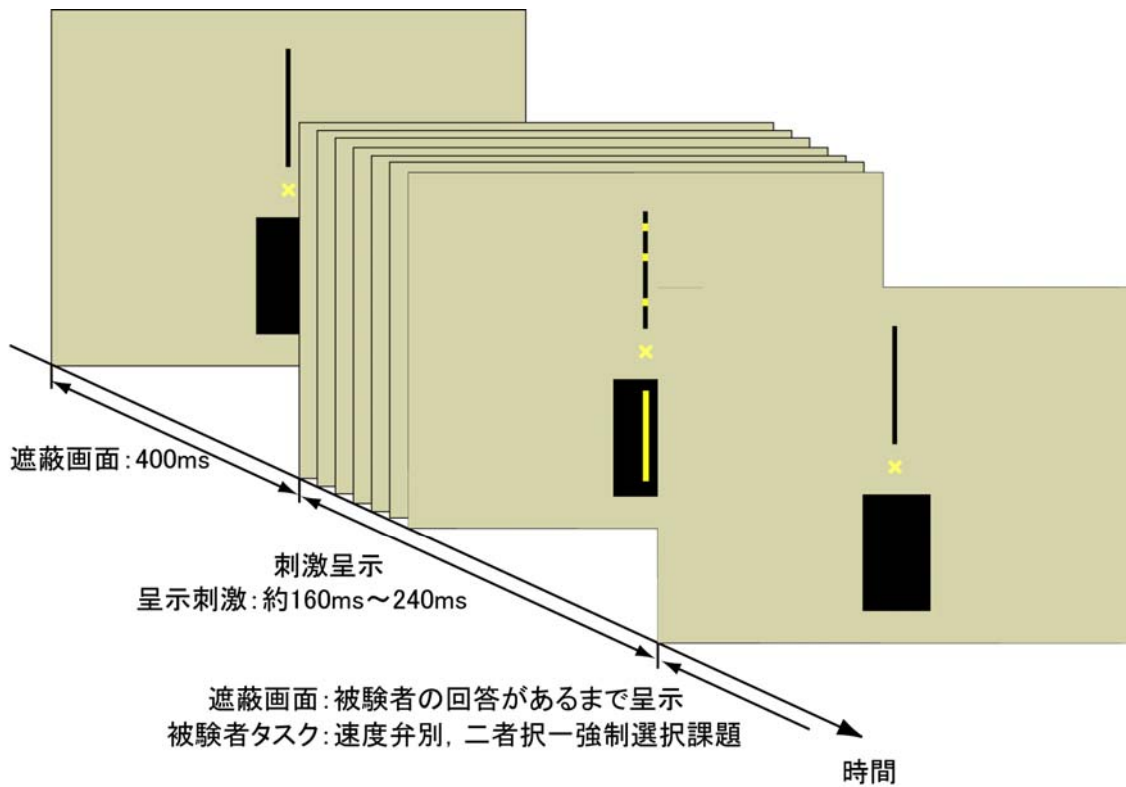


図 9-2 速度の定量評価実験パラダイム

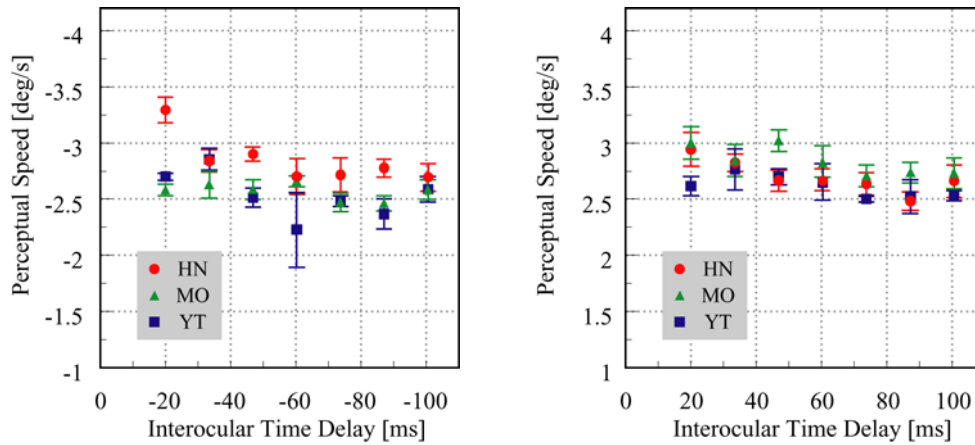


図 9-3 眼間時差から生じる速度知覚の定量評価 (左-負符号, 右-正符号)

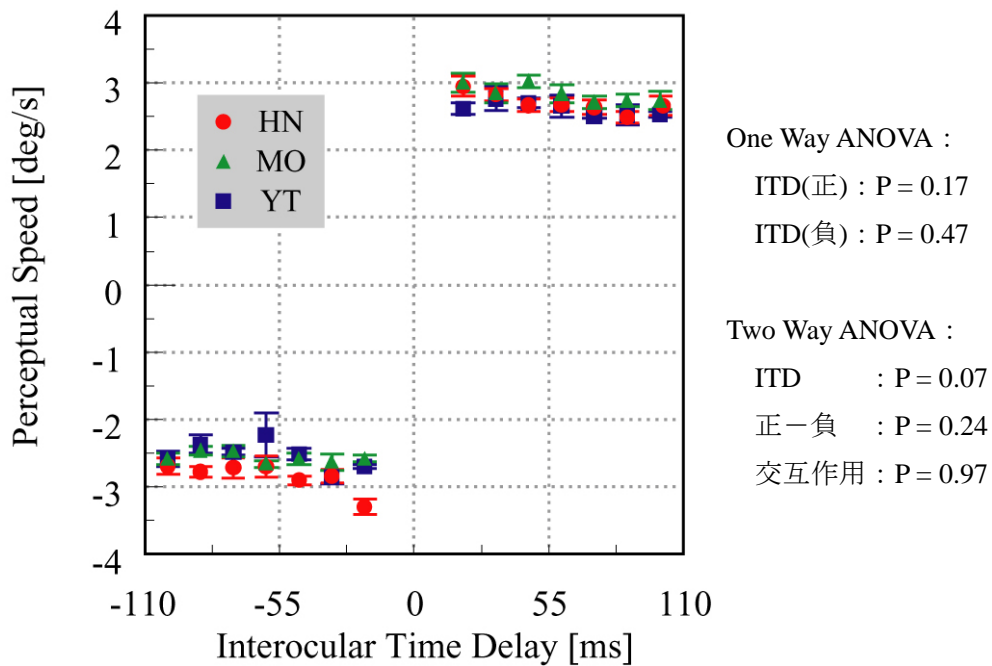


図 9-4 眼間時差から生じる速度知覚の定量評価

9.3. おわりに

この章では、眼間時差だけが与えられる条件下では、奥行きと速度が同時には決定できないことから、速度は決定できないという仮説を立て心理物理学的に検討した。

眼間時差から知覚される速度は，眼間時差の値に依存しないことが明らかになった．また，速度が眼間時差に関係なく一様に知覚されることから，視覚系は速度を尤もらしいものに仮定することで，奥行き知覚を優先的に決定するメカニズムが存在することを示唆する．そして，奥行き知覚が眼間時差に依存し，知覚される速度は依存しないことから，視覚系が奥行きと速度を同時に決定しているということが示唆する．

第10章 速度知覚に対するリファレンスの影響

10.1. はじめに

眼間時差から生じる速度は、眼間時差に依存せずに一様に知覚されることを示した。これは、奥行きを優先して決定するメカニズムが視覚系に存在することを示唆する。このとき視覚系は、おそらく尤もらしい速度を適当に仮定しているのでないか。では、視覚系はどのようにして視覚刺激の速度を決定しているのだろうか？もしこの速度が視覚系の処理において意味のある速度であるならば、どのような条件でも同様の速度に知覚される可能性がある。または次のようにも考えられる。第9章の速度評価実験では、明示的な速度を持つリファレンス刺激を用いることで定量的な速度測定を行った。その結果、知覚された速度は、リファレンス刺激の速度呈示範囲の平均値であった。このことから、眼間時差からは速度を決定することができないため、視覚系が、明示的なリファレンス速度を参照した可能性がある。つまり知覚される速度は不安定であり、リファレンスの呈示速度範囲が変化するとその影響を受ける可能性がある。この章では、リファレンス速度の呈示範囲が、眼間時差から生じる速度知覚に影響を与えるかどうか心理学的に検討する。もし知覚された速度が視覚系で重要な意味を持つのであれば、リファレンスに依存しないと考えられる。しかし、そうでないのであれば単純にリファレンスの呈示速度の平均値に追従すると考えられる。

実験の結果、眼間時差から生じる速度は、リファレンス速度の影響を受けることを示す。しかし、リファレンス速度が非常に速いときには平均速度には知覚されない。このことから、ある程度の尤もらしい速度というものが、視覚系の奥行き・速度生成メカニズムに存在するのではないかと考えられる。

10.2. リファレンス速度の範囲に対する速度知覚の影響

実験は、9.2の実験と同様に行った。実験環境も同様である(図9-1, 図9-2を参照)。実験条件で異なるのは、呈示した眼間時差が ± 33.5 , ± 60.3 , ± 87.1 ms であることと、リファレンス刺激の速度の範囲が3通りあることである。明示的な速度を持つリファレ

ンスの速度は、平均速度が 2.8deg/s である 9.2 と同様の速度範囲、平均速度が 2.1deg/s である 0.7~3.5deg/s の範囲、平均速度が 3.5deg/s である 2.1~4.9deg/s の 3 条件とした。全ての実験において、リファレンス速度は 0.25deg/s 間隔の 11 段階に設定した。被験者には 2 つ同時に呈示されるテスト刺激とリファレンス刺激のどちらがより速く運動して見えたか二者択一強制選択で回答させた。被験者は、3 つの実験それぞれにおいて、11 段階設定したパラメータに対し 10 試行、合計 330 試行を 1 セットとした実験を 4 セット行った。

実験結果を図 10-1, 図 10-2, 図 10-3 に示す。また図 10-4 にリファレンス刺激の呈示速度の平均値と知覚された速度の関係を示す。図 10-1, 図 10-2, 図 10-3 のグラフは、実験により得られた結果に対し Logistic Function で Curve Fitting し、50% Threshold の値を計算してプロットしたものである。横軸は RDS テスト刺激の眼間時差[ms]を絶対値で示している。縦軸はリファレンス刺激の速度[deg/s]を示している。エラーバーは Curve Fitting 時の残差標準偏差である。グラフの灰色直線はリファレンス刺激の呈示範囲の平均速度であり、それぞれ 2.1, 2.8, 3.5deg/s の値を示している。図 10-4 のグラフは、図 10-1, 図 10-2, 図 10-3 の結果をリプロットしたデータで、横軸はリファレンス刺激の平均速度であり、縦軸は 50% Threshold の値である。

図 10-1, 図 10-2 から、リファレンス速度の呈示範囲が 0.7~3.5deg/s と 1.4~4.2deg/s の場合では、眼間時差から生じる速度は、リファレンス刺激の平均速度に近い速度で知覚されていることが分かる。図 10-3 より、リファレンス速度の呈示範囲 2.1~4.9deg/s の場合では、平均速度より低い値で知覚されている。図 10-4 のリファレンスの平均速度に注目したグラフを見ると、知覚される速度がリファレンスの平均速度の増加に伴って、知覚される速度も増加していることが分かる。

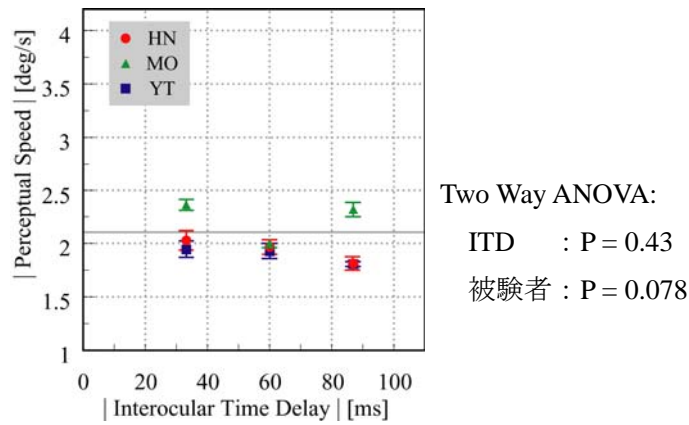


図 10-1 速度評価 (リファレンス平均速度 2.1deg/s, 範囲 0.7~3.5deg/s)

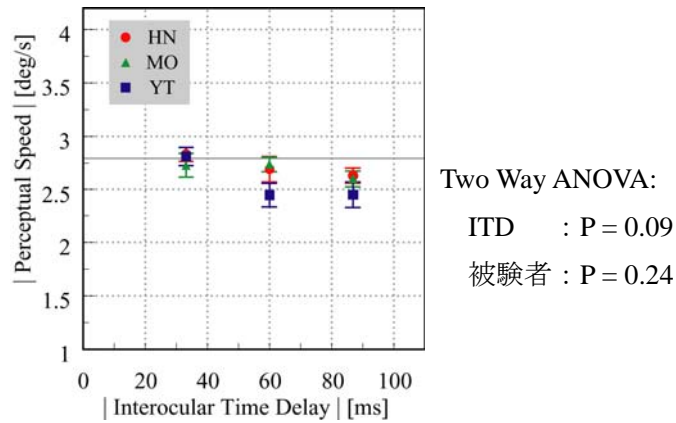


図 10-2 速度評価 (リファレンス平均速度 2.8deg/s, 範囲 1.4~4.2deg/s)

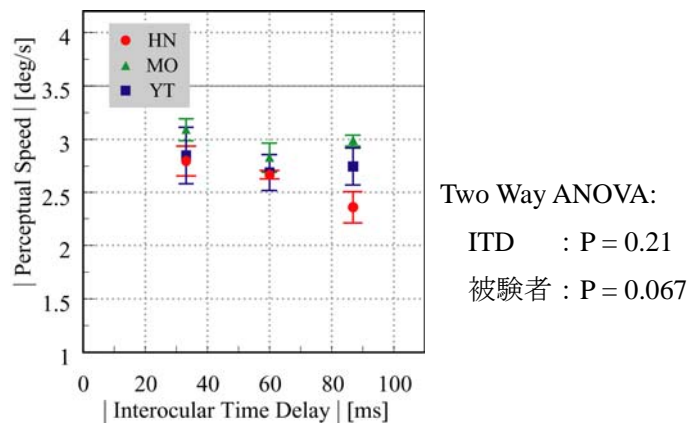


図 10-3 速度評価 (リファレンス平均速度 3.5deg/s, 範囲 2.1~4.9deg/s)

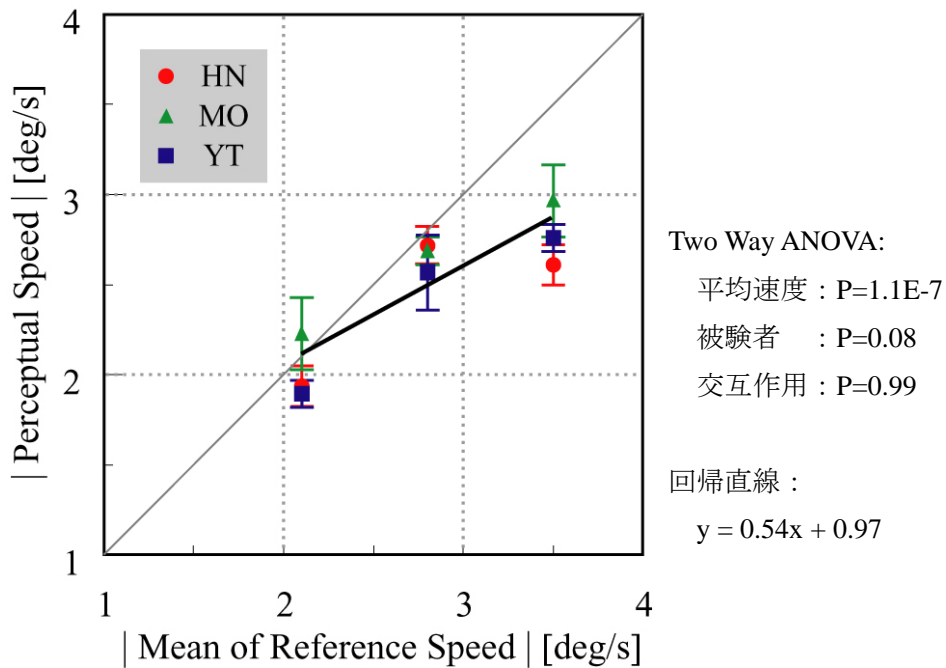


図 10-4 リファレンス速度範囲と知覚速度

10.3. おわりに

曖昧な眼間時差からは奥行き知覚だけが決定し速度は決定できない。このことは視覚系が速度を尤もらしいものに仮定して、奥行きを優先して決定するメカニズムが存在することを示唆する。この章では、このときに仮定する速度は何によって決まるのかを検討した。特に、リファレンス刺激の平均速度に注目して心理物理実験を行った。

実験の結果、リファレンスの呈示範囲速度が遅い場合は、眼間時差より生じる速度知覚は影響を受け、平均速度付近の速度で知覚されることが明らかになった。ただし、リファレンス速度が非常に速い時は、その平均速度には知覚されない。

このことから、視覚系が仮定する速度は、不安定であり明示的なリファレンス速度を参照していることが示唆される。しかし、その速度が非常に速い場合はその影響を受けないことから、視覚系が仮定する速度にはある程度の尤もらしい速度というものが奥行き・速度生成メカニズムの基礎部分に存在するのではないかと考えられる。

第11章 眼間時差により生じる速度知覚 に対するリファレンス速度の時間 変化の影響

11.1. はじめに

第9章では、眼間時差により生じる速度知覚が、眼間時差に依存しないことを示した。このことから視覚系には奥行き知覚を優先するメカニズムが存在すること、速度をある適当な速度に仮定することが示唆された。第10章では、知覚される速度は明示的な速度を持つリファレンスに依存することが示唆された。ただし、非常に速い速度に対しては影響を受けないことから、視覚系が仮定する速度には、尤もらしい速度という概念が、奥行き・速度知覚の生成メカニズムに存在するのではないと考えられる。この章では、視覚系が仮定する速度がどのようにして決定するのかについて検討する。

第10章において、眼間時差により生じる速度知覚がリファレンス刺激の遅い速度範囲に影響を受けることが示された。このとき、視覚系はどの時点で知覚速度の変移を生じるのだろうか？明示的なリファレンスが呈示されるたび少しずつ修正するのだろうか？それともある程度の時間（呈示回数）が必要なのであろうか？このことを調べるために、リファレンスの速度範囲を途中で変更する実験を構築した。

実験の結果から、リファレンスの呈示範囲を変化させた場合、早い段階で知覚される速度もその平均速度に追従して変化することを示す。このことから、視覚系が外界の情報に対して、柔軟かつ迅速に対処するのではないかと考えられる。

11.2. リファレンス速度範囲の時間変化に対する速度知覚

実験は、10.2と同様に行った。実験環境を図11-1に示す（実験パラダイムは図9-2を参照）。10.2の実験と異なる条件は、RDSのテスト刺激が持つ眼間時差を $\pm 46.9\text{ms}$ だけを呈示したことと、リファレンス刺激の呈示速度の制御が異なることである。リファレンスの速度は、実験の試行開始から全体の半分の試行までの前半部分と、半分から最後までの後半部分で速度呈示範囲を変更した。変化のパターンは2通り設定した。前半

部分を 1.4 ~ 4.2 deg/s の平均速度 2.8deg/s とし、後半を 0.7 ~ 3.5 deg/s の平均速度 2.1deg/s とする速い速度から遅い速度へ変化す条件と、反対に遅い速度から速い速度へ変化するパターンである。前半、後半ともにタスク終了に約 15 分かかる。被験者には、実験中にリファレンス刺激の呈示速度範囲が変化することを教示しなかった。この条件下で、眼間時差から生じる速度知覚の定量的な評価実験を行った。被験者は矯正することで正常な視力を持つ成人した男女の 3 名で行った。被験者には、2 つ同時に呈示されるテスト刺激をリファレンス刺激のどちらがより速く見えたか二者択一強制選択で回答させた。2 パターンの実験において、前後半の 11 段階のリファレンス速度それぞれに対し 20 試行、合計 440 試行を 1 セットとして、2 セット行った。

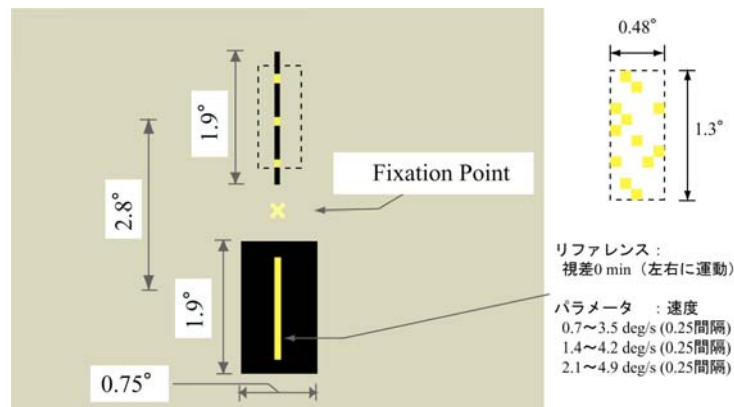


図 11-1 リファレンス平均速度変化実験

実験結果を図 11-2, 図 11-3 に示す。グラフの横軸は、実験開始からの試行回数を示している。縦軸は、知覚された速度[deg/s]を示している。プロットデータは恒常法で求めた 50% Threshold の値で、エラーバーは Curve Fitting 時の残差標準偏差である。リファレンス速度の変化地点は試行回数が 220 回のときであり、221 試行から後半のリファレンス速度範囲に切り替わるように設定した。

図 11-2 より、被験者により知覚された速度に違いはあるが各被験者で見ると、MO, YT では、前半部分（試行回数 110, 220 回）の時点で平均値 2.1deg/s のリファレンス速度に影響を受け、後半部分（330, 440 回）の時点では平均値 2.8deg/s のリファレンス速度に影響を受けいている。それに対し、HN は最後まで、リファレンスの平均速度 2.1deg/s

に影響を受けている。図 11-3 の結果では、全ての被験者が、前半部分では、リファレンス速度の平均値 2.8deg/s に影響を受けており、後半部分ではリファレンス速度の平均値 2.1deg/s に影響を受けている。

以上の結果から、知覚速度に個人差はあるが、低速から高速に変化する場合も高速から低速に変化する場合も、リファレンス刺激の呈示速度変化に早い段階で影響を受けることが示唆された。これらのことから、視覚系が、明示的なリファレンス速度が適当な値の場合に影響を受けること、かつ早い段階でその速度の平均値に知覚速度が近づくことが示唆された。

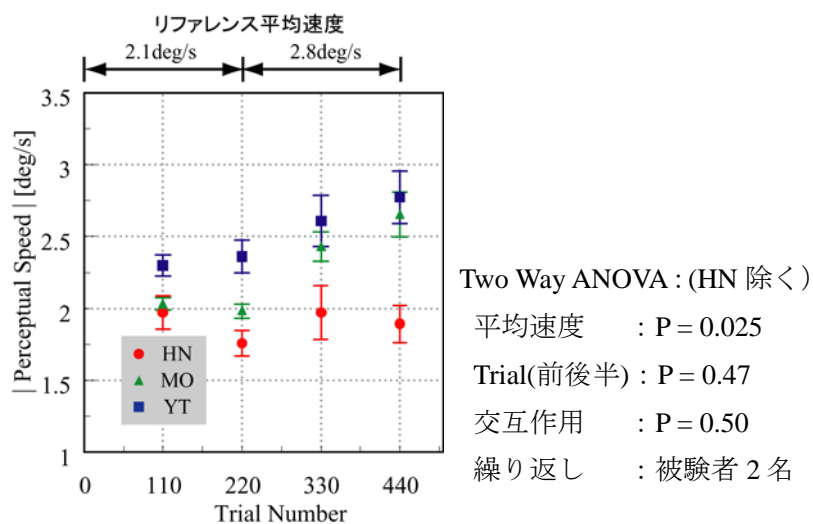


図 11-2 低速から高速へ変化する条件での速度知覚 (2.1 → 2.8deg/s)

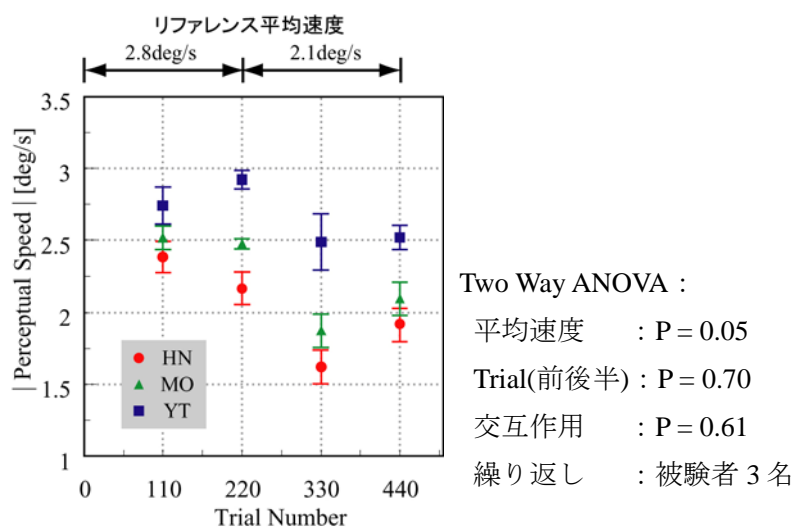


図 11-3 高速から低速へ変化する条件での速度知覚 (2.8 → 2.1deg/s)

11.3. おわりに

眼間時差により生じる速度知覚がリファレンス刺激の遅い速度範囲に影響を受けることから、どの程度の段階で、視覚系がその速度に影響を受けるのかについて検討した。

実験の結果、リファレンス速度が遅い速度から速い速度にシフトした場合も、その反対の場合でも、知覚される速度はその平均値に早い段階でシフトすることが示された。このことから、視覚系が、奥行き・運動知覚の生成において非常に柔軟に外界の情報に対処していることが示唆される。

第12章 結言

12.1. 議論・今後の課題

純粋な眼間時差だけの情報により奥行き知覚と運動方向の知覚が決定すること、速度については眼間時差に依存せずに一様に知覚されるという結果について、生理学的知見・心理物理学的知見と比較して議論をする。

生理学実験により、ネコの線条皮質（エリア 17/18）において様々な奥行き・速度にチューニングしている V1 細胞が報告されている[1]。これら V1 の細胞の例を図 12-1 に示す。上段は Anzai らの生理実験から報告された細胞反応プロファイルで、左図は左眼から入力を受ける単眼性プロファイル、中央は左右眼から入力を受ける両眼性のプロファイル、右図は右眼から入力を受ける単眼性プロファイルを示している。下段は、これらのプロファイルを分かり易いように簡略化したものである。各グラフの横軸は、それぞれ単眼へ入力される刺激位置の視差[deg]と両眼間における刺激位置の視差[deg]（両眼視差）を示し、縦軸は単眼もしくは両眼間への入力の時間差[ms]（眼間時差）を示している。緑の領域は興奮性領域を示し、赤は抑制性領域を示す。単眼性プロファイルでは、傾きの符号はその細胞のチューニング運動方向を示し（図 12-1 は左方向チューニング）、傾きの大きさはチューニング速度を表している。両眼性プロファイルでは、どの両眼視差にチューニングしているのかを示している。横軸と原点で交差する場合は固視点付近にチューニングし、それ以外は固視点より遠い奥行き（Far Tuned）、もしくは近い奥行き(Near Tuned)にチューニングしていることを示す(図 12-1 は Near Tuned)。Anzai らの報告では、ほとんどの V1 細胞において単眼・両眼性プロファイルの傾きが同じであると報告している。このことから、V1 細胞において奥行きと速度が同時に決定されているのではないかと提案している。

V1 細胞の奥行き・運動方向のチューニングの組み合わせに注目すると、図 12-2 のような 4 つのタイプに分類できる。それは、固視点より遠い奥行きで左方向の運動(Far-Left)、固視点より近い奥行きで左方向の運動 (Near-Left)、固視点より遠い奥行きで右方向の運動(Far-Right)、固視点より近い奥行きで右方向の運動(Near-Right)の 4 つである。速度についてはプロファイルの傾きで決定される。このようなタイプの V1 細胞を用いて、視覚系が眼間時差に対してどのような知覚を決定可能であるだろうか？大別

して次の3つの仮説が考えられる。

- (i) 無決定仮説：奥行き・速度のどちらも決定しない（図 12-3(a)）
- (ii) 速度優先仮説：眼間時差から速度だけを決定するために、奥行きを一定と仮定する（図 12-3(b)）
- (iii) 奥行き優先仮説：眼間時差から奥行きだけを決定するために、速度を一定と仮定する（図 12-3(c)）

これらの3つの仮説の特徴について説明する。無決定仮説は、視覚系が、眼間時差に対し様々な奥行きと速度にチューニングする V1 細胞の反応を選択する場合である。この仮説では、図 12-3(a)のように1つの眼間時差入力に対して、複数の V1 細胞が異なる奥行き・速度を報告するために、そのどちらも決定できない。速度優先仮説は、視覚系が奥行きを一定と仮定した上で眼間時差を処理すると考えた場合である。この仮説では、図 12-3(b)のように特定の空間視差に対し興奮性を示す細胞の反応だけを用いることで、異なる眼間時差から速度だけを決定できる。つまり、この仮説では、異なる眼間時差入力に対して、必ず異なる傾きを持つプロファイルの反応だけを取得できるため、その傾きから決定できる速度が算出されることになる。奥行き優先仮説は、視覚系が速度を一定と仮定すると考えた場合である。この仮説では、視覚系が図 12-3(c)で示すように同一の傾きを持つプロファイルだけを選択する。そのため異なる眼間時差に対して反応を示すプロファイルは、異なる奥行きにチューニングしている。つまり、異なる眼間時差に反応を示す細胞は異なる奥行きに反応するため、眼間時差から奥行きを決定できる。これらの仮説は、第7章、第9章の結果から導き出された眼間時差だけが与えられた場合、速度は一樣に知覚され奥行き知覚が決定するという本研究の心理物理実験の結果と一致する。このことから、視覚系が図 12-3(c)に示す奥行き優先仮説を適用していることを示唆する。

視覚系が、眼間時差だけから奥行き知覚を優先して生成するとしても、まだ奥行きと運動方向を一意には決定できない。なぜならば図 12-4(a)に示すように、速度を一定と仮定しても、固視点に対し手前かつ右方向の運動にチューニングしている細胞と、固視

点より奥かつ左方向の運動にチューニングしている細胞が共に反応するからである。つまり、眼間時差に対して2通りの解釈が存在する。しかしながら、この問題の解決策として、1つの方法が提案される。第5章、第6章で述べたように眼間時差により生じる奥行きと運動方向の知覚は、そもそも奥にバイアスがあるという可能性である。つまり、視覚系は眼間時差により生じる知覚は常に奥と解釈して、固視点より手前の奥行きと解釈する細胞の反応を選択せず、固視点より奥であるという細胞の発火を選択することで、奥行きと運動方向を同時に決定できる。

以上の2つの制約条件により、視覚系は曖昧な眼間時差から奥行き・運動方向・速度の知覚を生成することが可能である。つまり、眼間時差が奥にバイアスを持つということで共変性の解釈を一意に決定するメカニズムと（図 12-5(a)）、速度を一定と規定することで眼間時差より奥行き知覚を優先的に決定するメカニズム（図 12-5(b)）の2つの制約が、初期視覚における皮質メカニズムにおいて、曖昧な視覚情報から瞬時に尤もらしい知覚を生じさせる頑健なメカニズムの第1段階を担っていることを示唆する。

しかしながら、この2つ制約条件を用いる仮説には、検討すべき問題もいくつか残っている。1つは、視覚系が眼間時差に依存せずに尤もらしい速度を仮定するということである。奥行き優先仮説では、速度を規定することで眼間時差から奥行き量を決定するため、この速度の規定条件が重要となる。この尤もらしい速度については、生理学的観点より次の解釈が存在する。それぞれの速度にチューニングしている V1 細胞の比率による偏り、つまり初期視覚の細胞集団の体系により、最も総数が多い細胞の影響を受けると解釈である。しかしながら、V1 における細胞集団の比率については、まだ良く知られていない。この点に関して、Read らが次のような主張をしている。Anzai ら[1]と Pack ら[2]の生理実験の比較より、両眼性プロファイルにおいて傾きを持つ V1 細胞は、ネコの線条皮質における比率と比較するとマカクザルの V1 細胞ではその割合が低いことを指摘している。また Read らは、生理実験の結果から、マカクザルの V1 で発見された細胞は、両眼性の時空間プロファイルで傾きを持つものがほとんど存在しないことも報告している[24][25]。Read らの主張が正しいとした場合でも、心理物理実験の結果から奥行きと運動の知覚は同時に決定される可能性があることから、このメカニズムが V1 において完結していないということを示唆するに留まる。ではその場合、頑健

なメカニズムがどこに存在するのだろうか？それはおそらく MT にあるであろう。その根拠として、MT 細胞のほとんどが、運動方向選択性を持ち、また約 2/3 が両眼視差にも選択性を持つことが知られている[19][20]。このことから、奥行き優先仮説が V1 ではなく、MT において行われている可能性もある。従来の生理学研究で、MT 細胞において時空間的にチューニングしている細胞が報告されている[2][24][28][29][30]。これらの従来研究の主張の対立により、奥行き・運動の知覚が V1 において同時に処理されているということに関しての議論はまだ決着はしていない。今後、サルの V1, MT における細胞集団の時空間特性の解明や大規模な比率を検討する生理実験が行われることにより、この問題の決着を見ることを期待する。

2つ目は、眼間時差から生じる知覚が奥にバイアスがあるという仮説である。更にこのことは、眼間時差が暗に遮蔽の存在を規定している可能性もある。Tyler[23]の実験では、刺激面の広範囲の様々な位置において眼間時差を持つ刺激を呈示した結果、固視点の手前で運動する刺激を知覚している。このことは、本研究で得られた眼間時差が与えられた場合に常に奥とバイアスがあるという結果と一致しない。しかし、彼らの実験と本研究の実験の大きな違いが存在する。それは眼間時差の呈示条件である。本研究における眼間時差の呈示位置は幅 1pixel の鉛直スリットまたは水平スリットの背後であり、遮蔽情報が明示・暗示されている。この 1pixel に並んだ眼間時差について、様々なカモフラージュを用いた実験による奥行き知覚の検証した心理物理実験により報告されている（谷，酒井）。彼らの実験では、スリットを不可視にした状態でスリット上の様々な位置で固視点の前後に空間視差の奥行きを持つ RDS 刺激を分布させた。これによりスリットの存在をカモフラージュし、かつ眼間時差より生じる奥行き量より奥の RDS 刺激を呈示することで、スリットによる遮蔽の情報を打ち消すことを試みた。それでもなお、眼間時差からの生じる奥行き知覚は固視点より奥にのみ知覚される結果となった。このことから、そもそも眼間時差が奥にバイアスがあることを示唆する、更に暗に遮蔽の規定により奥行きオーダーを決定するかもしれない。奥行きと運動方向の知覚の生成メカニズムが V1 において存在するならば、この奥行きオーダー手がかりは、どのようにして V1 に伝達するのだろうか？遮蔽情報のオーダー規定メカニズムは、最近の研究により V1, V2 もしくは V4 の腹側経路において行われていることが報告されている。

この領域で規定した奥行きオーダー手がかりを参照することで、奥行き知覚を生成するのであるならば、V1 領域の背側経路へのフィードバックの存在が必要である。しかし、もし MT においてこれらの奥行きと運動方向の知覚の生成が決定するのであれば、遮蔽情報は MT へ伝達されれば良い。MT から V2 へのフィードバック、もしくは MT と V4 の繊維連絡は存在するため、これらの結合が奥行きオーダー手がかりの伝達に参与している可能性がある。このように、奥行き・運動知覚の生成メカニズムは、初期視覚の V1 領域で完結しているのではなく、V2, V4, MT へと階層構造により頑健なメカニズムを構築している可能性も考えられる。

以上、眼間時差から生じる奥行きと運動の知覚の生成メカニズムについての心理物理学・生理学的知見から考えられる仮説、本研究の結果との比較をしながら、議論・考察を行った。これらのことから、曖昧情報からの奥行き・運動知覚の生成メカニズムを解明するためには、生理学の観点から、両眼性の細胞集団の比率の調査を V1 もしくは MT の領域で検討していく必要があると考えられる。また、眼間時差のバイアス、もしくは遮蔽情報の寄与のメカニズムの解明のために背側経路・腹側経路の結合についても検討が必要である。

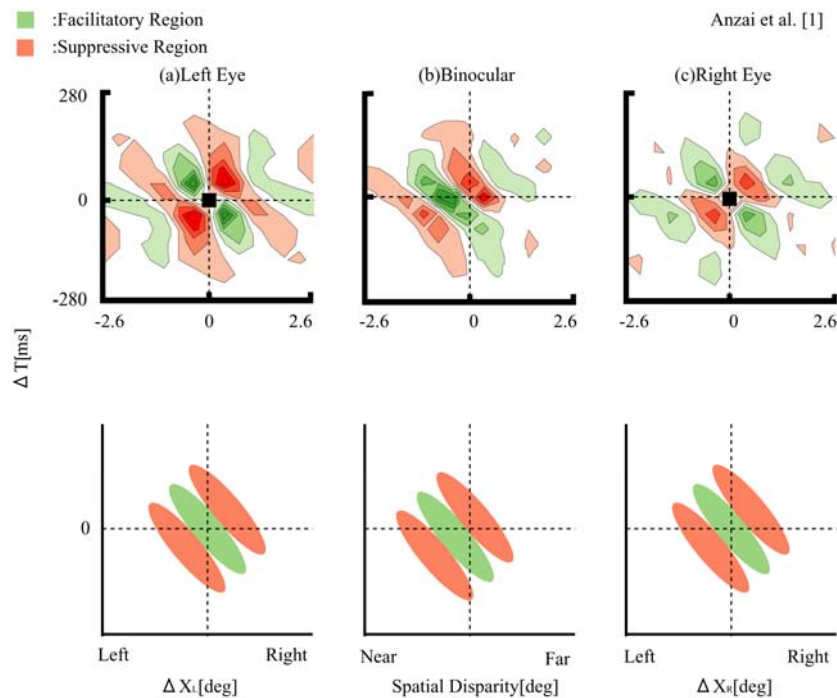


図 12-1 生理実験により報告された V1 細胞：単眼・両眼性プロファイル

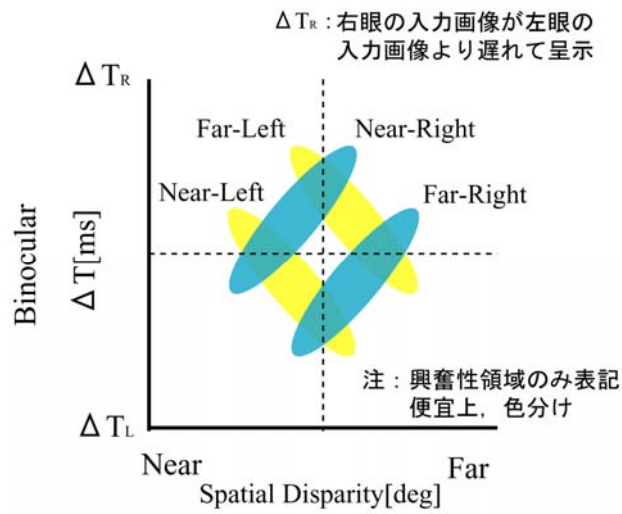


図 12-2 4つの両眼性プロファイル

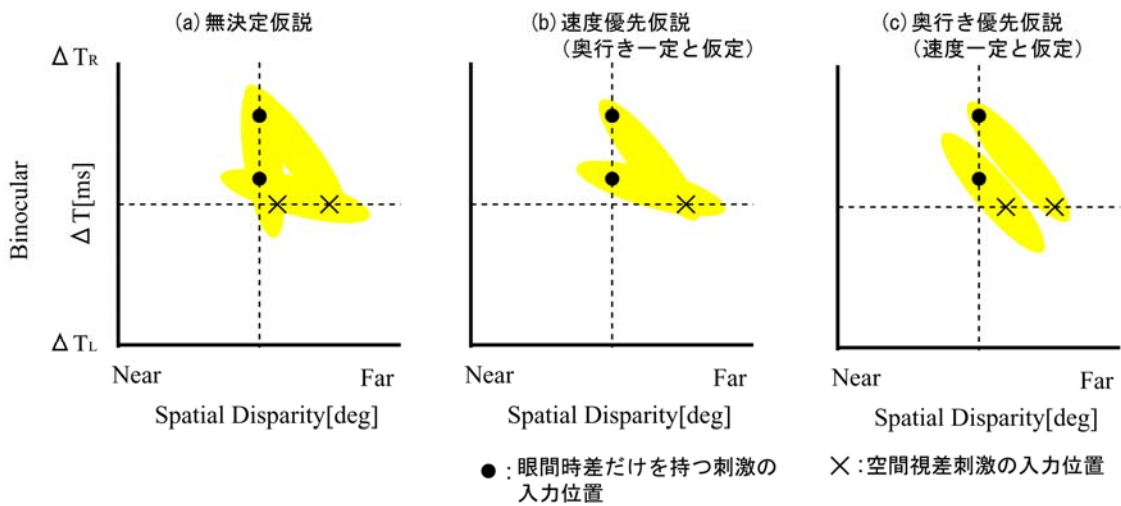


図 12-3 V1細胞のプロファイルにより導出可能な3仮説

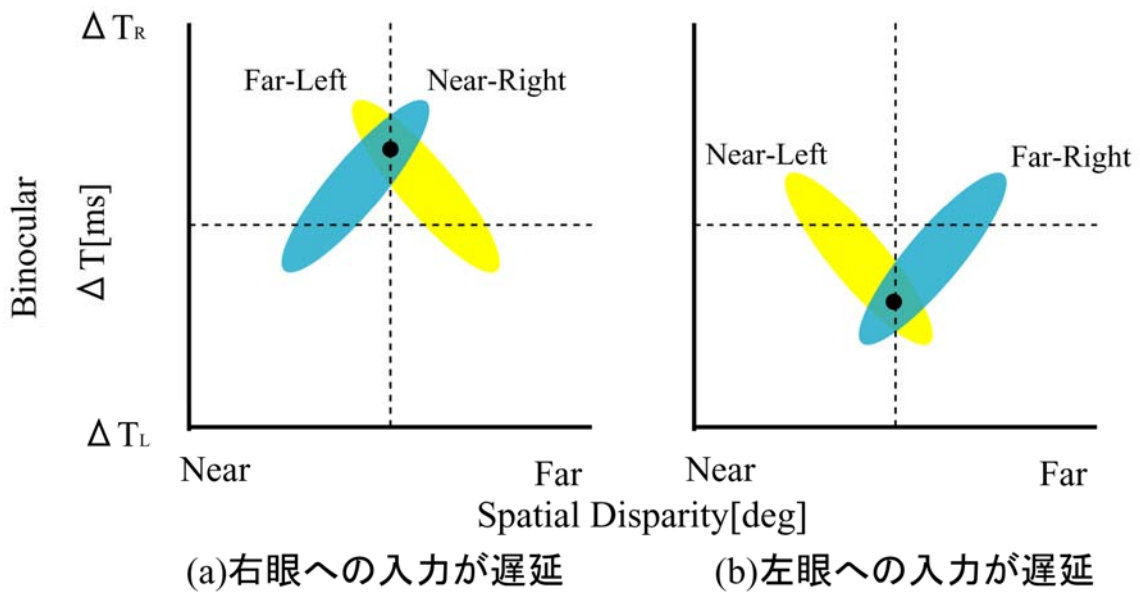


図 12-4 眼間時差入力に対する 2通りの奥行き・運動方向解釈

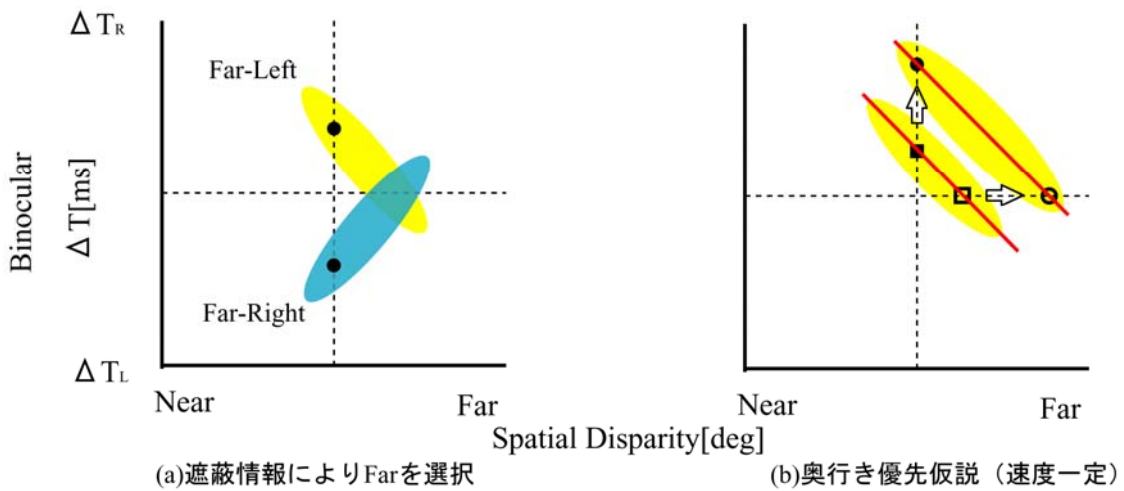


図 12-5 2つの制約条件により導かれる奥行き・運動知覚の生成メカニズム

12.2. 本研究のまとめ・結論

視覚系が曖昧な眼間時差からどのような奥行きと運動の知覚を生成するかについて定性的かつ定量的に解明することを目的として、心理物理学的に研究を行った。その結果をまとめる。

第2章では、眼間時差により生じる奥行きと運動知覚を検討するため、スリット視に

両眼性情報を用いる実験を提案した。これにより両眼視差・運動・面・遮蔽・単眼情報など様々な視覚情報を同時に制御することを可能とした。従来の研究では、スリット視において両眼視差が有効であるかどうか検討されていないため、スリット視の基礎について検討した。その結果、スリット視において空間視差・眼間時差の両方の視覚情報から奥行き知覚が生じることを示した。特に幅 1pixel のスリットであっても、眼間時差から奥行き知覚が成立することを明らかにした。またスリット視の視覚現象である面情報の再構成も成立することも明らかにした。そして、眼間時差が呈示される運動過程において生じる局所部位の両眼遮蔽情報である *Da Vinci Stereo* との比較により、眼間時差の奥行き弁別が *Da Vinci Stereo* の奥行きの弁別精度より高いことを示した。更に眼間時差から生じる奥行き弁別の精度・閾値は、明確な奥行き知覚を与える空間視差と同程度であることを示した。これらのことは、曖昧な眼間時差が奥行き知覚を生成するために重要で利用可能な情報であることを示す。

第 3 章、第 4 章では眼間時差の奥行き知覚を検証するために、呈示刺激が持つ眼間時差以外の視覚情報である図形的特徴、明示的な面、眼間時差のオンセット・オフセットの呈示順序、RDS 刺激の構成要素について注目した。その結果、図形的特徴・明示的な面情報の両方が存在すると奥行き弁別の精度を向上させることを明らかにした。どちらか一方だけでは精度の向上しないことを示した。どちらの情報も持たない眼間時差だけを持つ RDS 刺激の場合でも奥行き知覚が生じることから、純粋な眼間時差だけの情報から奥行き知覚が成立することを示した。また、眼間時差がオンセット・オフセットだけしか呈示されなくても、明示的な面情報により、面の連続性が呈示されることで、オンセットの奥行き知覚が補間され、RDS 刺激のように眼間時差が連続して呈示される場合と同程度の奥行き弁別・閾値が得られることを明らかにした。オンセット・オフセットの呈示順序、RDS 刺激の構成要素は奥行き知覚の生成に無関係であることを示した。これらのことから、視覚系が、純粋な眼間時差だけの情報から奥行き知覚が生成可能であることを示す。

第 5 章、第 6 章では、眼間時差から生じる運動方向について注目し、奥行きと運動方向知覚に対する遮蔽情報の影響について検討した。曖昧な眼間時差だけからは、奥行きと運動方向には 2 通りの解釈が存在し一意に決定できないが、視覚系は遮蔽情報による

奥行きオーダー手がかりを用いることで一意に決定できることを明らかにした。また運動方向の知覚の精度は、眼間時差の大きさに依存せず高いことを明らかにした。これは、視覚系が、運動方向を眼間時差の符号（どちらの眼の視覚刺激が先行して入力されたか）で決定できるからと考えられる。遮蔽物が不可視の場合であっても、明示的な場合と同様に、奥行きと運動方向を決定できることを明らかにした。これは、視覚系が視覚刺激の出現・消失の位置関係から暗示される不可視の遮蔽物の存在を推測可能なため、眼間時差だけから奥行き・運動方向を規定できることを示唆する。眼間時差が与える左右方向の運動手がかりと矛盾した上下方向の運動手がかりを与える明示的な遮蔽物の場合でも、矛盾しない遮蔽と同様に奥行き知覚が生じ、運動方向も左右に知覚されることを明らかにした。このことは、遮蔽情報の影響が無いことを示唆する。これらのことは、視覚系では、奥行きと運動方向を同時に処理するメカニズムが存在することを示唆し、奥行き・運動方向決定には共変性を一意に決定するために眼間時差が奥にバイアスがあることを示唆する。

第7章では、眼間時差により生じる奥行き知覚の定量評価を行った。その結果、眼間時差から生じる奥行き知覚は、既知の奥行き量を持つ空間視差とほぼ同等の奥行き量を持つことを示した。このことから眼間時差が約 100ms まで、両眼間の視覚刺激は融合可能であり、眼間時差に比例した奥行き量が生じることを明らかにした。つまり、視覚系には、眼間時差だけの情報から明確な奥行き量を生成するメカニズムが存在することを示す。

第8章、第9章では眼間時差から生じる速度について注目した。眼間時差だけでは奥行きと速度が同時に決定できないこと、かつ奥行き知覚が眼間時差に依存して決定されることから、速度が決定できないという仮説を立て、速度知覚について検討した。その結果、眼間時差から生じる速度の弁別が不可能であることを示した。定量評価により速度が眼間時差に依存せず一様に知覚されることを明らかにした。このことは、視覚系では、眼間時差から速度が決定できずに、奥行きだけが優先して決定されることを示す。

第10章、第11章では、眼間時差から決定できない知覚速度は、どのように決定されるのかについて検討した。視覚系が速度を尤もらしい値に仮定して、奥行き知覚を優先して決定するために、外界に存在する明示的な速度を参照することを示した。ただし明

示速度が、尤もらしくない非常に速い速度の場合には影響を受けないことを明らかにした。そして、外界の明示速度が変化すると、視覚系は柔軟かつ迅速に対応するために、その速度の変化に影響され知覚速度も変化することを示唆した。

この章では、心理物理実験の結果を受けて、生理学的な従来研究との比較をした。心理物理学研究は頑健なモデルを構築するための第一段階を担っていると考え、実験結果からどのような視覚システムが考えうるのかを議論した。本研究の結果が生理学的な知見を支持することを示し、視覚系では、曖昧な眼間時差から生じる奥行き・運動知覚が同時に処理するメカニズムが存在することを示唆した。

以上のことから、視覚系において、曖昧な眼間時差による奥行き・運動知覚の生成メカニズムは、柔軟かつ迅速に奥行き・運動知覚を生成するメカニズムを持つと考えられる。また曖昧情報から奥行き・運動方向知覚を規定するために、眼間時差による知覚を奥にバイアスすることで、奥行き知覚を優先して決定するために尤もらしい速度を適当に決めることができる柔軟性を持つ。これにより共変性を持つ曖昧な眼間時差に対して常に、瞬時に知覚を生成するメカニズムが視覚系にあることを示唆する。

最後に本研究の心理物理学実験の結果が、視覚系のメカニズムの解明に用いられ、頑健なメカニズムの解明が成されることを期待する。

謝辞

本研究に取り組むにあたり、長年に渡り多大なる御指導と御教授を賜りました筑波大学大学院システム情報工学研究科酒井宏准教授に心から感謝致します。酒井先生には、公私共に様々な物事について助言と援助して頂きました。更に学識・見識について学ばせて頂きました。これらが本研究に従事する上で大いに役立ち結果に繋がった事に感謝致します。

本研究を進めるにあたり有意義な助言をして頂き、かつ研究機材・装置を拝借させて頂いた同研究科平井有三教授に感謝致します。また平井有三教授をはじめ、論文審査を快諾して頂いた同研究科北脇信彦教授、椎名毅教授、福井幸男教授、小木哲朗准教授に感謝致します。多忙な中、審査のために時間を割いてくれた事、皆様から本研究に対して様々なご指摘・ご教授して頂いた事に深く感謝致します。

実験被験者を引き受けて頂いた多くの皆様、実験の助力・助言をして頂いた計算視覚科学研究室の皆様に感謝致します。

最後に、さまざまな面で支えてくれた友人、そして長年に渡り心身ともに常に支え続けてくれた家族、兄、荻谷雅宏、母、荻谷わか子に深く感謝します。

参考文献

- [1] Anzai, A., Ohzawa, I., & Freeman, R. D., "Joint-encoding of motion and depth by visual cortical neurons: Neural bases of the Pulfrich effect", *Nature Neuroscience*, 4(2001), 513-518
- [2] Pack, C. C., Born, R. T., & Livingstone, M. S., "Two-Dimensional Substructure of Stereo and motion Interactions in Macaque Visual Cortex", *Neuron*, 37(2003), 525-535
- [3] Qian, N., & Andersen, R. A., "A physiological model for motion-stereo integration and a unified explanation of Pulfrich-like phenomena", *Vision Research*, 37(1997), 1683-1698
- [4] Adelson, E. H., & Bergen, J. R., "Spatiotemporal energy models for the perception of motion", *Journal of the Optical Society of America A*, 2(1985), 284-299
- [5] DeAngelis, G. C., Ohzawa, I., & Freeman, R. D., "Receptive-field dynamics in the central visual pathways", *Trends in Neuroscience*, 18(1995), 451-458
- [6] Wheatstone, C., "Contributions to the physiology of vision – Part the first. On some remarkable and hitherto unobserved phenomena of binocular vision", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 128(1838), 371-394
- [7] Johnston, E. B., "Systematic distortions of shape from stereopsis", *Vision Research*, 31(1991), 1351-1390
- [8] Qian, N., "Binocular disparity and the perception of depth", *Neuron*, 18(1997), 359-368
- [9] Tsai, J. J., & Victor, J. D., "Reading a population code: a multi-scale neural model for representing binocular disparity", *Vision Research*, 43(2003), 445-466
- [10] Julesz, B., "Binocular depth perception of computer generated patterns" , *Bell System Technical Journal*, 39(1960), 1125-1162
- [11] Pulfrich, C., "Die Stereoscopie im Dienste der isochromen und heterochromen Photometrie", *Naturwissenschaft*, 10(1922), 553-564
- [12] Julesz B. & White B., "Short term visual memory and the Pulfrich phenomenon", *Nature*, 222(1969), 639-641.
- [13] Morgan, M. J. & Thompson, P., "Apparent motion and the Pulfrich effect", *Perception*, 4(1975), 3-18

- [14] Burr, D. C. & Ross, J. "How does binocular delay give information about depth?", *Vision Research*, 19(1979), 523-532
- [15] Rock, I., "Anorthoscopic perception", *Scientific American*, 244(1981), 103-111
- [16] Nakayama, K., Shimojo, S., "Da Vinci stereopsis: depth and subjective occluding contours from unpaired image points", *Vision Research*, 30(1990), 1811-1825
- [17] Shimojo, S., Silverman, G. H., & Nakayama, K., "An occlusion-related mechanism of depth perception based on motion and interocular sequence", *Nature*, 333(1988), 265-266
- [18] Hayashi, R., Maeda, T., Shimojo, S., & Tachi, S., "An integrative model of binocular vision: a stereo model utilizing interocularly unpaired points produces both depth and binocular rivalry", *Vision Research*, 44(2004), 2367-2380
- [19] Maunsell, J. H. R., & D. C. Van Essen, "Functional properties of neurons in middle temporal visual area of the macaque monkey. II. Binocular interactions and sensitivity to binocular disparity", *Journal of Neurophysiology*, 49(1983), 1148-1167
- [20] Albright, T. D., "Direction and orientation selectivity of neurons in visual area MT of the macaque", *Journal of Neurophysiology*, 52(1984), 1106-1130
- [21] Rodman, H. R., & Albright, T. D., "Single-unit analysis of pattern-motion selective properties in the middle temporal visual area (MT)", *Experimental Brain Research*, 75(1989), 53-64
- [22] Ross, J., "Stereopsis by binocular delay", *Nature*, 278(1974), 363-364
- [23] Tyler, C. W., "Stereopsis in dynamic visual noise", *Nature*, 250(1974), 781-782
- [24] Read, J. C. A., Cumming, B. G., "Effect of interocular delay on disparity-selective V1 neurons: relationship to stereoacuity and the pulfrich effect", *Journal of Neurophysiology*, 94(2005), 1541-1553
- [25] Read, J. C. A., Cumming, B. G., "The stroboscopic Pulfrich effect is not evidence for the joint encoding of motion and depth", *Journal of Vision*, 5(2005), 417-434
- [26] Efron, B., "Bootstrap methods: Another look at the jackknife", *Ann. Statist*, 7(1979), 1-26.
- [27] Efron, B. & Tibshirani, R. J., "An Introduction to the Bootstrap", Chapman & Hall, New York

- [28] Bradley, D. C., Qian, N., Andersen, R. A., "Integration of motion and stereopsis in middle temporal cortical area of macaques", *Nature*, 373(1995), 609-611
- [29] DeAngelis, G. C., & Newsome, W. T., "Perceptual "read-out" of conjoined direction and disparity maps in extrastriate area MT", *PLoS Biology*, 2(2004), E77
- [30] DeAngelis, G. C. & Uka, T., "Coding of horizontal disparity and velocity by MT neurons in the alert macaque", *Journal of Neurophysiology*, 89(2003), 1094-1111

自著論文

学術雑誌論文

1. Ko Sakai, Mitsuharu Ogiya, and Yuzo Hirai, "Perception of depth and motion from ambiguous binocular information", *Vision Research*, Vol.45, 2005, pp.2471-2480

国際学会論文

1. Mitsuharu Ogiya, Ko Sakai, and Yuzo Hirai, "Integration of Space and Time Leading to the Simultaneous Perception of Depth and Motion -- Perception of Objects Moving Behind a Thin Slit --", *Proc. of 9th International Conference on Neural Information Processing*, Singapore, Nov, 2002, Vol. 3, pp.1231-1235

国際学会発表

1. K. Sakai, S. Katsumata and M. Ogiya, "Simultaneous determination of depth and motion in early vision", *Computational Neuroscience Meeting 2006*, Abstract, 89
2. K. Sakai and M. Ogiya, "The role of early vision in the determination of depth and motion from ambiguous binocular information", *Computational Neuroscience Meeting 2004*, Abstract, 99
3. K. Sakai, M. Ogiya and Y. Hirai, "Perception of depth and motion from ambiguous information", *Vision Sciences Society 2004*, 2004 Annual Meeting Abstract, 107

国内学会

1. 荻谷 光晴, 酒井 宏, "眼間時差情報から生じる速度知覚", *VISION*, Vol. 18-1, 61, 2006
2. 酒井 宏, 荻谷 光晴, "眼間遅延からの奥行きと運動の知覚", *視覚科学フォーラム*, 2005
3. Mitsuharu Ogiya, Ko Sakai, "Encoding of Interocular Time Delay in Early Vision- Joint Encoding mechanism for Depth and Velocity -", *ITE Technical Report Vol 29, No.22*, 5-8, 2005
4. 荻谷 光晴, 酒井 宏, "眼間時差から生じる知覚における奥行き優先仮説", *Vision*, Vol.17-1, 73, 2005
5. Mitsuharu Ogiya, Ko Sakai, "Independence between the spatio-temporal characteristics of random dot stereogram stimuli and depth perception in single slit condition", *ITE Technical Report Vol 28, No.21*, 1-4, 2004
6. Mitsuharu Ogiya, Ko Sakai and Yuzo Hirai, "Binocular Disparity in Single Slit Condition", *ITE Technical Report Vol 27, No.23*, 41-44, 2003

7. 荻谷 光晴, 酒井 宏, "時間的な両眼視差による奥行き知覚", *Vision*, Vol.15-1, 57, 2003
8. 荻谷 光晴, 酒井 宏, "両眼視を用いたスリット運動視の奥行き知覚", *Vision*, Vol.14-1, 34, 2002