

博士論文

視覚情報提示のための
時空間統合知覚特性の研究

指導教員 館 すすむ 教授

東京大学大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻

渡邊淳司

目次

1	序論	1
1.1	本論文の概要	1
1.2	本論文の背景：人間の時空間統合特性を利用した視覚情報提示手法	2
1.2.1	眼球運動（サッカード）を利用した情報提示	3
1.2.2	運動知覚（スリット視）を利用した情報提示	5
1.3	本論文の目的：眼球運動時及び運動知覚時の時空間統合知覚特性の変化	6
1.4	本論文の構成	8
2	眼球運動を利用した情報提示：サッカード残像の空間特性	12
2.1	本章の目的と位置づけ	12
2.2	背景	13
2.2.1	サッカードの眼球運動特性	13
2.2.2	サッカード時の知覚特性	13
2.2.3	サッカード時のフラッシュ刺激に対する定位	14
2.2.4	サッカード時の連続点滅刺激に対する定位	15
2.3	実験 2-1：時間幅を持って提示された光点刺激の定位と形態知覚	16
2.3.1	実験装置と手順	16
2.3.2	実験結果	18
2.3.3	考察：結果から予想される定位と形態知覚のモデル	22
2.4	実験 2-2：モデル検証のために刺激の持続時間を変化させた実験	25
2.4.1	実験装置と手順	25
2.4.2	実験結果	25
2.4.3	考察：モデルと実験結果の適合性	25
2.5	実験 2-1, 2-2 のまとめ	30
2.6	実験 2-3：知覚される点線の長さの光源位置による違い	32
2.6.1	実験装置と手順	32
2.6.2	実験結果	32
2.7	実験 2-4：サッカード残像の垂直方向の大きさ	35
2.7.1	実験装置と手順	35
2.7.2	実験結果	37
2.7.3	考察：垂直方向の縮小	38
2.8	サッカード残像の空間特性に関する考察	40
2.8.1	形態生成と定位の分離	40
2.8.2	網膜像の半分の大きさの知覚像	40
2.8.3	光源位置による違いと垂直方向の収縮	42
2.9	本章のまとめ	42

3	眼球運動を利用した情報提示：サッカー残像の時間特性	43
3.1	本章の目的と位置づけ	43
3.2	背景	44
3.2.1	固視時の残像の持続時間計測手法	44
3.2.2	サッカー残像の持続時間計測手法	45
3.3	実験 3-1：サッカー時と固視時の残像の持続時間の比較	45
3.3.1	サッカー残像計測の実験装置と手順	46
3.3.2	固視残像計測の実験装置と手順	47
3.3.3	実験結果	49
3.4	実験 3-2：サッカー残像の時間的処理と空間的処理の順序	50
3.4.1	実験装置と手順	50
3.4.2	実験結果 3-2	51
3.5	サッカー残像の時間特性に関する考察	51
3.6	本章のまとめ	52
4	眼球運動を利用した情報提示：特徴，設計指針，応用例	53
4.1	本章の目的と位置づけ	53
4.2	サッカーを利用した情報提示手法の特徴と応用例	53
4.2.1	サッカーを利用した情報提示手法の特徴	53
4.2.2	眼球運動の誘導と情報提示に適したサッカーの種類	53
4.2.3	実装と応用	56
4.2.4	考察	57
4.3	サッカーを利用した情報提示における設計指針	61
4.3.1	提示画素数を最大化する点滅周期の計算	61
4.3.2	シミュレーションと具体例	62
4.3.3	設計論のまとめ	62
4.4	眼球運動計測と合わせた情報提示の提案	64
4.4.1	提案する計測手法の原理	64
4.4.2	提案する計測手法の特徴及び計測実現のための要件	68
4.5	実験 4-1：眼球運動計測のための網膜再帰反射特性	68
4.5.1	実験装置と手順	68
4.5.2	実験結果	70
4.6	実験 4-2：眼球運動計測に必要な空間解像度	71
4.6.1	実験装置と手順	71
4.6.2	実験結果	73
4.7	眼球運動計測に関する考察	76
4.8	眼球運動計測に関するまとめ	77
5	運動知覚を利用した情報提示：運動知覚と属性情報の時空間統合	78
5.1	本章の目的と位置づけ	78
5.2	背景	78
5.2.1	運動知覚と形の統合	78
5.2.2	運動知覚と色の統合	79

5.2.3	運動軌道上の色統合	79
5.3	実験 5-1：運動知覚による混色の主観判断	81
5.3.1	実験装置と手順	81
5.3.2	実験結果	84
5.4	実験 5-2：運動知覚による混色の客観判断	87
5.4.1	実験装置と手順	87
5.4.2	実験結果	87
5.5	実験 5-3：運動知覚による混色と眼球運動	91
5.5.1	実験装置と手順	91
5.5.2	実験結果	91
5.6	実験 5-4：運動知覚による色分離の主観判断	93
5.6.1	実験装置と手順	94
5.6.2	実験結果	94
5.7	運動知覚と色統合に関する考察	97
5.8	運動知覚と色統合のまとめ	97
5.9	スリット視を利用した 3 次元情報提示手法	98
5.9.1	目的と位置づけ	98
5.9.2	背景	98
5.10	実験 5-5：スリットを通して知覚される奥行き精度	99
5.10.1	実験装置と手順	99
5.10.2	実験結果	101
5.10.3	考察	102
5.11	スリット視を利用した 3 次元情報提示手法のまとめ	103
6	結論	104
6.1	知覚世界と物理世界の時空間	104
6.1.1	時空間統合特性の変化	104
6.1.2	時空間統合特性の変化に関する考察	105
6.2	本論文のまとめ	107
	参考文献	108
	付録	128
A	サッカー時の知覚特性の詳説	128
A.1	視知覚のための感覚器官	128
A.1.1	眼球の構造	128
A.1.2	網膜の構造	128
A.1.3	視覚情報の脳内での流れ	128
A.2	視知覚のための眼球運動	130
A.2.1	眼球運動を引き起こす眼筋	130
A.2.2	眼球運動の種類	130
A.2.3	固視微動の特徴	133
A.3	サッカーの特徴	133

A.3.1	サッカーの動特性	133
A.3.2	サッカーの生成機構	135
A.3.3	サッカーの種類	135
A.4	サッカーと網膜上の変位の補償	137
A.4.1	サッカー抑制	137
A.4.2	サッカーにおける視野の安定	138
A.5	サッカー時の空間知覚特性	139
A.5.1	サッカー時のフラッシュ刺激に対する定位	139
A.5.2	サッカー時の連続点滅刺激に対する定位	141
A.5.3	サッカー時の連続点滅刺激による 2 次元像の提示	142
A.5.4	サッカー時の空間圧縮	142
B	運動情報とその属性情報の統合に関する概説	144
B.1	運動刺激の分類	144
B.2	運動検出メカニズム	144
B.2.1	運動検出モデル	144
B.2.2	神経生理学的検証	146
B.3	運動と空間属性の統合	147
B.3.1	運動と位置	147
B.3.2	Flash lag	147
B.3.3	Flash lag のモデル	148
B.3.4	様々な属性の Flash lag	148
B.3.5	色運動非同期錯視	149
C	瞬目時の知覚特性を利用した情報提示手法	152
C.1	瞬目の特徴	152
C.2	提案する情報提示手法の概要	152
C.3	実現方法	153
C.3.1	提示デバイス	153
C.3.2	予備実験	155
D	視知覚特性を利用した舞台演出	156
D.1	本章の目的と位置付け	156
D.2	身体表現の強化	157
D.2.1	表現の定義と表現の強化	157
D.2.2	イメージの想起	157
D.2.3	Media Art, MultiMedia Performance	158
D.2.4	Media Art , MultiMedia Performance の問題点	158
D.3	これまで行われた身体表現の強化手法	159
D.3.1	パフォーミングアートにおける映像と音楽	159
D.3.2	身体運動とインタラクティブアート	159
D.4	Media Performance Unit cell/66b	160
D.5	映像による身体表現の強化	162

D.5.1	パフォーマーの身体と映像の関係性	162
D.5.2	身体運動と映像の具体的な関係付け	163
D.5.3	構成したシーン	165
D.5.4	システム構成	166
D.5.5	演出手法の評価	167
D.5.6	観察者のコメントとそれに対する考察	170
D.5.7	表現者による評価とそれに対する考察	171
D.5.8	身体運動と映像の関係付けのまとめ	172
D.6	観客とのインタラクションを実現した舞台演出	172
D.6.1	背景と位置づけ	172
D.6.2	実現手法	172
D.6.3	眼球運動を利用した舞台演出	173
D.7	提案する演出手法の実現	175
D.7.1	舞台構成	175
D.7.2	本演出手法の特徴	176
D.7.3	演出に対するコメント	176
D.7.4	考察	177
D.7.5	観客とのインタラクションを実現した舞台演出のまとめ	177
D.8	本章のまとめ	177
E	視触覚の関係性とメディアアート	179
E.1	本章の目的と位置づけ	179
E.2	re-cognition	180
E.2.1	作品コンセプト	180
E.2.2	作品概要	180
E.3	Beings - Haptic artwork with Smart Tool -	181
E.3.1	作品コンセプト	182
E.3.2	作品概要	182
E.3.3	作品システム	183
E.3.4	作品の評価	184
E.4	本章のまとめ	184
F	感覚入力を利用した歩行誘導	185
F.1	パラサイトヒューマンプロジェクト	185
F.1.1	目的と概要	185
F.1.2	背景と特徴	186
F.1.3	デバイスの実装	187
F.1.4	神経系のモデル化	194
F.2	歩行誘導の概要	195
F.3	歩行誘導研究の背景と特徴	196
F.3.1	背景	196
F.3.2	特徴	196
F.3.3	応用	196

F.4	歩行誘導サービスの実現	198
F.4.1	歩行誘導サービスの背景	198
F.4.2	感覚入力による歩行周期誘導	198
F.4.3	本手法の特徴	199
F.5	振動入力による歩行誘導実験	200
F.5.1	具体的歩行誘導手法	200
F.5.2	歩行誘導実験におけるデータ処理	201
F.6	実験 F-1：振動刺激のタイミングの同定	202
F.6.1	実験条件	202
F.6.2	実験結果	203
F.7	実験 F-2：他のタスクを阻害しない刺激周期の変動範囲	204
F.7.1	実験条件	204
F.7.2	実験結果	204
F.7.3	考察とまとめ	205
F.8	神経系のモデル化	208
F.8.1	モデル化の概要	208
F.8.2	神経系の生理学的モデル	209
F.8.3	神経系の数理モデル	209
F.8.4	van der Pol 方程式によるモデル化	212
F.9	歩行シミュレーション	214
F.9.1	モデルにおける引き込み現象	220
F.9.2	モデル化のまとめ	222

本論文全体のメッセージ

自分の行っている認知科学の研究は、人間という生物が自己を取り巻く環境をどのように知覚しているかを調べるものである。そして、それは環境の物理世界と自身の知覚世界の相対化をすることでもある。人間は物理環境の中に存在しているが、その中で環境を「観察」しているのではなく、環境を「解釈」している [1]-[6]。解釈された知覚世界は環境の物理世界とは異なるものであるし [7][8]、むしろ、物理世界は知覚世界を生じさせるきっかけでしかない（夢のように物理世界からの刺激がなくても知覚世界は生じる）。錯視と呼ばれる知覚現象はその物理世界と知覚世界の違いを表した端的な例である。例えば、 $\langle \text{---} \rangle$ と $\rangle \text{---} \langle$ の中心部分の --- の長さは、物理的には同じでも、知覚的には異なっている [9]。このように、認知科学という学問は、物理世界と知覚世界の相異を明らかにするものである。

「どんな学問も、人間の生を活性化させ、満足させるために存在する。」 [10] と自分は思っている。では、認知科学によって人間が環境をどのように解釈するか、そのメカニズムがわかったとして、それはどのように人間の生を活性化させ、満足させることができるのだろうか。

前述のように、人間は自己を取り巻く世界、社会、環境を自分なりのフレームワークで解釈している。認知科学によって明らかになるのは、人間には何が見えて、何が見えないのか、そのフレームワークの最もハードウェアに近い制約である。人間はさらに、知覚されたもののなかから、自分なりの価値観、思いを通じて世界を解釈する。どのように世界を解釈するか、そのフレームワークは人それぞれであるが、自分の生を活性化させ満足させていくには、その時の世界に合わせてフレームワークを自在に変化させ、世界との折り合いをつけていくことが必要だと思われる [11][12]。そのためには、まず、自分が世界を「解釈」しているという、自身のフレームワークの存在を意識し、その性質を知ること。そして、状況に合わせて、そのフレームワークを自分なりに新しく発明、組み替えていくことが重要である [13]。知覚研究を通じて物理世界と知覚世界の相異、知覚世界の多様さを明らかにしていくことが、自分自身のフレームワークを意識し、一人一人が解釈している世界のかけがえのなさを感じることに繋がればよいと思う [14][15]。自分はこのようなメッセージを、言葉による論文だけでなく、体験として、例えば舞台や作品などで、いろいろな人達に伝えていきたい [16]。

本論文では、知覚に関する研究（第1章～第6章）だけでなく、そこからの知見をもとに制作された舞台（付録D）や作品（付録E）についても論じている。芸術は、科学による発見を、一人一人の人間がどのように解釈すればよいのか、その精神的な意味付けをし、精神的な生を豊かにするものである（物質的な生を豊かにするのは工学）。自分は、人の知覚、心のあり方、そして、それらがどう伝達・交換されていくのかに興味を持っており、研究によって新たな発見をし、それを自分なりの視点から人間の生に意味付けをしていきたい。その表現過程のひとつが本論文である。

第 1 章

序論

1.1 本論文の概要

人間の感覚情報のなかで視覚情報は大きな割合を占めるものであり、これまで様々な視覚情報提示手法が提案されている [17]。そして視覚情報提示において、2次元情報提示はその基礎をなすものである。本論文では、人間の視覚における時空間統合特性を利用することによって、2次元光源とスクリーンを利用したこれまでの提示手法とは異なる、新たな視覚情報提示手法の可能性を探り、その設計に必要な人間の視知覚特性を調べる。

一般に2次元の視覚情報を提示するためには2次元光源が必要となる。しかし、1列の光源がなんらかの運動を行う、もしくは脳内の物体運動情報と結びつくことによって、1次元光源でも2次元情報を提示することが可能となる。例えば、図 1.1 のように、1次元光源があるパターンで点滅しながら高速移動すると、人間は各瞬間瞬間に光っている1次元パターンがあたかも同時に提示されたように知覚し、2次元パターンとして認識する。このような視覚情報提示手法は既に実用化され、数種類のディスプレイが販売されている [18]。この情報提示手法は、異なる時間、異なる網膜位置に提示された光刺激をひとつのまとまった像として知覚するという、視知覚の時空間統合特性を利用した情報提示手法であり、少ない光源、少ないエネルギーで2次元情報を提示可能にしている。このように、人間の知覚特性をディスプレイを設計する際の制限条件と考えるだけでなく、その特性を積極的に利用することによって、これまでにない特徴を持った情報提示が実現可能であると考えられる。本論文では、図 1.1 とは異なる、人間の知覚とより密接に結びついた視覚情報提示手法に着目し、それらを実現する上で必要となる視知覚の特性について調べていく。

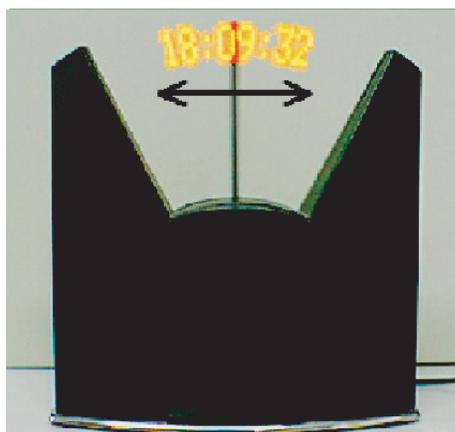


図 1.1: 1次元光源が高速移動することによって2次元パターンを提示する視覚情報提示ディスプレイ
ISM Inc. Fantazein

1.2 本論文の背景：人間の時空間統合特性を利用した視覚情報提示手法

人間の視知覚は、眼に入る光を網膜に結像させ、環境を脳内に写し取る受動的な過程ではない。知覚像は、眼球運動によって視覚情報を能動的に探索し、その結果、網膜上に描かれた光点刺激群を脳内である意味のあるまとまりとして解釈して、はじめて得られるものである。視覚システムが知覚像を得るまでの過程は、図 1.2 のように、「環境に知覚対象が存在し」、「それを眼球運動によって捕らえ」、「脳内で認識する」と、3つの過程に大きく分けて考えることができる。このとき、図 1.1 のような視覚情報提示ディスプレイは知覚対象自体が運動し、1次元光源を2次元イメージに展開するものであった(図 1.2(a))。しかし、視覚システムが知覚像を得るまでの過程には、より人間の知覚生成過程に近い「知覚対象を探索運動によって捕らえ」「脳内で認識する」という過程が存在し、それらを積極的に利用した視覚情報提示手法も提案されている。

「知覚対象を眼球運動によって捕らえる」過程を利用した情報提示手法として、サッカードと呼ばれる高速眼球運動を利用した情報提示手法が存在する [19]。この手法では、1次元の固定された点滅光源の前で観察者が眼球運動を起こすことで、眼球運動によって、点滅光源の点滅パターンの時間変化が空間パターンに展開されている(図 1.2(b))。また、「脳内で認識する」過程、特に運動の認識に着目した情報提示手法として、スリット状の1次元光源群をあたかもその後ろで、2次元イメージが移動するように点滅させて2次元イメージを提示する手法が存在する。この手法では、知覚される運動情報を利用し、脳内で1次元光源群からの継時的な視覚情報を2次元イメージに展開している(図 1.2(c))。しかし、これらの情報提示手法によって得られる知覚像は、物体が高速移動した図 1.2(a) のような提示手法で得られる知覚像と、その空間的・時間的の性質が異なる。そのため、図 1.2(b)(c) のような手法によって情報提示を行うためには、これらの手法で得られる知覚像の特性について調べる必要がある。

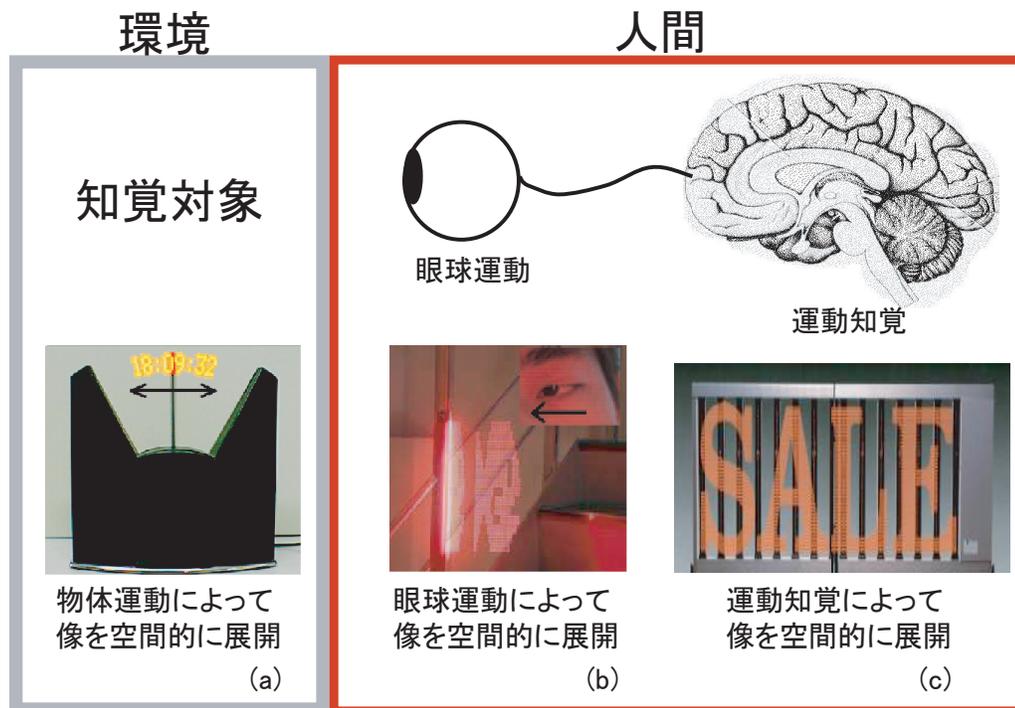


図 1.2 人間の視知覚システムとその時空間統合特性を利用した情報提示手法

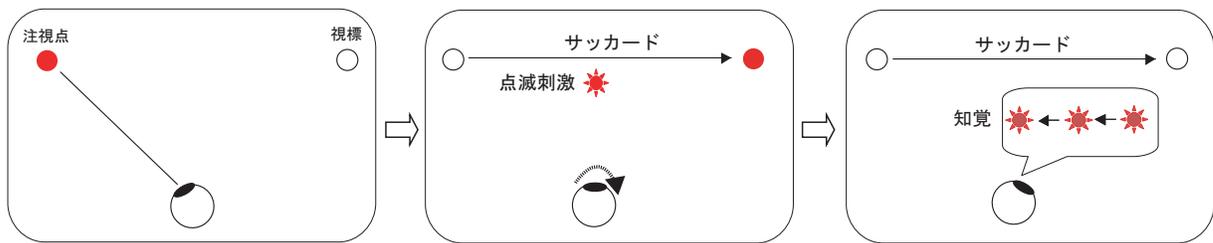


図 1.3 サッカード中に高速点滅する光点によって知覚される光点列

1.2.1 眼球運動（サッカード）を利用した情報提示

概要と特徴

本節では、眼球運動、特にサッカードと呼ばれる高速眼球運動を利用した情報提示手法の原理とその特徴について述べる。これまで、サッカード中に静止した光点を高速点滅させると、図 1.3 のようなサッカードと逆方向に移動する光点列が知覚されることが知られていた [20][21][22][23]。図 1.3 のように、観察者はある位置の注視点に視線を向けた後、異なる位置の視標に向けてサッカードを行う。そのサッカード中に光点を高速点滅させると、継時的に提示される光点群は網膜上で空間的に広がり、光点列として知覚される。そして、この現象を 2 次元に拡張したものとして、光点を垂直方向 1 列に並べ、水平サッカード中に点滅パターンを高速で時間変化させてやると、サッカードにより 1 次元の点滅パターンが空間パターンに展開されて 2 次元イメージが知覚される。このときの点滅パターンの周期、タイミングをうまく調節してやることで、様々な 2 次元情報が提示可能となる。ただし、1 度のサッカードは 50ms 程度という非常に短い時間のうちに行われるので、その間に意味ある情報を提示するためには、光点は数 100 ~ 1kHz 程度で点滅させる必要がある。一般にサッカード中の知覚は抑制され、知覚可能な解像度等が下がる可能性が示唆されていたが [24]、背景輝度が低く、光点刺激の背景に対するコントラストが十分確保できる場合、視力解像度の低下が殆ど生じないことを確認している [19]。また、藤田らの研究によっても、サッカード中に文字などの情報が知覚可能であることが報告されている [25]。

本手法は 1 次元の光源と観察者の眼球運動によって生じる残像を利用しているので、十分暗い環境においては、図 1.4 のように光源を建物の柱に装着することで、空中に情報提示を行うことも可能である。そして、本手法を使用したデバイスは小型化が期待でき、ウェアラブル情報提示デバイスにも応用可能である。また、これまでのディスプレイに無い特徴として、本情報提示手法は観察者の眼球運動を利用しているので、眼球運動を起こした人のみ情報を知覚可能であり、眼球運動の有無による情報知覚の選択性がある。

知覚像の性質

一般に、サッカード時の知覚は固視時の知覚と様々な特性が異なることが知られている [24]。そのため、このようなサッカードを利用したディスプレイを設計する際には、サッカードによって生じる残像（以後、サッカード残像と記す）の知覚特性を知ることが重要となる。例えば、サッカード残像の位置、形態は眼球運動によって網膜上に描かれた像のそれとは異なる。具体的には、10deg のサッカードによって知覚されるサッカード残像は、図 1.5(a) のような網膜上に映った 10deg の像とは異なり、図 1.5(b) にあるような 5deg 程度の網膜像約半分の大きさの像である。位置に関しても図のように光点列をまたぐ場所で知覚されることもある。そこで、本論文においては、以下に示すような、



図 1.4 サッカードを利用した情報提示手法の情報提示例

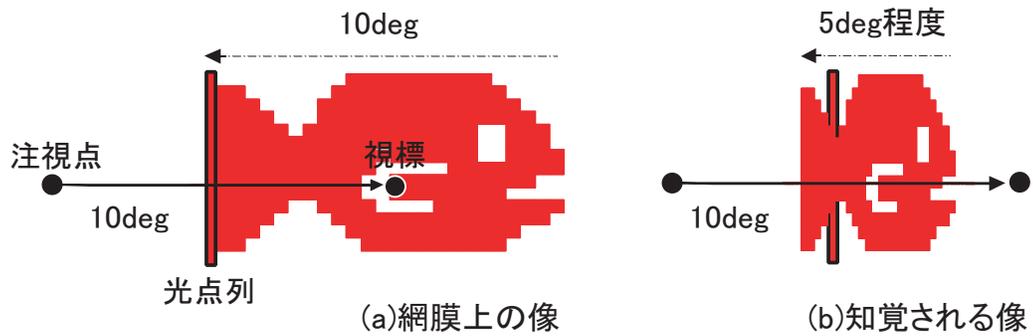


図 1.5 網膜像上の像 (a) 実際に知覚される像 (b)

サッカーダ残像の空間的性質，時間的性質を調べ，それに基づいてサッカーダを利用したディスプレイを構成する上での設計指針を示す。

- サッカーダによって生じる残像の空間的性質（残像の知覚される位置・形態）
- サッカーダによって生じる残像の時間的性質（残像の知覚上保持される持続時間）
- サッカーダによって生じる残像を利用した情報提示手法の設計指針

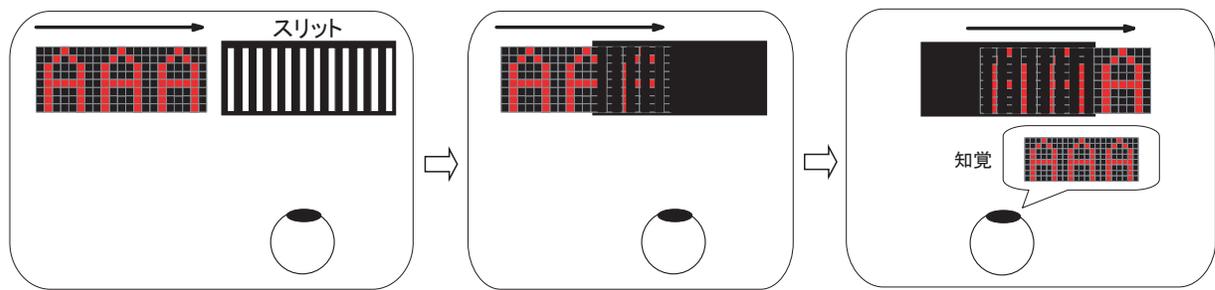


図 1.6 2次元イメージがスリット向こうで運動することによって形態情報が再構成される

1.2.2 運動知覚（スリット視）を利用した情報提示

概要と特徴

本節では、人間の運動知覚特性を利用した視覚情報提示手法の原理と特徴について述べる。人間は図 1.6 のようにスリットを通して運動物体を観察するとき、各瞬間瞬間には物体の一部分しか見えないにも関わらず、スリット向こうの物体の運動情報を利用することによって、物体の形態を知覚することができる（以下、この知覚をスリット視と記す）[26][27][28]。この現象から、梯子状（上述のスリットの穴が開いている部分）に光源を配置し、あたかもその向こうで 2 次元イメージが移動しているように点滅させてやると、見ている人間はスリット向こうのイメージの運動を知覚し、見えていない部分の形態情報をも補完して 2 次元イメージを知覚する。このようなスリット視の原理を利用したディスプレイ自体は実用化されており、街頭でも見かけることができる。例えば、図 1.7 にある AVIX 株式会社* の PoleVision が挙げられる。スリット視を利用したディスプレイは光源を間引くことによって、少ないエネルギー、空間で情報提示を行うことが可能である。そして、光源が間引かれているので、そこを通してディスプレイ向こうを見ることもできる。例えば、窓ガラスの枠部分に光源を取り付けることで、運動知覚時はガラスの上に重なる形で情報を知覚可能であり、さらにガラスを通して奥側の景色を見ることもできる。

知覚像の性質

スリット視を情報提示に利用する際、どんな物体（形態、色）が、どこに（位置、奥行き）提示可能であるかを調べるのが重要である。これまで、スリット状の光源によってどの程度の形態情報が再構成されるかについては先行研究が存在している [29][30][31]。スリットの向こうでイメージを運動させると、眼球運動によって物体の運動を追跡しなくても形態情報を再現可能であり（物体の運動知覚自体が重要であることを示唆）、再現された形態は、単純に静止画に対してスリット状の遮蔽をかけてサンプリングされた画像に比べ、そのナイキスト周波数以上の空間周波数情報が再現されていることが示されている。このことは運動軌道上で物体の形態情報は統合されている。

また、運動情報が物体の属性である形態を修飾するように、運動情報が物体の色知覚にも影響を与えている。具体的には、網膜上で別の位置にある 2 つの色情報が、運動軌道上で統合されているように知覚される [32][33]。そのため、スリット状の光源によって様々な色を表現しようとするときには、運動知覚と色統合の関係、そのメカニズムを調べる必要がある。

そして、近年は、スリット視によって得られる形態情報によって立体情報が提示可能であることも

* <http://www.avix.co.jp/>



図 1.7 (左) AVIX 株式会社 PoleVision(金沢八景駅) (右) その拡大図

示唆されている [34][35][36]．スリット状の光源を使用し，左右眼に時間差をつけて視覚情報を提示すると，その時間差は物体の奥行きとして知覚される．この知覚現象を利用すると，2次元スリット状の少ない光源によって3次元情報を提示する簡便なディスプレイが実現可能である．しかし，3次元ディスプレイの設計指針となる再現された奥行き情報の精度についてはこれまで調べられていない．そこで，このような視差をつけたスリット視の際に知覚される奥行き量の大きさ，精度について調べた．

運動知覚を利用した情報提示手法について，本論文においては以下に示すような，運動知覚によって再構成される形態及び色との関係を調べ，スリット視による立体視の精度，それに基づいた新たな3次元情報提示手法について述べる．

- 運動知覚によって網膜上異なる位置の色情報が統合される知覚特性とそのメカニズム
- スリット状光源から再構成される像とそれを利用した立体視の特性とその応用

1.3 本論文の目的：眼球運動時及び運動知覚時の時空間統合知覚特性の変化

視覚情報提示において，情報を時分割で提示するという手法は，提示のためのエネルギー，コストが少なく済むという利点から様々なディスプレイで採用されている．図 1.2(a) で示したような光源が高速運動するデバイスだけではなく，提示方式まで含めて考えると，CRT ディスプレイの走査線や LED マトリックスのダイナミック点灯等その手法の利用されている範囲は幅広い．これらの時分割視覚情報提示における基本原理は図 1.8(a) のように考えられる．横軸を空間，縦軸を時間と考えると，光源は時間とともに点滅パターンを変化させながら時空間上を斜めに移動する．そして，ある一定時間内に提示された光点群は，それらを空間軸に射影したものと同等の視覚情報として知覚される．これらの時分割視覚情報提示ディスプレイの設計においては，時間・空間を直交する軸とし，その上での光源の移動を考えることが重要である．

一方，図 1.2(b) で示した眼球運動によって2次元情報を提示する手法の原理を同様の時空間上で考えると図 1.8(b) のようになる．眼球運動を利用する情報提示手法では光源は固定され，眼球が運動するが，網膜上での光源位置を考えると光源が運動した場合と相対的には等価である．そのため，網膜上の時空間図で考えると図 1.2(a) と (b) における光源移動は同じく，時間とともに点滅パターンを変化させながら時空間上を斜めに移動する．このとき，知覚される2次元イメージは，光源自体が

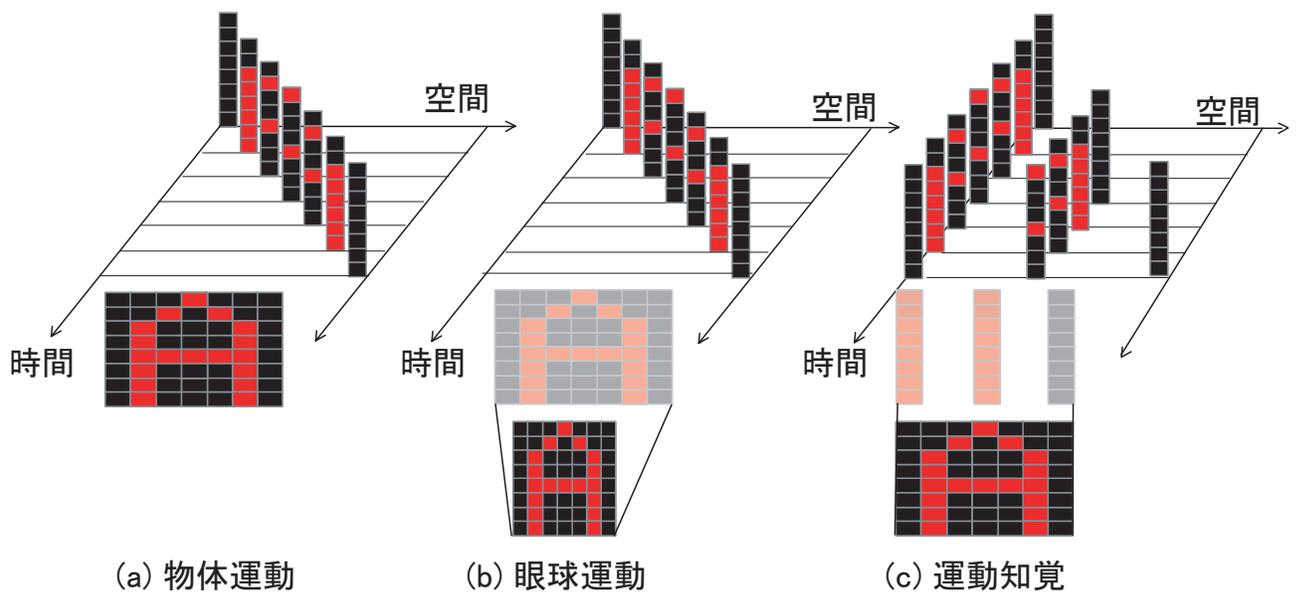


図 1.8 (a) 物体運動による知覚像 (b) 眼球運動による知覚像 (c) 運動知覚による知覚像

移動したときには光源情報を空間軸に投影すれば予測可能であった，しかし，眼球運動を利用した場合，知覚像は空間軸に投影された像とは異なり，眼球運動方向の大きさが網膜上の約半分である．そのため，光源が高速に動く場合と眼球運動が起きた場合の知覚像を同じ時空間軸上で表現することは困難である．

一方，図 1.2(c) で示した運動知覚によって 2 次元情報を提示する手法の原理を同様の時空間図で考えると図 1.8(c) のようになる．光源はスリット状に間引いて並べられているため，眼球が静止している限り，常にある空間位置にしか光点は存在しない（スリット視による形態情報の再構成が眼球運動なしで生じることは先行研究によって示されている [31]）．そのため，図 1.2(a) のように，提示された光源情報をそのまま空間軸に射影しても 2 次元パターンを知覚することは不可能である．このように，運動知覚によって得られる知覚像も，光源が高速に動く場合と同じ時空間軸上で表現することは困難である．

これらのことは，図 1.2(a) のような時間・空間を直交する軸として考え，その時空間軸上で光源の移動を考えるというモデルは，人間自身の眼球運動が起きているときや何らかの運動知覚が生じるときには，必ずしも有効に機能しないということを意味する．つまり，眼球運動や運動知覚が生じているときには，その知覚像を考える時空間すらア priori に考えてはいけない．しかし，多くの時分割情報提示手法は，観察者の眼球運動，移動する物体の運動知覚を考慮に入れず設計がなされている．そこで，本論文では眼球運動時，運動知覚時の時空間統合知覚特性がどのように変化するかを調べ，その原理に基づいた視覚情報提示ディスプレイの設計指針，応用例を示す．

1.4 本論文の構成

本論文では，眼球運動時，運動知覚時の時空間統合知覚特性の原理を調べ，その原理に基づいて，情報提示を行う際の設計指針，応用例を示す．2章以降，各章は図 1.9 のように位置付けられる．以降，各章について詳細に述べる．

- 1章: 序論
- 2章: 眼球運動時: サッカーボール残像の空間特性 残像の位置と形態
- 3章: 眼球運動時: サッカーボール残像の時間特性 残像の持続時間
- 4章: 眼球運動時: サッカーボールを利用した情報提示手法の特徴，設計指針，応用
- 5章: 運動知覚時: 運動知覚と属性情報（特に色情報）の時空間統合
- 6章: 結論

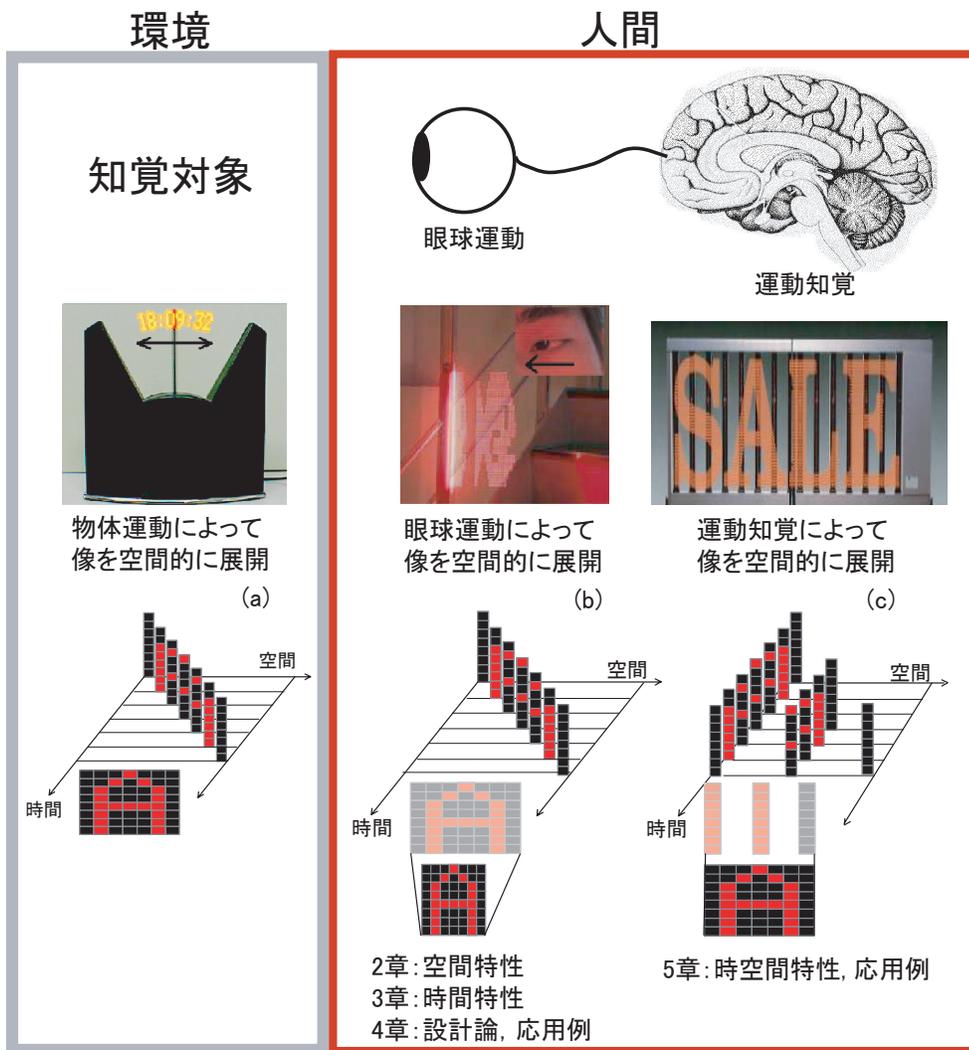


図 1.9 本論文における各章の位置付け

1章 序論（本章）

人間の感覚情報のなかで視覚情報は大きな割合を占めるものであり、これまで様々な視覚情報提示手法が提案されている。そして、視覚情報を時分割で提示するという手法は、様々なディスプレイで採用されている。例えば、1次元光源が高速運動するデバイス、CRTディスプレイの走査線やLEDマトリックスのダイナミック点灯等、幅広い範囲で利用されている。さらに、人間の眼球運動（サッカード）や運動知覚（スリット視）を利用して、時分割情報提示を行う手法も提案されている。これまで、時分割視覚情報提示の原理は網膜上の時間・空間座標をもとに考えられてきた。光源自体が高速運動して2次元情報を提示する場合、光源は時間とともに点滅パターンを変化させながら網膜上を移動する。ある一定時間内に提示された光点群は、それらの光点が網膜上各位置に同時に提示されたのと同等の視覚情報として知覚される。しかし、網膜上の時間・空間座標をもとに、その上で光源情報の移動を考えるというモデルは、人間自身の眼球運動や運動知覚が生じているときには、知覚像を正しく説明できない。そこで、本論文では眼球運動時、運動知覚時の時空間統合知覚特性がどのように変化するかを調べ、その視覚情報提示ディスプレイの設計指針を示した。

2章 眼球運動を利用した情報提示：サッカード残像の空間特性

2章では、サッカード残像の知覚される位置、形態について調べる。サッカード残像の知覚される位置・形態は、サッカードを利用した情報提示手法において、どこにどの程度の大きさで情報提示が可能かを示すものである。これまで、サッカード時に提示されるフラッシュのような瞬間的な光点刺激の定位に関しては、様々な研究がなされている [37]- [63]。そして、サッカード中に静止した光点を高速点滅させると、サッカードと逆方向に移動する光点列が知覚されることは知られていた [20][21][22][23]。しかし、サッカードを利用した情報提示で使用しているような、ある時間幅を持った光点刺激（例えば、高速に連続点滅するフリッカー刺激）に対しての定位、形態を同時に調べた研究は存在していない。そこで、サッカードに対して様々なタイミングでフリッカー刺激を提示し、その定位される位置、形態を調べた。実験 2-1, 2-2 の結果、サッカード時に時間幅を持って提示された光点刺激の定位は、光点刺激を単純なフラッシュの重ね合わせと考えて予測できるものではなく、はじめに刺激間の形態表象（一点や点列）が網膜像に基づいて形成され、その形態表象をまとめて定位しているというメカニズムを示唆するものであった。また、その定位にあたっては、サッカードから時間的に遠いイベント（光点刺激の点灯もしくは消灯）を手がかりに定位していることが示唆された。知覚される形態の大きさに関して、実験 2-3 では、光源位置による違いを調べ、光源がサッカードターゲットの向こう側にある場合には、7割程度の大きさに知覚されることがわかった。また、実験 2-4 から像の垂直方向に関しても 1~2 割程の収縮が観察された。

3章 眼球運動を利用した情報提示：サッカード残像の時間特性

3章では、サッカード時に知覚される残像の時間特性について調べる。これまで、固視時に物体自体が運動することによって生じる残像の持続時間については多くの研究がなされているが [64]- [68]、サッカード残像がどの程度の時間、保持されるかについては調べられていない。一般に、サッカード時においては、速度知覚、位置変化検出域等様々な知覚特性が抑制されているため、固視時とサッカード時ではその持続時間が同程度の長さであるとは限らない。そこで、サッカード時の残像の持続時間を、これまで調べられてきた固視時の持続時間の計測手法に倣って計測し、固視時と比較する実験（実験 3-1）、及びその保持のメカニズムを調べる実験（実験 3-2）を行った。実験 3-1 の結果、サッカード時の残像は固視時と同等の時間保持されていることがわかった（本実験条件では両者とも約

120ms程度)。また、それは提示する光点輝度にも拠らなかった。実験3-2の結果、サッカードの終了後かつサッカード残像の持続時間中に、ある長さをもった光点列を提示したとしてもその長さは、正しい長さに知覚された。これは、サッカード時の知覚においては、網膜像に対する空間的処理（サッカード方向の大きさが半分になる）が行われた後に、知覚像を一定時間保持する処理が行われることを意味している。

4章 眼球運動を利用した情報提示：特徴，設計指針，応用例

4章では、サッカードを利用した情報提示の特徴，設計指針，応用例を示す。サッカードを利用した情報提示手法は、1次元の光源と観察者の眼球運動によって生じる残像を利用しているので、空中など投影面の無い空間に情報提示を行うことが可能である。また、眼球運動を起こした人のみ情報を知覚可能であり、眼球運動の有無による情報知覚の選択性がある。まず、このような特徴を生かした情報提示の例を示した。設計指針においては、本情報提示手法において、光源の点滅周期を一定としたときの、提示可能画素数を最大化する点滅周期を特定した。サッカードの振幅・速度履歴と光源の大きさを仮定した場合、提示可能な最大画素数は光源の点滅周期に依存し、画素数を最大化する最適な点滅周期が存在する。実際の環境下でのパラメータでシミュレートした結果、およそ実際に見えている画素数と同程度の値が得られた。また、本手法は眼球運動を利用しているので、遠隔から眼球運動を計測可能であれば、確実に情報提示が可能となる。そこで、網膜再帰反射を利用したサッカード検出手法を提案した。本手法は、網膜再帰反射によって得られる瞳孔位置を、水平方向に高速スキャン可能なカメラで撮影し、高い時間精度で水平方向サッカードを検出するものである。本手法を実現する上で必要な網膜の再帰反射特性について調べた結果、カメラ光軸上の赤外光源とカメラ光軸を外れた赤外光源は3deg程度離すと効果的に差分画像を取得可能であり、サッカードのような移動量の大きい眼球運動が起きても、瞳孔位置を検出可能であることがわかった。また、本手法を利用してサッカードを検出する際に必要な空間解像度について調べた結果、サッカード検出という目的においては、従来眼球計測手法に比べて、約1/6の空間的解像度で実現可能であることがわかった。

5章 運動知覚を利用した情報提示：運動知覚と属性情報の時空間統合

5章では、運動知覚時の物体属性情報（特に色情報）の統合メカニズムを調べ、その3次元情報提示手法への応用を示す。人間はスリットを通して運動物体を観察するとき、各瞬間瞬間には物体の一部しか見えないにも関わらず、物体の形態を認識することができる。この形態知覚において、スリット向こうの物体の運動を知覚することが重要な役割を果たしている。また、運動情報が物体の属性である形態を修飾するように、運動情報が物体の色情報の知覚にも影響していることが考えられる。実際、筆者らは、網膜上では異なる位置であるが、同じ物体の運動軌道上に存在する2つの色が統合され、混色して知覚されることを示した。これまで、色の統合は網膜上の色配置を基本とし、網膜上非常に近い位置に異なる色を配置して空間的に統合させる手法（例えば、LCDディスプレイ）、もしくは、網膜上同じ場所に短い時間間隔で異なる色を提示して時間的に統合させる手法（例えば、DLPプロジェクタ）がとられていた。運動軌道上の色統合は、これまででない、網膜上ではなく脳内の知覚機構における色統合処理の存在を示すものである。実験5-1～5-4では、運動軌道上で色統合が起きていることを心理物理実験によって実証し、その色統合が起きるメカニズムを明らかにした。また近年、スリット視によって得られる形態情報によって、立体情報が提示可能であることが示唆されている。スリット状の光源を使用し、左右眼に時間差をつけて視覚情報を提示すると、その時間差は物体の奥行きとして知覚される。この知覚現象を利用すると、2次元スリット状の少ない光源によって3次元情報を提示する簡便なディスプレイが実現可能である。しかし、3次元ディスプレイの設計指

針となる再現された奥行き情報の精度についてはこれまで調べられていない。そこで、このような視差をつけたスリット視の際に知覚される奥行き量の大きさ、精度について調べた（実験 5-5）。その結果、スリット向こうの運動物体の速度が十分速く、形態が再構成可能であれば、スリット視によって再現された形態情報でも、実際に 2 次元情報を提示した場合と同等の精度で奥行きが知覚されることがわかった。

6 章 結論

眼球運動時（サッカー時）、運動知覚時の時空間知覚特性の変化について調べ、そのメカニズムについて考察した。そして、その知覚特性を利用した視覚情報提示手法の設計指針を示した。2 章の実験結果は、サッカー時に時間幅を持って提示された光点刺激は、形態生成処理（サッカー方向の大きさが半分になる）がなされた後に、定位処理が行われることを示唆するものであった。定位処理は、サッカー前にはサッカー方向に、サッカー後にはサッカーと逆方向に歪んだ空間に対して行われている。3 章の実験結果は、サッカーによって生じる残像に関して、その時間特性は変化しないことを示唆するものであった。つまり、サッカー時の時空間は、空間的には歪んでいるものの、時間に関しては物理的な時間と同様に扱えると考えられる。運動時の時空間知覚に関して、5 章の実験結果は、運動物体の像は運動軌道上に沿って保持されていることを示唆し、時間軸が運動軌道方向に変換されていると考えられる。眼球運動時では自分自身の運動情報が、運動知覚時には外部の物体の運動情報が、時空間知覚に大きな影響を与えている。これらのことは、視知覚において、ある一定時間、一定空間内に提示された視覚刺激は、網膜上の刺激配置のまま知覚されるのではなく、自身の身体運動もしくは外部からの運動情報をもとに再配置されて知覚されていると考えられる。

第 2 章

眼球運動を利用した情報提示：サッカード残像の空間特性

2.1 本章の目的と位置づけ

サッカードを利用した情報提示を行うにあたって、サッカード時に生じる残像の空間特性（知覚される残像の位置と形態）と時間特性（残像が保持される時間）は情報提示系を設計する上で重要なパラメータである。サッカード周辺（サッカード前後数 100ms）の時間帯は、眼球が動かず固視を行っているときとその視知覚の特性が異なるため（例えば、水平サッカード時に生じる残像の横幅は網膜像幅の約半分である）、情報提示を行うにあたってはサッカード時の知覚特性に基づいて設計指針を考える必要がある。まず本章では残像の空間特性、具体的には、情報提示手法を行った際、残像がどこにどのくらいの大きさで知覚されるかを調べた。

これまで、サッカード周辺の時間に瞬間提示されるフラッシュ刺激に関しては、提示された刺激がどこに（位置）、どんな形（形態）で知覚されるかは多くの研究が行われており [37]- [63]、フラッシュ刺激はある傾向を持って誤定位されることが知られている。一方、提案する情報提示手法で使用するような、ある時間幅を持って提示される光点刺激（例えば、一定時間高速点滅するフリッカー刺激）に関して位置と形態を同時に調べた研究はこれまで行われていない。そこで本章では、サッカードに対して様々なタイミングでフリッカー刺激を提示する以下の 4 つの実験を通して、サッカード残像の知覚される位置と形態について調べた。図 2.1 に調べる空間特性とそれに対応する実験を示す。

- 実験 2-1 では、サッカードに対して様々な時間に、時間幅を持った光点刺激（フリッカー刺激）を提示し、そのとき知覚される像の位置、水平方向の大きさを計測した（水平方向サッカード時）。そして、その結果から時間幅を持った光点刺激に対する定位メカニズムの仮説をたてた。
- 実験 2-2 では、定位メカニズムの仮説を検証するために、提示するフリッカー刺激の持続時間も様々に変化させて、その知覚像の位置、大きさを計測した。その結果は仮説を支持するものであった。
- 実験 2-3 では、知覚される像の大きさの光源位置による変化を計測した。
- 実験 2-4 では、サッカード中に垂直方向に光点列を光らせ、知覚像の垂直方向の大きさ（水平サッカード時）について計測した。

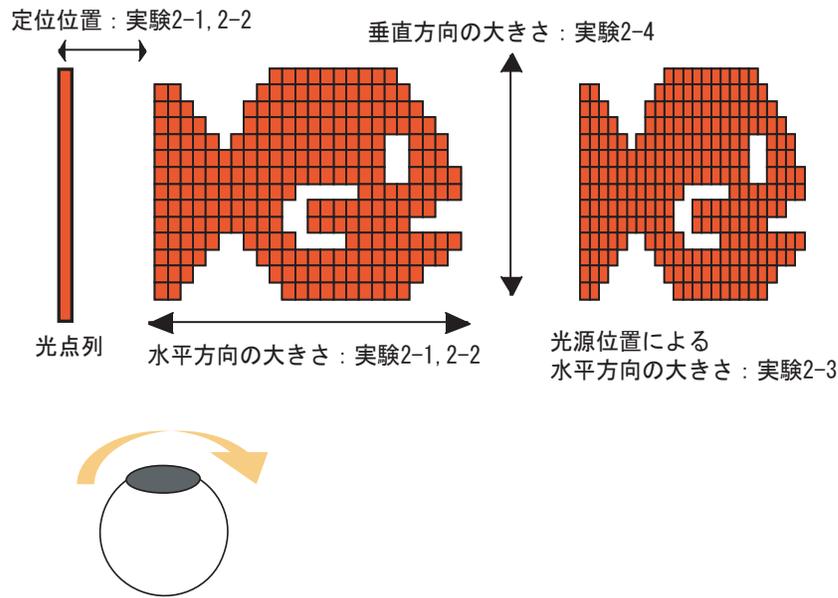


図 2.1 本章の実験で調べるサッカード残像の空間特性

2.2 背景

本節では、これまでに知られているサッカードの眼球運動特性，サッカード時の知覚特性について概説する．本節で記す内容は，本章の実験意義を理解するのに必要最小限の内容にとどめ，詳細については付録 A に記す．

2.2.1 サッカードの眼球運動特性

人間は日常生活において，環境の情報を解像度の高い網膜中心部で捕らえるために，絶えず眼球運動を行っている．サッカードは，視野周辺部の情報を得るために，ある注視位置から別の位置に向かって視線方向をステップ状に変化させるときに生じる高速な眼球運動である．日常生活におけるサッカードの振幅（視線の移動量）は 10deg 前後（視野角）であり，30deg 以上のサッカードは殆ど生じない．1 秒間に 2，3 度の頻度で生じ（不応期は約 200ms），持続時間（移動にかかる時間）は振幅 10deg で 30～40ms，20deg で 60～80ms 程度である．また，サッカードは極めて高速な眼球運動で，最高速度は 500deg/sec に及ぶ．サッカードを誘発する環境からの信号が入力されてから眼球が動き出すまでの時間（潜時）はおよそ 200～250ms であり，振幅が大きくなる程，最高速度，持続時間，潜時は大きくなる．眼球運動が始まると途中で随意的に運動を止めることはできない．

2.2.2 サッカード時の知覚特性

サッカードは急速で振幅の大きな眼球運動であるため，サッカード時に網膜像は急速に大きく変化する．そして，サッカードは非常に頻繁に行われ，その度に大きな網膜像の変化が生じているにも関わらず，日常生活においてその変化を知覚することは無い（例えば，自分で鏡を見ながら眼球を動かすときに，自分の動いている眼球を見ることはできない）．これはサッカード時の網膜像に対する感度の低下，つまりサッカード時の知覚は抑制されていることを示している．

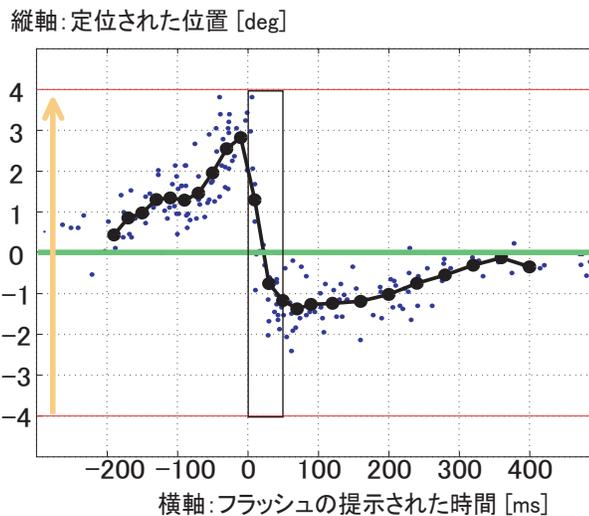


図 2.2 サッカー前中後における空間定位誤りの時間変化

サックード抑制の大きさはその刺激・環境条件に大きく依存し、その大きさは 100 倍以上になるものから、ほとんど抑制の無い場合までである。サックード抑制はサックード開始の数 10ms 前から始まり、その後徐々に回復しサックード終了後 100~200ms で完全に回復する。抑制の大きさを決める主たる要因を以下にまとめる。

- 背景が高輝度である程、抑制効果が大きく、暗黒では抑制はほとんど無いが非常に小さい。
- 刺激の空間周波数が低い程、抑制効果が大きい。
- 輪郭の明瞭なテスト刺激に対しては輪郭線が多い背景パターンは大きな抑制効果を示すが、一様テスト刺激に対しては背景パターンはほとんど影響しない。
- サックードが大きいほど抑制効果は大きい。

2.2.3 サックード時のフラッシュ刺激に対する定位

前述のように、サックードによって生じる急速な網膜像の変化は何らかの方法で抑制されている。しかし、サックード時の網膜像の変化を知覚することがなくても、サックードの前後で物体は網膜上でサックードの振幅の分だけ移動しており、その物体位置の変化を知覚しないことはサックード抑制だけで説明することはできない。視覚システムは何らかの方法でサックード前後の物体の網膜上の位置変化を補償している。これは位置の恒常性 (Space Constancy) と呼ばれている。これまで、このメカニズムをサックード周辺の時間にフラッシュ刺激を提示することによって調べた研究が多く存在している [37]- [63]。特に暗闇の中で提示されたフラッシュ刺激 (光点が数 ms 非常に短い時間提示される刺激) を定位する課題 [37]-[50] [54] [56] [57] では、定位のための手がかりは環境には存在しないため、サックード時の定位メカニズムを直接的に示唆するものと考えられてきた。サックード周辺の時間に暗闇の中でフラッシュ刺激を定位すると、ある傾向を持って誤定位することが知られている [44] [45] [46]。図 2.2 はサックード開始時間に対してフラッシュの提示された時間 [ms] に対して誤定位の大きさ [deg] をプロットした定位誤りの例である。-4deg から +4deg へのサックードが行われ、0deg にフラッシュが提示されたとする。時間軸上、サックードが行われている時間帯は 0~50ms (黒

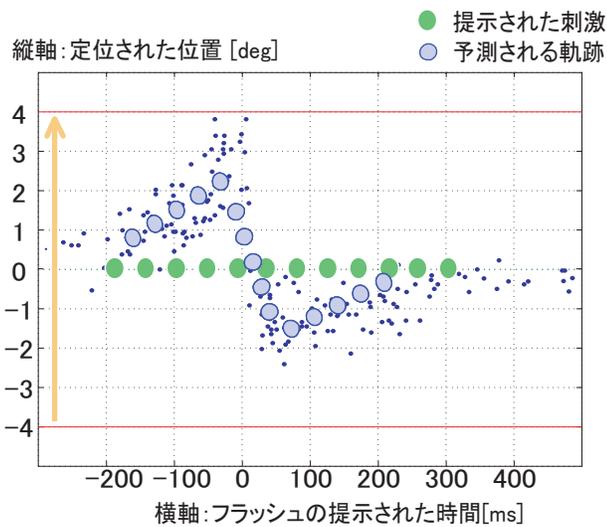


図 2.3 フラッシュの定位誤りから予測されるフリッカー刺激の知覚軌跡

枠) のおよそ 50ms である．一般に，光点がサッカード前に提示されるとサッカードと同方向に誤定位され，サッカード中は誤定位の位置が徐々に変化し，サッカード終了後にはサッカードと逆方向に誤定位される．サッカードの開始，終了時刻付近で定位誤りの絶対値が最大となる．この現象は一般に，脳内の眼球位置情報と網膜情報に基づいた相殺説によって説明される [43][44][69]．定位対象の知覚上の位置と実際の物理位置を式で表すと

$$P^p = E^p + R^p \quad P^r = E^r + R^r$$

と表せる． P は対象の位置， E は眼球位置情報， R は網膜からの相対位置情報を表し，添え字 p は知覚上の情報， r は実際の物理的な情報とする．上述の脳内での眼球位置情報は E^p である．このとき，網膜からの情報は知覚上と物理的な情報は等しい， $R^r = R^p$ とすると，知覚上の定位誤り $P^p - P^r$ は $E^p - E^r$ となる．つまり，知覚上の眼球位置情報 E^p が物理的な眼球位置情報 E^r と異なることから知覚上の定位誤りが形成されると考えられる．

2.2.4 サッカード時の連続点滅刺激に対する定位

サッカードを利用した情報提示手法では，光点はある時間パターンで高速点灯するため，その設計指針について考えるためにはフラッシュ刺激の定位だけではなく，ある時間幅を持って提示された光点刺激の定位について調べる必要がある．しかし，これまで，サッカード中に時間幅を持つ光点刺激を提示した研究は少ない．Hershberger は，サッカード中に 1 つの光点を 120Hz で連続点滅させた場合，サッカードと逆方向に順に光るサッカード振幅の半分程度の大きさを持った点列が知覚されると報告している [20]．しかし，知覚される点列の眼球運動との時間関係や，その定位位置についてはこれまで研究がなされていない．そこで本章では，このサッカード時にある時間幅を持って提示される光点刺激の知覚される形態と定位位置について調べる．

時間幅を持って提示される光点刺激の定位は，これまで調べられてきたフラッシュ刺激と異なり，空間的にある長さ（形態）を持った光点群を定位することになる．そのため，フラッシュ刺激では定位処理機構のみが考慮の対象となったが，時間幅を持った光点刺激に関しては，定位処理機構に加えて形態処理機構が働くことになる．このことを考えると，時間幅を持った光点刺激の定位のメカニズムとして以下の 2 つの仮説が考えられる．

1. 時間幅を持った光点刺激をフラッシュ刺激の集まりと捉え、光点刺激のそれぞれを独立に定位し、それを一つまとめた形態と考えるメカニズム。これは、各光点に対する定位処理機構が先に働き、その後に形態処理機構が働くと考えられるものである。この仮説に基づくと、連続点滅する光点の知覚軌跡は図 2.2 のような瞬間提示される光点の知覚軌跡の時間変化を結んだ逆 S 字状の像となる。
2. 継時的に網膜上に広がった光点刺激群を一つの形態と考え、それをまとめて定位しているメカニズム。これは、なんらかの形態処理機構が先に働き、それを一つの像としてまとめて定位処理が行われると考えるものである。この仮説に基づくと、知覚される像は網膜上に描かれた形態情報を元にしており、大きさの伸縮の可能性はあるが、光点の位置関係は保たれると考えられる。

前者の仮説では、時間幅を持った光点刺激をフラッシュ刺激の集合として捉え、それぞれの光点を独立に定位していると考えられる。そこから予測される知覚像の時間軌跡はフラッシュ刺激の定位の時間軌跡に沿ったものになる。例えば、図 A.13 のようにサッカード前後を含めて光点が提示されたとすると、予測される知覚軌跡は逆 S 字型の軌跡になる。サッカードの前後の時間帯では、サッカードと同方向に、サッカード中ではサッカードと同方向に移動しているはずである。この場合、知覚される長さはサッカード振幅の約半分であり、これまでの報告と一致するが、サッカード前後の移動に関してはそのような主観的知覚は報告されていない [20] [21] [22] [23]。一方で、後者の仮説ではサッカード中のみ光点刺激は網膜上で点列として広がり、サッカードと逆方向の像が知覚されることが予測される。このことは、これまでの主観的報告と一致するが、知覚される像の大きさには食い違いがある。もし、網膜上の長さがそのまま知覚されているとするならば、サッカード振幅と同じ長さの点列が知覚されるはずであるが、実際にはサッカード振幅の約半分の長さが知覚されている。また、この仮説における定位処理機構についてはこれまでの研究から予測することができない。

このように、時間幅を持った光点刺激の知覚される形態・位置に関しては、これまで得られた知見は少なく、その知覚像を予測することは困難である。そこで、本章の実験では、実際に眼球運動を計測しながら、サッカード前中後に時間幅をもったフリッカー刺激をサッカードに対して様々なタイミングで提示し、その知覚される位置・形態を同時に調べることにした。

2.3 実験 2-1：時間幅を持って提示された光点刺激の定位と形態知覚

2.3.1 実験装置と手順

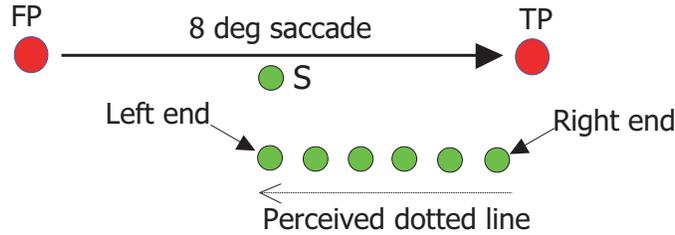
被験者

被験者は正常な視力を持った naive な男性被験者 3 名 (Y.I., Y.A., K.F.) である。3 名は実験 2-1, 2-2 の両方に参加した。

実験装置

注視点 (FP), 視標 (TP), フラッシュもしくはフリッカーする光点刺激 (S) を図 2.4(a) のように配置する。FP と TP は赤色 LED (Light Emitting Diode) を使用し、直径は視野角 0.25deg, 明るさ 16cd/m² である。被験者は FP から TP に向けて 8deg のサッカードを行った。S は直径 0.1deg の緑色 LED で、FP と TP の真中に配置した。S の輝度はフラッシュ条件で 10cd/m², フリッカー条件で 1.6cd/m² である。フリッカー条件のほうがフラッシュ条件より点滅時間が長いので、フリッカー

(a) Spatial arrangement



(b) Time charts

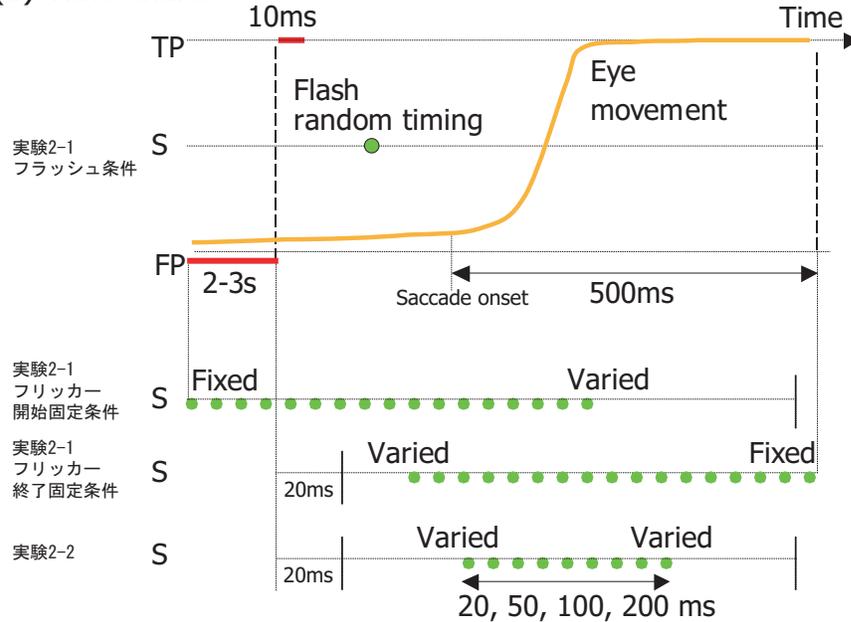


図 2.4 実験 2-1, 2-2 の実験装置の概観 (a) とタイムチャート (b)

条件において主観的な明るさを揃えるために暗い光点刺激を使用した。また、刺激輝度による傾向の差異を調べるために、被験者 K.F. は 1.6cd/m^2 の S を使用してフラッシュ条件の実験も行った。

被験者の右眼球と S との距離は 150cm 、FP、TP、S の中心の高さは被験者の眼球の高さと同じである。被験者の左眼を眼帯によって覆い、顎台によって頭部を固定した。被験者の右目の水平方向眼球運動を EMR-600 (NAC Inc.) によって計測した。解像度は 0.17deg である。EMR-600 の電圧出力と FP、TP、S の点滅タイミングを PC によって記録した。LED の制御には Microchip (PIC16F877) を用いた。実験は全て暗室 (0.01lx 以下) の中で行われた。

実験手順

実験の各ブロックは眼球運動計測装置のキャリブレーションによって始まる。被験者は FP、TP、S と同じ平面上で、 $-8, -4, 0, 4, 8\text{deg}$ の位置を順に注視する。眼球位置はこの 5 点でのデータから線形補完して求めた。

実験 2-1 のタイムチャートを図 2.4(b) に示す。実験 2-1 においては、フラッシュ条件、フリッカー開始固定条件、フリッカー終了固定条件の 3 条件のデータを計測した。各試行の初めに FP が $1\sim 2\text{sec}$ ランダムに点灯し、被験者は FP に視線を向ける。次に FP が消灯するとともに TP が 10ms 点灯する。被験者は TP に向けてサックードを行う。

- フラッシュ条件では，S は TP 消灯後 10～600ms の時間帯（サッカード開始約 200ms 前～終了約 400ms 後）のうちランダムに 2ms 点灯する．
- フリッカー開始固定条件では，S は FP 点灯とともに 500hz（0.5ms 点灯，1.5ms 消灯）の周期で点滅を開始し，FP 消灯後 10～600ms の時間帯（サッカード開始約 200ms 前～終了約 400ms 後）のうちランダムの時間に点滅を終了する．
- フリッカー終了固定条件では，S は FP 消灯後 10～600ms の時間帯（サッカード開始約 200ms 前～終了約 400ms 後）のうちランダムの時間に点滅を開始し，サッカード終了後 500ms に点滅を終了する．

フラッシュ条件において被験者は，知覚したフラッシュ刺激 S の位置をレーザポインタ（直径 0.08deg, レーザクラス II）によって指し示す．フリッカー開始固定条件，フリッカー終了固定条件においては，フリッカーの提示されるタイミングによって，点，もしくは点列のいずれかが知覚される．そのため，点が知覚されたときには一つのレーザポインタによってその位置を，点列が知覚されたときには二つのレーザポインタによって同時にその両端を指し示してもらった．レーザポインタは被験者の手の前に固定され，水平方向のみ回転可能である．FP, TP, S が配置されている平面は升目 1mm の方眼紙によって覆われていて，実験者がレーザポインタの明かりによって指し示された位置を読み取った．読み取った値は被験者に知らされなかった．実験は 1 ブロック 50 試行からなり，各被験者 5 ブロック行った．

データ解析

実験 2-1, 2-2 においては眼球運動に対して同じ手順でデータ解析を行った．被験者は 8deg のサッカードを行うので，サッカード振幅が 10deg 以上，もしくは 5deg 以下，持続時間が 70ms 以上，もしくは 20ms 以下，潜時が 300ms 以上，もしくは 60ms 以下の試行はデータから除かれた．

眼球運動計測装置からの電圧出力は初めに，カットオフ周波数 100Hz のローパスフィルタを通されノイズを除去される．得られた電圧データとキャリブレーションデータによって，眼球位置，眼球運動速度を計算する．眼球運動速度が初めて 40deg/sec を越えた時刻をサッカード開始と定義し，サッカード開始後，眼球運動速度が初めて 40deg/sec を下回る時刻をサッカード終了と定義した．

2.3.2 実験結果

実験 2-1, 2-2 の被験者の試行数及びサッカードの特性（振幅，持続時間，潜時）を章節の表 2.1 に示す．これらのデータは，全ての被験者において安定したサッカードが行われたことを示す．

フラッシュ条件での実験結果を図 2.5 に示す．横軸がサッカード開始に対するフラッシュ刺激の提示時間，縦軸が定位位置である．全ての被験者において，サッカード前約 200ms からサッカードと同方向の誤定位が観察され，サッカード開始時に最大となっている．サッカード開始からは徐々にサッカードと逆方向の誤定位が観察されはじめ，サッカードと逆方向の誤定位はサッカード終了後およそ 200～400ms まで続く．Y.I. (図 2.5(a)) のデータにおいては，他の被験者よりもサッカード後の誤定位が長く続いている．Y.A. (図 2.5(b)) のデータではサッカードと同方向の誤定位がサッカード開始 200ms よりも前から始まり，サッカード後のサッカードと逆方向の誤定位は観察されなかった．K.F. (図 2.5(c)) のデータでは，サッカード後でもサッカードと同方向の誤定位が観察されることがあった．また，K.F. の S がより暗い 1.6cd/m² の条件での結果 (図 2.5(d)) は，明るい 10cd/m² の条件と同様の傾向が観察された．やや個人差があるものの，フラッシュ刺激に対する一般的な定位の傾向はこれまでの先行研究 ([46][48][54]) と一致する．

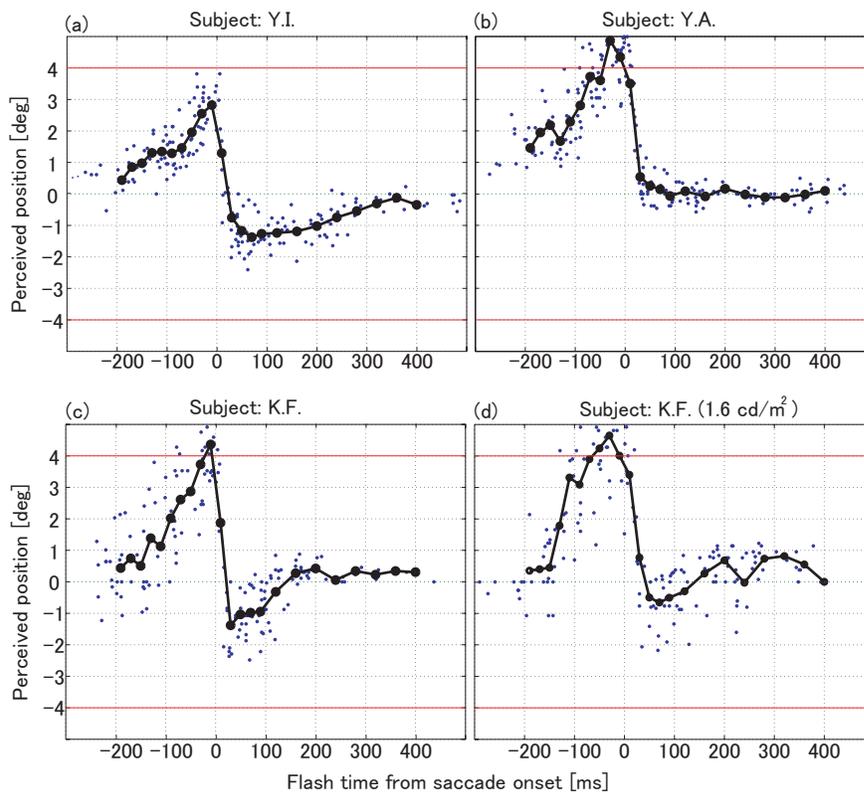


図 2.5 フラッシュ条件での定位

フリッカー条件での結果を図 2.6 に示す．本実験において，サカドは被験者にとって右方向（-4deg から +4deg）であるので，フリッカー中の最初のフラッシュは知覚された点列の右端，最後のフラッシュは点列の左端となる．開始固定条件の定位結果は図 2.6(a) である．横軸がサカド開始に対するフリッカーの終了時間，縦軸が定位位置である．フリッカーの開始時間は固定されているので，フリッカー中の最初のフラッシュ（点列の右端）と最後のフラッシュ（点列の左端）は両点とも最後のフラッシュが提示された時間（フリッカーが終了した時間）に対してプロットしてある．例えば，フリッカーがサカド開始から 100ms 後まで提示されていたとき，被験者 Y.I. は点列を知覚し，右端と左端をそれぞれ約 +2.0deg と -1.5deg に定位しているので，図 2.6(a) において両点とも水平軸（時間軸）100ms に，縦軸のそれぞれの定位された位置にプロットされている．終了固定条件の定位結果は図 2.6(b) である．横軸がサカド開始に対するフラッシュの開始時間，縦軸が定位位置である．フリッカーの最後のフラッシュ（点列の左端）はサカド終了後 500ms に固定されているので，図 2.6(b) においては定位された右端，左端ともにフリッカーの最初のフラッシュが提示された時間（フリッカーが開始した時間）にプロットされている．図 2.6(a)，(b) の両図において，のみが時間軸に対して正しくプロットされていることになる．図 2.6(c) は知覚された点列の長さをサカドの振幅に対する比率で示している．横軸は開始固定条件，終了固定条件それぞれ，図 2.6(a)，(b) と同じである．ゼロは点が知覚されたことを示す．

図 2.6(a)(c) を考えると，開始固定条件においては，全ての被験者がサカド前は点を知覚し，正しい位置（0deg）に定位している．サカド開始後に点列に見え始め，サカド終了とともに知覚される点列の長さは飽和している．このことは，知覚される点列はサカド中のみ広がっていることを意味する．また，知覚された長さに関しては，全ての被験者でサカド振幅の約半分である．

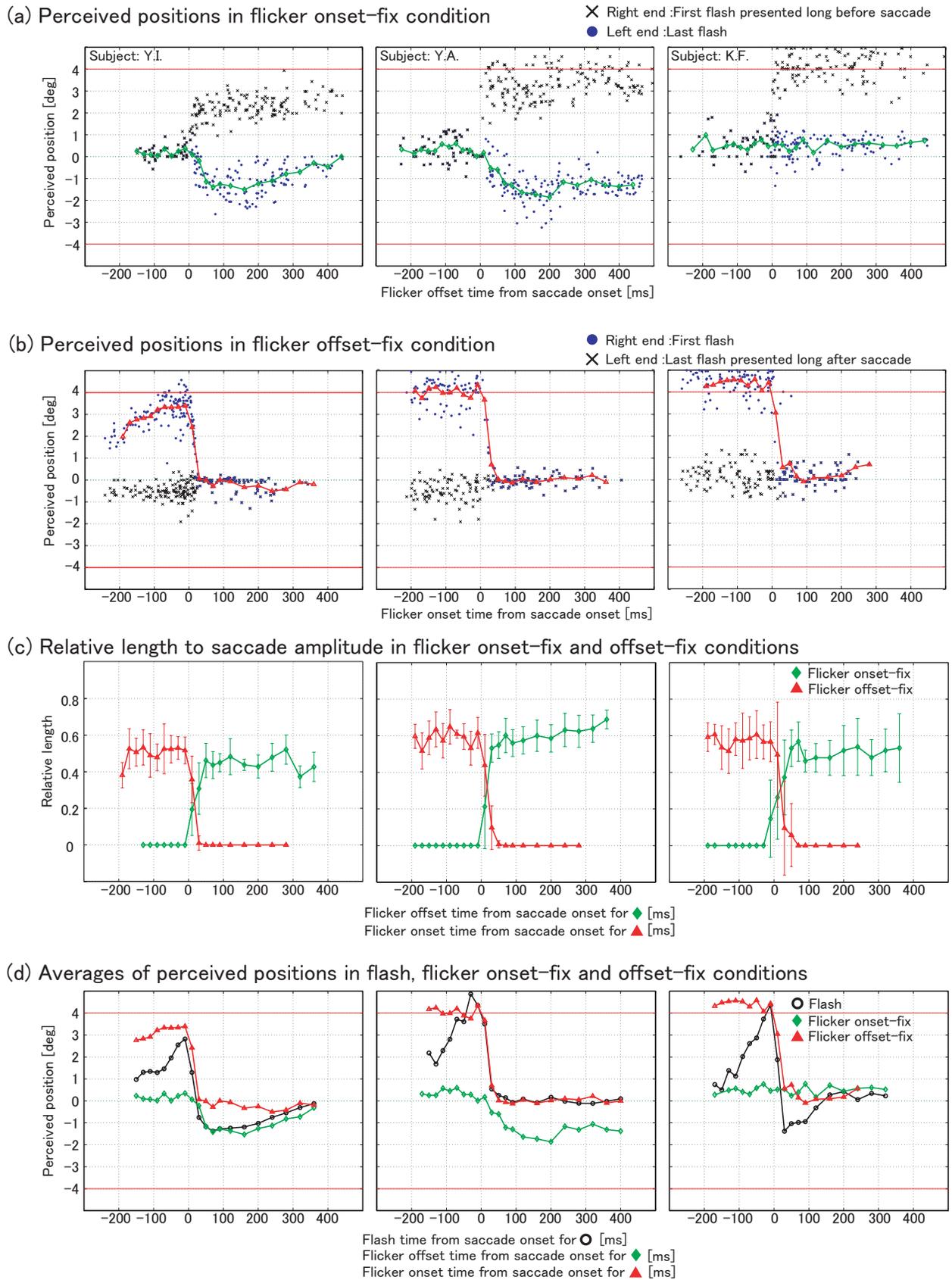


図 2.6 フリッカー条件での定位と知覚された長さ

Subject: K.F. (Continuous light)

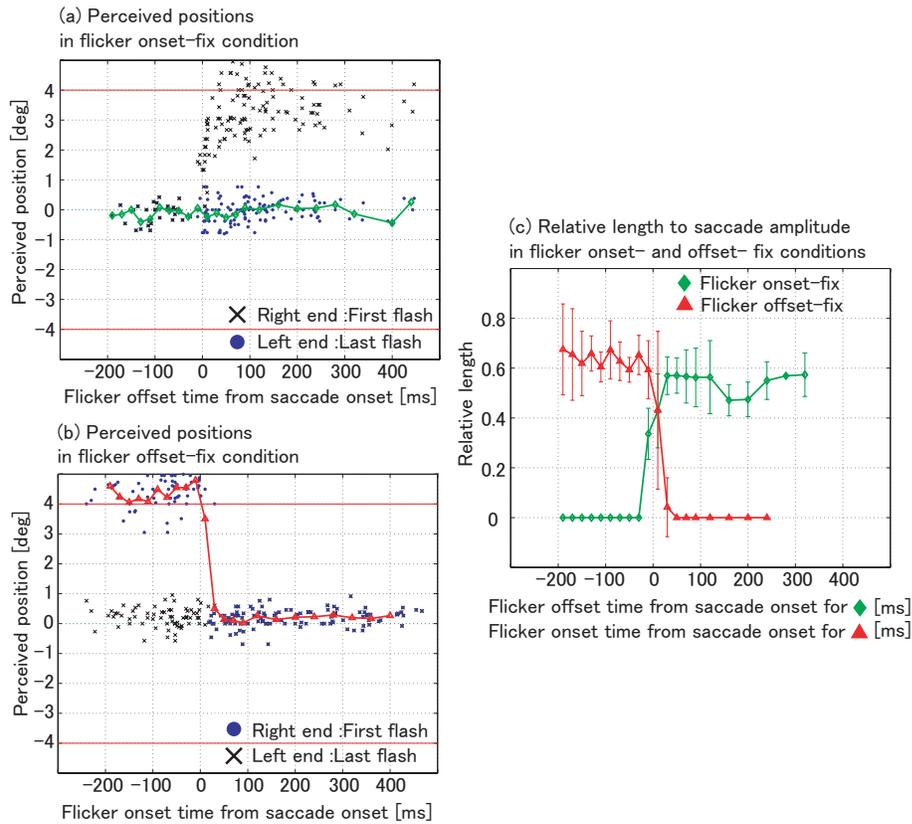


図 2.7 K.F. 連続点灯光点による結果

サッカード後の定位された位置については、やや個人差が見られる。Y.I. は左端をサッカードと逆方向にずれて知覚しており、フリッカーの持続時間が長くなると、左端は徐々に正しい位置 (0deg) に知覚されるようになっていく。Y.A. のデータにおいては、左端のサッカードと逆方向のずれがサッカード開始 400ms 以降も続いている。K.F. は左端を常に正しい位置に知覚している。

図 2.6(b)(c) を考えると、終了固定条件においては、全ての被験者はフリッカーがサッカード終了前に始まったときのみ点列を知覚している。知覚された長さは、開始固定条件と同じくサッカード振幅の約半分である。サッカード開始とともに知覚される長さは短くなり、サッカード終了とともにゼロになる(点に知覚される)。サッカード終了後にフリッカーが始まった場合は、全ての被験者が点を知覚し、正しい位置に定位している。左端の定位位置について考えると、全ての被験者が全ての時間帯でおよそ正しい位置に知覚している。右端は Y.A. と K.F. はサッカード前に約 4deg の位置に定位しており、サッカード開始とともに正しい位置に知覚されるようになっていく (Y.I. はサッカード前の時間帯において、定位位置がサッカード方向にずれているように観察されるが、知覚される長さの比率は一定である。これは、Y.I. はフリッカーがサッカード直前に提示されたとき小さなサッカードを起こす傾向があったためである)。

また、図 2.7 は K.F. に対して 500Hz のフリッカーではなく連続点灯刺激を使用してフリッカー条件と同様の実験を行った結果である。その結果は、500Hz のフリッカーと変わらないものであり、高速に点滅していることと連続点灯していることでは知覚特性が変わらないことを意味している。

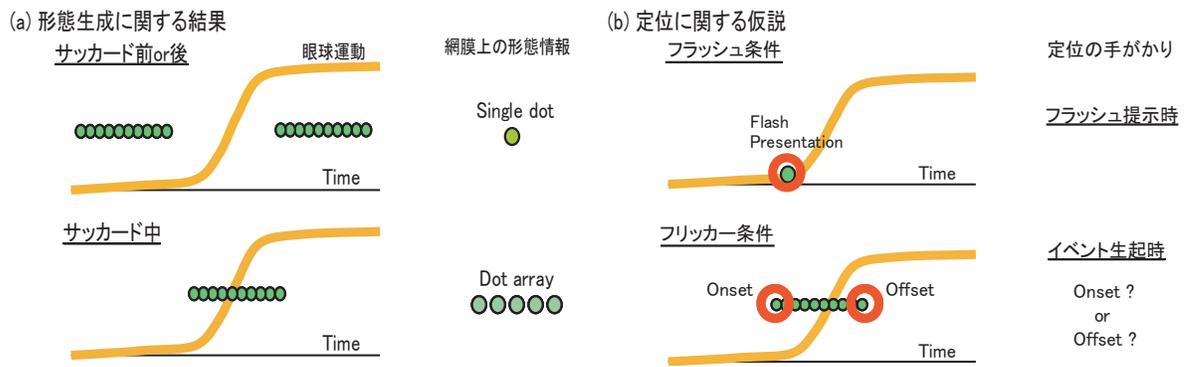


図 2.8 (a) 実験 2-1 の形態生成に関する結果 (b) 定位に関する仮説

2.3.3 考察：結果から予想される定位と形態知覚のモデル

2.2.4 節において、フリッカー刺激の定位は形態処理機構と定位処理機構の 2 つのプロセスがあり、以下のように、その順序によって予想される知覚像が異なることを述べた。

1. 各光点に対する定位処理機構が先に働き、その後に形態処理機構が働くと考えると、瞬間提示される光点の知覚軌跡の時間変化を結んだ逆 S 字状の像が知覚される。
2. なんらかの形態処理機構が先に働き、それを一つの像としてまとめて定位処理が行われると考えると、知覚される像は網膜上に描かれた形態情報を元にしており、大きさの伸縮の可能性はあるが、光点の位置関係は保たれると考えられる。

1 の仮説に基づく、フリッカーにおけるそれぞれのフラッシュを独立に考え、フラッシュ刺激が提示されたときと同様に定位しているとするならば、そのフリッカーの定位位置、知覚形態はフラッシュの定位時間軌跡から予測できるはずである。そこで、図 2.6(d) に開始固定条件におけるフリッカーの最後のフラッシュ（図 2.6(a) における）、終了固定条件におけるフリッカーの最初のフラッシュ（図 2.6(b) における）及びフラッシュ刺激の定位時間軌跡（図 2.5）をプロットした。これら条件のフラッシュ刺激は全て横軸（時間軸）においてフラッシュ刺激が提示された時間にプロットされている。つまりは、同じ時間軸上に存在するデータは、同じ網膜位置に提示されたことになる。もし、フリッカーのなかのそれぞれのフラッシュを独立に定位しているのならば、この 3 つのグラフは重なることが予想される。しかし、図 2.6(d) はこの仮説を支持するものではなく、フリッカーのそれぞれのフラッシュを独立に定位し、形態を知覚しているとは考えにくい。さらに、知覚された長さに関しても、フリッカーの中のフラッシュが独立に定位されているならば、その知覚される長さは予測可能である。例えば、フリッカー開始固定条件において、点列はサッカード開始前約 200ms から広がり始めるはずであるし、フリッカー終了固定条件において、点列はサッカード終了 200ms 程度まで広がり続けるはずである。しかし、この知覚される長さに関しても、この仮説は支持されるものではない。図 2.6(c) に示したように、サッカード中のみ点列は広がっている。つまり、本実験から得られた定位位置、長さに関する結果は、フリッカーの中の各フラッシュが独立にフラッシュ条件と同様に定位されているとする仮説 1 を支持するものではない。

本実験の結果は、図 2.8(a) のように、サッカード前後の眼球が静止している状態においてはフリッカー刺激は一点に知覚され、フリッカーがサッカード中に提示されたときのみ点列が知覚された（この結果はサッカード前に連続点灯光点を提示し、一点のみ知覚されたという Schlag and Schlag-Rey

(1995) の報告や 200Hz のフリッカー刺激を 80ms サッカード前に提示し、一点のみ知覚されたという Sogo and Osaka (2001) の報告と一致する)。つまり、知覚される形態（一点か点列か）は網膜上に生じている形態に基本的に起因していると考えられる。図 2.6(d) における各フラッシュの定位位置の差異に比べて、図 2.6(c) の条件によらない知覚された長さの安定性（振幅の約半分）を考えると、形態処理の後に定位処理が行われていると考える、以下のような仮説 2 が支持される。

1. 形態生成プロセス：刺激間の形態表象（一点や点列）が網膜像に基づいて形成される
2. 定位プロセス：形成された形態表象をまとめて定位している

つまり、なんらかの形態生成プロセスにおいて、一点もしくは網膜像の約半分の点列が生成され、それが一つのまとまった表象として定位されている（長さが半分になることに関しては本章末の考察を参照）。この 2 段階定位仮説に基づいて考えると、フラッシュ条件においては定位プロセスのみによって定位が行われているのに対し、フリッカー条件においては形態生成プロセスの後に定位プロセスの影響を受けている。この差異が図 2.6(d) のような定位の差が生じる原因となっていると考えられる。

次に、定位プロセスに関してより詳しく考える。Schlag and Schlag-Rey (1995) らによると、ある物体の知覚位置は、眼球位置と対応させながら連続的に更新されるというよりは、なんらかのタイミングで一度で決定されるか、ある一定期間の平均によって決定されると考えられる。しかし、刻一刻変化する眼球位置情報に対して、ある時間幅を持って提示されたフリッカー刺激のいつの時点の情報が定位に使用されているのであろうか。フラッシュ刺激に関しては、図 2.8(b) のように、そのフラッシュが提示されたというイベントが起きた時間が定位の手がかりである。一方、フリッカー刺激においては、フリッカーの開始、もしくは終了のイベントが生じたときが重要な手がかりとなる考えられる。そこで、フリッカー刺激がどちらのイベントを手がかりに定位を行っているかを調べるために、実験 2-1 から得られたデータをもとに予測を行った。フリッカーの開始・終了を基準にした予測を以下に示す。

Onset-based localization

$$X_{first} = F(t_1)$$

$$X_{last} = F(t_1) - L(t_1, t_2)$$

Offset-based localization

$$X_{first} = F(t_1) + L(t_1, t_2)$$

$$X_{last} = F(t_2)$$

ただし、フリッカー刺激は時刻 t_1 から t_2 （サッカー開始時刻を 0 とする）に提示されたとする。 $F(t)$ は図 2.5 のフラッシュ条件の定位の時間軌跡である。 $L(t_1, t_2)$ は図 2.6 の知覚された長さである。 X_{first} は予測されたフリッカーの最初のフラッシュ（点列の右端）の定位位置、 X_{last} は予測されたフリッカーの最後のフラッシュ（点列の左端）の定位位置である。フリッカー開始を手がかりとした定位を onset-based localization、フリッカー終了を手がかりとした定位を offset-based localization とする。どちらの定位においても、 X_{first} 、 X_{last} はフラッシュ刺激に対する定位時間軌跡と知覚された長さによって予測されている。onset-based localization においては、 X_{first} はフラッシュ刺激の定位と一致し、 X_{last} は X_{first} と知覚された長さによって決定される。offset-based localization においては、 X_{last} がフラッシュ刺激の定位と一致し、 X_{first} は X_{last} と知覚された長さによって決定される。

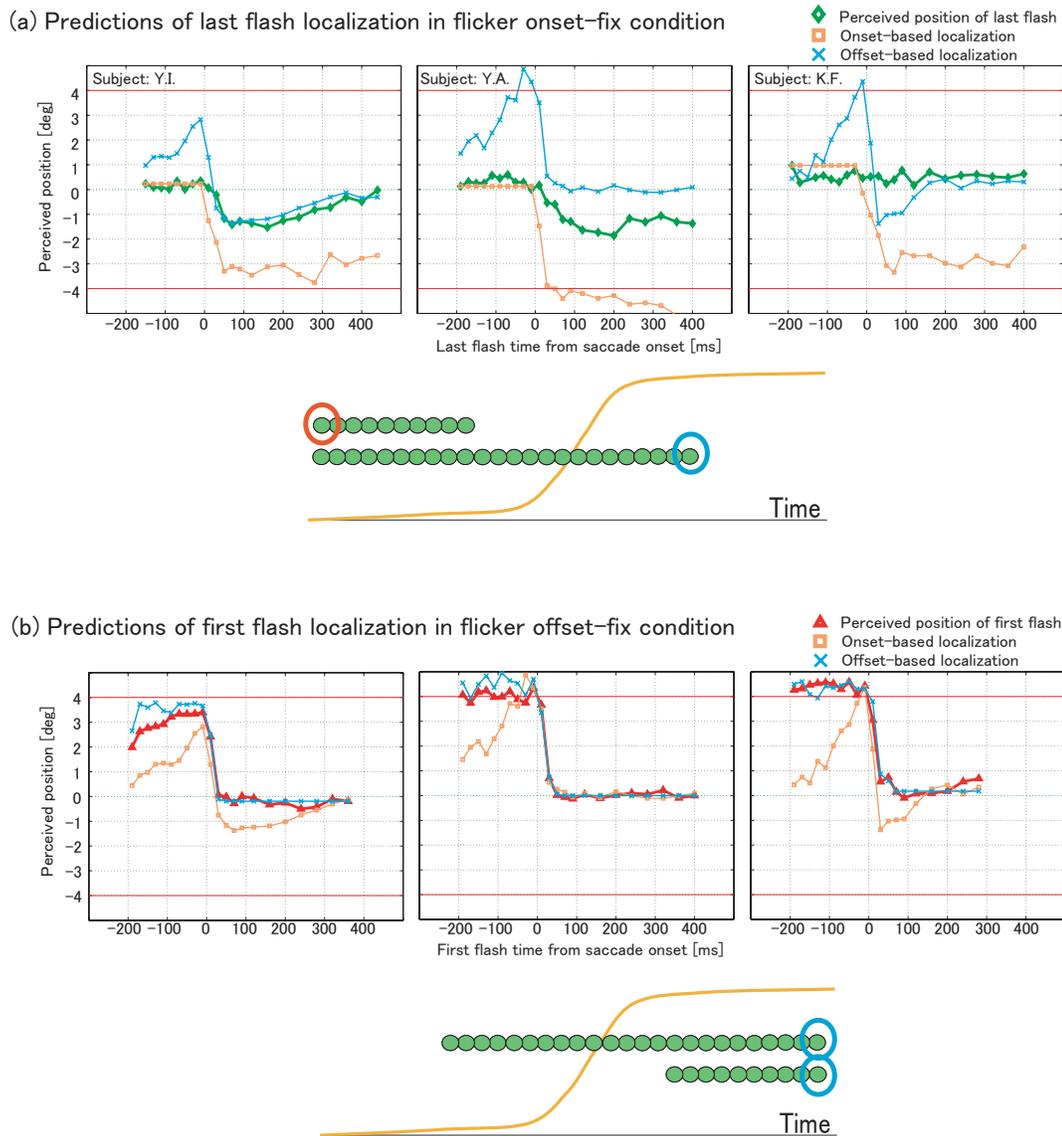


図 2.9 フリッカー条件での onset-base , offset-base localization のシミュレーション結果

図 2.9 に式によって予測される時間軌跡と 2 つのフリッカー条件のデータを合わせて示す．図 2.9(a) ではフリッカー開始固定条件での左端（最後のフラッシュ）の定位位置と onset-based , offset-based localization の予測結果を示している．サッカド前に点滅が終了したフリッカー刺激について，定位の時間軌跡は onset-based localization の予測結果と重なっている．また，サッカド後まで続いているフリッカー刺激に関しては，offset-based localization の予測結果のほうが近い値を示している，もしくは重なっている．図 2.9(b) ではフリッカー終了固定条件での右端（最初のフラッシュ）の定位位置と onset-based , offset-based localization の予測結果を示している．全ての時間帯において，offset-based localization の予測結果が定位の時間軌跡と重なっている．これらの結果はフリッカーがサッカド前に終了すればフリッカーの最初のフラッシュを手がかりに定位を行い，フリッカーがサッカド後まで続けばフリッカーの最後のフラッシュを手がかりに定位を行っていることを示唆している．つまり，どちらの場合にもサッカドから時間的に遠いフラッシュを手がかりに定位を行っていることになる．この傾向の一般性を調べるために実験 2-2 においては，フリッカーの開始・終了及び持続時間を変化させて，その定位位置の時間変化を調べた．

2.4 実験 2-2：モデル検証のために刺激の持続時間を変化させた実験

2.4.1 実験装置と手順

被験者及び実験装置は実験 2-1 と同じである．実験 2-2 においては，フリッカー刺激の提示タイミング及び持続時間を変化させた．フリッカーの持続時間は 20, 50, 100, 200ms のいずれかから選ばれた．図 2.4(b) に示すように，フリッカー刺激は TP の消灯 10 ~ 600ms 後（サッカード開始約 200ms 前 ~ 約 400ms 後）に提示された．被験者は前実験と同じく，知覚された点もしくは点列をレーザポインタによって指し示した．S の明るさは前実験フリッカー条件と同じく 1.6cd/m^2 である（被験者は持続時間の違いによって生じる明るさの違いを見分けることはできなかった）．被験者は 1 ブロックは 50 試行で 20 ブロックの実験を行った．4 つの持続時間は各ブロック内ランダムに含ませた（各条件あたりは前実験と同じく 5 ブロックである）．

2.4.2 実験結果

得られた結果を図 2.10 示す．定位された右端（フリッカー中の最初のフラッシュ），左端（フリッカー中の最後のフラッシュ）はそれぞれの提示された時間にプロットされている．例えば，持続時間 100ms のフリッカーがサッカード前 100ms から提示されれば，右端は水平軸（時間軸）-100ms に，左端は水平軸 0ms の，定位された位置にプロットされる．点が知覚されたときにはそれぞれの時間軸上で同じ垂直軸上の位置に 2 つ点がプロットされる．図 2.10(a)-(d) に右端，左端の知覚された位置のデータを前実験のフラッシュ条件のデータとともに示す．持続時間が 20ms の条件（図 2.10(a)）においては，持続時間が短いので最初のフラッシュ（右端）と最後のフラッシュ（左端）の時間軌跡は殆ど同じ傾向を示している．しかし，より長い持続時間の条件（図 2.10(b)-(d)）では，2 つの時間軌跡は異なっている．サッカード前の時間帯においては，最初のフラッシュの誤定位が大きく，サッカード後の時間帯においては，最後のフラッシュの誤定位が大きい．そして，どちらもフラッシュ条件の時間軌跡とは異なっている．図 2.10(e) は各条件の知覚された長さのサッカード振幅に対する比率である．時間軸はフリッカーが終了した時間である．この結果はサッカード中にフリッカーが点滅していたときのみ点列が知覚されていることを意味している．例えば，持続時間 200ms の条件では時間軸 0ms（サッカード直前にフリッカーが終了）から知覚された長さが増加し始め，240ms（サッカード自体の持続時間が 40ms であるのでサッカード終了直前にフリッカーが開始）まで長さが知覚されている．持続時間 20ms の条件においては知覚された長さの最大値が他の条件に比べて小さいが，これはフリッカーの持続時間がサッカードの持続時間より小さいことによる．持続時間 50, 100, 200ms の条件では，長さの最大値はおよそ半分で，被験者内で安定した値を示している．

2.4.3 考察：モデルと実験結果の適合性

図 2.10(a)-(d) の結果はフリッカーにおける最初のフラッシュの時間軌跡も，最後のフラッシュの時間軌跡もフラッシュ条件の時間軌跡と一致していないということを示している．これら 3 つの条件の時間軌跡はサッカードに対して同じタイミングに提示されている，つまり，同じ網膜位置に提示されているのにも関わらず異なる位置に定位されている．また，図 2.10(e) はサッカード中にフリッカーが提示されたときのみ点列が知覚されたことを示している．これらの結果も実験 2-1 の結果と同じく，フリッカーの中の各フラッシュを独立に考え，フラッシュ条件と同様な定位が行われているという考えを支持するものではなく，知覚される形態（一点か点列か）は網膜上の形態情報をもとに形成されているという 2 段階仮説を支持するものである．

定位に関しては，実験 2-1 より，サッカー前に終了したフリッカーは最初のフラッシュを，サッカー終了後まで提示されているフリッカーは最後のフラッシュを定位の手がかりにしているということが示唆された．この傾向が本実験結果にも当てはまるか，式で示した onset-based もしくは offset-based localization からの予測値と実際の定位軌跡を比べた．その結果を図 2.11(a)-(h) に示す．フリッカーがサッカー前に開始，終了した場合（フリッカーが t_1 から t_2 まで提示されたとすると， $t_1 < -d$, or $t_2 < 0$; 左の白い領域），一点が知覚され，その定位はおよそ onset-based localization と一致している．一方，フリッカーがサッカー後に開始した場合（ $t_1 > 40$ or $t_2 > 40 + d$; 右の白い領域），一点が知覚され，定位は offset-based localization に近い．この二つにはさまれた時間帯（ $-d < t_1 < 40$ or $0 < t_2 < d + 40$; 色のついた領域）では，被験者がサッカーを行っている間にフリッカーが提示され，点列が知覚されている．この時間帯では，定位が onset-based localization に近いのか，offset-based localization に近いのかはつきりとは区別できない．そこで，この差を定量的に評価するために以下の値を計算した．

$$D_{onset} = \sqrt{M[d_{onset}^2]} = \sqrt{M[(P_{onset} - P)^2]}$$

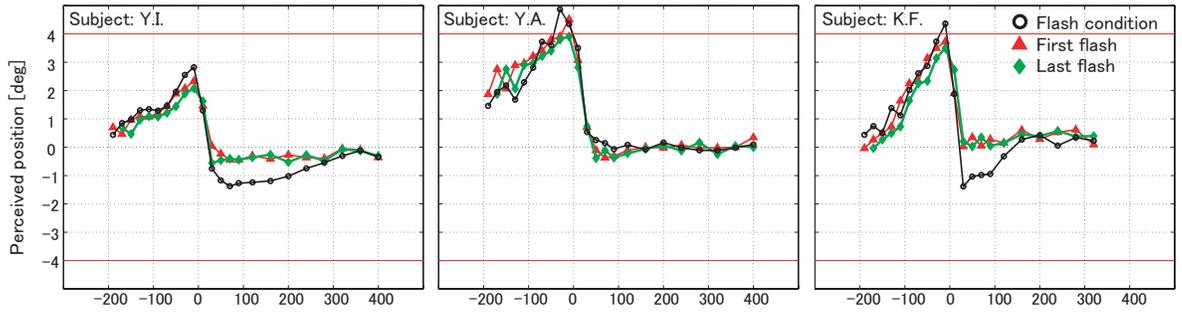
$$\begin{aligned} D_{offset} &= \sqrt{M[d_{offset}^2]} = \sqrt{M[(P_{offset} - P)^2]} \\ &= M\left[\frac{(d_{offset}^2 - d_{onset}^2)}{(d_{offset}^2 + d_{onset}^2)}\right] \end{aligned}$$

ここで $M[\dots]$ は各条件内でのデータの平均を取ることを意味する． P は実際に定位された位置を表し， P_{onset} と P_{offset} はそれぞれ onset-based localization と offset-based localization から予測された位置である． D_{onset} と $D_{offset}[\text{deg}]$ は onset-based localization と offset-based localization の予測エラーを表す．この値が小さいときほど予測が実際の値に近いことを示している．インデックス は正の値を取るとき（ d_{onset} が d_{offset} より小さいとき），onset-based localization が定位された値に近いことを示し，負の値を取るとき（ d_{onset} が d_{offset} より大きいとき），offset-based localization が定位された値に近いことを示している．

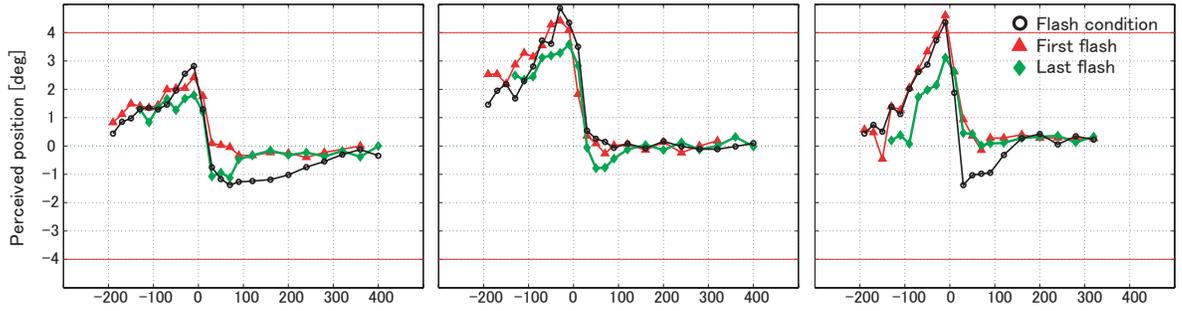
図 2.12 に 4 つの持続時間条件において計算された D_{onset} と D_{offset} ，インデックス の値を示す．それぞれの値は 3 つの時間区分内で計算され，3 人の被験者のデータを平均している．図 2.12 において“ Before ”と記されている時間区分はフリッカーがサッカー前に開始し，サッカー前もしくはサッカー中に終了した場合である．この時間区分は図 2.11 では左の白い領域と左の青い領域である（この 2 つの領域は同じ傾向を示したので一つの時間区分とした）．この時間区分では全ての持続時間条件において，インデックス は正の値を示している．つまり，フリッカーがサッカー前に開始し，サッカー後まで点滅し続けなければ，定位はフリッカーの最初のフラッシュを手がかりにしていると考えられる．

次に，図 2.12 において“ Before/After ”と記されている時間区分はフリッカーがサッカー前に開始し，サッカー後まで継続した場合である．この時間区分は図 2.11 では中央の黄色い領域であるこの時間区分においてインデックス は，持続時間 100ms 条件において正の値を示し，200ms 条件においては負の値を示している．どちらが優位と断言するのは困難であるが，サッカーが長い持続時間を持って提示された場合は，サッカー後の時間帯にフリッカーが点滅している時間が長くなるため，フリッカーの最後のフラッシュを定位の手がかりとする傾向があると考えられる．

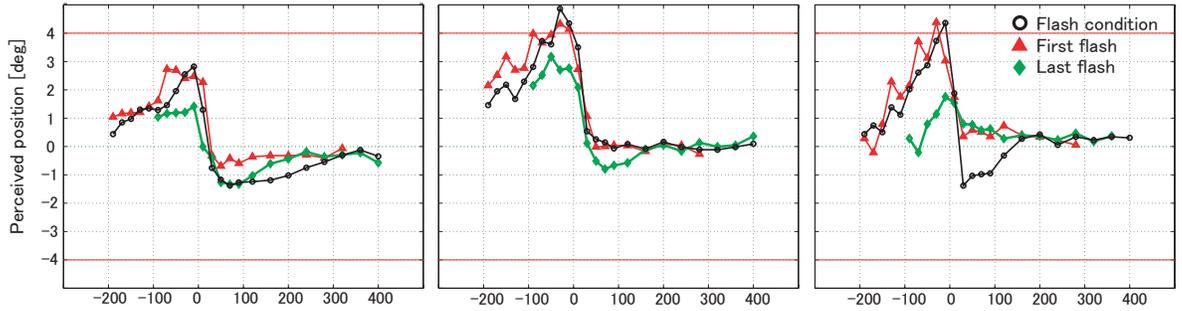
(a) Duration 20ms



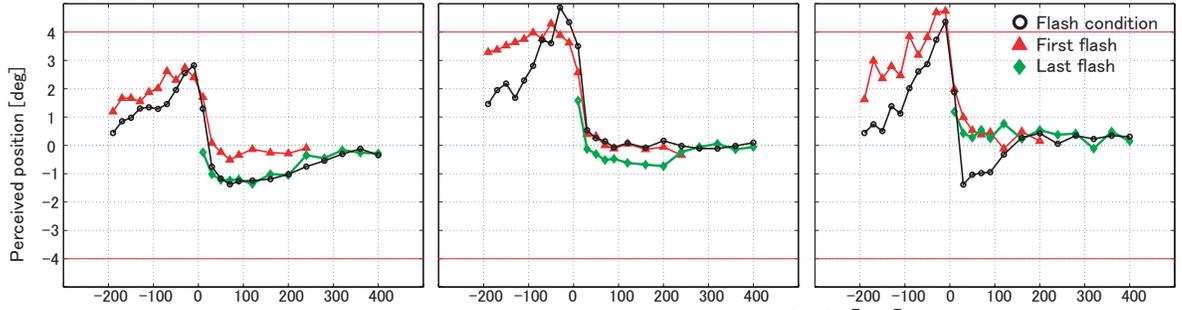
(b) Duration 50ms



(c) Duration 100ms



(d) Duration 200ms



(e) Relative length to saccade amplitude

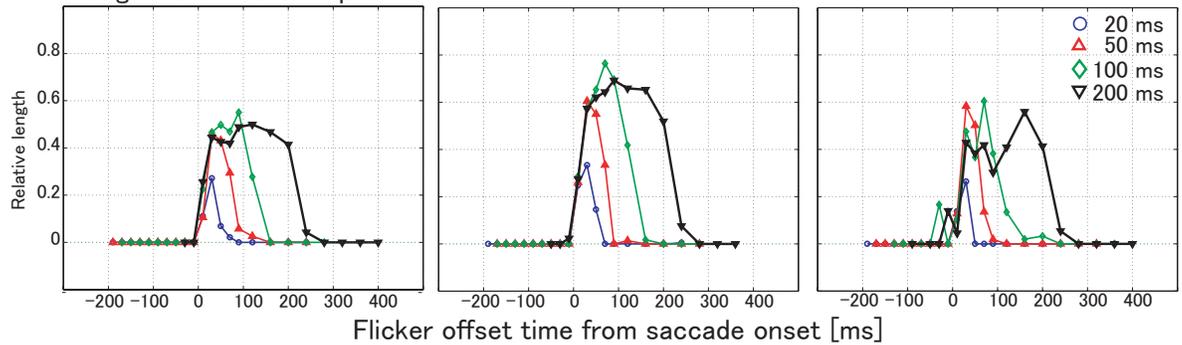


図 2.10 実験 2-2 の結果

Subject: Averaged

▲ Perceived position of first flash □ Onset-based localization
◆ Perceived position of last flash × Offset-based localization

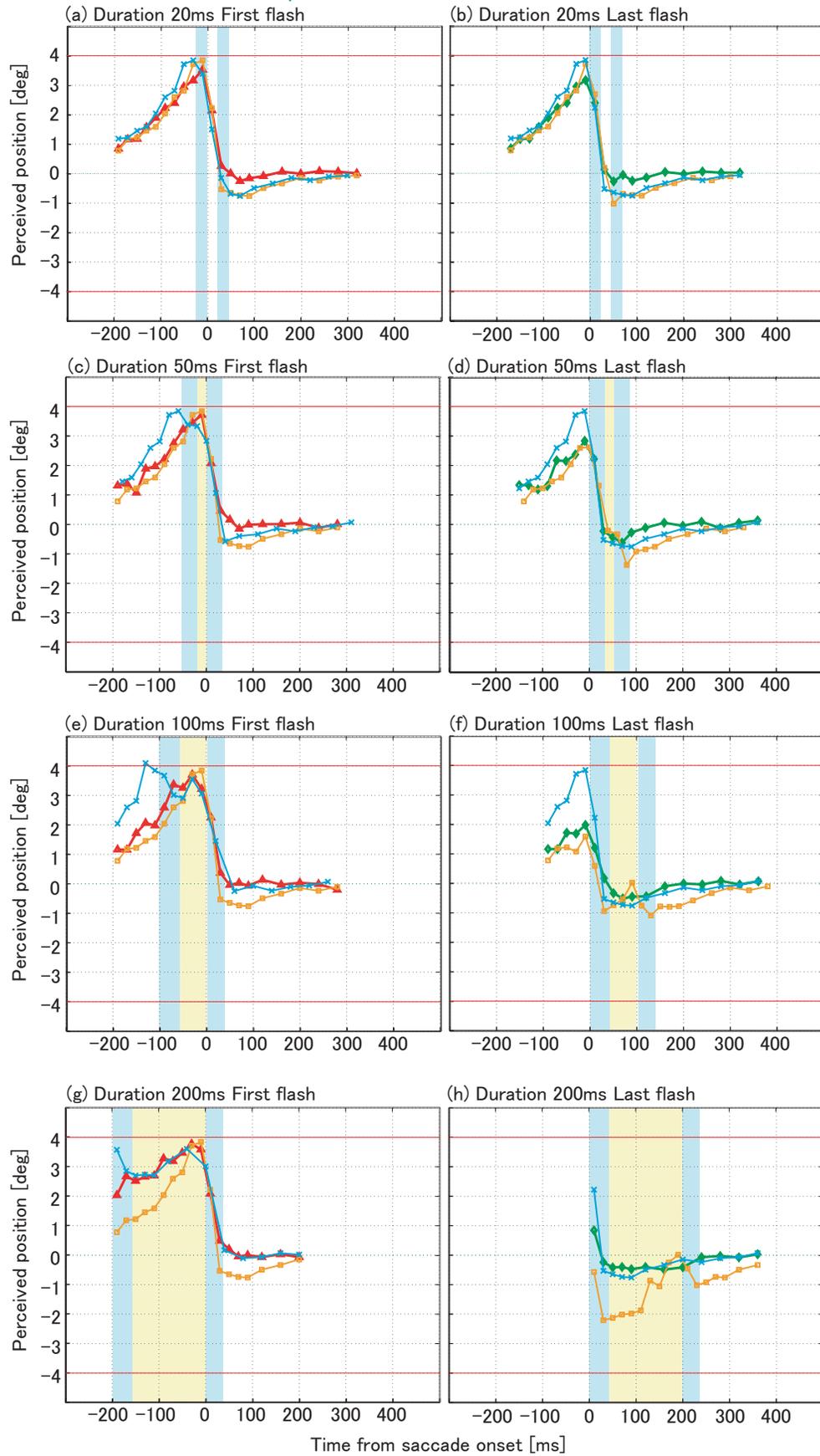


図 2.11 定位の結果と予測値の比較

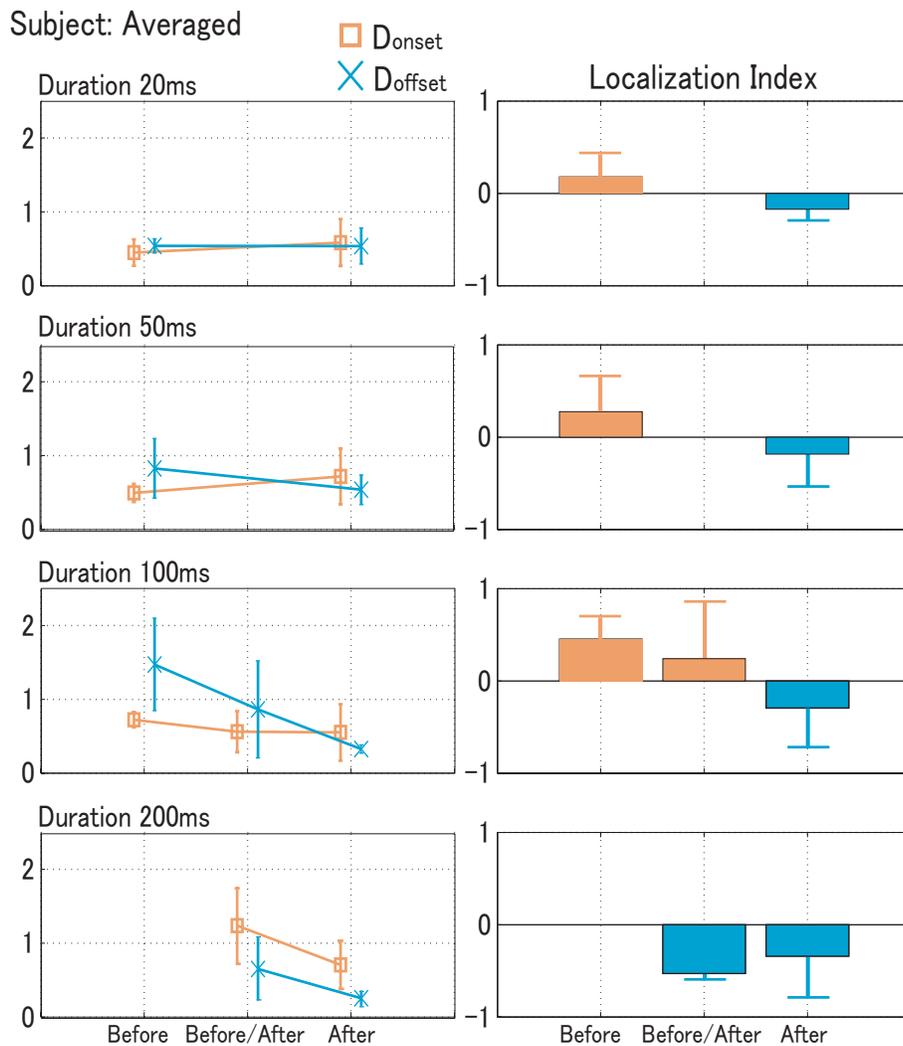


図 2.12 計算された指標

最後に、図 2.12 において“ After ”と記されている時間区分はフリッカーがサッカード中もしくはサッカード後に開始し、サッカード後に終了した場合である。この時間区分は図 2.11 では右の青い領域と右の白い領域である（この 2 つの領域は同じ傾向を示したので一つの時間区分とした）。この時間区分では全ての持続時間条件において、は負の値を示している。つまり、フリッカーがサッカード後まで続いている場合、定位はフリッカーの最後のフラッシュを手がかりにしていると考えられる。

時間区分“ Before ”において、フリッカーの最初のフラッシュを手がかりに定位し、時間区分“ After ”において、フリッカーの最後のフラッシュを手がかりに定位しているという結果は実験 2-1 によって得られた、サッカードから時間的に遠いイベントを手がかりに定位をしているという仮説を支持するものである。

2.5 実験 2-1, 2-2 のまとめ

実験 2-1, 2-2 より得られた結果は以下のこと示した。

- フリッカーのようなある時間幅を持って提示された光点刺激はフラッシュが定位される時間軌跡から単純に予測できるものではない（サッカードに対して同じ時間に提示された光点であっても異なる位置に定位された）。
- 知覚される像の水平方向の大きさは安定してサッカード振幅の約半分の大きさであった。

そして、これらの結果から以下のことが示唆された。

- フリッカーのような時間幅を持って提示される刺激は、刺激間の形態表象（一点や点列）が網膜像に基づいて形成され、その形態表象をまとめて定位している。
- 定位においてはサッカードから時間的に遠い光点を手がかりに定位をしている。

表 2.1: 実験 2-1, 2-2 で計測されたサッカードの試行数, 振幅 [deg], 持続時間 [ms], 潜時の平均 [ms]
括弧内は標準偏差

	Experiment	Trials	Amplitude	Duration	Latency
Y.I.	Expt. 1	185	7.69 (1.18)	40.6 (5.8)	220.2 (25.4)
	Expt. 2	181	7.65 (1.43)	40.8 (6.4)	207.7 (31.9)
	Expt. 3	221	7.46 (1.16)	39.4 (5.8)	212.9 (31.5)
	Expt. 4, 20ms	184	7.13 (1.09)	40.6 (6.1)	221.1 (33.5)
	Expt. 4, 50ms	171	7.21 (1.19)	40.5 (5.7)	222.2 (32.9)
	Expt. 4, 100ms	169	7.24 (1.26)	40.7 (5.9)	224.8 (31.0)
	Expt. 4, 200ms	160	7.11 (1.27)	40.3 (5.7)	222.9 (30.5)
Y.A.	Expt. 1	206	6.92 (1.05)	39.0 (4.9)	213.5 (48.6)
	Expt. 2	214	7.62 (1.38)	42.6 (5.9)	212.7 (40.5)
	Expt. 3	171	7.54 (1.02)	41.6 (5.5)	208.8 (33.9)
	Expt. 4, 20ms	201	6.92 (1.12)	40.0 (5.3)	212.6 (32.0)
	Expt. 4, 50ms	181	6.96 (1.05)	40.3 (5.0)	206.0 (35.9)
	Expt. 4, 100ms	182	6.95 (1.10)	40.0 (5.0)	219.6 (50.6)
	Expt. 4, 200ms	183	6.95 (1.08)	39.5 (5.0)	222.5 (50.7)
K.F.	Expt. 1	181	7.17 (1.26)	38.0 (6.2)	258.4 (45.2)
	Expt. 1 (1.6cd/m ³)	166	7.20 (1.35)	36.9 (5.8)	248.9 (41.8)
	Expt. 2	176	7.60 (2.17)	41.0 (9.2)	222.4 (35.3)
	Expt. 2 (cont.)	153	7.00 (1.65)	35.4 (9.1)	218.4 (20.2)
	Expt. 3	167	7.29 (1.47)	41.9 (8.3)	244.3 (48.9)
	Expt. 3 (cont.)	176	7.30 (1.86)	35.5 (6.0)	230.8 (32.8)
	Expt. 4, 20ms	189	6.98 (1.16)	38.5 (5.4)	228.7 (42.8)
	Expt. 4, 50ms	184	6.97 (1.16)	38.9 (5.4)	223.0 (40.9)
	Expt. 4, 100ms	168	6.87 (1.18)	38.3 (5.4)	227.5 (42.0)
	Expt. 4, 200ms	169	7.06 (1.22)	39.1 (6.0)	223.8 (39.5)

2.6 実験 2-3：知覚される点線の長さの光源位置による違い

実験 2-1, 2-2 では、定位を行う光点刺激はサッカーの始点と終点の midpoint に提示されていた。しかし、情報提示を行う際には必ずしも光源がサッカーの midpoint にあるわけではなく、光源の場所によって知覚される像の大きさが異なる可能性がある。そこで実験 2-3 では、サッカー時に提示する光点刺激の位置を変化させて、知覚像のサッカー方向の長さを計測した。

2.6.1 実験装置と手順

被験者

被験者は正常な視力を持った naive な男性被験者 1 名 (A.H.)、naive な女性被験者 1 名 (K.Y.)、実験の目的を知っている男性被験者 2 名 (J.W., A.N.) である。

実験装置

実験装置の概観を図 2.13 に示す。被験者は暗い室内で 113cm の距離から光点を観察した。注視点 (FP)、サッカーの視標 (TP) は緑色 LED (大きさ 0.5deg, 輝度 8.3cd/m²) を使用した。サッカー時を通じて提示される刺激はレーザー (大きさ 0.5deg, CLASS A) によって刺激を提示した。注視点、視標は頭を中心線を 0deg としたとき、それぞれ、-4deg, +4deg に設置された。各ブロックは 20 試行からなり、各被験者は 8 ブロックを行った。ブロック内で刺激は -2deg (S1), +2deg (S2), +6deg (S3), +10deg (S4) の 4 箇所のいずれかに提示された。

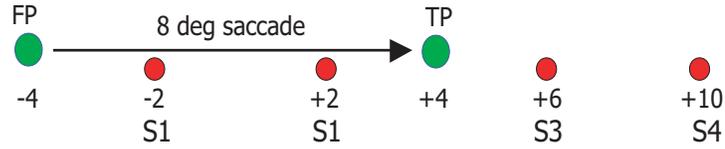
実験手順

各ブロックは計測装置のキャリブレーションから始まり、20 試行を連続して行った。刺激のタイムチャートを図 2.13 に示す。注視点が 2~3s ランダムに提示され、注視点消灯直後に視標が 10ms 点灯し、被験者は 8deg のサッカーを行う。刺激は注視点点灯とともに 4 箇所のいずれかで点灯し始め、注視点点灯後 300ms まで提示される。被験者は、知覚された線の両端をレーザーポインタによって指し示した。

2.6.2 実験結果

実験結果を表 2.2 に、各データと 4 人の被験者の平均を図 2.13 に示す。図 2.13(a)(b)(c) の横軸は刺激の提示された位置、縦軸は、(a) 知覚された線の長さ、(b) サッカーの振幅、(c) 知覚された長さのサッカー振幅に対する比率、である。図 (a) をみると、刺激位置に関わらず知覚された長さは 3.5~4.0deg で一定である。一方、図 (b) では、刺激位置によってサッカーの振幅は変化している。刺激が視標 (TP) より向こう側 (S3, S4) に提示された場合、サッカー振幅が増加している [70]。このとき、図 (c) に示すように、知覚された長さの振幅に対する比率を考えると、刺激が視標 (TP) より向こう側に提示されると (S3, S4)、比率が約 7 割程度に減少している。つまり、サッカー振幅を一定とした場合、サッカー視標より向こう側の光源 (S3, S4) によって知覚される像は、注視点と視標の間にある光源 (S1, S2) によって知覚される像より小さくなるということを意味している (S1,2 と S3,4 では振幅の大きさが異なっているが、光源の位置が不変のとき、知覚される線の長さの比率は、サッカー振幅に依らず一定であることが示されている [71][72])。このことから、情報提示を行う際には、サッカーの行われる始点と終点の間に情報提示用の光源は設置すべきであると考えられる。

(a) Spatial arrangement



(b) Time charts

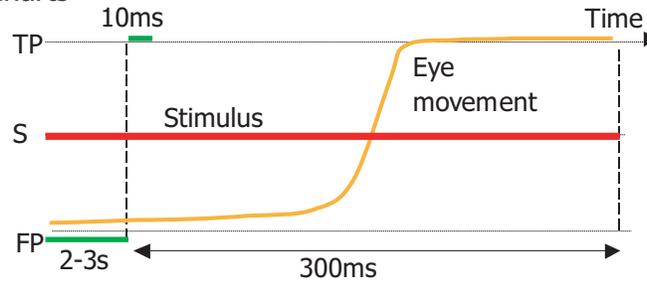


図 2.13 実験 2-3 の実験の概観 (a) とタイムチャート (b)

表 2.2 実験 2-3 の結果

	SP1	SP2	SP3	SP4
試行数				
J.W.	6	24	31	33
A.N.	25	35	42	40
H.A.	28	40	33	37
K.Y.	28	23	30	32
知覚長さ [deg]				
J.W.	3.38 (0.49)	3.41 (1.12)	3.29 (1.16)	2.70 (1.41)
A.N.	3.14 (1.84)	3.56 (1.18)	3.01 (1.00)	2.74 (1.90)
H.A.	5.20 (2.08)	4.97 (1.94)	4.35 (1.03)	5.37 (1.66)
K.Y.	4.04 (1.33)	3.33 (1.17)	3.44 (1.39)	4.06 (1.90)
振幅 [deg]				
J.W.	7.02 (0.49)	7.46 (1.12)	10.5 (1.16)	10.73 (1.41)
A.N.	8.81 (1.84)	8.41 (1.18)	9.55 (1.00)	11.16 (1.90)
H.A.	9.34 (2.08)	8.85 (1.94)	10.34 (1.03)	13.77 (1.66)
K.Y.	8.85 (1.33)	7.66 (1.17)	8.82 (1.39)	9.59 (1.90)
比率				
J.W.	0.48 (0.13)	0.46 (0.06)	0.32 (0.06)	0.25 (0.07)
A.N.	0.36 (0.10)	0.43 (0.07)	0.32 (0.07)	0.25 (0.07)
H.A.	0.56 (0.19)	0.58 (0.21)	0.43 (0.21)	0.39 (0.13)
K.Y.	0.46 (0.13)	0.44 (0.14)	0.39 (0.11)	0.44 (0.18)

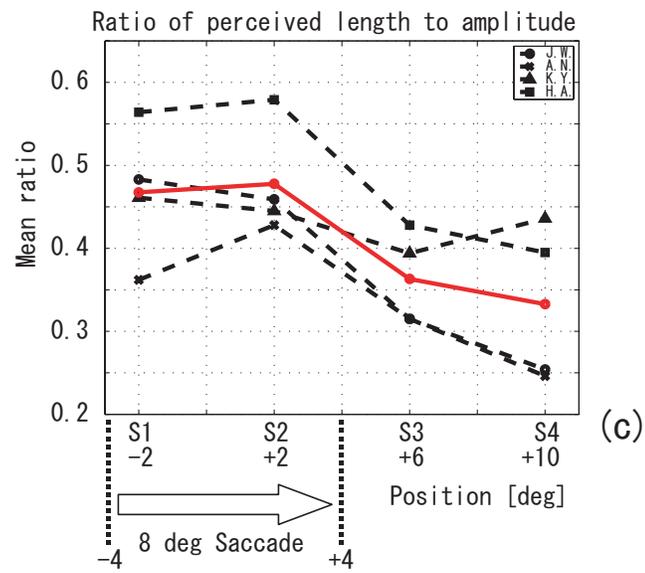
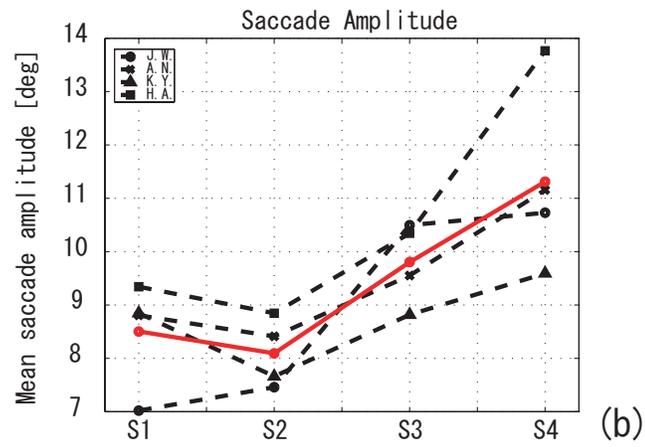
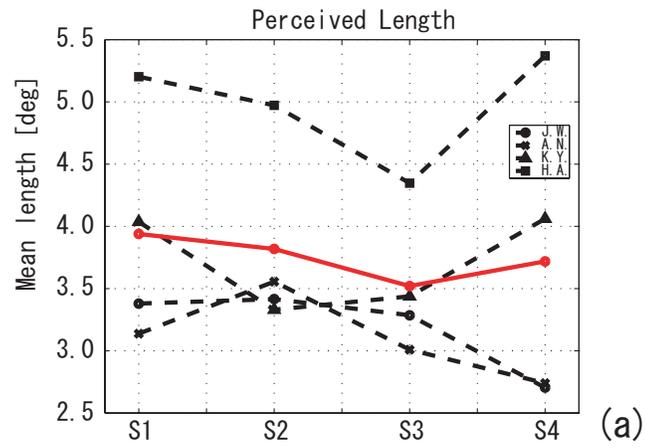


図 2.14 実験 2-3 の実験結果

2.7 実験 2-4：サッカーボール残像の垂直方向の大きさ

実験 2-1, 2-2 ではサッカーボール残像の定位位置とサッカーボールと同方向の形態について調べた。実験 2-4 ではサッカーボール方向と垂直方向の残像の大きさについて調べる。実験においては、サッカーボール前後含めて光点刺激を垂直方向に光らせ、眼球運動によって展開された形態の垂直方向の大きさ、位置を計測した。

2.7.1 実験装置と手順

被験者

被験者は正常な視力を持った naive な男性被験者 3 名 (Y.I., Y.A., R.T.) と実験の目的を知っている男性被験者 1 名 (J.W.) である。

実験装置

注視点 (FP), 視標 (TP), 縦に 64 個 LED を並べた光点列 (S) を図 2.15(a) のように配置する。FP と TP は赤色 LED (直径 0.25deg, 輝度 $60\text{cd}/\text{m}^2$), S は FP と TP の真中に配置し, S の各 LED は緑色 LED (直径 0.2deg, $20\text{cd}/\text{m}^2$) を使用した。S の垂直方向の大きさは 12.8deg である。被験者の右眼球と S との距離は 150cm, FP と TP の間隔は視野角にして 8deg もしくは 12deg とした。FP, TP, S の中心の高さは被験者の眼球の高さと同じである。LED の明滅制御には Microchip (PIC16F877) を用いた。実験は暗室 (0.01lx 以下) で行われた。

実験手順

実験のタイムチャートを図 2.15(b) に示す。初めに FP が 1~2sec ランダムに点灯し, 被験者は FP に視線を向ける。次に FP が消灯し 200ms 後に TP が 10ms 点灯し, 被験者は TP に向かって水平サッカーボールを行なう。このとき TP が消灯した 62ms 後に中央の S が上から順に一点ずつ一点あたり 2ms ずつ, 合計 128ms 点灯する (128ms の間, 点灯しているのは S のどれか一点のみである)。また, 200ms のギャップは特に潜時が時間的に安定してるエクスプレッスサッカーボール [73]-[78] を誘発し, 安定した実験条件を得るためである。

サッカーボールを行った被験者が知覚した光点軌跡は, いずれも図 2.16 左のシグモイド関数形状であった。実験において, 被験者の眼球運動を計測するとともに, 被験者には知覚された光点軌跡が横方向に曲がり始める「始点」もしくは直線に戻る「終点」(図 2.16 左の×印) をレーザーポインタで指し示してもらった。注視点, 視標, 光点列が存在する平面上は方眼紙で覆われており, 指し示された位置は実験者がポインタの明かりによって読み取った。また, 読み取られた値は被験者に知らせていない。被験者は左眼を眼帯で隠し, 右眼で知覚された光点軌跡をもとに始点・終点を指し示した。被験者の頭部は顎台によって固定され, 眼球運動は NAC 社 EMR-600 によって 600Hz で計測された。光点列の点滅開始・終了時刻は眼球運動と同時に計測されているため, 被験者から報告された位置の光点が光っていた時刻と計測されたサッカーボールの開始・終了の時刻の時間関係が算出可能である。実験ではサッカーボール幅を 8deg, 12deg の 2 通りに変化させ, 指し示す位置を始点・終点それぞれ別に計 4 ブロック (1 ブロック 20 試行) の実験を行った。

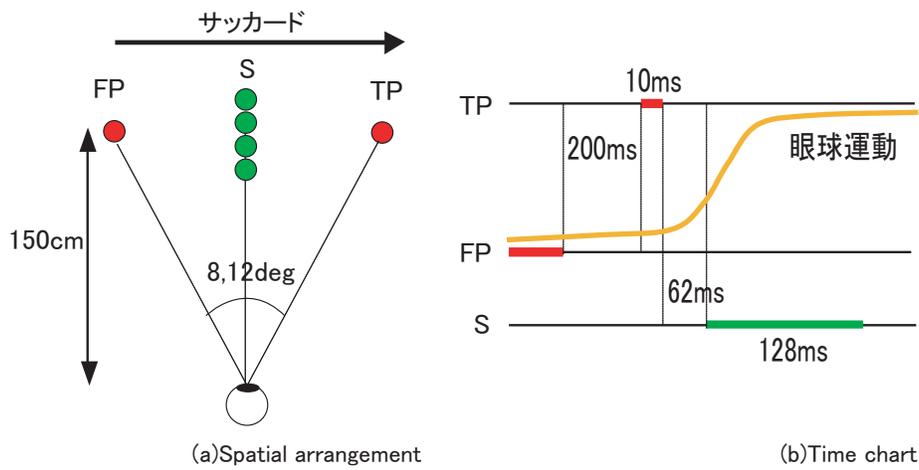


図 2.15 実験の概要とタイムチャート

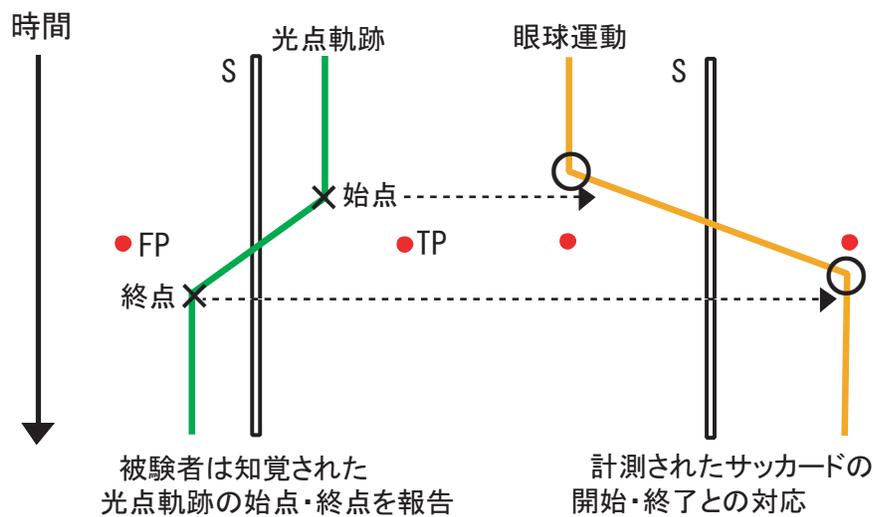


図 2.16 知覚された像 (左) と眼球位置の時間変化 (右)

データ処理

8deg の試行においては、サッカードの振幅が 6deg 以下もしくは、10deg 以上の試行を除き、12deg の試行においては、9deg 以下もしくは、13deg 以上の試行を除いた (12deg の試行では全ての被験者にアンダーシュートの傾向が見られたため下方の閾値を 9deg とした)。さらに、全ての試行においてサッカードの潜時が 80ms 以下もしくは 130ms 以上の試行を除き、潜時の分散の少ないエクスプレスサッカードの場合のみの試行を、全ての被験者において各セット 20 試行のデータを得た。潜時が 80ms から 130ms 間のサッカードにおいて知覚された像は全て図 2.16 左のような直線、斜線、直線と続くものであった。全ての被験者の本実験におけるサッカードの特性を表 2.4 に示す。表の各値は 20 試行の平均値で、括弧内は標準偏差である。12deg の振幅においてアンダーシュートの傾向が見られるものの、持続時間、潜時ともに安定したサッカードが行われた。サッカードの開始・終了条件は、測定したデータに 100Hz のローパスフィルタをかけた後、眼球運動速度が 40deg/sec 以上であった最初の時刻をサッカード開始、40deg/sec 以上であった最後の時刻をサッカード終了とした。

表 2.3: 知覚された光点軌跡の始点・終点と計測されたサッカーの開始・終了との時間差，知覚された光点軌跡の振幅に対する割合

	Y.I.	Y.A.	R.T.	J.W.
時間差 [ms]				
8-始点	8.0	13.8	8.5	9.7
12-始点	10.0	6.0	12.1	11.8
8-終点	-1.1	-0.5	0.6	1.4
12-終点	-2.8	0.9	-2.2	6.5
知覚された幅 [deg]				
8deg	4.83	4.92	3.97	4.83
割合	0.63	0.63	0.56	0.60
12deg	5.99	7.29	5.08	6.63
割合	0.61	0.71	0.57	0.61

2.7.2 実験結果

実験 2-4 の被験者の行ったサッカーの特性（振幅，持続時間，潜時）を本節末の表 2.4 に示す．これらのデータは全ての被験者において安定したサッカーが行われたことを示す．

被験者が指し示した始点・終点の位置と眼球運動の時間関係を表 2.3 に示す．一番上の項目は，報告された始点・終点位置の LED が光っていた時刻（図 2.16 左の×印）からサッカーの開始・終了の時刻（図 2.16 右の□印）を引いた時間差である．始点において正の値は眼球運動が起こり始めた後に，知覚された光点軌跡が曲がり始めたということの意味し，終点において正の値は眼球運動が終了した後に直線に戻ったということの意味する．始点の知覚においては，8，12deg とともに，4 人の被験者平均してサッカー開始の約 10ms 後，知覚上で光点軌跡が曲がり始めた．終点においてはサッカー終了後，8deg で約 0ms，12deg で約 1ms で直線に戻っている．上記の時間差がレーザポイントのポインティング誤差によるものでないことを確かめるために，知覚された位置とレーザポイントによって指し示す位置の誤差を計測した．光点列と同じ輝度の LED を 8deg のサッカーにおいて実際に知覚される光点軌跡と同じ形状（図 2.16 左の形状），同じ大きさ（全体の高さ 12.8deg，始点・終点間の水平距離 5deg，垂直距離 4deg）に並べ，一点あたり 2ms ずつ，上から順に点滅させた．被験者には，眼球を動かさずにその始点・終点を指し示してもらった．得られたポインティング誤差の補正を行っても，8deg において被験者 4 人の平均時間差は始点でサッカーの 11.3ms 後，終点でサッカー終了 1.6ms 後であった．

図 2.17 は実験データに基づいて眼球運動の時間変化と光点列の点滅タイミング及び知覚された光点軌跡の始点・終点のタイミングを示したイメージ図である．縦軸は眼球位置 [deg]，横軸は時間 [ms] である．点線の矢印は斜め線が知覚された時間帯，太線部はサッカー開始と始点の知覚の時間差である．この結果は，眼球運動計測によって得られたサッカーの時間幅に比べて，ポインティングから逆算されたサッカーの時間幅は短いということの意味している．ただし，実験 2-1，2-2 から知覚される像の形態表象自体は網膜像と一致することがわかっており，眼球運動開始の時刻と光点軌跡の曲がり始める時刻自体は同時だと考えられる．そうすると，このような結果が得られた原因として，光点軌跡の垂直方向の大きさが収縮して知覚されたということが考えられる．

また，表 2.3 第 2 項目は，始点・終点の横方向の距離，つまり知覚される光点軌跡の横幅と，サッ

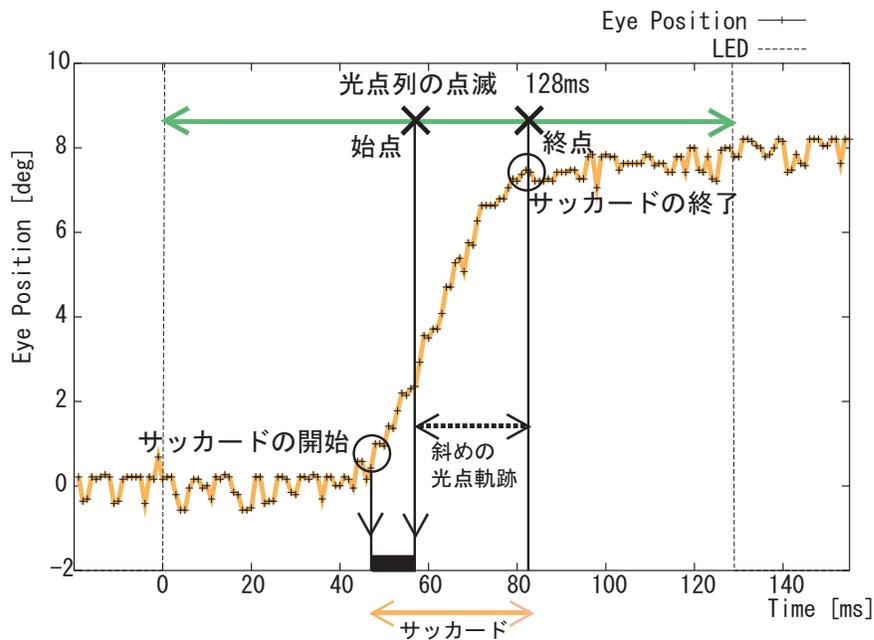


図 2.17 眼球運動の時間変化と光点列の点灯タイミング 縦軸：眼球位置 [deg]，横軸：時間 [ms]

カードの振幅に対する知覚された光点軌跡の横幅の割合である。Y.A. の 12deg の試行を除いて、サッカード幅の 6 割程度の大きさであった（サッカードの振幅は始点・終点実験を合わせた平均を利用した）。この結果は実験 2-1，2-2 で得られたデータと一致するものである。

2.7.3 考察：垂直方向の縮小

光点列の点灯時間を長くした場合

Honda の研究 [46] では、サッカードの前約 100ms から誤定位が始まり、サッカード後約 100ms 経っても誤定位が生じている。このように、一点を瞬間定位した場合の誤定位はサッカード前中後約 250ms に渡っている。一方、本実験で光点列が点滅しているのは、サッカード前約 40ms からサッカード後約 40ms までの 128ms の間であり、空間定位誤りが生じている時間幅に比べて光点列が点滅している時間幅は少ない。そこで、サッカードの視標が点灯した直後から各光点 4ms ずつ 256ms に渡って光点列 S を一点づつ上から点灯させた場合、どのような光点軌跡が知覚されるか調べた。その結果は、256ms 点灯させた場合でも、128ms 点灯させた場合と同じ図 2.16 左のような、シグモイド関数形状の光点軌跡が知覚された。ただし、256ms の場合は一点の点灯時間が長くなっているため、斜め線の傾きは水平に近くなっていた。

サッカードの種類による差異

本実験においては、安定した実験条件を得るために潜時が時間的に安定したエクスプレスサッカードを誘発した。しかし、サッカード視標の光るタイミングによってサッカードの振幅、最高速度、持続時間等の動特性が変化することが知られている [79]。そこで、視標の点灯するタイミングを、注視点消灯後、0，50，100，150ms と変化させて光点列を観察したが、知覚される光点軌跡の形状に変化は無かった。

表 2.4: 実験 2-4 で計測されたサッカーの振幅 [deg], 持続時間 [ms], 潜時 [ms] の平均 括弧内は標準偏差

	Experiment	Amplitude	Duration	Latency
Y.I.	8-始点	7.7(1.1)	38.8(4.7)	91.2(4.5)
	8-終点	7.6(0.7)	38.5(3.1)	99.7(7.1)
	12-始点	9.5(0.8)	43.2(3.6)	98.1(11.5)
	12-終点	10.0(1.0)	45.7(3.6)	98.8(5.8)
Y.A.	8-始点	7.2(0.7)	39.5(7.1)	92.2(9.9)
	8-終点	8.3(1.6)	44.5(7.3)	96.1(11.8)
	12-始点	11.0(1.6)	53.1(7.4)	101.6(12.5)
	12-終点	9.6(1.7)	50.0(9.1)	99.8(13.5)
R.T.	8-始点	7.3(1.7)	38.7(13.4)	104.7(14.0)
	8-終点	6.8(1.6)	38.0(10.9)	93.8(20.4)
	12-始点	9.0(1.6)	40.8(7.9)	105.4(17.8)
	12-終点	8.8(1.2)	39.8(5.5)	96.0(26.6)
J.W.	8-始点	8.3(1.7)	37.7(4.0)	91.0(15.9)
	8-終点	7.8(1.8)	36.5(6.5)	95.5(10.6)
	12-始点	11.0(1.7)	44.9(5.2)	87.8(19.7)
	12-終点	10.6(1.6)	42.5(4.9)	95.0(9.9)

2.8 サッカード残像の空間特性に関する考察

2.8.1 形態生成と定位の分離

サッカー時にフラッシュ刺激を暗闇の中で提示すると、図 2.5 のような傾向を持って誤定位が起きることが知られている [46][48][54]。これまで、この誤定位は眼球位置情報と網膜情報を利用した相殺説によって説明されてきた [43][44][69]。相殺説とは、暗闇において、定位のための情報が自分の眼球位置と網膜上の刺激位置しか得られないため、網膜上の対象位置から自分の眼球位置情報を差し引くことで正しい刺激位置を計算していると考えられるものである。フリッカー刺激のようなある時間幅を持った光点刺激を多数のフラッシュ刺激の集まりとして、この相殺説に基づいて考えると、フリッカー刺激はフラッシュ刺激の誤定位の時間軌跡をなぞるように定位されると考える。しかし、本実験の結果はこの予測とは異なり、フリッカー刺激をフラッシュ刺激の単純な足し合わせと考えることはできないということを示している。

実験 2-1, 2-2 の結果は、ある時間幅を持って提示された光点刺激の定位は、はじめに形態生成がなされ、その後に形態がまとめて定位されるという、形態生成プロセスが定位プロセスに先立って生じていることを示唆するものであった。実験 2-3 におけるシグモイド形状の知覚も、サッカー開始とほぼ同じ時間帯にサッカーと逆方向に曲がり始め、サッカー終了と同時に垂直方向に戻るものであり、この仮説を裏付けるものである。視覚システムとしても、定位を何度も行うより形態生成後に一度定位を行うほうが、より効率的に環境を知覚していくことができると考えられる。

また、これまで、形態生成プロセスがひとまとまりの形態として処理する刺激の時間幅に関する報告が Sogo らによってなされている [56]。Sogo らは 2 つのフラッシュ刺激を ISI (Inter-Stimulus Interval) を変えて異なる位置に提示したとき、120ms より短い ISI で提示した場合には、2 点が網膜上と同じ距離に知覚され、それ以上長い ISI で提示すると、2 つのフラッシュを独立に定位した距離、つまり図 2.5 の各フラッシュの提示された時間の定位誤りの位置の差に知覚されることを報告している。このことは、ISI120ms 以下で提示された 2 つ (複数) の刺激に対しては、ひとまとまりに形態処理がなされていることを示唆している。

定位プロセスにおいては、本実験結果はサッカーから遠い時間のイベント (光点刺激の点灯もしくは消灯) を手がかりに定位を行っていることが示唆された。ただし、興味深い現象として実験 2-2 において、サッカー後に点滅を開始したフリッカー刺激 (図 2.11 右の白い領域) に対しては殆ど定位誤りが生じていない。この時間帯に提示されたフラッシュ刺激は定位誤りが生じるのに対し、フリッカー刺激は正しく定位される理由として、その刺激の持続時間の違いが挙げられる。サッカー後に提示され始めたフリッカーは網膜上の同じ位置をある一定時間 (数 10ms) 刺激する。そのため、視覚システムにとって、その刺激が網膜上のある位置にあることが記憶され、サッカー時の不確かな情報を手がかりに定位を行うのではなく、サッカーから十分あとの時間の正確な情報を手がかりに定位していることが考えられる。

2.8.2 網膜像の半分の大さの知覚像

実験 2-1, 2-2 から知覚される像の形態は基本的には網膜上の形態表象 (点もしくは点列) をもとに形成されることが示唆されるものであった。しかし、その大きさに関しては網膜像の約半分縮んでしまう。本節ではその原因について考察する。

一つの可能性として、光点刺激の知覚上の保持時間が短く、サッカー中に提示されたフリッカーのうち、初めに提示された光点がサッカーが終了する前に知覚上消えてしまうということが考えられる。実際、サッカー中に提示された光点は固視時よりも早く消える可能性も示唆されている。

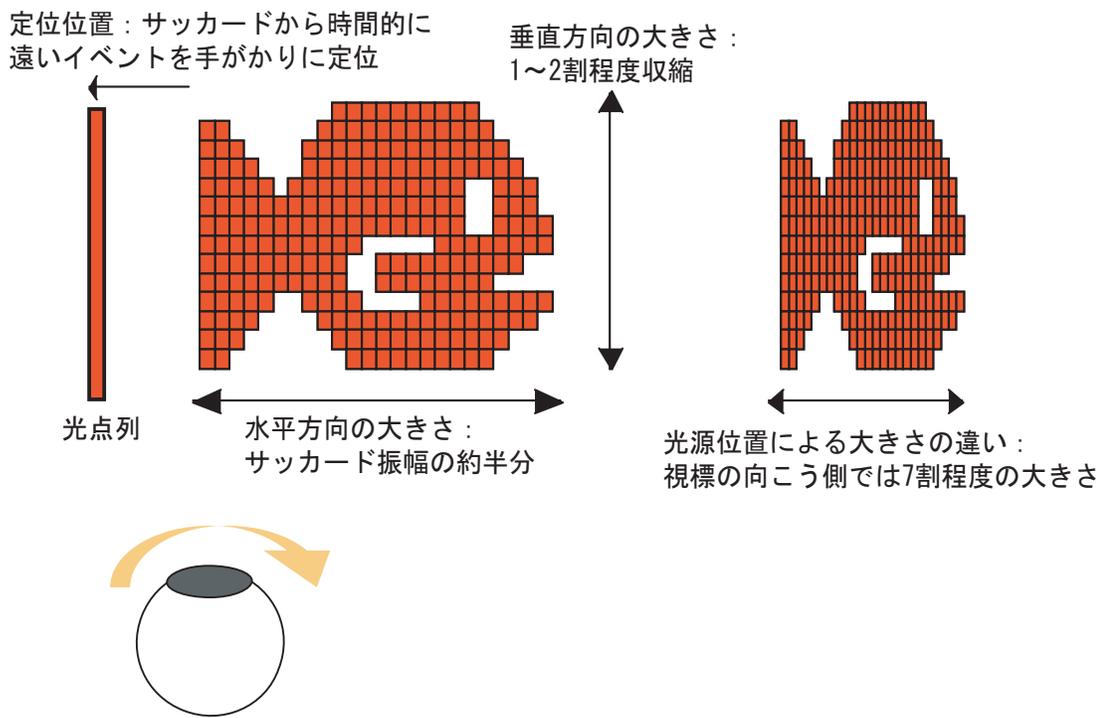


図 2.18 本章の実験からわかったこと

[80][81]．しかし、フリッカーの最初のフラッシュの色を変えて提示したときにも、異なる色を含めた点列全体が知覚されることから、このことが起きている可能性は少ない。

また、サッカー直前の時間帯にはサッカーターゲットを中心にあたかも空間が圧縮するように、空間知覚が歪むことが報告されている [37][52][51][53][58][60][61][63]．この現象は定位の手がかりが見える明るい環境において顕著に生じるが [53]，近年では暗闇でも起きることが示唆されており [58][60]，同様の現象がサッカー中に生じる点列に対しても起きている可能性もある。

短い時間に提示された光点刺激の形態は速度知覚の積分によって生じていることも考えられる。Castetらはサッカーによって生じた高速の運動も知覚することが可能であるということを示しており [82]，抑制された速度知覚によって形態を知覚し、その大きさが収縮してしまった可能性も考えられる。

点列の移動方向に関して、本実験ではサッカーと逆方向の移動が知覚された。これは Hershbergerらの報告と一致するものであるが [20]，大石らの実験では、点列はサッカーと同方向に移動しているという主観的報告がなされている [83]．確かに、Hershbergerらの実験においても約一割の被験者はサッカーと同方向に光点の移動を知覚している [21]．しかし、もし、点列がサッカーと同方向に移動しているならば、実験 2-4 のように垂直方向に光点を移動させた場合、サッカーと同方向に曲がる光点軌跡が知覚されるはずである。しかし、実験においてそのような報告は得られていない。知覚される主観的な移動方向と実際の眼球運動との時間関係は必ずしも一致するものではないと考えられる。また、この知覚される移動方向の差異の原因として、大石らの実験においては注視点、視標が常に点灯していることや、連続点滅光点がサッカーの 2sec 以上前から点灯していること、注意のコントロールがあること等が挙げられる。

2.8.3 光源位置による違いと垂直方向の収縮

実験 2-3, 2-4 より知覚される像の大きさは, 光源位置に依存し, 垂直方向にも収縮が起こることがわかった. これらの特性はサッカード前の時間帯に空間が圧縮されるように知覚される現象 [37][52][51][53][55][58][60][61][62][63] においても観察される特性でもある. ただし, サッカード前の空間収縮現象とサッカード中に広がる光点列の収縮を全く同様の現象と解釈することもできない. サッカード前の空間収縮現象においては, 物体自体の大きさはさほど変化せず, 物体と物体の間の空間が収縮するのに対し, サッカード中に広がる光点列はその刺激自体の大きさが変化する. このように, サッカード中に広がる光点列の収縮メカニズムに関しては, 未だ明らかでない部分が多い.

2.9 本章のまとめ

本章では, サッカード時に生じる残像の空間特性, つまりは残像がどこにどのくらいの大きさで知覚されるかを調べ, その定位メカニズムについて考察した. 図 2.18 に示すように, 実験 2-1, 2-2 より像の水平方向の大きさはサッカード振幅の約半分でありそれはサッカード中のみ広がることがわかった. そして, その定位メカニズムとして, 網膜情報を基に形態が生成され, その形態がサッカードから時間的に遠いイベント (光点刺激の onset もしくは offset) を手がかりに定位していることが示唆された. 知覚される形態の大きさに関して, 実験 2-3 から光源位置による違い, 光源が視標の向こう側にある場合は, 7 割程度の大きさに知覚されることがわかった. また, 実験 2-4 から像の垂直方向に関しても 1~2 割程の収縮が観察された.

第 3 章

眼球運動を利用した情報提示：サッカード残像の時間特性

3.1 本章の目的と位置づけ

サッカード時に生じる残像（以下，サッカード残像と記す）の知覚特性，特に空間特性（知覚される残像の位置，形態）と時間特性（残像が知覚される時間の長さ）は眼球運動を利用した視覚情報提示ディスプレイを設計する上で重要なパラメータである．2章において，まず，残像の知覚位置・形態に関して述べた．本章においては残像の時間特性，つまりは残像がどの程度の時間，知覚上保持されるのかを調べる．

これまで，固視時の残像（以下，固視残像と記す）の時間的特性に関する研究は多く存在し，光点の移動距離と等しい大きさの像が数 10～200ms 程度の持続時間をもって知覚されることが知られている [64][65][66][67][68]．そして，その知覚特性は図 3.1(a) のような 1 次元の光点列を物理的に高速移動させ，2 次元情報を提示するデバイス [18] 等に利用されている．一方，図 3.1(b) のようなサッカード残像に関して，残像がどの程度の時間保持されているかはこれまで調べられていない．一般に，サッカード時においては，速度知覚，位置変化検出域等様々な知覚特性が抑制されているため [84][85][86]，固視時とサッカード時ではその持続時間が同程度の長さであるとは限らない．そこで，本章ではサッカード残像の持続時間を計測し固視残像と比較する実験（実験 3-1），及びその保持のメカニズムを調べる実験（実験 3-2）を行った．

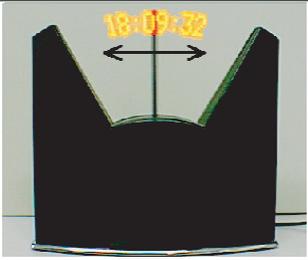
	 <p>固視時の残像を用いた 情報提示手法 (a)</p>	 <p>サッカード時の残像を用いた 情報提示手法 (b)</p>
空間的 特性	光点の移動距離だけ 情報提示可能	眼球の移動距離の約半分 情報提示可能
時間的 特性	数10～200 ms程度	本章の対象

図 3.1: 残像の時空間特性の比較 (a) 固視残像を利用したもの ISM Inc. Fantazein (b) サッカード残像を利用したもの Saccade-based display[19]

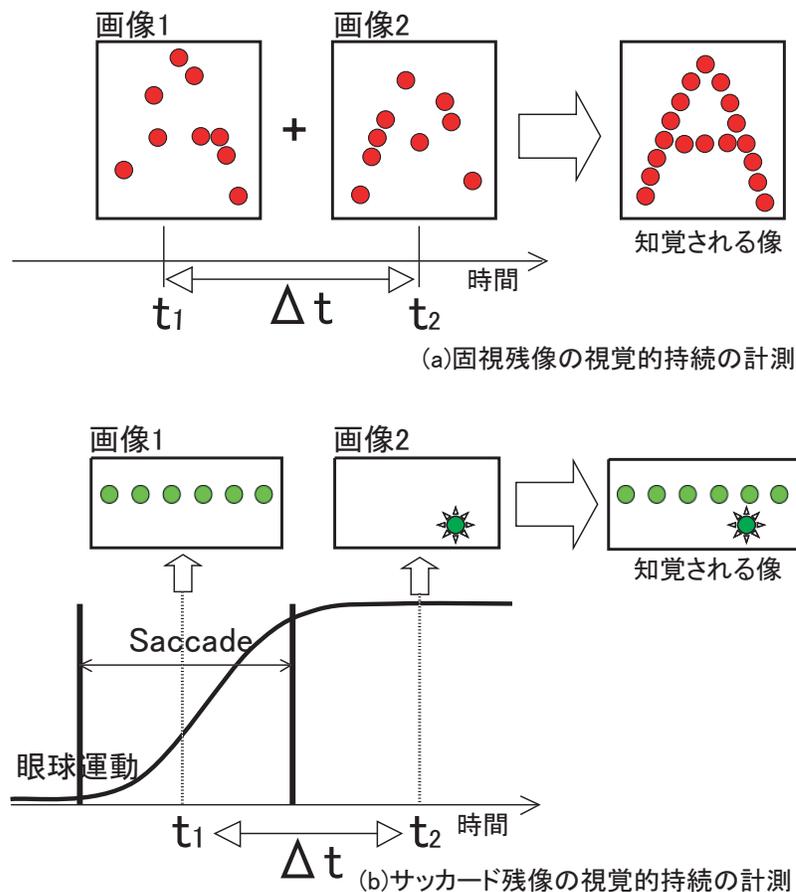


図 3.2: (a) 固視残像の視覚的持続時間の計測手法 (b) サッカーダ残像の視覚的持続時間の計測手法

- 実験 3-1 では、固視残像の持続時間計測手法に倣った手法によってサッカーダ残像の持続時間を計測し、固視残像の持続時間と比較した。実験 3-1 の結果、サッカーダ残像の持続時間は固視残像と同等の約 120ms であった。これは、サッカーダ残像が生じた後、約 120ms の範囲に提示された光点はサッカーダ残像と時間的に統合され、ひとつの像として知覚されることを意味している。
- 実験 3-2 では、サッカーダ残像を含んだ時間的統合が網膜像に対する空間的処理（網膜像の半分の大きさに知覚される）に先立って行われるのか、それとも、空間的処理が行われた後に時間的統合が行われるのか、サッカーダ残像の時間的、空間的処理の順序について調べた。

3.2 背景

本章では、これまで行われてきた固視残像の視覚的持続時間の計測方法、及び本章の 2 つの実験で使用したサッカーダ残像の視覚的持続時間の計測手法について述べる。

3.2.1 固視時の残像の持続時間計測手法

視覚刺激提示終了後も、ある一定期間、刺激の網膜像の情報を完全に近い形で保持するメカニズムが視覚システムには存在するという事は古くから知られている。このメカニズムは視覚的持続

(Visual Persistence), アイコニックメモリ (Iconic Memory), VIP (Visual Information Storage) 等と呼ばれている。刺激に対する応答がある一定期間続くということは、網膜刺激に対するインパルス応答からも予測できることである。例えば、1ms のフラッシュ光に対する応答でも 50ms 程度は続くことになる。一見、残像と呼ばれる現象に類似しているが、保持時間が残像は数秒から数十秒であるのと比べて極めて短いことが特徴である。そして、残像は網膜上の現象で眼球を手で押すとそれに合わせて移動するが、視覚的持続は知覚上の現象であると考えられている。

このような視覚的持続時間の計測は Sperling の部分報告法 [64] と呼ばれる手法にはじまる。部分報告法では、3 行 4 列の文字マトリックスを短時間提示して、このとき、例えば、1 行目の文字だけ読むように指示する。その文字の読み取り正答率を測定する。提示前にどこを読むかの指示が与えられれば、当然、正答率は向上する。さらに、提示後に指示を与えても正答率が向上することを発見した。このことは視覚システムは情報を短時間見えたまま保持するメカニズムが存在することを示唆している。その後、異なる実験によってもこのような視覚的持続機構が存在することが確認された。これまで行われてきた代表的な計測手法として、図 3.2a のような手法が挙げられる [65] [66]。この手法の原理は、2 つが同時に見えて初めて意味をなす画像 (図 3.2a 画像 1, 2) を一定時間 Δt あけて提示したとき、 Δt が視覚的持続時間より短ければ、2 枚の像が重なって 1 枚の画像として知覚可能であると考え、2 枚の像が 1 枚の像として知覚可能な最大時間 Δt を計測するものである。実験では、2 枚の画像の提示時間間隔を変えながら文字の読み取り正答率を測定し、100ms より短いところでは視覚的持続の影響があり、視覚像の保持時間は 100ms 程度であることを示した。

視覚的持続の機構は、大脳レベルでその処理に必要な時間を確保するメカニズムとも考えられるし、網膜での時間特性とも考えられる。多くの研究者は、持続時間が空間周波数に依存する [87][88][89] ということから、視覚的持続が網膜レベルの現象ではなく、より高次の機構に関係すると考えている。

3.2.2 サッカー残像の持続時間計測手法

一般に、サッカー時においては、速度知覚、位置変化検出域等様々な知覚特性が抑制されている。さらに近年、サッカー時の時間知覚は固視時と異なることも報告されており [90]、サッカー時に生じる知覚像の視覚的持続時間は固視時と同程度であるとは限らない。そこで、本章ではサッカー中に生じる残像 (サッカー残像) の視覚的持続時間を計測し、そのメカニズムについて論じる。サッカー残像の視覚的持続時間の計測手法を図 3.2a の固視残像の計測手法に倣って考えると、画像 1 をサッカー中に、画像 2 をサッカー後に提示したとき、2 枚の画像がひとつの画像として知覚される最大の時間間隔 Δt がサッカー残像の視覚的持続時間と考えることができる。サッカーを利用したディスプレイにおいては、1 次元の光点列を高速点滅させることで 2 次元情報を提示しているが、本実験においては、サッカー中に一点の光点を高速点滅させてサッカー残像を生じさせ図 3.2b の画像 1 とし、ある一定時間 Δt 後に画像 2 として別の光点を提示して視覚的持続時間を計測するものとした。

3.3 実験 3-1: サッカー時と固視時の残像の持続時間の比較

実験 3-1 においては、サッカー残像と固視残像の視覚的持続時間を 2 つの光点刺激の提示時間間隔 Δt を変化させることによって計測する。 Δt をそれぞれ 6 種類変化させて、画像 1 と画像 2 が同時に見える割合を計測した。また、視覚的持続時間は提示される刺激の明るさによって異なることも考えられ、画像 1 と画像 2 の明るさをそれぞれ 2 種類ずつ変化させた。以下、サッカー残像と固視残像の視覚的持続時間計測の実験装置、実験手順について述べる。

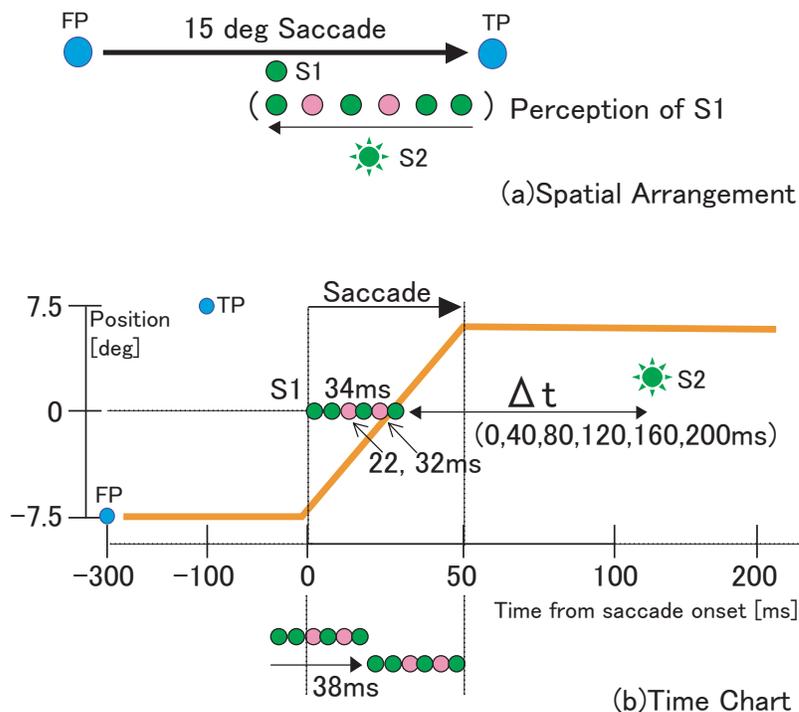


図 3.3 実験 3-1：実験装置の概観 (a) タイムチャート (b)

3.3.1 サッカード残像計測の実験装置と手順

被験者

被験者は正常な視力を持った naive な男性被験者 3 名 (N.S., H.I., T.K.) である。

実験装置

注視点 (FP)，視標 (TP)，サッカー中点滅する光点 (S1)，サッカー後に点滅する光点 (S2)，を図 3.3a のように配置する。FP と TP は視野角 15deg 離れており、両者ともに青色 LED、輝度 $0.4\text{cd}/\text{m}^2$ 、大きさ 0.12deg である。S1 は FP と TP の真中に配置され、黄緑色もしくは赤色のいずれかの色で高速点灯可能である。S2 は S1 から右に 5.9deg 、下に 1.9deg 移動した場所に位置し、黄緑色に点灯する。S1, S2 の大きさは FP・TP と同じ 0.12deg である。S1 は被験者の左眼球の正面に位置し、その距離は 150cm である。FP, TP, S の中心の高さは被験者の眼球の高さと同じである。被験者は右目を眼帯で覆い、あご台によって顔の位置を固定した。実験は暗室 (0.01lx) で行われた。

実験手順

実験のタイムチャートを図 3.3b に示す。初めに FP が $1\sim 2\text{sec}$ ランダムに点灯し、被験者は FP に視線を向ける。次に FP が消灯し 200ms 後に TP が 10ms 点灯し、被験者は TP に向かって右方向水平サッカーを行なう。 200ms のギャップは特に潜時が安定しているエクスプレスサッカー [73]-[78] を誘発し、安定した実験条件を得るためである。TP が点灯してから 100ms 後に S1 が 500Hz (0.5ms 点灯, 1.5ms 消灯) で 34ms 点滅する。サッカー中に光点 S1 が高速に点滅することで、被験者は光点列を知覚する。そして、S1 の点滅終了 Δt 後に、S2 が 1ms 点灯する。被験者のタスクは、サッカー中の S1 の高速点滅によって生じる光点列と、S1 の点滅終了 Δt 後に一瞬だけ点灯する S2 が

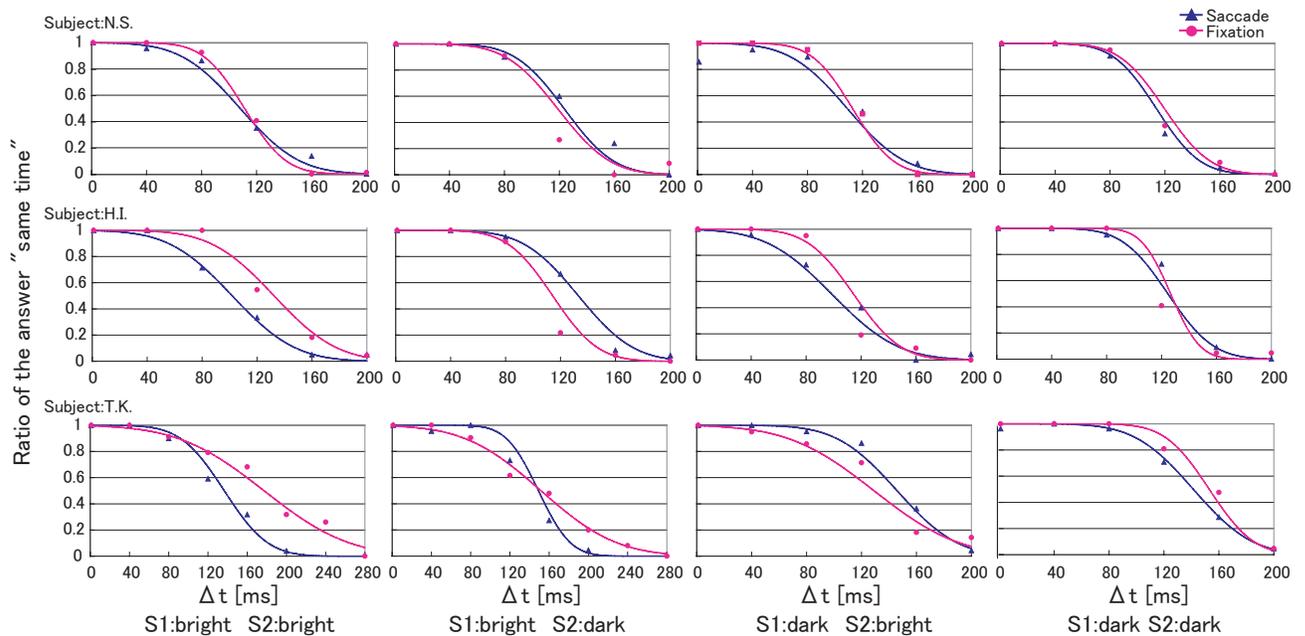


図 3.4 サッカード残像と固視残像の視覚的持続時間の計測結果

「同時に見えた」か「別々に見えた」かを答える 2AFC (2 Alternative Forced Choice) であった。S1 と S2 がはっきりと別々に知覚されない場合は、全て「同時に見えた」と答えてもらった。S1 と S2 の時間間隔 Δt には、0 ~ 200ms まで、40ms 刻みで計 6 種類をランダムに用いた（ただし、1 人の被験者の 2 条件に対しては Δt を 0 ~ 280ms まで 40ms 刻みで計 8 種類を用いた）。実験においては、各 Δt ごとに 20 回の試行を行い、その回答から S1 と S2 が「同時に見えた割合」を導出した。

サッカーダ中に提示される S1 は 500Hz で 17 回点滅を繰り返すが（34ms 提示）、このうち 11 回目（点灯開始から 22ms）と 16 回目（点灯開始から 32ms）は赤く点灯し、それ以外は黄緑色で点滅する。実験においては、サッカーダ中に知覚される光点列にこの 2 つの赤い光点が両方とも含まれていた場合のみを 20 回の有効な実験結果とした。これは、サッカーダ中に S1 点滅開始から 22 ~ 32ms の領域が必ず含まれるようにしたもので、サッカーダに対して光点列の提示タイミングが早すぎる試行、遅すぎる試行を除くためである。図 3.3b 下部にあるように、サッカーダの持続時間を約 50ms と考えると、サッカーダと S1 の点滅タイミングの範囲は 38ms 以内に抑えられている。

3.3.2 固視残像計測の実験装置と手順

実験装置

サッカーダ残像の視覚的持続時間を固視残像の視覚的持続時間と比較するために、サッカーダ中に知覚される光点列と等価な刺激を固視時に提示し、その視覚的持続時間を計測した。被験者はサッカーダ残像の計測に参加した 3 名である。サッカーダ時に提示される高速点滅光点は、光点がサッカーダ中に点滅したときのみ点列に知覚され [56][83]、点列の右端がサッカーダ開始時、左端がサッカーダ終了時に提示された光点であることが知られている（右方向のサッカーダ時） [71][72][91]。そこで、固視残像の計測においてはサッカーダ残像計測時の高速点滅光点 S1 に代わって、図 3.3a の S1 の知覚像と同等の、水平方向に物理的に幅を持つ光点列 S1' を右から順に光らせた。

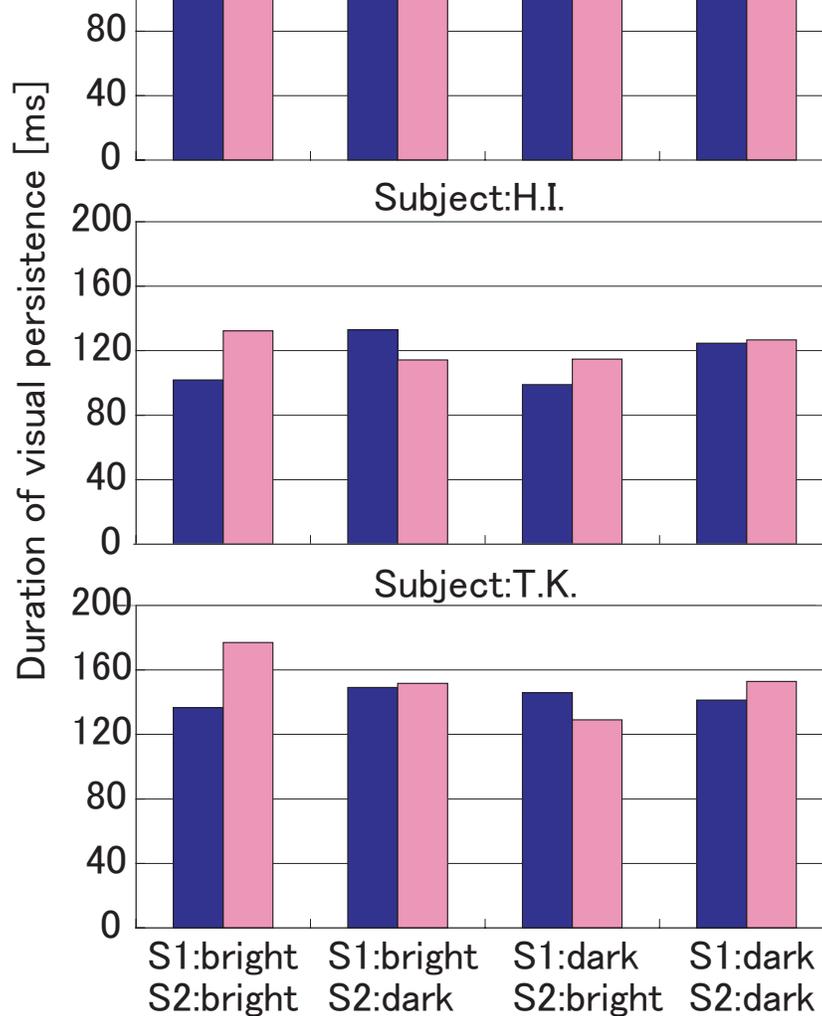


図 3.5 サッカー残像と固視残像の視覚的持続時間の比較

実験手順

実験においては、まず注視点 FP を 1~2sec 点灯し、被験者は FP を固視する。FP 消灯 100ms 後に光点列 S1' が点灯を始める。光点列 S1' は S1 と同じ大きさの光点 15 個から構成されており、S1 から TP までの視野角 7.5deg に等間隔に配置されている。これは、サッカー残像計測時に知覚された光点列の長さはサッカー振幅の約半分、位置は左端が S1 に一致していることによる。S1' は右端の光点が 0.5ms 点灯し、消灯から 1.5ms 後に右から 2 番目の光点が 0.5ms 点灯する。このように右端の光点から左へと順番に、2ms おきに 0.5ms ずつ、計 30ms かけて点灯する。そして、S1' の左端が消灯してから Δt 後に光点 S2 が 1ms 点灯する。ただし、光点列 S1 を構成する 15 個の光点のうち、左から 2 個目、7 個目は赤く点灯し、それ以外は黄緑色に点灯する。被験者のタスクは、サッカー残像計測と同じく、S1' の知覚像と S1' 消灯 Δt 後に点灯する光点 S2 が「同時に見えた」か「別々に見えた」かを答える 2AFC であった。

3.3.1, 3.3.2 節において、サッカー時、固視時の視覚的持続時間の計測手法について述べたが、前述のように、視覚的持続時間は提示される光点刺激の明るさによって異なることも考えられ、S1(S1') と S2 のそれぞれの輝度を「明るい ($4.0\text{cd}/\text{m}^2$)」「暗い ($0.8\text{cd}/\text{m}^2$)」に変化させて、各 4 条件におい

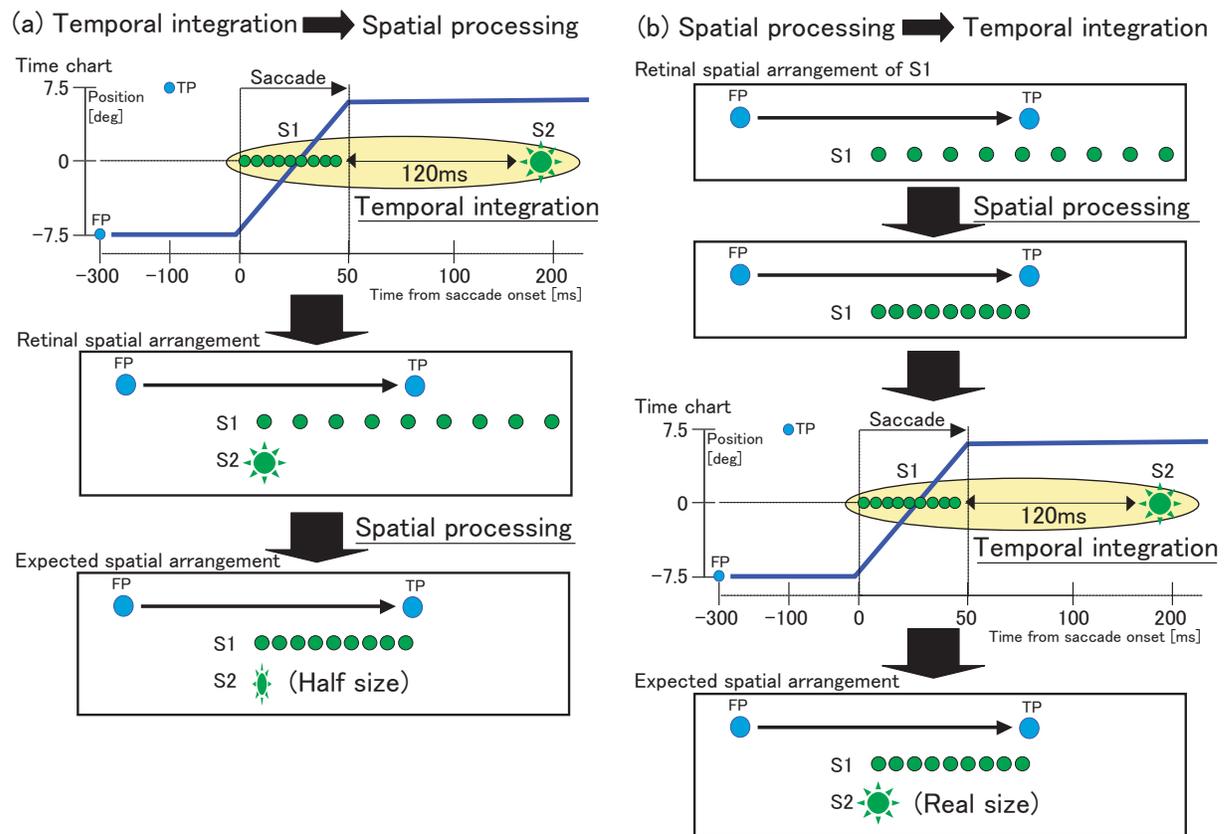


図 3.6 (a) 時間的統合後の空間処理 (b) 空間処理後の時間統合

てサッカード時と固視時の視覚的持続時間を計測することとした。各輝度条件において 6 種類の Δt を計測し、各 Δt あたり 20 試行を行った。被験者は輝度 4 条件、サッカード・固視の 2 条件、で合計 960 試行を行う。また、予備実験として、眼球運動の振幅を変化させてサッカード残像の視覚的持続時間を計測したが、その持続時間に違いが見られなかったため、本実験においては眼球運動を計測せずに実験を行った。

3.3.3 実験結果

サッカード残像、固視残像の視覚的持続時間の計測結果を図 3.4 に示す。3 人の被験者、明るさ 4 条件の 12 データ示されている。各グラフの横軸は Δt [ms]、縦軸は「S1(S1') と S2 が同時に見えた割合」である。青 がサッカード残像、赤 が固視残像を表し、各データは累積正規分布を仮定した近似曲線によって結ばれている。

全てのグラフにおいて、 Δt の値が 0 ~ 80ms では、得られた値はおよそ 1.0 であり、S1(S1') と S2 が同時に知覚されていることを示している。また、 Δt の値が 200ms となると殆どの条件において、値は 0 であり、S1(S1') と S2 が別々に知覚されている。このとき、近似曲線が 0.5 の値を取るときの Δt の値を視覚的持続時間と考え、各条件においてその視覚的持続時間を算出すると、図 3.5 のデータが得られる。横軸が輝度の 4 条件であり、青がサッカード時、赤が固視時のデータである。縦軸が算出された視覚的持続時間である。図 3.5 より、本条件においては、サッカード残像の視覚的持続時間は 100ms ~ 140ms であり、各被験者内においてはサッカード残像と固視残像の視覚的持続時間はほぼ同程度であることがわかった。また、この視覚的持続時間は光点の輝度に拠らないことがわかった。

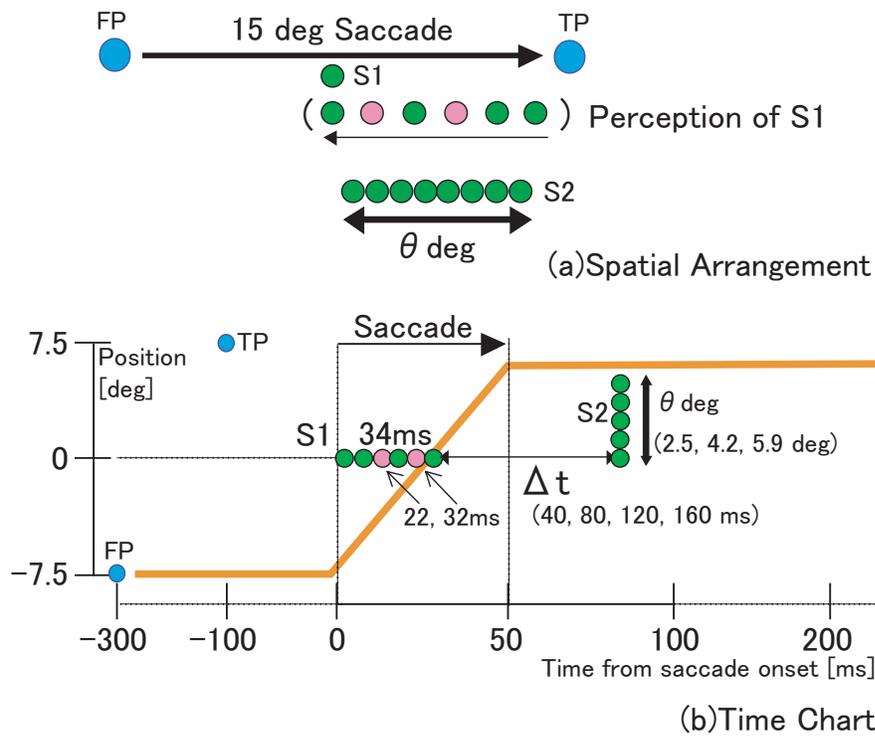


図 3.7 実験 3-2：実験装置の概観 (a) タイムチャート (b)

3.4 実験 3-2：サッカード残像の時間的処理と空間的処理の順序

実験 3-1 からサッカード残像は固視残像と同等の約 120ms の持続時間を持つことがわかった。これは、サッカード残像が生じた後、120ms の範囲に提示された光点は時間的に統合され、ひとつの像として知覚されることを意味している。また一方で、サッカード残像の空間的特性として、知覚像のサッカード方向の大きさは網膜像の約半分であることが知られている。このとき、図 3.6a にあるように、サッカード残像を含んだ 120ms の範囲での時間的統合が網膜像に対する空間的処理（水平方向、半分の大きさになる）に先立って行われるならば、他の光点刺激が視覚的持続時間内に提示されると、まず、その刺激は空間的処理が行われていないサッカード残像と時間的に統合される。そして、統合された像に対して空間的処理が行われ、提示された光点刺激も合わせて半分の大きさに知覚されると考えられる。一方、図 3.6b にあるように、サッカード残像に対する空間的処理が時間的統合に先立って行われるならば、120ms 以内に他の刺激が提示されても、サッカード残像のみ半分の大きさに知覚され、他の刺激は正しい大きさに知覚されることになる。実験 3-2 では、このサッカード残像の時間的、空間的処理の順序について調べる。

3.4.1 実験装置と手順

被験者

被験者は実験 3-1 に参加した 2 名 (N.S., H.I.) である。

実験装置

実験 3-2 の実験装置 (図 3.7a) は, S2 を除いて実験 1 のサッカーボール残像計測の実験装置と同様のものを使用した。S2 は光点の代わりに水平方向に 15 個の光点を並べたものを用いた。15 個の光点は等間隔に配置されており, 全て黄緑色に点灯する。S2 は 15 個の光点のうちいくつかを同時に点灯させて, 以下のいずれかの長さの光点列を提示した。2.5deg (左から光点 7 個分), 4.2deg (左から光点 11 個分), 5.9deg (光点 15 個分)。S2 の位置は左端の光点が装置中央から下に 1.9deg 移動した場所に, 右端が装置中央から下に 1.9deg, 右に 5.9deg 移動した場所に位置するように配置されている。S1, S2 の光点の輝度はともに $0.8\text{cd}/\text{m}^2$ である。

実験手順

実験においては, S1 を提示後, Δt 後に S2 を 3 種類のいずれかの長さで提示し, 被験者にはその知覚された長さを報告してもらった。各長さの条件において Δt を変化させて, 視覚的持続時間内及び視覚的持続時間後に提示された S2 の知覚された長さを調べた。

実験のタイムチャートを図 3.7b に示す。実験 3-1 と同様の FP, TP の点灯タイミングによって, 被験者のサッカーボールを誘発する。S1 は実験 1 と同様に 34ms 点灯し, Δt 後に S2 が 3 種類の長さのいずれかで 1ms 点灯する。このとき, 被験者はサッカーボール中に提示される S1 による光点列を知覚した後, 提示される光点列 S2 の知覚像の両端をレーザーポインタで指し示す。S2 周辺には 1mm 単位の方眼紙で覆われており, 実験者がレーザーの明るさによってこの 2 点間の距離を読み取り, 知覚された S2 の長さを計測した。各長さにおいて Δt を 40ms から 160ms まで 40ms 刻みで 4 種類変化させ, 各 Δt において 20 試行, 計 240 試行を行った。実験 1 と同じく S1 の 2 つの赤い光点が知覚されなかった場合, 20 試行から除いた。また, Δt の最小値は 40ms であるため, サッカーボールの持続時間から考えてもサッカーボール中に S2 が提示されることはない。実験においては Δt および S2 の長さをランダムで選んで行った。

3.4.2 実験結果 3-2

提示された S2 の長さを知覚された S2 の長さの比率を図 3.8 に示す。グラフの横軸は S1 と S2 の時間間隔 $\Delta t[\text{ms}]$ であり, 長さ 3 条件の値を示している。青が 2.5deg, 緑が 4.2deg, 白が 5.9deg のデータである。縦軸は S2 の提示された長さに対する知覚された長さの割合で, 縦軸の値が 1 より大きい場合は知覚された長さが実際の長さより長いことを表し, 縦軸の値が 1 より小さい場合は知覚された長さが実際の長さより短いことを表す。実験 1 において計測された両被験者の視覚的持続時間は約 120ms であり, Δt が 40, 80ms の条件においては S2 が S1 の視覚的持続時間内に提示され, 160ms の条件においては視覚的持続時間後に提示されたことになる。両被験者ともに知覚された光点列の比率は全ての条件において 0.9 ~ 1.1 程度であり, 実際に提示された光点列とほぼ等しい長さを知覚している。つまり, サッカーボール残像の持続時間中に提示された光点列は, 網膜像の半分の長さを知覚されることはなく, 持続時間終了後と同様の正しい長さに知覚された。このことは, サッカーボール残像の時間的・空間的処理の順序に関して, まず, サッカーボール残像の空間的処理が行われ (サッカーボール残像の形態が決定され), その後他の視覚刺激との時間的統合が行われていることを意味している。

3.5 サッカーボール残像の時間特性に関する考察

サッカーボール残像の持続時間は, 本実験条件においては固視残像と変わらず 120ms であることがわかった。しかし, 近年, サッカーボール時の時間知覚に関して, サッカーボール中の主観的な時間は固視時よ

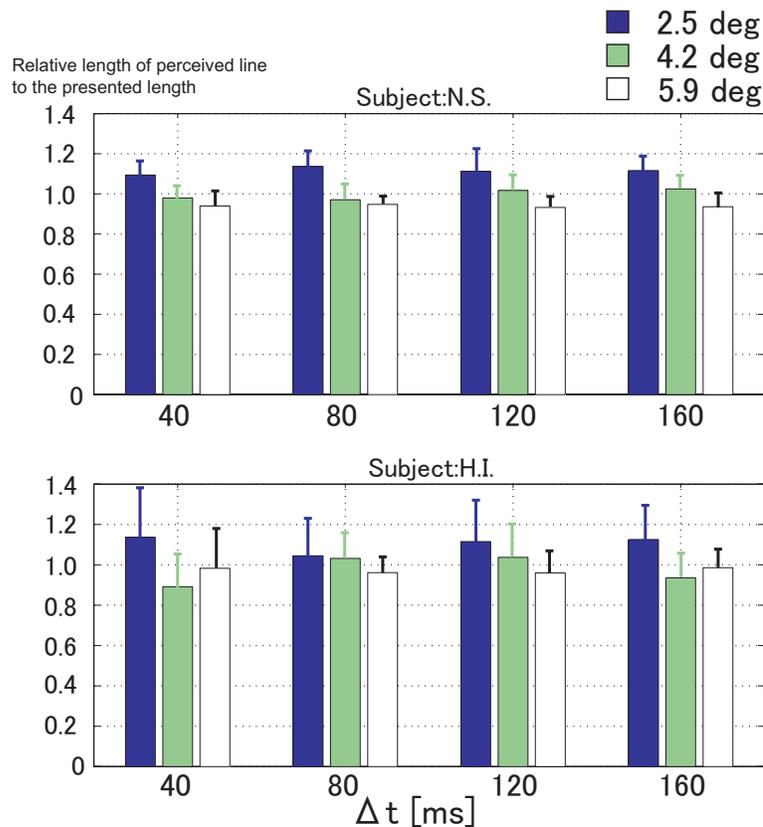


図 3.8 知覚された光点列と提示された光点列の長さの比率

りも遅く進むという報告がある [90]。このような時間知覚のメカニズムを考える際に、視覚的持続時間は基本的なデータであり、本実験結果は、時間知覚のどの段階でサッカードによる影響が生じているかを特定する上で重要な意義を持つ。

3.6 本章のまとめ

実験 3-1 において、サッカード時と固視時に知覚される残像の視覚的持続時間を計測した。その結果、サッカード時、固視時ともに光点の輝度に拠らずに約 120ms の視覚的持続時間が計測され、サッカードによって生じる残像も固視時に生じる残像と同等の持続時間を持つことがわかった。これは、サッカード時には様々な知覚特性が抑制されているのにも関わらず、視覚的持続に関する機構は固視時と同様に機能していることを示唆している。また、この結果はサッカードを利用した情報提示手法によって提示された像は、固視残像によって提示された像と同等の時間保持されることを意味している。

実験 3-2 の結果は、サッカードの終了後かつサッカード残像の持続時間中に、ある長さをもった光点列を提示したとしてもその長さは、半分の長さを知覚されるサッカード残像とは異なり正しい長さを知覚されるということがわかった。これは、サッカード残像の知覚においては、網膜像に対する空間処理が行われた後に、他の光点刺激との時間的統合が行われることを意味している。

第 4 章

眼球運動を利用した情報提示：特徴，設計指針，応用例

4.1 本章の目的と位置づけ

本章においては，サッカーカードを利用した情報提示手法の特徴及び応用例を示し，情報提示を行う際の設計指針について論じる．本情報提示手法においては，光源をどのくらいの点滅周期で，いつ点滅させるかが重要となる．点滅周期に関して，提示可能な情報量を最大化する点滅周期の条件を特定した．また，光源の点滅タイミングに関しては，遠隔から眼球運動を計測し，それに合わせて情報提示を行う手法を提案した．

4.2 サッカーカードを利用した情報提示手法の特徴と応用例

4.2.1 サッカーカードを利用した情報提示手法の特徴

本研究で取り上げているサッカーカードを利用した情報提示手法は，従来の手法とは提示原理が根本的に異なる情報提示手法である．本節では，その情報提示手法としての可能性及び応用例について論じる．サッカーカード中に光点が点滅すると点線が知覚されるということはこれまでも知られていたが，その応用としては脳疾患の検査等の医療分野に用いられている [92] もの，情報提示手法として積極的に利用しようとする試みはこれまでなされていない．

サッカーカードを利用した情報提示手法の大きなメリットは，少ない空間的リソース（投影面がなくても），少ないエネルギー（光源自体が少ない）で情報提示が可能であるという点である．例えば，空中や水中はもちろんのこと窓ガラスなど現実空間に重ねて情報を提示することが可能である．このように，本手法はある種の環境型オーグメンテッドリアリティ [93] 提示装置と考えることも可能である．そして，本手法では 1 列の LED さえあれば情報提示が可能であり，設置可能な場所は多岐にわたる．また，本手法は，眼球運動を起こした人のみ情報を知覚可能であり，全ての人に同じ情報を伝達することは不可能であるが，その情報提示の選択性から，提示する場所，情報の性質を選べばこれまでにない情報提示のあり方を実現するものである．

4.2.2 眼球運動の誘導と情報提示に適したサッカーカードの種類

本手法の原理は，眼球運動中に 1 次元光点列が点滅し，2 次元イメージを提示するものである．そのため，眼球計測を行わない場合，なんらかの方法で眼球運動を誘発させ，それに合わせて光点列の明滅パターンを変化させることが確実に情報提示を行ううえで重要となる．例えば，図 4.1 上のように視標（眼球運動の到達点）と情報提示のための光点列を 1 つの光点列にまとめ，2 本の光点列を並べることによって眼球運動を誘発し，情報提示を行うことも可能である．この方式のタイムチャートを図 4.1 下に示す．注視している光点列が消え，その後，視標兼光点列が光るが，このとき既に視標

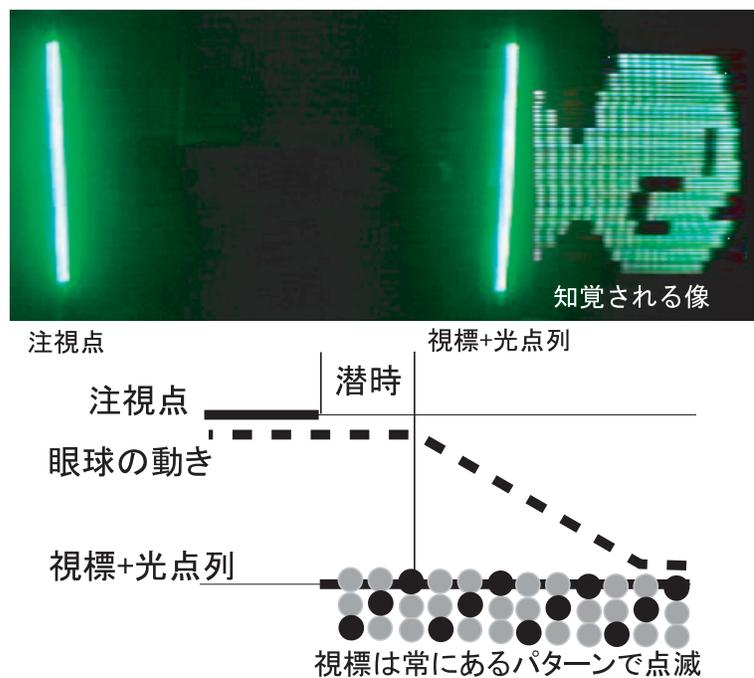


図 4.1 2本のLEDによる実装とそのタイムチャート

光点列はあるパターンで明滅しており、眼球が視標に向かってサッカードを行えば高い確率で情報提示が可能である。

また、サッカードを誘発するとき、視標となる光点を光らせるが、その光点を光らせるタイミングによって、誘発されるサッカードの潜時(視標が光り始めてから眼球運動が始まるまでの時間)、速度、振幅等の運動特性が異なることが知られている [79] (詳細は付録 A を参照)。誘発したサッカード中に情報提示を行う場合、その潜時が時間的に安定であると、情報提示のために光らせる光点列の発光タイミングや発光時間が決定でき、安定した情報提示が可能となる。

Braun らは注視点が消灯する時間と視標を点灯させるタイミングを変化させ、それによって起こされるサッカードの潜時の変化を調べた [77]。そのグラフを図 4.2 に示す。グラフの縦軸はサッカードの回数、横軸は潜時をミリ秒で表したものである。注視点が消灯する時間と視標が点灯するまでの時間を OVERLAP (注視点が消灯する前に視標が点灯) 500, 200, 100, 0ms, GAP (注視点が消灯した後に視標が点灯) 500, 300, 200, 100, 50ms の 9 条件で変化させた。OVERLAP 条件というのは、図 4.2 左下のように注視点の点灯中に視標が光るもので、OVERLAP の時間が長いと意識的にサッカードを起こすことになる。GAP 条件というのは、図 4.2 右下のように注視点が消灯してから視標が光るもので、反射的にサッカードが引き起こされる。図 4.2 においては特に GAP200ms 条件において潜時が最も安定している。このサッカードはエクスプレスサッカード [73][76] と呼ばれ、潜時が 100ms 程度で安定していることが知られている [75]。そのため、本手法において情報提示を行う際には、注視点・視標の光るタイミングを、注視点が消えてから視標が光るまでの間隔を 200ms としエクスプレスサッカードを誘発することが安定した情報提示つなぐと考えられる。また、エクスプレスサッカードは反復することによって潜時がより安定する [74] ことも知られている。

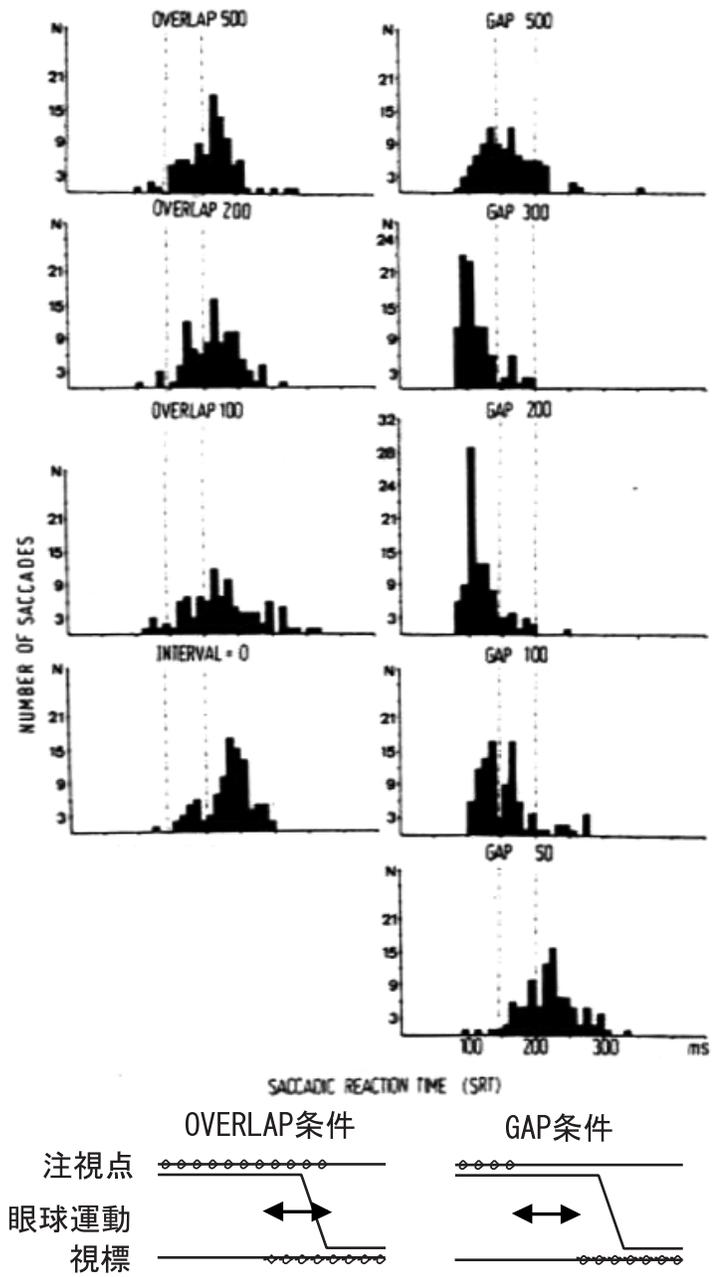


図 4.2 注視点・視標の提示タイミングによる潜時の安定性の変化 ([77] より引用, 改編)

4.2.3 実装と応用

本節では本情報提示手法の応用例について述べる。

本情報提示手法の大きな特徴は、視線が移動するような環境と 1 列の LED があれば LED 列付近の投影面の無い空間にも情報提示が可能であるという点である。そのため、光点列の配置次第であらゆる場所に実視野に重畳する形で 2 次元イメージを提示することが可能である。例えば、空中や水面、ガラス窓等、投影面の無い空間に情報提示することも可能となる。具体的には、普段生活している街中でも図 4.3 にあるように光点列を大型化し、ビル等に設置することによって、ビルとビルの中の空間に情報提示を行うことも可能である。ただし、実際に屋外で本手法を使用する場合には、夕方から夜にかけてなど、やや暗い環境において使用するとより効果的な情報提示が可能となる。

本手法は、反射的な眼球運動が起こる視覚刺激や、視線が無意識的に動くような環境で、観察者の眼球運動を利用して情報提示を行おうとするものである。LED 光源以外にも眼球運動を誘発する環境刺激は多く存在し、イベント会場においてブース間を見渡すときや、演劇等の舞台においてスポットライトが当たるとき、異なる方向で音が鳴っても眼球運動は生じる。また、サッカーは頭を振ったとき等、自分自身の身体運動によっても生じる。このように、注意が移ることが多い環境条件や、眼球運動が多く生じる身体運動を行っている状況において、ディスプレイを設置するのが望ましい。このような場合、観察者は、見ようとするよりは突然見えてしまったという感覚で情報を知覚する。具体的にこの特徴を生かした設置方法を考えると、例えば、図 4.4 のような観客が様々なブースを歩き回っている展示会場の中などでブースとブースの間などに本手法を利用したディスプレイを設置すると、観客はブースとブースを移動する思いがけない注意の隙間に情報を知覚することになる。

本手法は眼球運動を起こした時だけ、眼球運動を起こした人だけ、情報を知覚可能である。これまでは光点列を縦 1 列に並べて情報提示を行っていたが、その光源をある意味のある形に並べることによって、図 4.5 のように、通常見えているイメージとサッカー中に見えるイメージが異なるという、これまでにない特徴を持ったディスプレイが構成可能である。

また、本手法を利用すると、新しく光点列を作成、配置するのではなく、既存の光点列にこの提示手法を組み込むことによって、そのデバイスに新たに情報提示能力を付与することができる。例えば、図 4.6 のように既存の PC 用ハブのランプを利用することによっても情報提示は可能である。

現在のところ、光源として高周波数の点滅制御が容易な LED を利用しているが、光源自体が発光体である必要はなく、レーザー等を壁面に投射することによっても LED を利用した場合と同様の情報提示が可能である。実際に高輝度の LED を鏡に投射して情報提示を行うことも図 4.7 のように可能であった。

本手法を使用したデバイスは小型化が期待でき、図 4.8 のように小型化してウェアラブル情報提示デバイスに応用可能である。ウェアラブルデバイスに実装する場合、眼球運動を簡単に測定可能であれば [94][95]、それにあわせて確実に情報提示が可能となる。図 4.8 は実際に眼鏡の上部から簡便に視線方向を計測可能な装置に LED 列を配置した概念図である。

舞台演出としては利用されているが [96]、本情報提示手法によって知覚されるイメージの奥行きについて興味深い現象がある。図 4.9 のように奥にある LED の前に人間が立つと、イメージは人間に重なって知覚される。日常使用している、テレビなどのディスプレイでは画面の前に人間が立つとその後ろの画像は見えないが、本情報提示手法で知覚されるイメージは、奥行きの手がかりが弱いいため、そのイメージの知覚される奥行きは周りの環境条件によってある程度手前や奥に変化し得る。



図 4.3 ビルとビルの中の空間に情報提示 (概念図)

4.2.4 考察

これまで、サッカーと呼ばれる高速な眼球運動を利用した簡便で汎用的な情報提示手法の特徴や応用例について述べた。本情報提示手法は工学的分野の他にデザイン分野、芸術的分野に対しても応用が可能であり、様々なアプリケーションを提案していきたい。現在は、クラブや舞台などのある程度暗い環境にて本手法を利用したディスプレイを実際に展示し、その現実的なアプリケーションを模索している。

また、これまでの実験は暗室の中で行っており、人間の目の特性は環境の照度や光源の輝度が変化すると大きく変化することが知られている [97]。実際に予備的に計測したところ、照度が約 50lx を超えたあたりから情報提示が困難となった。50lx という明るさは、住宅全般平均照度が約 70lx [98] であり、日常生活する上でやや暗い程度の明るさである。今後は照度、輝度と情報提示能力の関係とともに、背景と LED のコントラストについてや、LED に対する注意と情報提示能力との関係などについても着目し、より日常生活に近い環境条件の中で情報提示ができる条件を明らかにしていく。



図 4.4 展示会場内での設置 (概念図)

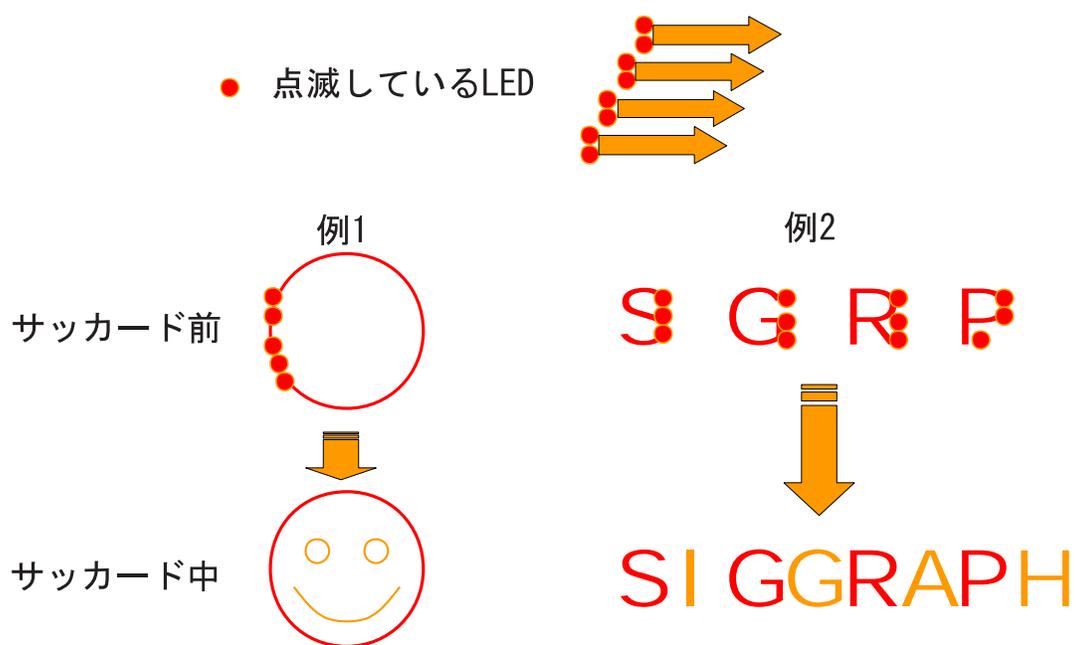


図 4.5 サッカー時と固視時で異なる情報を提示可能



図 4.6 既存の光点列を利用した情報提示 (概念図)



図 4.7 鏡面に映った 2 次元イメージ

視線方向検出器



図 4.8 ウェアラブルデバイスとしての実装例 (概念図)

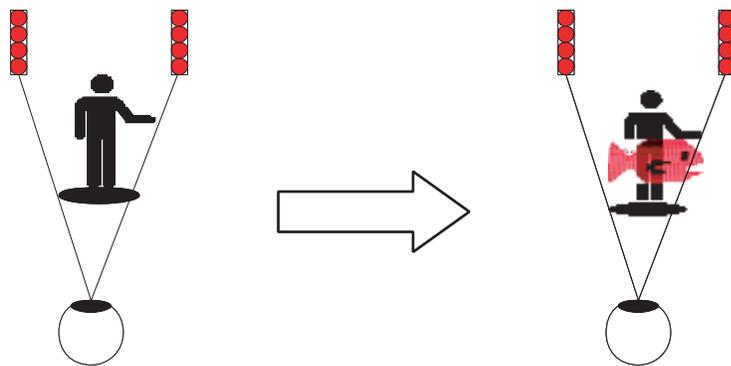


図 4.9 人間にイメージが重なる概念図

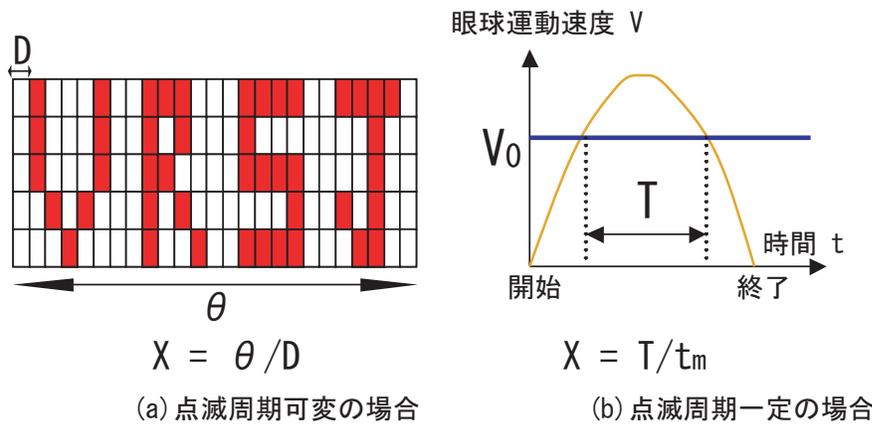


図 4.10 提示可能な画素数の計算 (a) 点滅周期可変の場合 (b) 点滅周期一定の場合

4.3 サッカーどを利用した情報提示における設計指針

4.3.1 提示画素数を最大化する点滅周期の計算

本章では、サッカーどを利用した報提示手法において、1回のサッカーどでどの程度の2次元情報を提示可能であるか。そして、提示可能な情報量（画素数）を最大化するためには、どの程度の点滅周期で光源を点滅させればよいかを論ずる。2章の実験結果から、サッカーど（水平方向）によって知覚される像の大きさは水平方向に約半分、垂直方向に1~2割程度収縮する。ただし、画素数自体は網膜上の画素と一致することがわかっている。よって、画素数最大化の議論に関しては網膜上での光点の位置関係をそのまま使用して考える。

まず、垂直方向に提示可能な画素数に関しては、垂直方向に並べた光源の数だけの画素数が提示可能である（観察者が水平方向にサッカーどを行った場合）。水平方向に関しては、物理的には図4.10(a)に示すように、提示可能な最大画素数 X はサッカーどの振幅 θ を光源の大きさ D で割っただけの画素数提示可能である。しかし、サッカーどの眼球運動速度は一定ではないため、上記のように提示画素数を最大化するためには、運動速度に合わせて点滅周期を変化させる必要が生じる。実際、眼球運動に合わせて点滅周期を変化させるのは非常に困難であるので、点滅周期を一定とし、提示可能な画素数を最大化することを考える。このとき、提示可能な最大画素数 X は、サッカーど中において情報提示に利用可能な時間を T 、点滅周期を t_m とすると、 $X = T / t_m$ によって計算可能である。ただし、上記のサッカーど中の情報提示利用可能時間 T は図4.10(b)にあるような、サッカーど中の眼球運動速度がある一定速度 V_0 を超えている時間帯である（図4.10(b)のグラフは縦軸に眼球の運動速度、横軸に経過時間を取り、サッカーどが起り始めてから、サッカーどが終わるまでを示したものである。グラフにあるように、サッカーどが起り始めてから眼球の運動速度は上昇し、ピークを迎え、サッカーど終了とともに0になる）。

上記の V_0 は、図4.11に示す条件を満たす眼球運動速度である。連続した画素を提示するために、光源は図4.11(a)のように、十分短い時間点灯し、 t_m 消灯するということを繰り返すとする。このとき、点滅周期 t_m の間に光源は網膜上を $V \times t_m$ だけ移動する。図4.11(b)上部にあるように、この移動量が光源の大きさ D より大きいと、ある時間 t での点灯と $t + t_m$ での点灯が重ならず提示可能である。しかし、図4.11(b)下部にあるように、2つの点灯時間の像が網膜上で重なってしまうと、正しく情報提示を行うことが困難になる。この $V \times t_m$ が光源の大きさよりも大きくなる最低速度が上記の V_0 である。

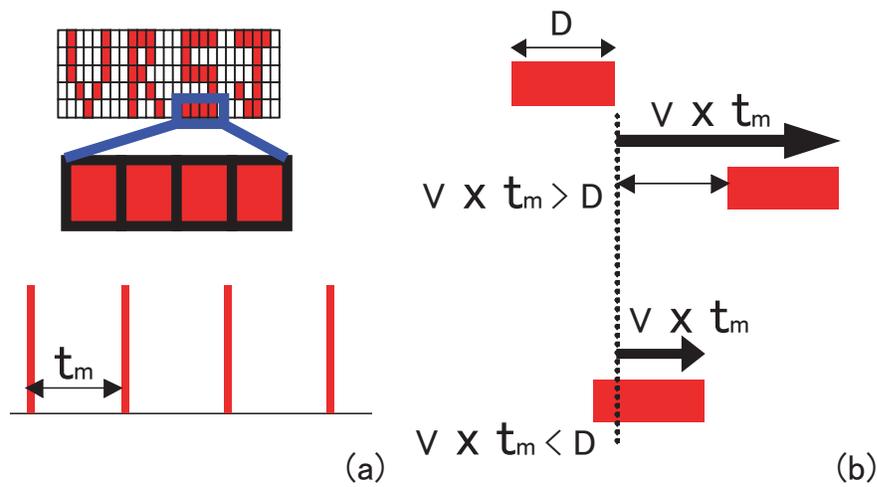


図 4.11 (a)1 画素の提示手法 (b) 情報提示可能な最低眼球運動速度

4.3.2 シミュレーションと具体例

これまでの議論をまとめると、1 度のサッカードで提示可能な最大画素数 X は、サッカード中において情報提示に利用可能な時間を T 、点滅周期を t_m とすると、 $X = T/t_m$ によって計算可能である。このとき T は、サッカードの速度履歴を既知とすると、 V_0 によって決定される。そして、 V_0 は $V_0 \times t_m = D$ を満たすので、光源の大きさ（光源から観察者までの距離）を一定とすると、 V_0 は t_m によって決定される。つまり、 T は V_0 の関数であり、さらに V_0 は t_m の関数であるので、サッカードの速度履歴、光源の大きさを既知とすれば、提示可能な最大画素数 X は t_m によって決定される。

以上の議論に基づいて、光源の大きさを 0.1deg (5mm の光源を 3m 手前から観察した大きさ)、 10 、 20deg のサッカード（最高速度それぞれ 300 、 400deg/sec ）の速度軌跡を図 4.12 のように正規分布で仮定したときの提示可能な最大画素数 X を計算した。その結果を図 4.13 に示す。横軸が点滅周期 $t_m[\text{ms}]$ 、縦軸が提示可能な最大画素数 $X[\text{pixel}]$ である。10deg のサッカードで点滅周期 0.4ms のときに最大 32 ピクセル、20deg のサッカードで点滅周期 0.3ms のときに最大 50 ピクセル提示可能である。知覚される像の大きさは水平方向半分なので、それぞれの振幅で提示される 1 ピクセルの大きさは視力換算 0.1 、 0.08 となる。この値は、サッカード時に視力が低下しないならば、十分知覚可能な大きさである。

4.3.3 設計論のまとめ

サッカードの振幅・速度履歴と光源の大きさを仮定した場合、提示可能な最大画素数は光源の点滅周期に依存し、画素数を最大化する最適な点滅周期が存在する。実際の環境下でのパラメータでシミュレートした結果、およそ実際に見えている画素と同程度の値が得られた。

また、情報提示するにあたって英数字などの文字を提示する場合には、多くの情報を物理的に提示できたとしても、一度のサッカードで認識できる文字の数は数文字程度に限られており [99]、1 度に認知できる情報量に関する限界も考慮する必要がある。

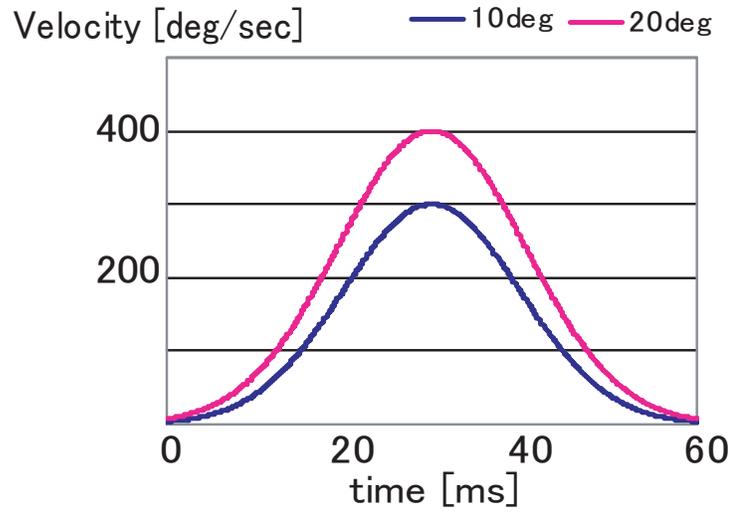


図 4.12 仮定したサッカードの速度軌跡 (10, 20deg)

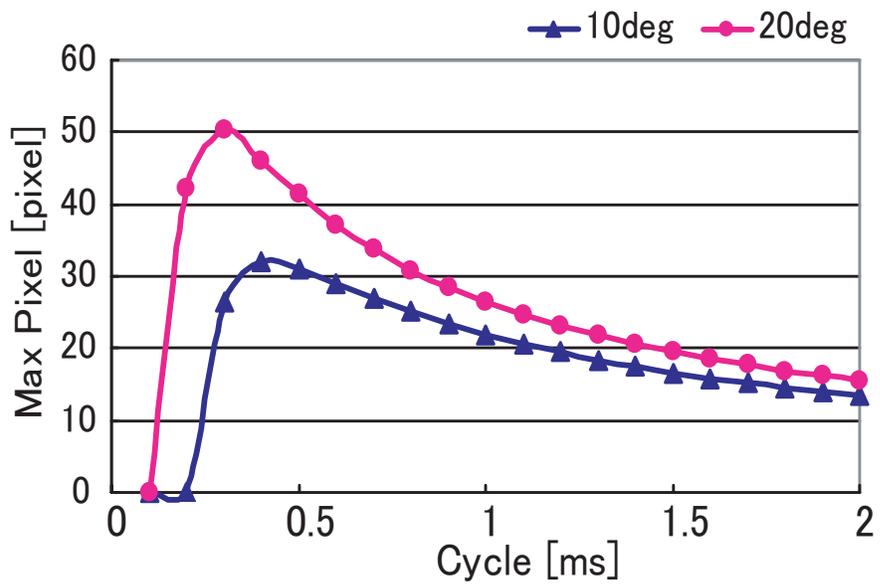


図 4.13 提示可能な最大画素数 (10, 20deg)

4.4 眼球運動計測と合わせた情報提示の提案

サッカーカードを利用した情報提示手法は観察者の眼球運動自体を情報提示に利用しているのですが、眼球運動のタイミングが光点列の発光タイミングと合わないと、2次元イメージを提示することができなかつた。しかし、図 4.14 のように観察者のサッカーカードを遠隔からカメラ等で検出し、そのサッカーカード中に光点列を光らせることが可能であれば、観察者に対して確実に情報提示が可能となる。このように、サッカーカードを利用した情報提示システムにおいて、遠隔からサッカーカードを検出する手法は重要な要素技術であり、これによって様々なアプリケーションが実現されると考えられる。

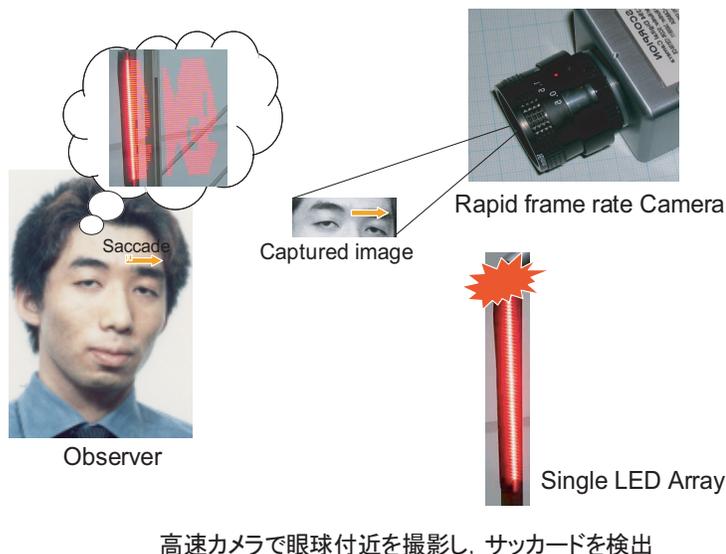


図 4.14 眼球運動計測と合わせた情報提示の概念図

4.4.1 提案する計測手法の原理

これまでの遠隔視線計測技術

これまで提案されてきた遠隔視線計測手法の多くは、赤外光をカメラ近傍から眼球に向かって照射し、眼球付近の映像をカメラによって取得、画像処理によってプルキンエ像と瞳孔中心を検出し、二点の相対位置関係によって眼球運動を計測するものであった(図 4.15 に各要素を示す) [100][101][102][103][104]。この手法を利用して、精度良く計測を行うためには眼球周辺の詳細な 2 次元画像が必要となる。具体的には、眼球を横 160pixel 縦 120pixel 程度で撮影すれば、0.5deg の精度で眼球運動が計測可能であるという報告があり [105]、眼球周辺画像ではその 2~3 倍と考えると、NTSC 規格標準 (640×480pixel) 程度のカメラで撮影する必要がある。一方で、NTSC 規格標準のフレームレートは 60Hz であり、サッカーカード (最高速度 700deg/s、持続時間 50ms[24]) のような高速で短時間に行われる眼球運動のタイミングや軌跡を正確に知ることは困難である。

このように、これまでの遠隔眼球運動計測システムでは、位置計測に高い空間解像度を必要とするため、高速な眼球運動を計測可能な時間解像度を確保することができなかつた。そのため、これまでの手法を利用してリアルタイムにサッカーカードを検出し、サッカーカード中に情報提示を行うことは難しい。そこで、本研究では網膜再帰反射像を利用することによって、一台のカメラで遠隔から高い時間解像度でサッカーカードを検出する手法について述べる。

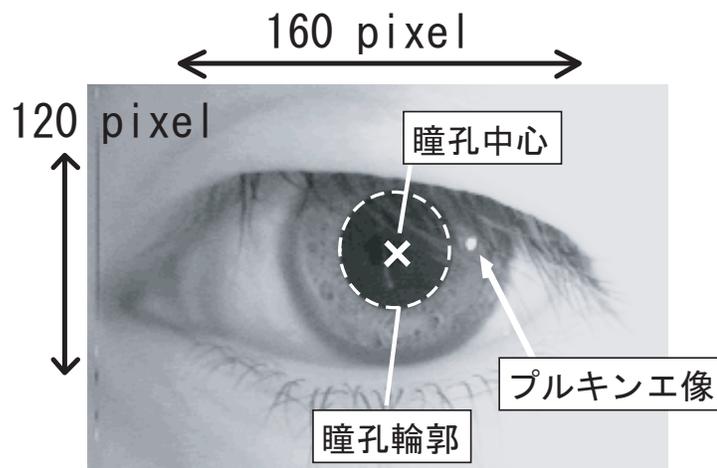


図 4.15 視線計測に利用される要素

計測原理

初めに、提案する計測手法に関連深い、網膜再帰反射を利用した瞳孔位置検出手法について述べる。図 4.16 にあるように、カメラと眼球を結ぶ光軸上に存在する光源によって眼球を撮影すると、網膜からの再帰反射によって眼球の瞳孔部分が明るく光る現象が観察される（この現象自体はフラッシュを使って写真撮影する際に、瞳孔部分が赤く光る赤目現象として知られている）。このとき、カメラの光軸上に存在する光源によって撮影された画像（以下、On-axis 画像）とカメラの光軸とはずれた位置に存在する光源によって撮影された画像（以下、Off-axis 画像）の差分をとると、On-axis 画像のみ網膜再帰反射によって瞳孔部分が明るく光っているので、瞳孔位置が抽出されることが知られている（図 4.16 差分画像）[106][107][108][109][110]。

そして、4.5.2 節で述べるように、網膜再帰反射は視線がカメラ方向を向いてなくても生じるため、図 4.17 のように眼球の回転は、瞳孔位置の変化として計測される。このとき、サッカーによって生じる高速な瞳孔位置の変化を高フレームレートのカメラで撮影することによって、サッカー開始のタイミングを精度よくを検出することが可能であると考えられる。

サッカー検出の概念図を図 4.18 に示す。上が撮影された瞳孔位置の時間変化、下が瞳孔移動速度の時間変化を表している。時刻 t_0 にサッカーが開始、 t_2 に終了したとすると、瞳孔位置、移動速度は図にあるような時間軌跡を示す。本手法で目的としている、実時間サッカー検出を行うためには、サッカー開始とともに生じる現象を捉える必要がある。これまでのサッカー近接計測を行った研究では、サッカー検出方法として眼球運動速度がある一定速度を越えたら、サッカー開始とみなす方法が多く採用されている [24]。本手法においても同様の考え方から、瞳孔の移動速度に着目し、瞳孔移動速度がある一定速度 (V_T) を越えたらサッカーの開始を検出したと考える。さらに、情報提示のために、検出後何らかの処理を行うことを考えると、サッカー開始から検出までの時間 (t_0 から t_1 までの時間) ができるだけ短いことが望ましい。また、本手法では位置の差分から速度を算出しているため、少なくともサッカー検出には 2 フレーム分の時間が必要となる。サッカーの持続時間が 50ms 程度であることを考えるとカメラのフレームレートとして最低でも 200Hz 程度 (2 フレームで検出できたとしてサッカー開始 10ms 後に検出) は必要となると考えられる。そのため、これまでの計測手法で使用されていた、フレームレート 60Hz 程度 (1 フレーム約 16ms であり、サッカーの持続時間中には 3 フレームしか撮影されない) の 2 次元エリアカメラではリアルタイムに

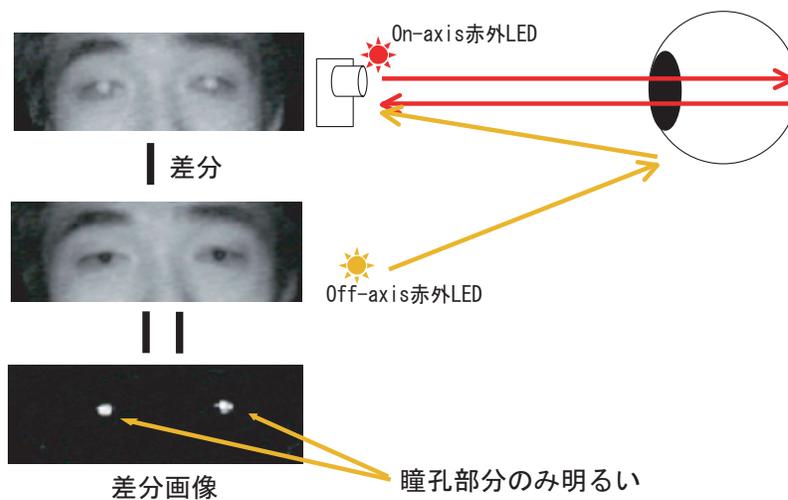


図 4.16 差分画像による瞳孔位置の取得

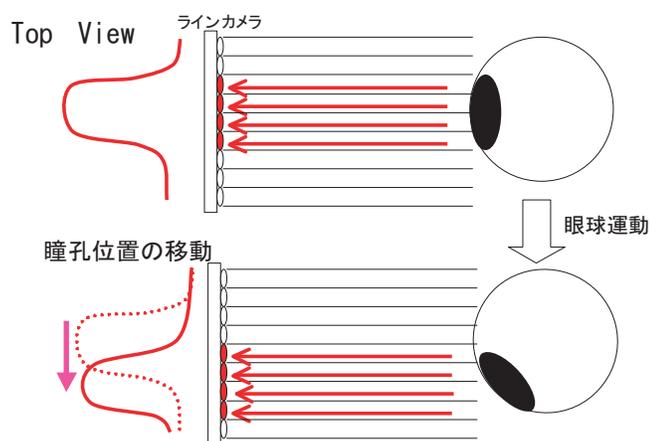


図 4.17 眼球運動による瞳孔位置の移動

サッカード検出を行うことは困難である。ただし、サッカードを利用した情報提示においては、その振幅の大きさ、日常生活における頻度の高さから水平方向のサッカードのみを利用して情報提示を行っているので [19]、水平方向のみのサッカードを高い時間解像度で検出できればよい。そこで、本手法では1次元方向に空間解像度を限定することによって、高いフレームレートを実現しているカメラを利用することとした。そのようなカメラとして、以下の2つのタイプのカメラが挙げられる。

1. ラインスキャンカメラ

- ・ 1kHz 以上のフレームレートで撮影可能
- ・ 受光素子の位置が固定

2. パーシャルスキャンカメラ

- ・ フレームレート 200Hz ~ 500Hz 程度
- ・ 任意の部分を選択してスキャン可能

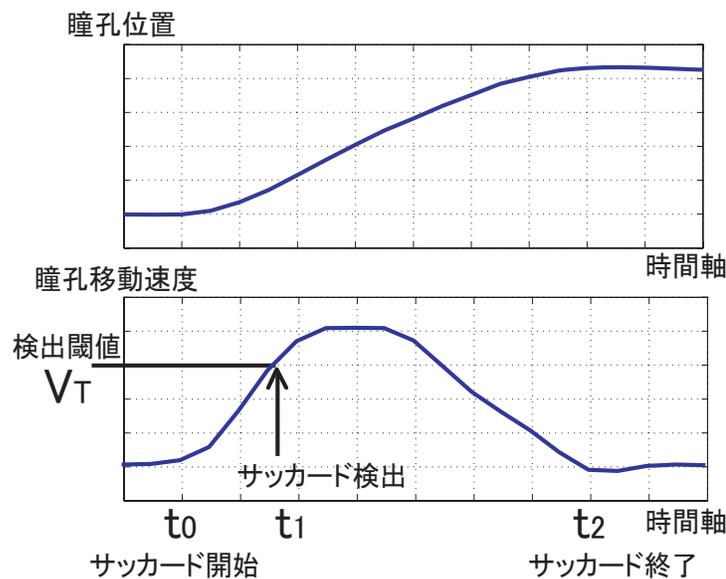


図 4.18 サッカード検出概念図

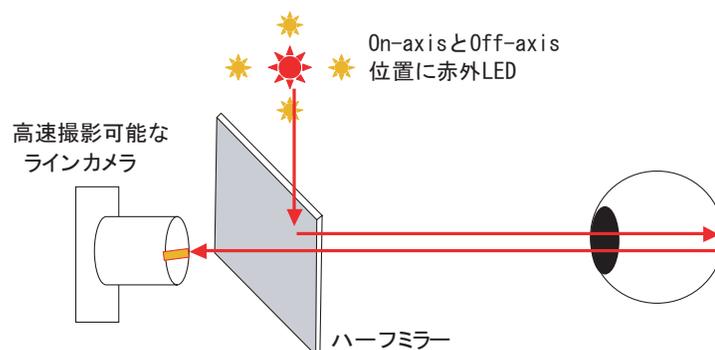


図 4.19 提案する計測原理のシステム構成

ラインスキャンカメラは、受光素子が1次元に固定して配置されているため、配置と垂直方向の眼球位置の移動に対してレンチキュラレンズやシリンドリカルレンズを使用して受光素子の位置に合わせて物理的に光を集める必要がある。一方で、パーシャルスキャンカメラはスキャン位置をソフト側で簡易に変更可能であり、眼球位置の垂直移動に対する処理が比較的容易である。そのため、本章ではパーシャルスキャンカメラを使用して実験を行うこととした（ただし、本章では1次元方向を高速にスキャンするカメラを以降どちらもラインカメラと記す）。

システムの構成を図 4.19 に示す。ハーフミラーを使用してカメラと On-axis 赤外 LED（図 4.19 赤色の光源）が同じ光軸上になるように配置する。Off-axis LED（図 4.19 橙色の光源）はカメラの光軸とある程度離して配置する。カメラ前には可視光のノイズを除くために IR フィルタ（図には示されていない）を設置する。計測時には On-axis の LED と Off-axis の LED を交互に光らせ、それぞれの網膜再帰反射像をラインカメラで計測し、差分画像から瞳孔位置を取得、その移動速度からサッカードを検出を行う。

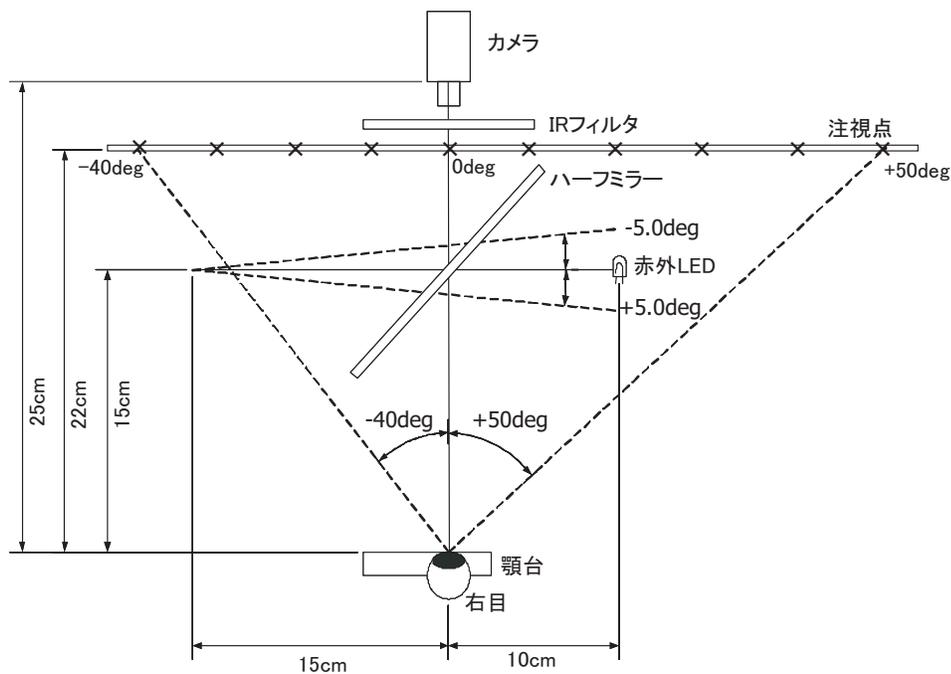


図 4.20 実験装置の配置

4.4.2 提案する計測手法の特徴及び計測実現のための要件

一般に、エリアカメラを使用して点光源の2次元位置を計測する目的において、エリアカメラではサンプリングレートが遅い場合、ラインカメラとシリンドリカルレンズ等を用いて1次元方向を別々に高速計測する手法がとられることが多い。しかし、眼球位置を計測することを目的としたこれまでの遠隔眼球計測においては、エリアカメラが多く用いられており、サッカーのような高速な眼球運動の運動軌跡、開始・終了タイミングを精度良く計測することは困難であった。そこで、本手法では、これまで瞳孔位置検出のみに利用されていた網膜再帰反射像を利用すると同時に、瞳孔位置の水平移動を高速なラインカメラで計測することによって、高い時間解像度でサッカー検出を実現している。

本手法は網膜再帰反射によって得られる瞳孔位置の移動を利用して、サッカー検出を行うものである。しかし、本手法が基本原理としている網膜の再帰反射特性について、少数の先行研究はあるものの[108][110]、統一的には調べられていない。そこで、本手法を実現するためには、カメラ光軸に対する光源のずれと網膜再帰反射量の関係、及びカメラ光軸に対して眼球の向いている角度と網膜再帰反射量の関係を調べる必要がある。また、計測条件を決定するにあたって、眼球をどの程度の空間解像度で撮影すればサッカーが検出可能なかを調べる必要がある。次節以降では網膜の再帰反射特性を調べる実験を行い、本手法を使用して効率的に計測を行う条件について述べ、次に、サッカー検出に必要な空間解像度について計測し、その結果を考察する。

4.5 実験 4-1：眼球運動計測のための網膜再帰反射特性

4.5.1 実験装置と手順

被験者

被験者は正常な視力を持つ男性2名である。実験結果では代表的な1名分のデータを示す。

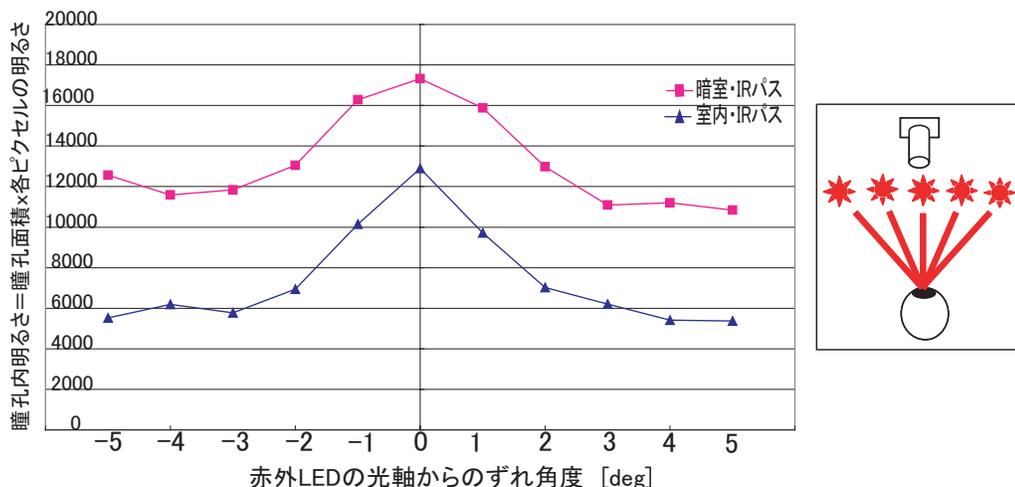


図 4.21 注視点 0deg (暗室・室内条件), 赤外 LED の位置を変えたときの再帰反射特性の変化

実験装置

実験装置の配置を図 4.20 に示す．本実験は網膜の再帰反射特性を調べることが目的なので，被験者の頭部を顎台で固定し，2次元のエリアカメラを使用して実験を行った．USB カメラ (フレームレート 30Hz, 解像度 320×240 ピクセル, 画角 92.6deg) を被験者の右目から 25cm の位置に配置し，被験者の右目を撮影した．眼球の横幅は 50pixel 程度である．カメラの前には IR パスフィルタを配置した．赤外 LED (ピーク波長 880nm, ビーム角 120deg, 放射強度 60mw/sr) をハーフミラーを介して配置し，その位置をカメラの光軸に対して -5deg から +5deg まで 1deg 刻みで 11 段階に変化させた．

実験手順

3 秒間 (約 90 フレーム) 撮影し，頭部が動かないように固定したまま，赤外 LED の位置を変化させた．被験者に注視点の一つを固視してもらい，つまり，ある注視点を見ているあいだは頭部を固定して，11 段階に赤外 LED の位置を変化させ計測を行った．被験者の注視点は -40deg から +50deg まで 10deg 刻みで 10 段階に変化させており，注視点，LED 位置の組み合わせは計 110 通りである．また，注視点 0deg の条件においては，照明条件を暗室，室内 (100lx) と 2 通りに変化させ，他の注視点の条件では暗室条件のみで計測を行った．

画像解析

次に実験によって得られた映像から網膜の再帰反射特性を抽出するために行った画像処理について述べる．各試行で得られた動画ファイルから 50 フレームを切り出し，50 枚から 1 枚の平均画像を算出した．その画像を 256 段階のグレースケールに変換し，コントラストを調整するためにヒストグラムの均等化を行った．そして，赤外 LED とカメラ光軸のずれが 0deg の画像から瞳孔抽出を行って，画像から瞳孔部分を切り出すフィルタとして利用した．ある注視点に視線を向けている間は頭部が固定されており，瞳孔面積，位置は変化しないため，このフィルタを他の LED ずれ角度の画像にも乗算した．このような処理を全ての注視点のデータに対して行い，それぞれの瞳孔内の明るさの値の和，瞳孔面積，単位面積あたりの明るさを求めた．

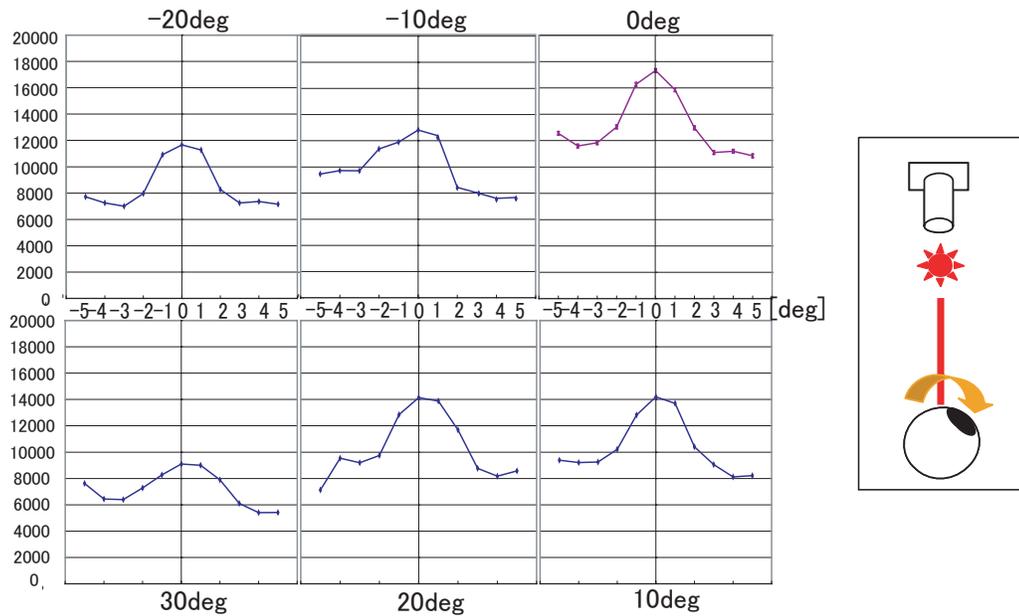


図 4.22 視線方向による再帰反射特性の変化

4.5.2 実験結果

赤外 LED 位置のずれによる反射量の変化

図 4.21 に被験者が 0deg の注視点を固視しているときに、赤外 LED の位置を変化させたときの網膜からの反射量の違いを示す。照明条件は暗室、及び室内の 2 条件である。横軸は赤外 LED のカメラ光軸に対するずれ角度 [deg] であり、縦軸は瞳孔内明るさの値の和である。暗室条件、室内条件ともにグラフの概形は似ており、カメラ光軸からのずれが 0deg のとき、明るさの和が最大となり、ずれ角度が大きくなると明るさの値が減少する。およそ 3deg 程度離れると暗室内で最大値の 7 割程度、室内で最大値の 5 割程度となり、それ以上赤外 LED が光軸から離れると、明るさの和が一定となっている。これは、赤外 LED が光軸から約 3deg 離れると網膜からの再帰反射が観察されないことを意味しており、瞳孔位置の計測においては 0deg と、3deg 程度離れた位置に赤外 LED を配置し、差分画像を取得することが望ましいということがいえる。また、室内条件では瞳孔が収縮することによって全体として値が小さくなっているが、3deg 程度離れると再帰反射が観察されない傾向は変化していない。これは、画像の差分を利用している本手法は外部環境によらず利用可能であるということを示している。

視線方向による反射量の変化

図 4.22 に注視点の位置を変化させた場合のデータを示す。全て暗室条件のデータである。実験では、-40deg から +50deg まで注視点を変化させて計測したが、同様の傾向を示したのでここでは -20deg から +30deg まで示す。縦軸、横軸ともに図 4.21 と同じである。どの注視点角度においても赤外 LED が 0deg のとき最も値が大きく、3deg 程度光軸から離れると再帰反射が観察されなくなっている。これは、サッカード (振幅 10 ~ 30deg[111]) のような振幅が大きい眼球運動を行った前後でも瞳孔位置を検出することが可能であるということを示して。また、明るさの和の最大値についてみると、LED のずれ角が 0deg のとき最大で、注視点が中心から離れるにつれ減少している。図 4.23 に示すように、

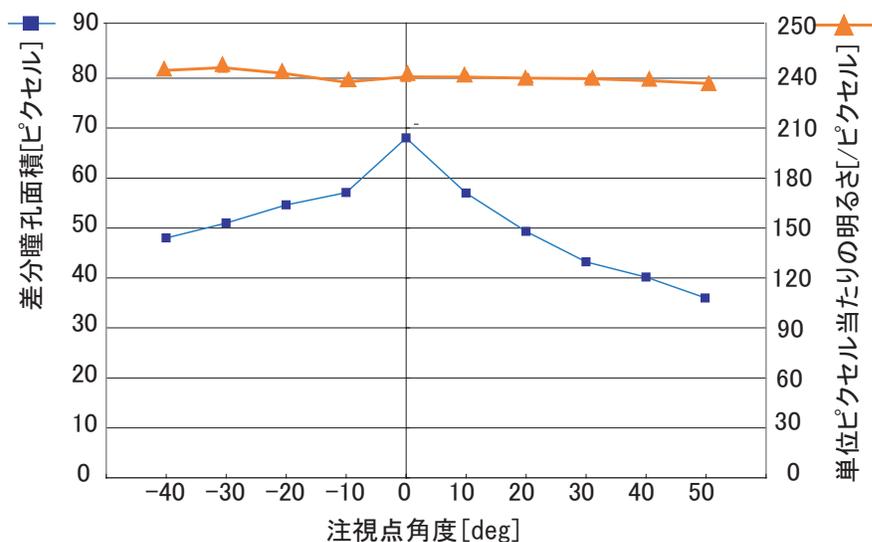


図 4.23 瞳孔面積と単位面積あたりの反射量

眼球を回転させるにつれて撮影される瞳孔面積が減少している一方で、単位面積あたりの明るさに変化が無いということ考えると、反射量の総量の減少はカメラに映る瞳孔の大きさが変化しているために生じているものと考えられる。

実験のまとめ

本実験により、On-axis と Off-axis の 2 種類の LED は 3deg 程度離すと効果的に差分画像を取得可能であり、サッカードのような移動量の大きな眼球運動が起きても、瞳孔位置を検出可能であることがわかった。また、注視点位置による反射量の変化は眼球の回転によって瞳孔の面積が変化し、それによって瞳孔全体の反射量が変わっているということがわかった。

4.6 実験 4-2：眼球運動計測に必要な空間解像度

本実験においては、サッカードを実際に高速カメラで撮影し、得られた映像に対してサッカードタイミングを検出する処理を行った。そして、撮影された映像の空間解像度を落としていったとき、どの程度までサッカード検出が可能であるかシミュレーションを行いサッカード検出に必要な空間解像度を調べた。

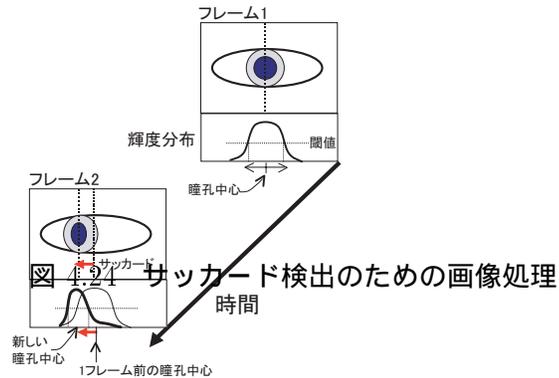
4.6.1 実験装置と手順

被験者

被験者は実験 4-1 に参加した 1 名である。

実験装置

実験装置の位置関係は図 4.20 と同様である。

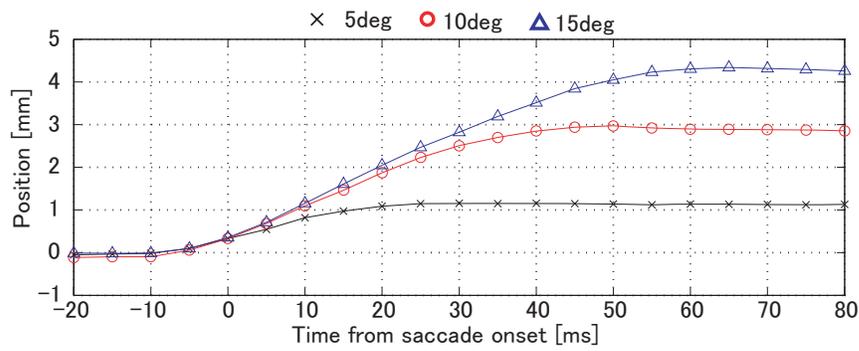


実験手順

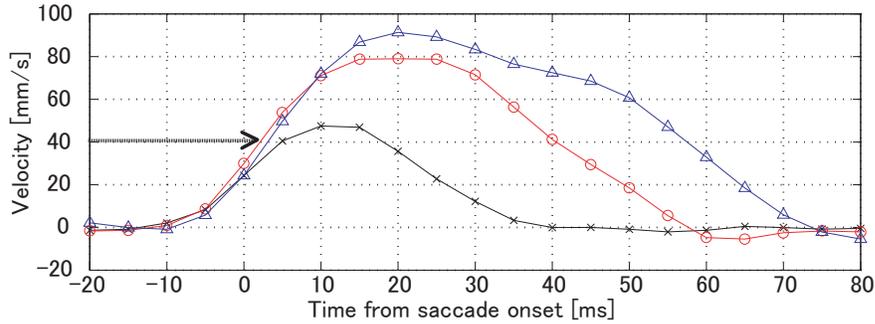
被験者は顎台上に頭部を固定し、正面の注視点（0deg）から右方向に5，10，15degのサッカドをそれぞれ10試行を行い、そのサッカドを撮影した。ただし、本実験においては眼球を撮影するカメラとして、パーシャルスキャンカメラ（Point Grey Research Inc. Scorpion）を使用し、眼球周辺の画像を空間解像度340×120pixel（図4.15に示す眼球横幅を約250pixelで撮影可能な解像度）、フレームレート200Hzで撮影した。本実験においては、被験者の頭部は固定され、眼球の位置が既知であるので、眼球位置特定のためのOff-axisのLEDは使用しなかった。差分を取らず、On-axisのLEDのみで眼球を照らした場合でも、明るい瞳孔部分はその他の部位とのコントラストが十分大きく瞳孔部位が抽出可能であったので、On-axisのLEDによって得られた画像に対してサッカド検出の処理を行った。赤外LED（Siemens社SFH480-2 ピーク波長880nm，ビーム角12deg，放射強度40mw/sr）をカメラ光軸上（図4.20の赤外LED，0degの位置）に固定し、撮影中は点灯させ続けた。実験環境は、実際の使用状況における瞳孔径に近づけるために、日常環境であるがサッカドを利用して情報提示が可能なやや暗めの室内の明るさ（40lx）とした。

サッカド検出のための画像処理

得られた200Hzの映像からサッカド周辺の40フレーム（200ms）を画像として取得し、それぞれの画像から瞳孔中心を通る水平方向1行を切り出す。そして、その1行の輝度分布において、図4.24のように、瞳孔中心の輝度と輝度分布の最低値の中間値を瞳孔輪郭を抽出する閾値として利用し、1行における瞳孔の左右端を決定する。そして、その左右端の中点を瞳孔中心とした。この処理を全ての画像に対して行い、それぞれの画像における瞳孔中心位置を決定し、その時間変化を瞳孔移動速度として求めた（ただし、両端を検出するにあたっては、瞳孔の幅がある一定値（4mm）以上という前提を利用して、睫毛等によって瞳孔が隠される影響を除外した）。



(a) 瞳孔移動軌跡



(b) 瞳孔移動速度

図 4.25 計測された瞳孔位置の変化と瞳孔移動速度の変化

4.6.2 実験結果

計測された瞳孔移動軌跡と移動速度

サッカド振幅 5, 10, 15deg 条件において計測された瞳孔移動軌跡, 移動速度の平均を図 4.25 に示す. 図 (a) の縦軸はカメラによって計測された瞳孔移動距離 [pixel] を眼球との位置関係から移動距離に換算したもの [mm] (画像処理を開始した画像の瞳孔位置を 0 とした), 横軸はサッカド開始時間を 0 とした時間 [ms] である. 図 (b) の縦軸は (a) から算出された移動速度 [mm/s], 横軸が時間 [ms] である. ただし, 移動速度は (a) のデータに対してカットオフ周波数 50Hz, 段数 2 段 (2 フレーム後のデータまで使用する) のローパスフィルタを施した後に, 前後のフレーム間の差分を取って算出した. また, 各試行の平均を取るにあたっては, 瞳孔移動速度が 10mm/s を初めて越えた時刻をサッカド開始時刻 (時刻 0) とし, サッカド開始時刻を揃えて平均を取った. 両図において × 印が 5deg, ○ 印が 10deg, Δ 印が 15deg の軌跡である. 図 (a) においては, サッカド振幅が大きくなるに従って移動距離も大きくなっているのが観察される. また, サッカドの持続時間はそれぞれ, 30, 50, 70ms 程度であり, 図 (b) において速度が生じている時間とほぼ一致している. 図 (b) の移動速度の時間履歴について考えると, 10deg における最大速度は 5deg の約 2 倍である一方で, 15deg における最大速度は 10deg よりやや大きい程度である. 15deg のサッカドは最大速度が 10deg の場合と殆ど変わらないが, 最大速度が生じている時間が長くなることによって, 振幅を大きくしていることが観察されている. これはこれまで調べられてきたサッカドの動特性と一致している [24].

これらの移動速度の時間履歴に対して, 例えば, 瞳孔移動速度が 40mm/s を越えたらサッカド開始を検出したとする場合, 図 (b) の矢印の速度を越えたときの時間 (時刻 5ms) にサッカドが検出されたことになる (ただし, 本実験の処理では 2 段のローパスフィルタを用いているので, 実際に

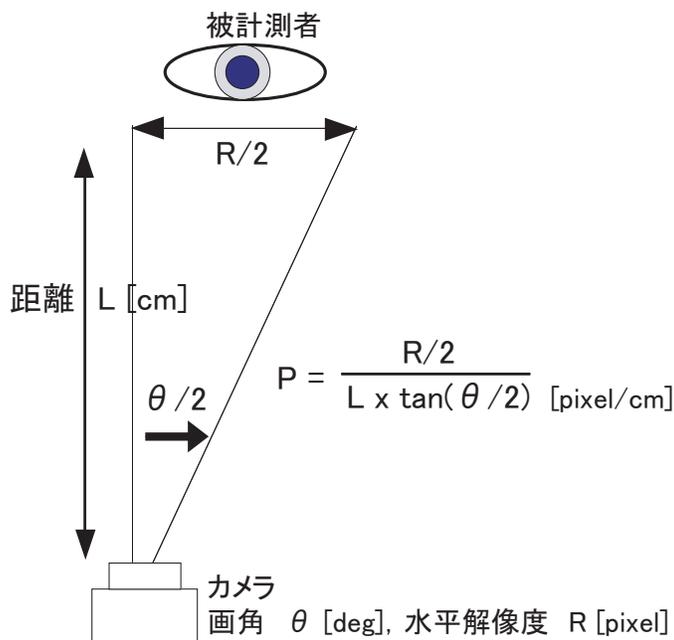


図 4.26 空間解像度を決定する要因

検出される時刻は 3 フレーム後の 20ms である)。

また, 5deg のサッカーによる瞳孔移動速度の最大値は 10, 15deg に比べて小さく, 5deg のサッカーを検出しようとする必要があるが, そうすると, 頭部運動等他の要素による瞳孔移動とサッカーによる瞳孔移動を区別することが難しくなる。そして, 5deg のサッカーは持続時間が 30ms 程度と短いため, 検出時刻がサッカー開始に対して遅れると, 実時間で何らかの処理を行うことは難しい。そのため, サッカー開始後約 10ms までの速度履歴は振幅 10deg 以上のサッカーではほとんど変わらない [111] ということからも, 10deg 以上のサッカーを検出対象にすることが安定したサッカー検出に繋がると考えられる (そのため, 以後は 10, 15deg のデータについてのみ議論を行う)。

空間解像度と検出の関係

次に, サッカー検出に必要な空間解像度について考える。空間解像度を考える目安として, 被計測者のいる距離において水平方向 1cm を占める pixel 数, P [pixel/cm] という値を考える。 P [pixel/cm] は, カメラの画角 θ [deg], 水平方向解像度 R [pixel], 被験者とカメラの距離 L [cm] とすると, 図 4.26 から, $P = (R/2) / (L \times \tan(\theta/2))$ と表される。本実験においては $R = 1280$, $\theta = 55.8$, $L = 25$ であり, $P = 60.6$ [pixel/cm] となる。このとき, 本実験で得られた映像の解像度を下げ (R を小さくする), P の値を小さくしていったときに, どの程度までサッカー検出が可能であるかシミュレーションを行った。 $R = 1280$ の条件で撮影された画像を, 図 4.27 のように, 水平方向に 1/2, 1/4, 1/5, 1/10 にダウンサンプリングしてサッカー検出処理を行った (それぞれ, $P = 30.3, 15.2, 12.1, 6.0$ pixel/cm)。

10, 15deg のそれぞれ 10 試行全てのデータをダウンサンプリングし, 瞳孔位置, 移動速度を算出した。得られた瞳孔移動速度の平均, 及び標準偏差を図 4.28 に示す。縦軸, 横軸は図 4.25(b) と同じである。エラーバーの大きさは 2σ である。グラフに示されている黒い太線は移動速度が 40mm/s の値であり, 検出の閾値を 40mm/s としたとき, 確実にサッカーが検出される (閾値がエラーバーを下回っている) 時刻まで線を水平方向に延ばしている。実時間でサッカーを検出, 情報提示を行う

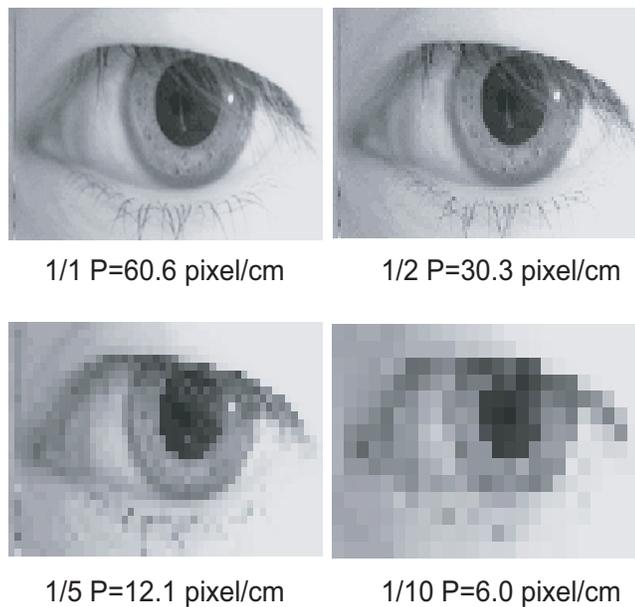


図 4.27 ダウンプリングした画像

ためには、グラフにおいて1~2フレーム以内(5~10ms)にはサッカードが検出されていることが望ましい。図 4.28 から、10deg, 15deg 両条件において、 $P = 60.6, 30.3, 12.1$ pixel/cm の場合、サッカード開始直後(5~10ms 後)にサッカードが検出されているが、 P の値が小さくなると、標準偏差(エラーバーの大きさ)が大きくなり、 $P = 6.0$ では、検出までの時間が20ms かかっていることが読み取れる。つまり、10deg 以上のサッカード検出においては、 $P = 12.1$ pixel/cm 程度の空間解像度が必要であると考えられる。

実験のまとめ

本実験から、水平方向のサッカードを安定して検出するためには $P = 12.1$ pixel/cm 以上の空間解像度が必要であることがわかった。この値は、少なくとも1mm あたり1pixel 程度の解像度が必要であるということを意味する。これまでの遠隔眼球位置計測において、0.5deg の精度で計測を行うには眼球を水平方向160pixel, 1mm あたり6pixel 程度で撮影する必要があった(眼球の直径は25mm 程度 [111])。つまり、サッカード検出という目的においては、従来手法に比べて、空間的解像度としては約1/6 で目的が達成されることが分かった。

また、従来手法では、頭部の運動が殆ど許容されなかったが、本手法においては、頭部運動はかなりの大きさで許容されることが示唆される。例えば、 $P = 10$ pixel/cm として1m の距離から画角60deg のカメラで撮影すると、必要な水平方向の解像度は1155pixel である。そして、瞳孔位置は撮影範囲内、約1m 程度水平方向に移動可能である。以上、本論文で提案するサッカード検出手順は以下のようにまとめられる。

1. 被計測者までの最大距離において、 $P = 10$ pixel/cm 程度以上になるようカメラの画角、解像度を設定
2. 被計測者までの距離を眼間距離によって推定

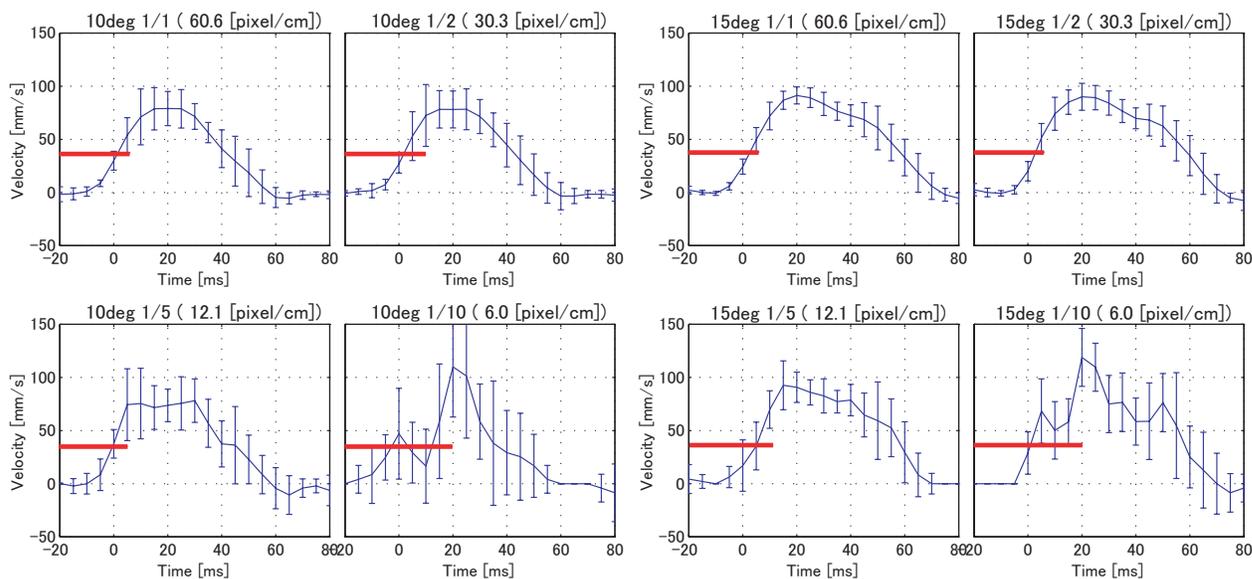


図 4.28 空間解像度による計測精度の違い (10, 15deg)

3. 閾値となる移動速度 (本実験では 40mm/s) が被計測者の距離で生じたときの画像上での移動速度 $V_{image} = (R/2) \times \frac{V_{real}}{L \times \tan(\theta/2)}$ [pixel/s] を計算
4. 瞳孔位置周辺の画像を高速に撮影 (パーシャルスキャンカメラを使用した場合, 撮影位置を瞳孔の位置に合わせて変化させる)
5. On-axis 画像と Off-axis 画像の差分から瞳孔位置を取得
6. 瞳孔位置の差分から瞳孔移動速度を算出し, 閾値と比較してサッカードを検出

4.7 眼球運動計測に関する考察

頭部運動との分離について

ここで, サッカードによる瞳孔移動と頭部運動による瞳孔移動の分離について考察する. 本手法では, 瞳孔移動速度がある閾値を越えたらサッカード開始とみなしているが, その閾値として頭部運動によって生じる瞳孔移動速度よりも大きな値を設定すれば, 安定したサッカード検出が行われると考えられる. 本実験においては, 40mm/s という値を閾値として使用したが, この値は, 計測状態を着座姿勢等腰が固定された自然な姿勢であることを想定したものであり, 立位, 歩行状態においては, より大きな閾値が必要となる可能性が考えられる.

また, この閾値は, カメラによって撮影された画像における移動速度なので, 被計測者とカメラの距離が変化すれば値が変化する. そのため, 被計測者との距離を何らかの方法によって知る必要がある. 本手法では, 両目の瞳孔位置が算出可能なので, 平均的な瞳孔間距離に基づいて被計測者とカメラのおよその距離を推定可能だと考えられるが, この点については, 今後の研究において詳しく考えていきたい.

本手法は、サッカードを利用した情報提示だけではなく、近年、多く開発されている視線を使用したインターフェイス [112][113][114][115] への応用も考えられる。また、サッカードは注意や覚醒状態と強く関係しており [116][117][118]、本手法は、人間の心理状態や生理状態を遠隔から計測する簡便な手法のひとつとして考えられる。また、遠隔から非侵襲で、高い時空間解像度の眼球計測が必要とされる分野として、眼球運動異常の診察が考えられる [119][120]。これまで、眼振等の眼球運動異常の治療においては、医師が眼球の動きを細かに観察し、異常の原因となる脳の部位を特定してきた。しかし、これらの観察は医師の経験に基づくことが多く、同時に定量的な計測が行われれることが望まれる。脳内の異常と眼球運動の関係 [92] についての研究も存在し、医療分野への応用も考えていきたい。

4.8 眼球運動計測に関するまとめ

サッカードを利用した情報提示手法によって確実に情報提示を行うために、本節では、網膜再帰反射を利用したサッカード検出手法を提案した。本手法は、網膜再帰反射によって得られる瞳孔位置を、水平方向に高速スキャン可能なカメラで撮影し、高い時間精度で水平方向サッカードを検出するものである。

本手法を実現する上で必要な網膜の再帰反射特性について調べた結果、On-axis と Off-axis の2種類の赤外光源は 3deg 程度離すと効果的に差分画像を取得可能であり、サッカードのような移動量の大きい眼球運動が起きても、瞳孔位置を検出可能であることがわかった。また、本手法を利用してサッカードを検出する際に必要な空間解像度について調べた結果、サッカード検出という目的においては、従来眼球計測手法に比べて、約 1/6 の空間的解像度で実現可能であることがわかった。

第 5 章

運動知覚を利用した情報提示：運動知覚と属性情報の時空間統合

5.1 本章の目的と位置づけ

本章では、スリット視を利用した情報提示手法の設計指針となる運動知覚時の時空間統合知覚特性、特に色情報の統合特性について述べる。人間は図 1.6 のようにスリットを通して運動物体を観察するとき、各瞬間瞬間には物体の一部しか見えないにも関わらず、スリット向こうの物体の運動情報を利用することによって、物体の形態を知覚することができる [26][27][28]。この現象を利用すると、スリット状に光源を配置し、あたかもその向こうで 2 次元イメージが移動しているように点滅させてやると、見ている人間はスリット向こうのイメージの運動を知覚し、見えていない部分の形態情報をも補完して 2 次元イメージを知覚する [29][30][31]。このようなスリット視の原理を利用したディスプレイ自体は実用化されており、街頭でも見かけることができる。

そして、運動情報が物体の属性である形態を修飾するように、運動情報が物体の色情報の知覚にも影響していることが分かった [32][33]。具体的には、網膜上では別の位置に提示された 2 つの色は、知覚される運動軌道上で統合されているように知覚される。これまで、色の統合は、非常に近い位置に異なる色を配置し、空間的に統合させるか（例えば、CRT や液晶ディスプレイ）、同じ場所に短い時間間隔で異なる色を提示し、時間的に統合させる手法（例えば、DLP プロジェクタ）がとられていた。これらの手法の基本原理は網膜上の情報そのものが色統合の主要因と考え、空間的に、時間的に近い領域に他の色を提示し、網膜上において色統合を起こすものである。運動軌道上の色統合は、これまでにない、網膜上ではなく脳内の知覚機構における色統合処理であり、本章、実験 5-1~5-4 では、運動軌道上で色統合が起きていることを心理物理実験によって実証し、その色統合が起きるメカニズムを探る。

また、スリット視時に、左右眼に時間差をつけて視覚情報を提示すると、その時間差は物体の奥行きとして知覚されることが知られている [34][35][36]。そこで、この原理を利用することによって、2 次元スリット状の少ない光源によって 3 次元情報を提示する簡便なディスプレイが実現可能である。実験 5-5 ではこのような 3 次元ディスプレイの設計指針となる、視差をつけたスリット視の際に知覚される奥行き量の大きさ、精度について調べた。

5.2 背景

5.2.1 運動知覚と形の統合

スリット視によってスリット向こうを運動する物体の形態情報が知覚されることは、Parks's Camel[26]と呼ばれ、古くから知られている。その形態再構成のメカニズムに関しては、多くの研究がなされて

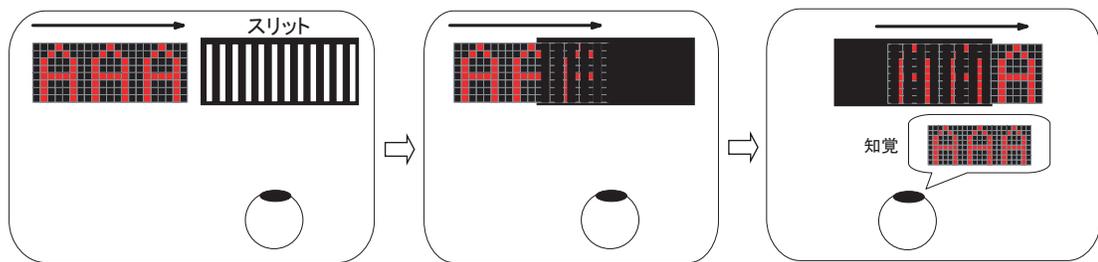


図 5.1 運動知覚による形態情報の統合

きた．[27][28][30][31][121][122][123]．このようなスリット視は，スリットが1つ，移動物体の1画素分の大きさしかなくても生じる．複数のスリットを使用した場合は，単純に静止画に対してスリット状の遮蔽をかけてサンプリングされた画像に比べ，スリットの向こうでイメージを運動させると，そのナイキスト周波数以上の空間周波数情報が再現されていることが示されている [31]．形態を再構成するメカニズムとして，スリット向こうの物体の運動知覚が重要な役割を果たしており，運動軌道に沿って形態情報が再構成されていることが示唆されている．例えば，スリットを通して文字認識を行うタスクにおいて [31]，運動方向と同じ方向のノイズを加えた場合や，運動残効が起きている状態でタスクを行った場合，文字の認識率が減少することが報告されている．また，スリット視は眼球運動が起きていなくても知覚することが可能である．眼球運動が生じると，ある位置での継時的な光源の点灯パターンは網膜上に空間パターンとして広がる．そのため，眼球運動時には形態を知覚しやすくなるが，提示時間が 100ms 以下（眼球運動が生じるまでの潜時以下の時間）でも形態を知覚可能であるため，眼球運動が必ずしも必要でない．

スリット視において，形態は運動情報によって構成されていると考えれば，脳内の運動処理機構から形態情報を処理する機構への情報伝達があると考えられる．これまで，運動情報処理は頭頂側の経路（Dorsal Pathway），形態情報処理は側頭側の経路（Ventral Pathway）で別々に処理されていると考えられてきたが [124][125][126][127]，近年は，MT 野等の運動処理機構のスリット視への関与が示唆されている [128][129][130]．

5.2.2 運動知覚と色の統合

これまで，形態や色に関する情報処理は，運動情報等，空間的な情報処理を行う経路とは異なる経路によって処理されていると考えられてきた [124][125]．しかし，スリット視における運動情報の形態生成への関与などから，運動情報と形態・色情報は必ずしも別々の経路で並列に処理されているのではなく，経路間でも情報伝達が存在していることが考えられる．そして，近年，運動知覚が色統合にも影響を与えていることを示唆する現象が報告されている．本章で論じる運動軌道上の色統合 [32][33] や図 5.2 のような Color From Motion と呼ばれる現象である [131][132][133]．

5.2.3 運動軌道上の色統合

本章で論じる運動軌道上の色統合について述べる．色の知覚は網膜上の3種類の錘体細胞の反応の比率によって決定されている．そして，色の混色は網膜上で空間的に，時間的に近傍に提示された色情報が統合される過程であり，網膜上の色情報の配置が最も重要な要因であると考えられてきた．しかし，同じ網膜上の色配置であっても，静止時には分かれて知覚される色が，運動時には統合（混色）して知覚されることが報告されている [32][33]．図 5.3 に運動軌道上での色統合（混色）の概念

図を示す．例えば，図 5.3(a) のように，四角い物体がある一定速度で赤，緑に点滅しながら移動すると，あたかも黄色い物体が移動しているように知覚される．このとき，観察者の眼球が静止していたとすると，網膜上には図 5.3(b) 左のような赤・緑の縞が描かれることになる．しかし，観察者が物体の運動を知覚していると，網膜上では別々の位置（空間的に混色しない距離）に描かれている赤・緑が統合されて，黄色い四角が移動しているように知覚される．本章では，物体の運動軌道上で色情報が統合されていることを心理物理実験によって示し，そのメカニズムを探る．

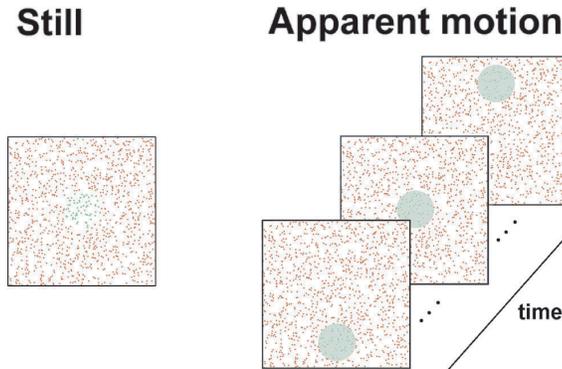


図 5.2: Color From Motion ([133] より引用) ドット自体は静止している，静止時には色の広がりを知覚されないが，色領域が移動すると，その領域内に色が広がるように知覚される．

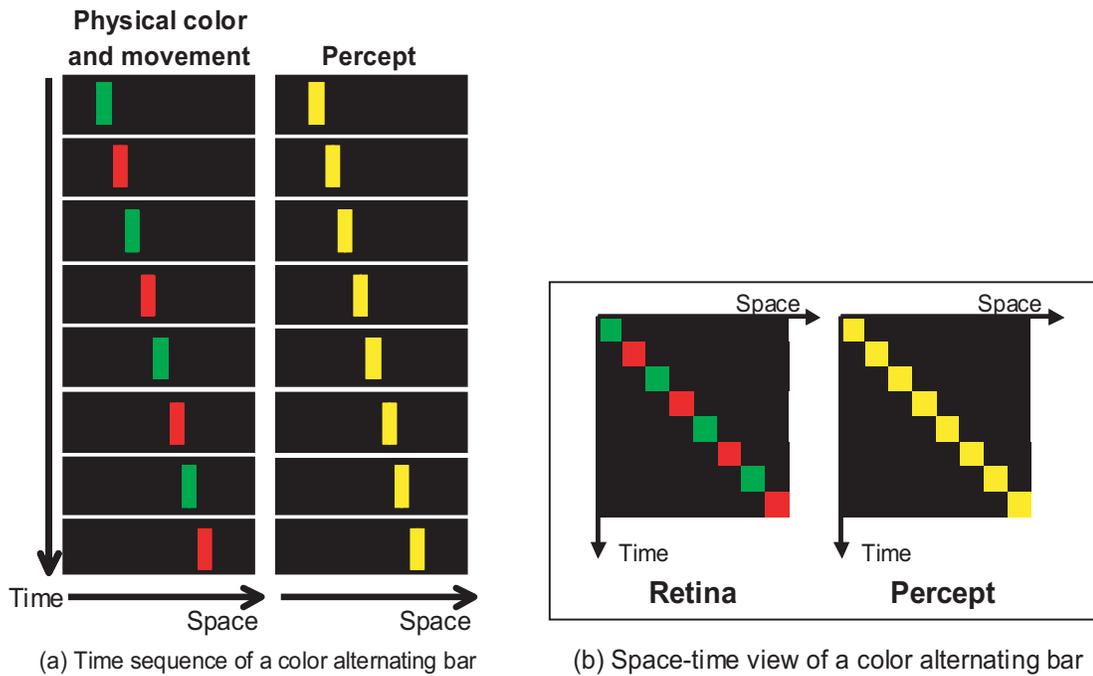
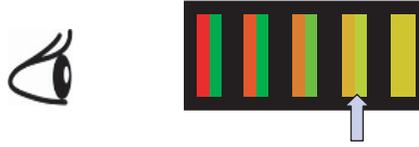


図 5.3 (a) 運動知覚による混色の概念図 (b) 時空間表記

- Subjective evaluation by rating



- Objective evaluation by color matching

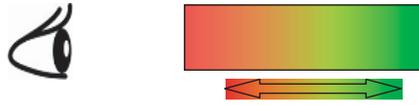


図 5.4 混色の主観評価とカラーマッチングによる客観評価

5.3 実験 5-1：運動知覚による混色の主観判断

本実験では、網膜上の異なる位置に提示された色情報が運動知覚によって統合されることを、被験者に色の見え自体を答えてもらう主観評価実験によってを示す。被験者には、図 5.4 上のように、提示された運動物体の知覚された色が提示された 5 つの色のうちどれが一番近いかを選択してもらった。

5.3.1 実験装置と手順

被験者

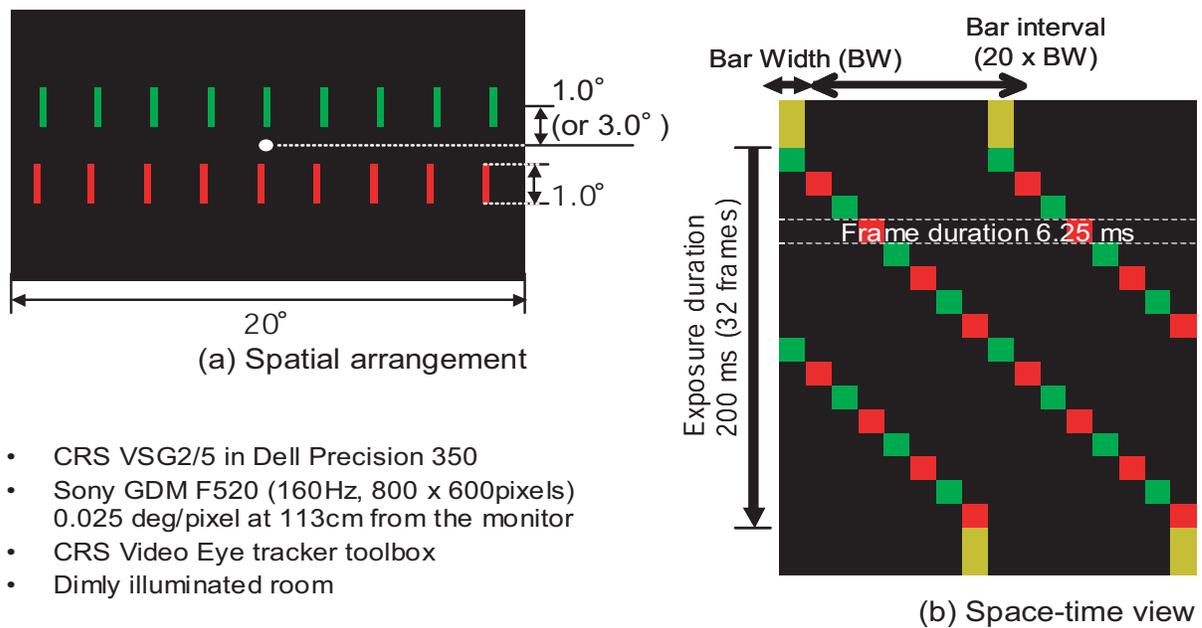
被験者は実験の目的を知っている男性被験者 2 名 (J.W., S.N.)、naive な男性被験者 2 名 (I.K., I.M.)、naive な女性被験者 2 名 (A.M.) の計 5 名である。全ての被験者は正常な視力、正常な色知覚能力を持っていた。

実験装置

刺激提示に使用したディスプレイは図 5.5(a) に示すような、Sony GDM F520 (160Hz, 800 x 600 pixels, 1.5min/pixel at 113cm from the monitor) を使用し、画像の描画には CRS VSG2/5 in Dell Precision 350 を使用した。被験者は、ディスプレイを 113.4cm の距離から観察した。提示した赤色の最高輝度は $28cd/m^2$ 、緑色の最高輝度は $84cd/m^2$ であった。

実験手順

被験者は、実験中、画面中心の注視点を固視する。実験においては、垂直方向視野角 1deg の大きさのバー群 (水平方向の大きさは可変) が上下 1deg もしくは 3deg 離れた位置に提示され、上下のバー群は左右逆方向に 200ms 移動する。となりのバーとの間隔はバー 20 本分である。バーは図 5.5(b) に示すように、1 フレーム (160Hz なので約 6ms) でバーの水平方向の大きさの分だけ、色を交互に変化させながら移動する。そのため、眼球が動かなければ網膜上で色が混色することはない。このバーがある一定速度以上で移動すると、バー内部の 2 色が混色した状態で知覚される。この混色の度合いをバー移動後にテスト刺激群を提示し、知覚されたバー内部の色がどの色に近かったか被験者に選んでもらう。テスト刺激の色相をディスプレイの赤・緑の最高輝度に対する比率 (R, G) で表すと以下のように 1.0 と 0.5 のあいだを 5 段階に等分割したものである。



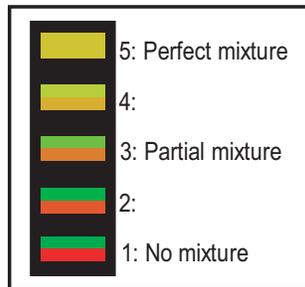
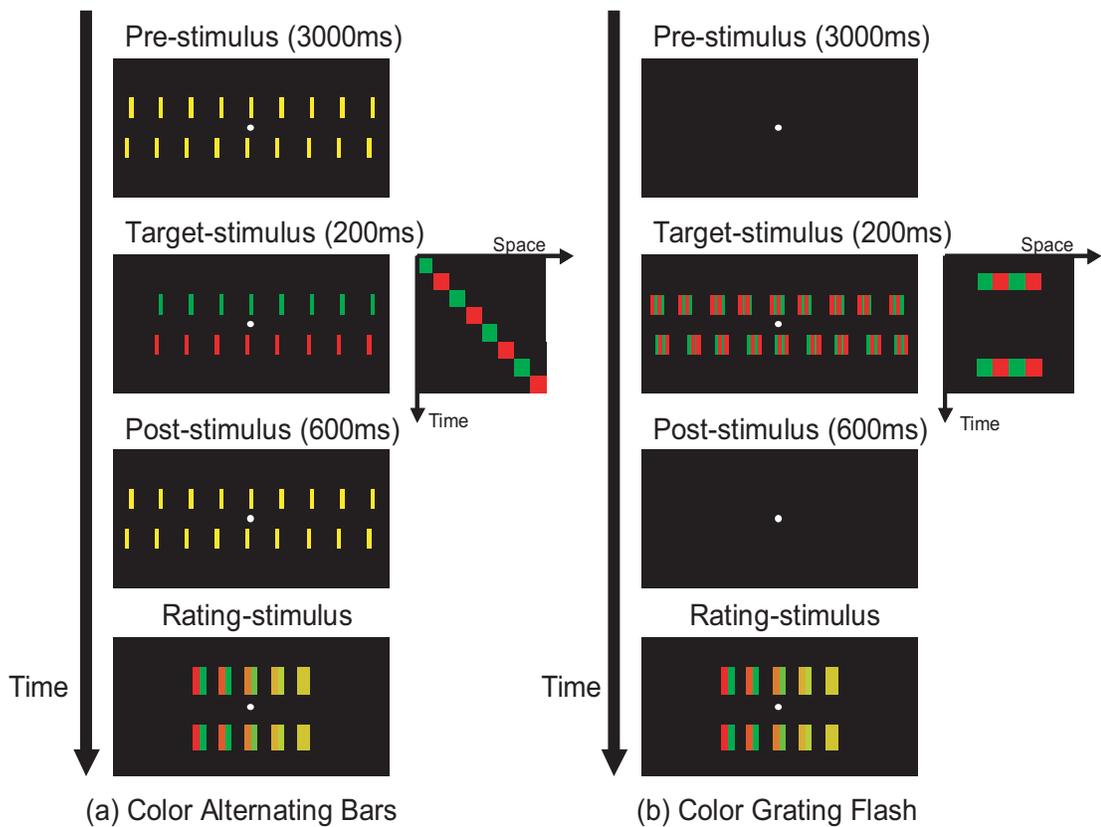
- CRS VSG2/5 in Dell Precision 350
- Sony GDM F520 (160Hz, 800 x 600pixels)
0.025 deg/pixel at 113cm from the monitor
- CRS Video Eye tracker toolbox
- Dimly illuminated room

図 5.5 (a) 提示刺激の概観 (b) 時空間表記

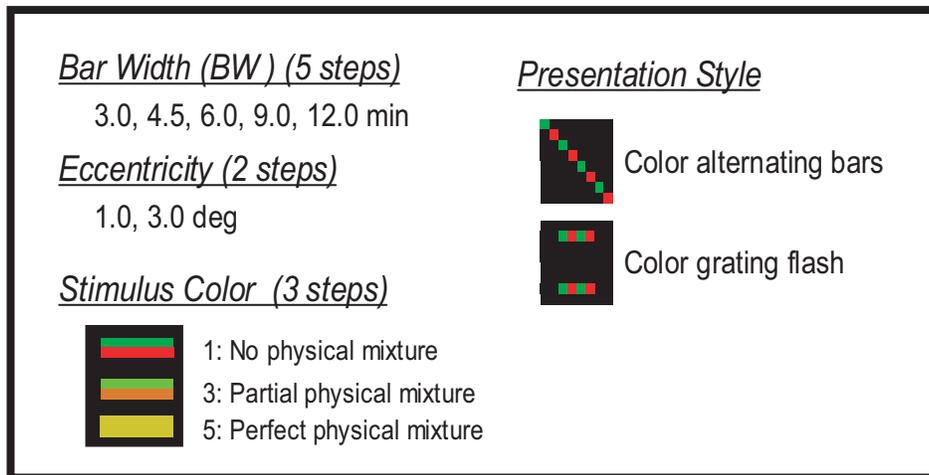
1. 赤 (1.0, 0.0) 緑 (0.0, 1.0)
2. 赤 (0.875, 0.125) 緑 (0.125, 0.875)
3. 赤 (0.75, 0.25) 緑 (0.25, 0.75)
4. 赤 (0.625, 0.375) 緑 (0.375, 0.625)
5. 赤 (0.5, 0.5) 緑 (0.5, 0.5)

実験のタイムチャートを図 5.6(a) に示す．はじめに 3sec バーが動かない状態で提示される．このときのバーの色は黄色である．その後バーが 200ms の間上下逆方向に運動する．運動中のバーの色は上記のように赤・緑が交互に点滅する．運動後は 600ms バーが黄色の状態で静止する（運動前後の静止したバーの刺激は，バーが現れた瞬間や消えた瞬間の色によって判断されるのを防ぐため）．そして，1sec バーが消えた後に図 5.6(c) のような 5 種類のテスト刺激が提示される．指標は 1~5 の 5 段階で値が大きいほど混色して知覚されたことを示し，5 の場合は完全混色したことを表す．運動知覚による混色との比較実験として，図 5.6(b) のように，同じ大きさのバー群が一瞬フラッシュする刺激を提示し，その色がどのような色に知覚されるか同様のテスト刺激から選んでもらった．バー群は 10 本分のバーが一度にフラッシュする．図 5.6(a) の運動混色条件と図 5.6(b) のフラッシュ刺激条件を比較した場合，200ms の間に提示される各網膜位置での色情報は同じであり，その違いは運動情報の有無である．

実験におけるパラメータは，図 5.6(d) にあるように，バーの水平方向の大きさ 5 段階，注視点からの垂直距離 2 段階，色相 3 段階（テスト刺激の 1, 3, 5 に対応），提示手法（運動混色条件，フラッシュ条件）2 段階の計 60 条件である．色相を変化させたのは，被験者の主観判断が妥当であるか判断するためである．黄色を提示していて被験者が黄色を正しく選んでいるのならば，被験者は正しく主観的に知覚した色を答えていると考えられる．被験者（5 人）は各条件 6 試行，計 360 試行を行った．



(c) Rating



(d) Parameters

図 5.6: (a) 運動混色条件の実験手順, (b) フラッシュ条件の実験手順, (c) テスト刺激, (d) 実験パラメータ

5.3.2 実験結果

実験の結果を図 5.7 に示す．図 5.7(a) は被験者 5 人の評価値を平均した値である．上段が注視点からの垂直距離 1deg，下段が垂直距離 3deg の試行である．左の列は色相が赤・緑（テスト刺激の値で 1），中央の列は色相が黄味がかった赤・緑（テスト刺激の値で 3），右の列は色相が黄色（テスト刺激の値で 5）の試行である．赤い丸ドットが運動混色条件，緑の三角ドットがフラッシュ条件のデータである．各グラフの横軸はバーの水平方向の幅 [min]，縦軸が評価値（1～5： 1 が赤と緑，5 が黄色）である．左の列をみると，バーの水平方向の幅が小さくなるにつれ黄色く混色されて知覚されている．運動混色条件とフラッシュ条件を比べると，同じ大きさのバーが提示されていたとしても運動混色条件のほうが黄色く知覚されている．例えば，注視点から 1deg に提示された 3min のバーは，運動している場合には評価値が 5 で，黄色く混色して知覚される一方，フラッシュした場合には評価値は約 2.5 で，提示された赤・緑がやや黄色がかって知覚される程度である．同じバーの幅ならば，運動混色条件のほうが黄色く混色して知覚されるという傾向が中央の列でも観察される．ただし，提示している色相がテスト刺激値 3 なので，水平方向の幅を最も広くとっても 3 に評価されている．右の列を見ると，黄色いバーが提示されているので，バーの幅によらず評価値は 5 である．このことは，この主観評価実験の妥当性を支持するものでもある．図 5.7(b) にバーの色相が赤・緑（テスト刺激の値で 1）のときの全被験者のデータを示す．全被験者ともバーの水平方向の幅が狭いときには，フラッシュ条件より運動混色条件においてより黄色く混色して知覚されている．また，同様の実験を赤・緑の輝度を等輝度* とした条件や青・黄色の色を提示した条件においても計測したが，運動混色条件において，色が統合（混色）されて知覚された．

次にバーの移動速度，提示時間と混色の程度の変化の関係を調べた．同様の実験条件において，バーの幅を 4.5min に固定し，1 フレームの時間を 6.25, 12.5, 18.8, 25, 37.5, 50ms（バーの移動速度それぞれ 4, 2, 1.33, 1, 0.66, 0.5deg/sec）の 4 段階に，バーの提示時間を 200ms もしくは 1000ms の 2 段階に変化させた．被験者のタスクは同じく知覚されたバー内部の色がどの色に近かったかを選択するものであった．

実験の結果を図 5.8 に示す．図 5.8(a) は被験者 5 人の評価値を平均したものである．上段が注視点からの垂直距離 1deg，下段が垂直距離 3deg の試行である．左の列は色相が赤・緑（テスト刺激の値で 1），中央の列は色相が黄味がかった赤・緑（テスト刺激の値で 3），右の列は色相が黄色（テスト刺激の値で 5）の試行である．赤い が提示時間 200ms の条件，緑の が提示時間 1000ms の条件のデータである．各グラフの横軸は 1 フレームの時間を表し，値が小さいほどバーの移動速度が速いことを意味する．縦軸は被験者に知覚された色の主観評価値である．提示時間による差は，注視点からの垂直距離 1deg の条件において，やや 200ms のときにやや混色する傾向が強いものの，大きな差ではなく，垂直距離 3deg の条件においては殆ど差はなかった．1 フレームの時間と混色との関係を考えると，フレーム時間が 20ms 以下では評価値が高く，被験者は黄色を知覚していた．しかし，それよりもフレーム時間が短くなると，やや評価値は減少した．このことは，混色が起こるには，物体にある一定以上の移動速度が必要であり，かつ最も適した速度が存在することを意味している．

図 5.8(b) は全ての被験者の色相が赤・緑（テスト刺激の値で 1）のデータを示したものである．各被験者のデータは 2 種類の傾向に大別される．フレームの時間が短くなるとともに評価値が大きく混色していく傾向と，全体としてはフレーム時間が短くなるにつれ評価値が大きくなるものの，あるフレーム時間で最大値を示している傾向である．後者の傾向は混色が生じる最適な速度が存在することを意味しているが，前者の傾向の場合も，最適値が 6.25ms 付近であり，6.25ms より短いフレーム時間で提示した場合，評価値が減少していく可能性もある．

* 赤・緑を 16Hz で交互に提示し，最もちらつきが小さくなる緑の輝度を決定した（赤の輝度はディスプレイの最大値）

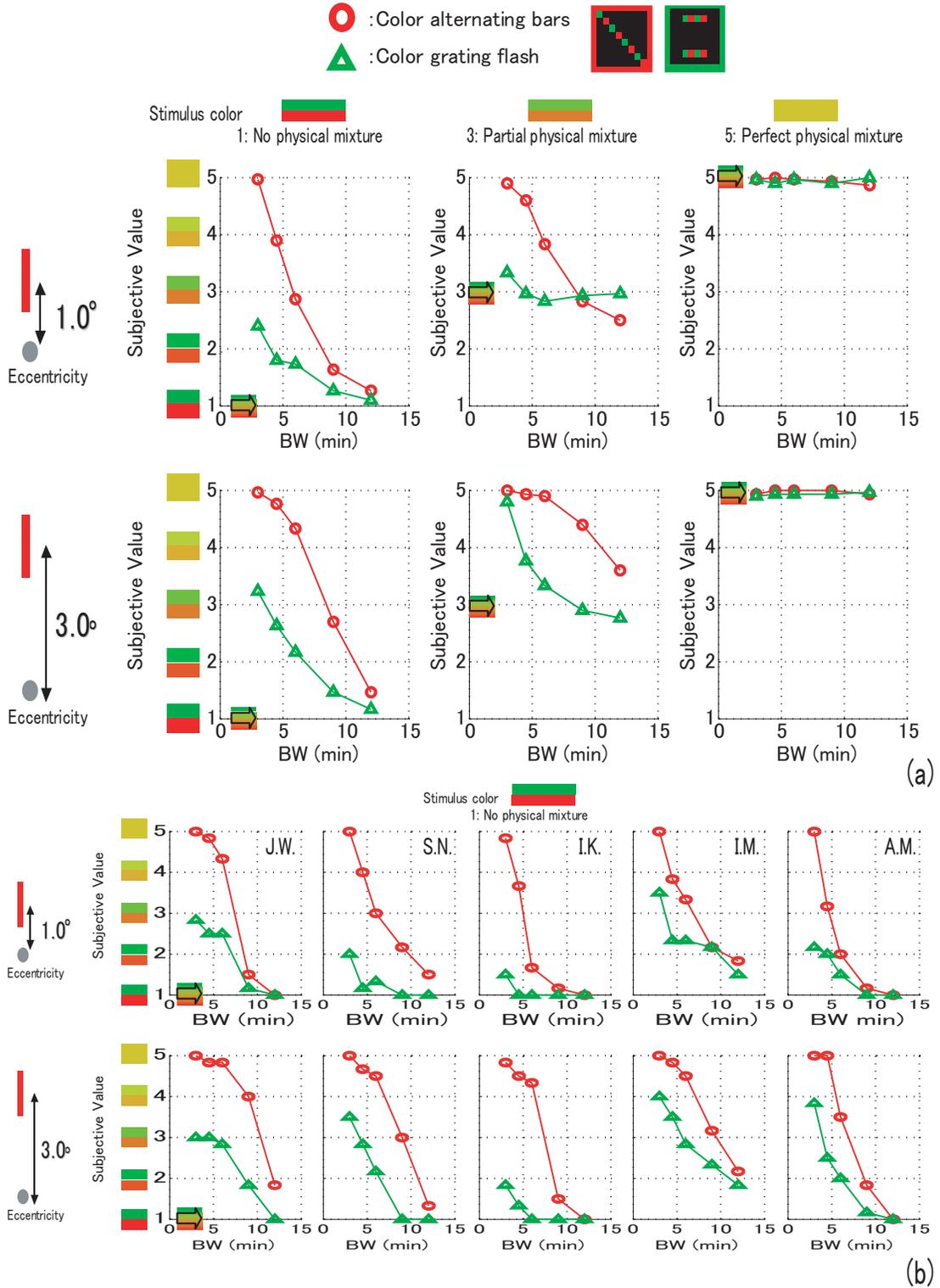
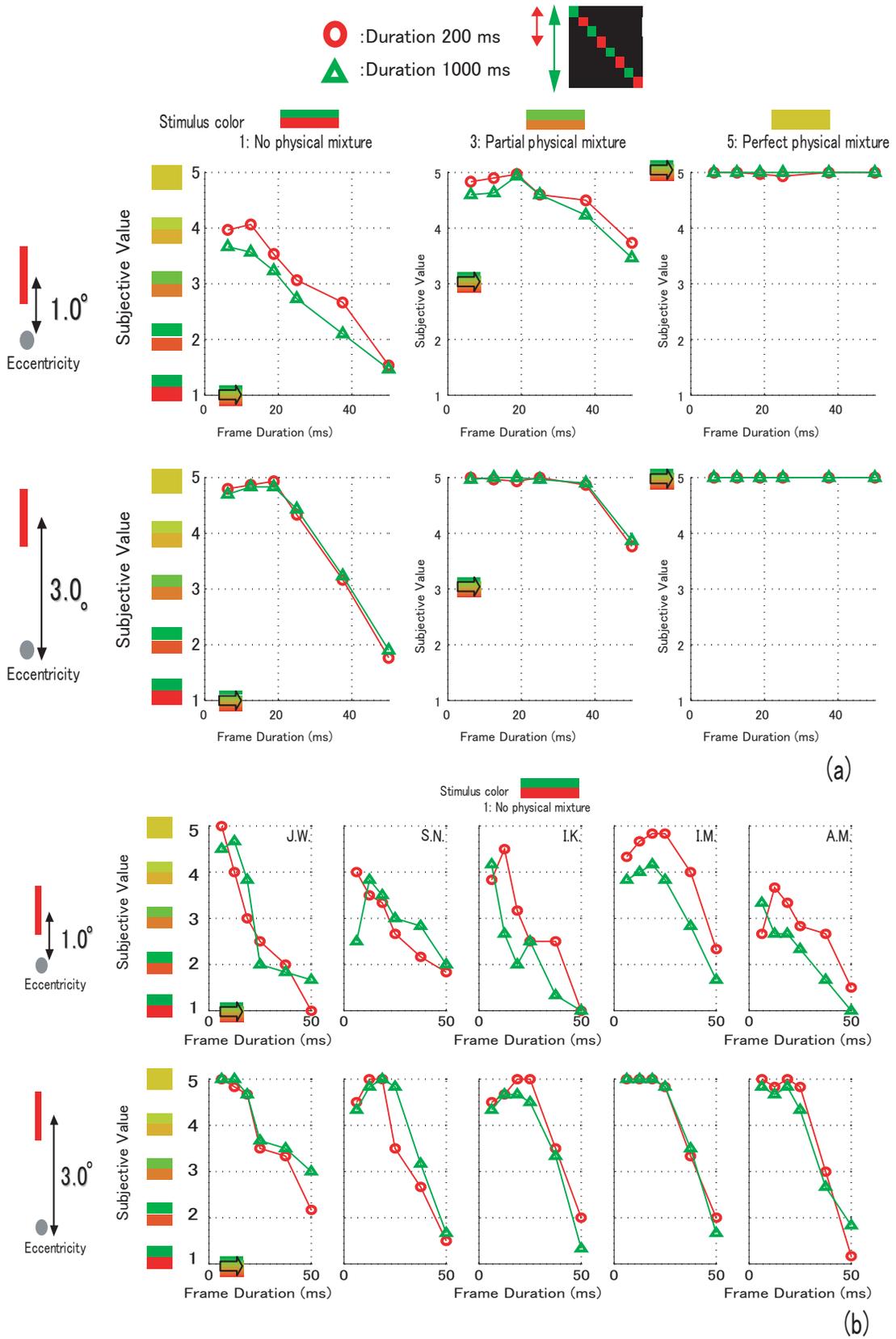


図 5.7 運動混色条件とフラッシュ条件の比較 (a) 被験者の平均データ, (b) 全被験者のデータ



5.4 実験 5-2：運動知覚による混色の客観判断

実験 5-1 では、図 5.4 上のように、知覚された主観的色味を選んでもらうことによって、網膜上の異なる位置に提示された色情報が運動知覚によって統合されることを示した。実験 5-2 では、被験者の主観的報告ではなく、カラーマッチングタスクのパフォーマンスという客観的指標によって、運動軌道上の色統合の程度を評価する。

5.4.1 実験装置と手順

被験者

被験者は、実験 5-1 に参加した、実験の目的を知っている男性被験者 2 名 (J.W., S.N.)、naive な男性被験者 1 名 (I.K.) である。

実験装置

実験装置は実験 5-1 と同様の装置を使用した。

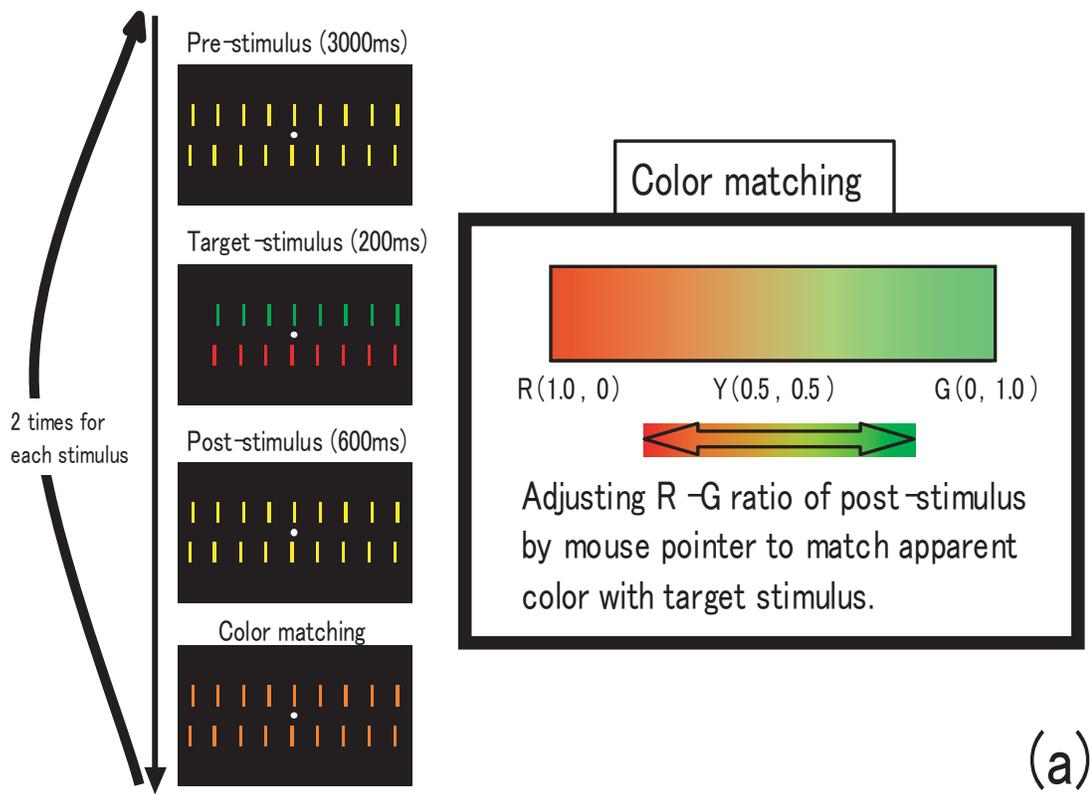
実験手順

実験のタイムチャートを図 5.9(a) に示す。はじめに、バー群が注視点の上下 1deg もしくは 3deg の位置に 3sec 提示される。バーの色は赤・緑の間の色相のランダムの色相である。上下のバー群は左右逆方向に 200ms 移動する。となりのバーとの間隔はバー 20 本分である。このときのバーの色は赤・緑が移動に合わせて交互に点滅する。運動後のバーの色は運動前と同じ色になるが、マウスを動かすと、バーの色が赤から緑の色相のあいだで変化する。被験者には、マウスを動かすことで物体の運動中に知覚された色に運動後のバーの色を合わせるカラーマッチングを行ってもらった。1 試行あたり、2 度の刺激提示とマッチングを行い、パフォーマンスの評価には 2 度目の値を採用した (2 度目のマッチングの刺激の色は 1 度目に決定した色から始まる)。

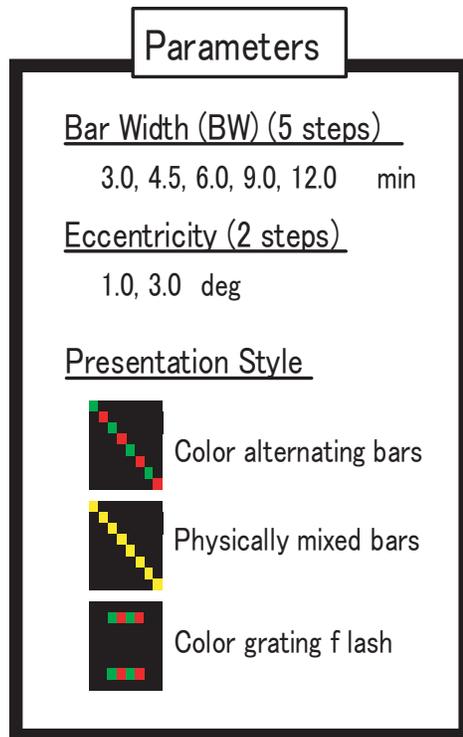
本実験におけるパラメータは、図 5.9(b) にあるような、運動中に提示するバーの水平方向の幅 5 段階、バーの注視点からの垂直距離 2 段階、提示形態 3 種類である。提示形態は、運動中に赤・緑が変化する刺激 (運動混色条件)、黄色いバーが移動する刺激 (物理混色条件)、同じ大きさのバー群が一瞬フラッシュする刺激 (フラッシュ条件) を提示した。また、運動中に提示する赤・緑は図 5.9(c) の 5 種類の色相とした。被験者 (3 人) は各条件 10 試行、計 3000 試行を行った。

5.4.2 実験結果

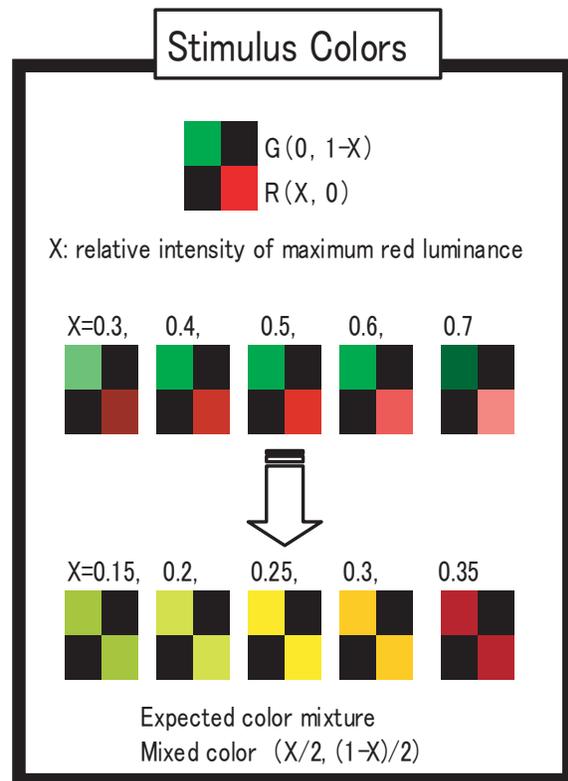
被験者 J.W. の刺激距離 1deg における全試行のデータを図 5.10(a) に示す。1 番上の行 (赤い) が運動混色条件、2 番目の行 (青い×) が物理混色条件、3 番目の行 (緑の) がフラッシュ条件のデータである。縦の列は運動中に提示するバーの幅による違いであり、左から 3.0, 4.5, 6.0, 9.0, 12.0min の 5 段階である。各グラフの横軸は、提示した刺激の赤色輝度の大きさであり、最大輝度に対する比率で表した。縦軸はカラーマッチングによって得られた赤色輝度の大きさである。各グラフに斜めに引かれている黒の直線は、カラーマッチングが理想的に行われた場合に期待される赤色輝度である。例えば、0.2 の赤色輝度が提示された場合、理想的に混色すると知覚される赤色輝度は半分の 0.1 になる。全体の傾向をみると、1 行目 (運動混色条件)、3 行目 (フラッシュ条件) では右のグラフほど理想値に対するずれが大きくなっている。これは、バーの水平方向の幅が小さくなるにつれ、混色が起きやすくなり、カラーマッチングのパフォーマンスも上昇したものと考えられる。



(a)

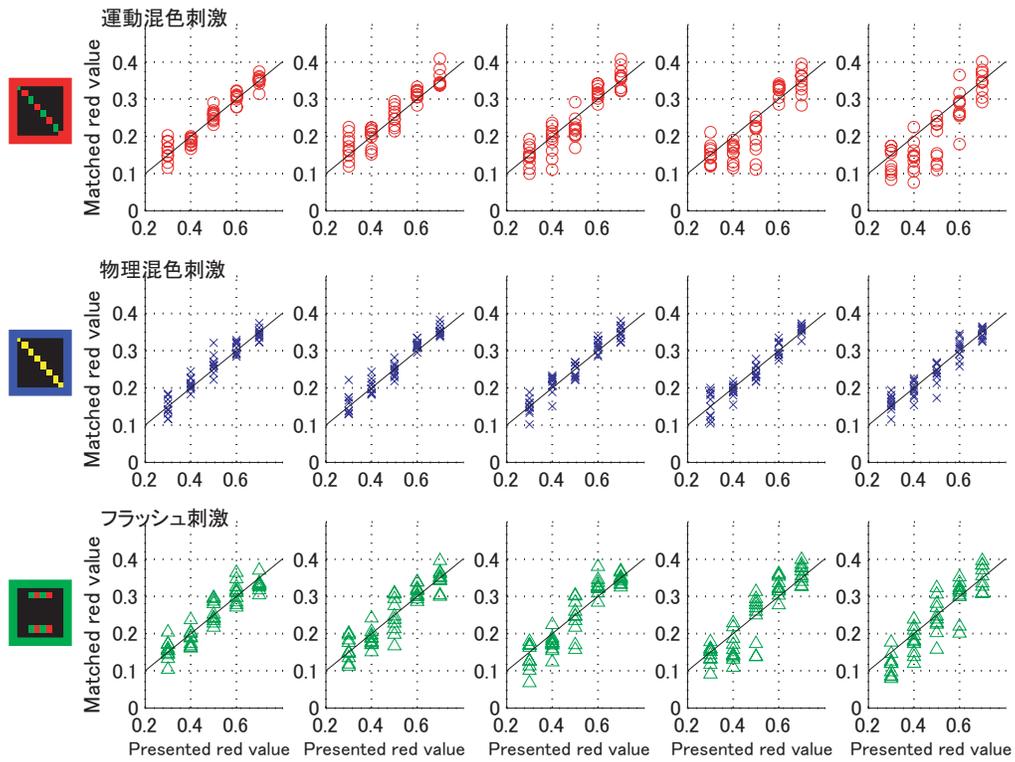


(b)

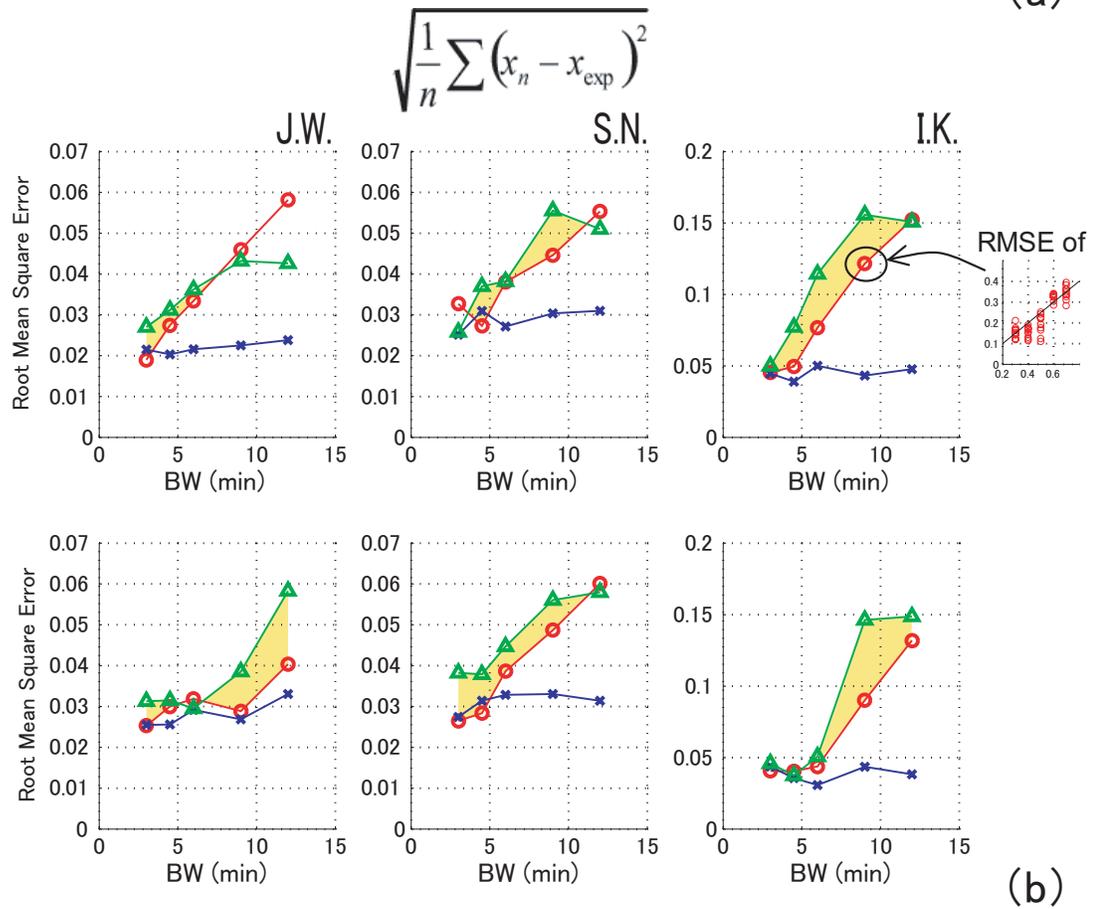


(c)

図 5.9: (a) カラーマッチングによる客観評価の実験手順, (b) 実験パラメータ, (c) 提示した 5 種類の色相



(a)



(b)

図 5.10 (a) 一人の被験者の全試行の結果, (b) 全被験者の RMSE (RootMeanSquareError)

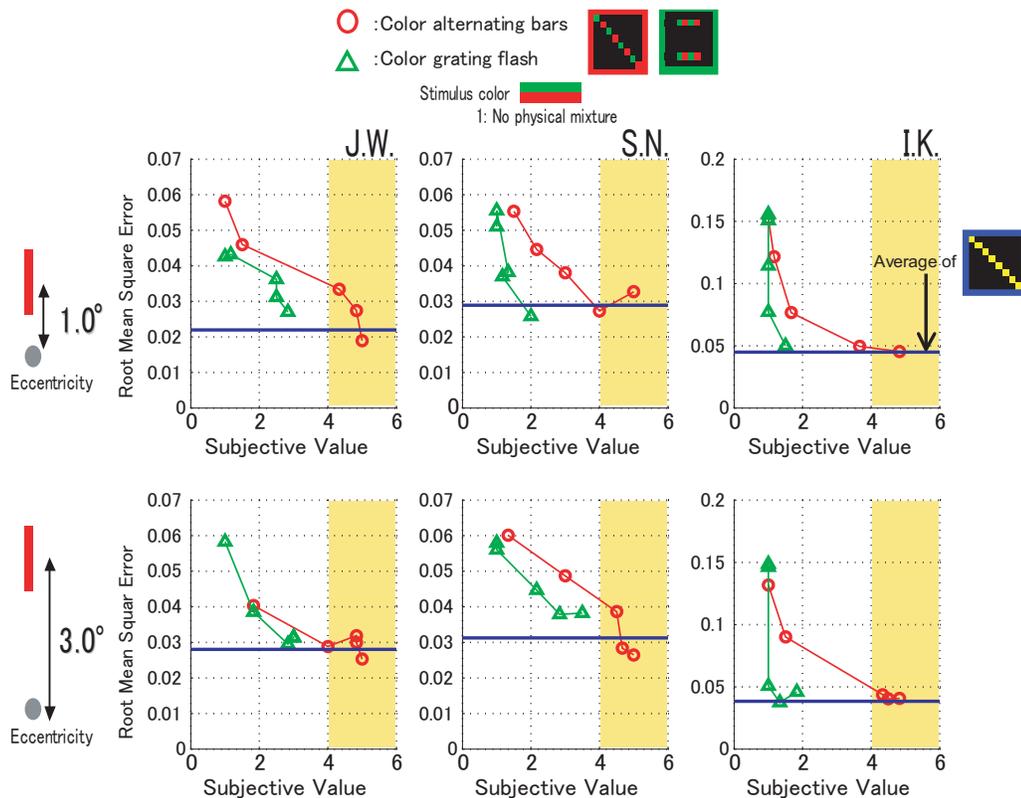


図 5.11 主観評価と客観評価を合わせてプロットしたデータ

このパフォーマンスを定量的に評価するために理想値からのずれの RootMeanSquare (二乗平均の平方根) を計算した。その被験者全員の結果を図 5.10(b) に示す。横軸はバーの横幅で、縦軸が計算した RMS である。縦軸の値が小さいほど理想値に近くカラーマッチングが行われていることを示している。各プロット一点一点は図 5.10(a) のグラフ一つに対応する。上段が注視点からの垂直距離 1deg、下段が垂直距離 3deg の試行である。青い×は物理的混条件で、バーの幅によらず RMS の値は一定であり、他の条件に比べてずれは小さい。赤い が運動混色条件で、緑の がフラッシュ条件であり、全ての被験者の殆ど全ての条件 (グラフ内黄色い領域) で運動するバーを提示したほうが RMS の値が小さくなっている。このことは、運動混色条件の色知覚においては、主観的に混色がして黄色く知覚されているだけでなく、カラーマッチングのパフォーマンスも向上していることを意味している。

本実験において提示した刺激自体は、実験 5-1 と同じであり、実験 5-1、5-2 を通じて、運動混色条件、フラッシュ条件の刺激は、主観的な色選択とカラーマッチングによる客観的タスクによってその混色の程度が評価された。そこで、運動混色条件、フラッシュ条件の各条件データを、横軸に実験 5-1 の主観的評価値、縦軸の実験 5-2 の RMS をとってプロットした。その結果を図 5.11 に示す。赤い が運動混色条件で、緑の がフラッシュ条件である。主観評価の値が 4 以上 (ほとんど混色している評価値) の領域が黄色く塗られた領域である。また、カラーマッチングの実験において物理的に混色した刺激を提示した場合の RMS の平均値が青い直線によって示されている。全ての被験者において、運動混色条件で主観的に混色している条件 (黄色い領域) においては、カラーマッチングのタスクにおいても物理的に混色している場合と殆ど変わらないパフォーマンスを示している。これは、運動軌道上の色統合によって得られた知覚が、主観的に黄色く見えているだけでなく、その知覚された色は物理的に混色している場合と変わらない精度でカラーマッチングタスクを行えたことを意味する。

5.5 実験 5-3：運動知覚による混色と眼球運動

実験 5-1, 5-2 においては, 被験者にディスプレイの中心を注視してもらい, 提示する刺激を短時間 200ms の間, 上下のバー群を上下逆方向に動かすことで眼球運動が起きないようにした。そして, 眼球運動が起きていないという前提のもとで, 網膜上異なる位置に提示された 2 つの色が運動軌道上で混色していると考えてきた。しかし, 実際に眼球運動が起きた場合には, 時間変化するバーの色が網膜上の同じ位置を刺激することになり, 運動軌道とは関係なく網膜上の要因によって混色が説明可能となる。そこで, 本節では運動知覚による混色が起きているときの眼球運動の有無について調べた。

5.5.1 実験装置と手順

実験 5-1 に参加した 5 名の被験者, 実験 5-1 と同様の装置を使用した。

本実験では, 画面上部に色を変化させながら運動するバーを提示し, 画面下部には赤・緑の縞が提示時間中通して静止している刺激, 静止縞刺激の概要と時空間表記で記した動きを図 5.12(a) に記す。もし, 運動混色条件において知覚された黄色が眼球運動によって生じる網膜上の混色によるものならば, 同時に提示された静止縞刺激も混色して黄色に知覚されるはずである。

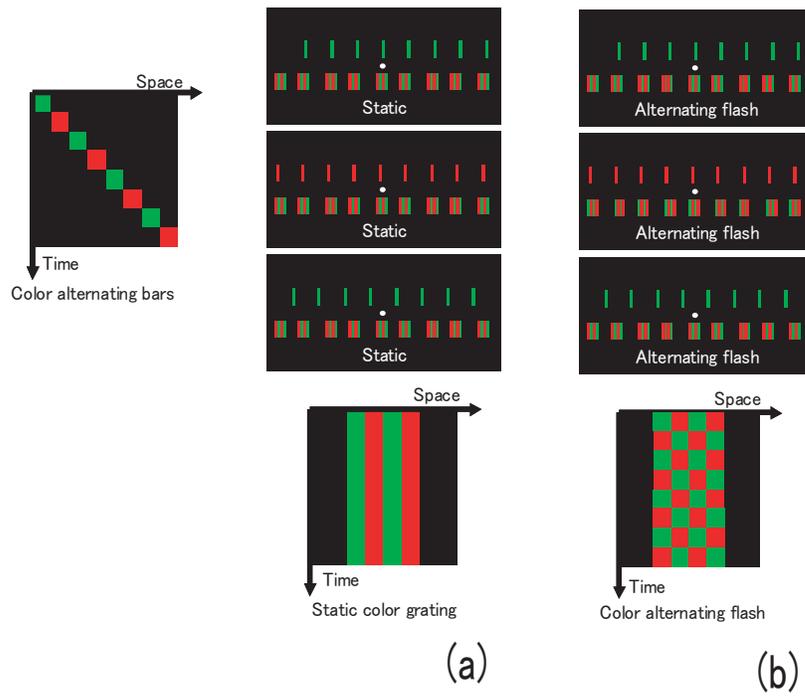
実験手順は実験 5-1 と同じく, はじめに 3sec バーが動かない状態で提示される。このときのバーの色は黄色である。その後上部 (または下部) のバーが 200ms 運動する。同時に, その 200ms のあいだ下部 (または上部) には赤・緑の静止縞が提示される。運動後は 600ms バーが黄色の状態に静止する。そして, 1sec バーが消えた後に実験 5-1 と同じく 5 種類のテスト刺激が提示され, 被験者は, 上部, 下部それぞれの色を 1~5 の 5 段階で答える (値は大きいほど混色して知覚されたことを示し, 5 の場合は完全混色したことを表す)。バーの水平方向の幅は 4.5, 6.0, 9.0, 12.0min の 4 段階, 刺激の注視点からの距離は 3deg, 色相は赤・緑の最高輝度であった。

5.5.2 実験結果

5 人の実験結果を図 5.12(c) に示す。赤い が運動するバーの条件で, 緑の が静止縞条件である。バー幅の狭い条件においては, 運動知覚による混色が生じて, 評価値が 5 (黄色) 近くになっているが, 同時に評価された静止縞の評価値は最もバー幅の狭い条件においても 3 程度であった。

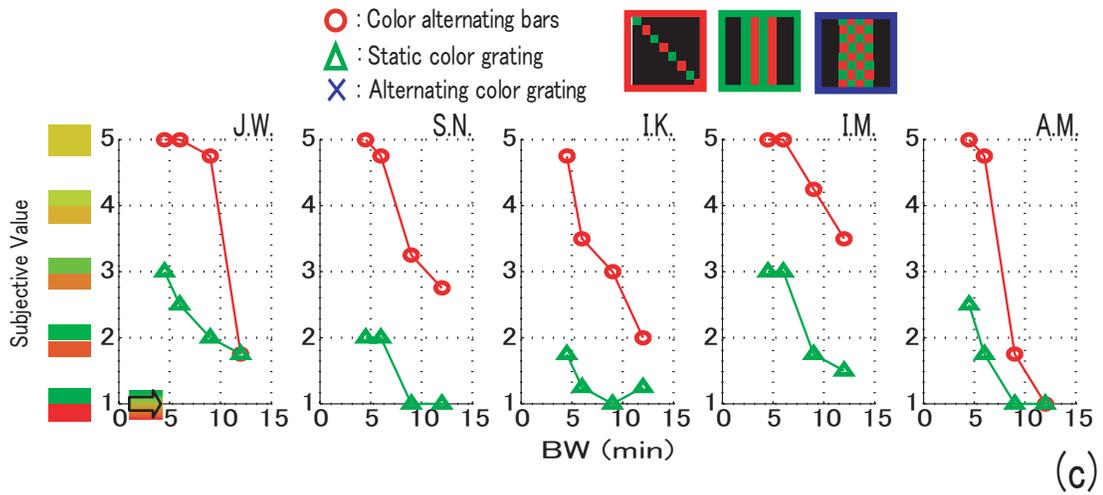
上記の実験では, 運動するバーと静止縞が同時に提示されたが, 静止縞条件では, 同じ色が網膜上の同じ位置に一定時間提示されており, その色の知覚を強めている可能性がある。そこで, 次に, 静止縞を提示する代わりに, 図 5.12(b) のような, 静止して赤・緑に点滅する縞を提示した。点滅縞刺激は, フレームレート (160Hz) に合わせて点滅する。もし, これまでの実験において知覚された黄色が, 眼球運動によって生じる網膜上の混色によるものならば, 点滅刺激は赤・緑に分かれて知覚されるはずである。実験手順は静止縞の実験と同じく, 被験者は, 上部, 下部それぞれの色を 1~5 の 5 段階で答えるものであった。同じく, バーの水平方向の幅は 4.5, 6.0, 9.0, 12.0min の 4 段階, 刺激の注視点からの距離は 3deg, 色相は赤・緑の最高輝度を使用した。

5 人の実験結果を図 5.12(d) に示す。赤い が運動するバーの条件で, 青の × が点滅縞条件である。バーの幅が狭い条件においては, 運動知覚による混色が生じて, 評価値が 5 (黄色) 近くになり, バーの幅が広くなるにつれて, 評価値も小さくなっている。一方, 点滅縞の評価値はバーの幅に関係なく 5 であり, 混色していた。これら 2 つの実験結果は, これまで観察された運動するバーの混色が, 眼球運動によらないことを心理物理実験によって示したものである。

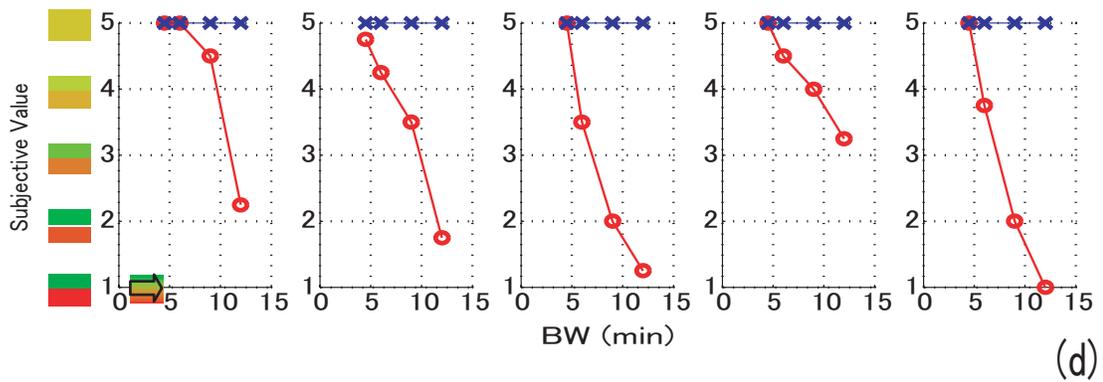


(a)

(b)



(c)



(d)

図 5.12: (a) 赤・緑の静止縞, (b) 赤・緑の点滅縞, (c) 赤・緑静止縞の全被験者データ, (d) 赤・緑の点滅縞の全被験者のデータ

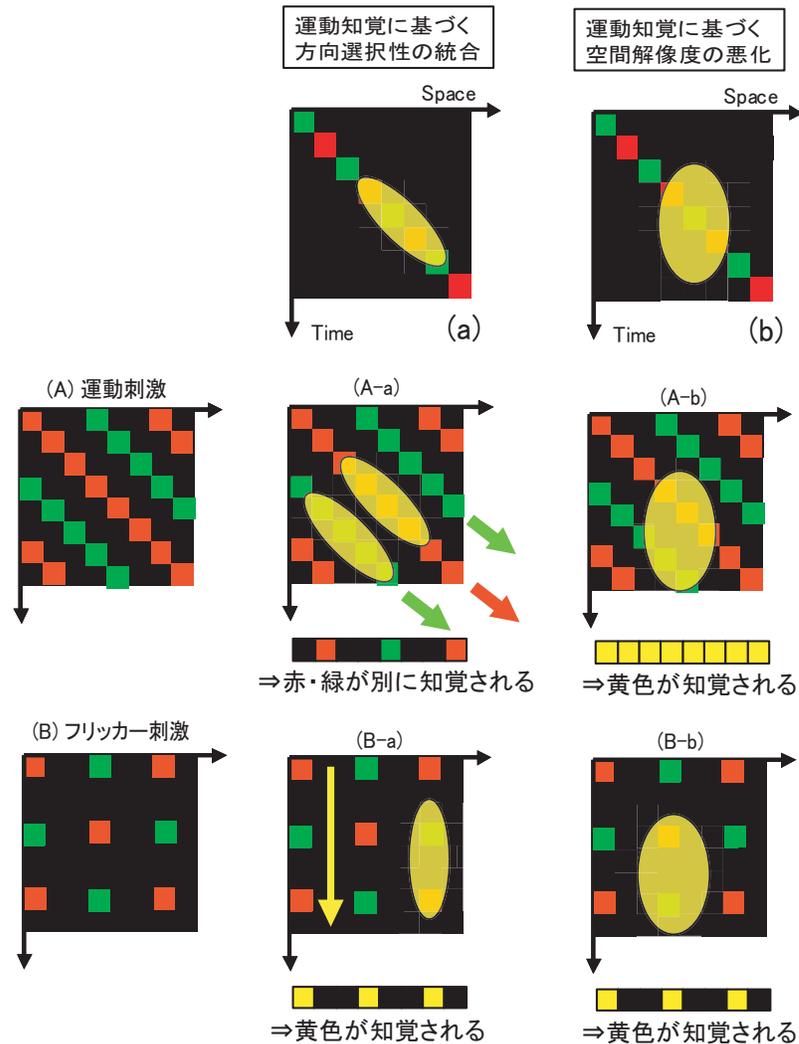


図 5.13 (a) 方向選択性のない解像度の低下による混色 (b) 方向に沿った色の混色

5.6 実験 5-4：運動知覚による色分離の主観判断

これまでの実験で、網膜上では異なる位置であっても、同一物体の運動軌道上に存在する色は混色して知覚されることを示した。この運動軌道上の混色現象から示唆される色統合機構を考えると、図 5.13 の 2 つの機構が考えられる。1 つは図 (a) にある、運動軌道に沿った運動方向選択性の統合であり、知覚される運動方向、時空間表記で斜め方向に統合が行われる。もう 1 つは、運動物体の輝度解像度が悪化するように [134]、色解像度も悪化していると考えられるものである。これまで示した運動軌道上の混色に関しては、運動方向選択性のない解像度の悪化によっても説明することは可能である。そこで、実験 5-4 では、色統合機構が運動方向選択性の統合なのか、色解像度の悪化なのかを確かめる実験を行った。

実験では、図 5.13(A) のような赤・黒・緑・黒を一周期とする横方向の格子縞の色は変化させず、横方向に高速移動させる運動刺激と、同様の格子縞が静止してフリッカーする図 5.13(B) のようなフリッカー刺激を提示し、そのときに知覚される主観的色味を調べた。眼球が静止していたとすると、

運動刺激とフリッカー刺激は色が提示される網膜各位置では同じ周波数で色が提示される。もし、色統合機構が運動方向選択性の統合であるならば、運動刺激が提示された場合には、運動方向は時空間表記上斜め方向なので、運動刺激の色は赤と緑により分離して知覚される。一方、フリッカー刺激に対しては、刺激が静止しているので時空間表記上垂直下方向に色情報が統合され、黄色に混色して知覚されることが予想される。もし、色解像度の悪化による統合であるならば、運動刺激、フリッカー刺激ともに黄色に混色して知覚されることが予想される。

5.6.1 実験装置と手順

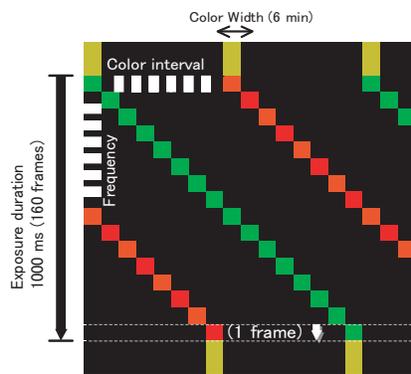
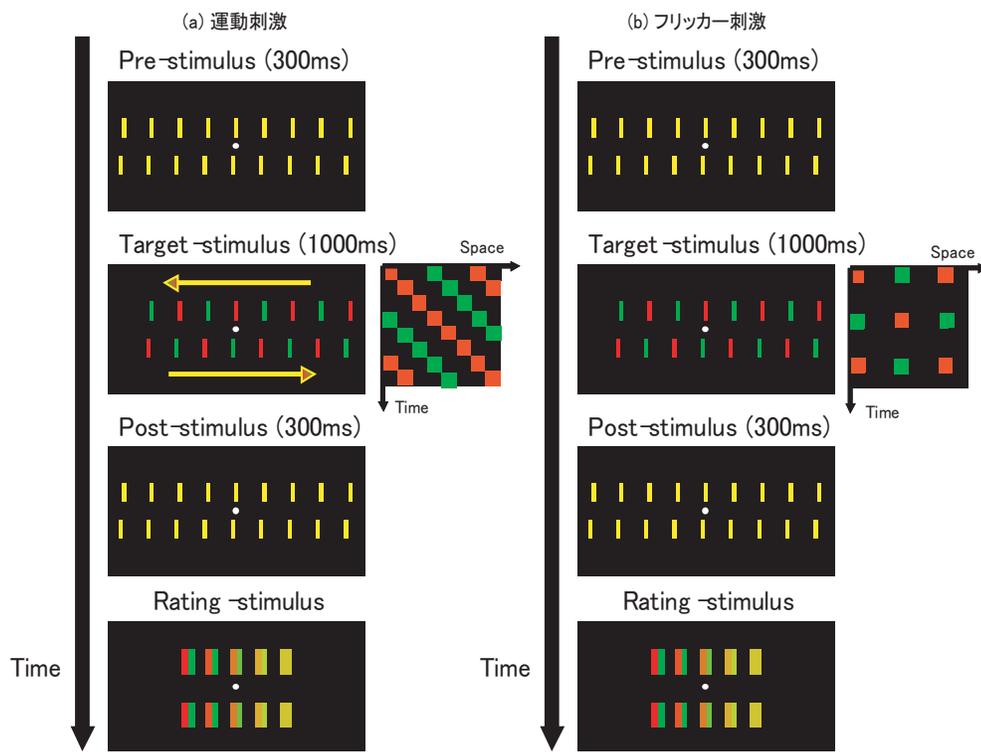
被験者は実験 5-1 と同じ 5 名である。実験装置はこれまでの実験と同じ装置を使用した。

運動刺激の実験手順を図 5.14(a) に、フリッカー刺激の実験手順を図 5.14(b) に示す。はじめに 300ms バーが動かない状態で提示される。このときのバーの色は黄色である。その後上下部の格子縞が 1000ms のあいだ逆方向に運動、もしくは静止して点滅する。運動後は 300ms バーが黄色の状態に静止するそして、1sec バーが消えた後に実験 5-1 と同じく 5 種類のテスト刺激が提示され、被験者は、知覚された色を 1~5 の 5 段階で答える（値は大きいほど混色して知覚されたことを示し、5 の場合は完全混色したことを表す）。実験パラメータとして、黒の幅を変化させたが、図 5.14(c) にあるように、黒の幅を変化させることは提示する色の周波数を変化させることになる。黒の水平方向の幅は 6, 12, 18, 24, 30, 42, 54, 72min（それぞれ 40.0, 26.7, 20.0, 16.0, 13.3, 10.0, 8.0, 6.6Hz に対応）の 8 段階、刺激の注視点からの距離は 1deg である。色相は赤・緑の最高輝度と等輝度[†]で 3 段階（テスト刺激の 1, 3, 5 に対応する）実験を行った（図 5.14(d)）。

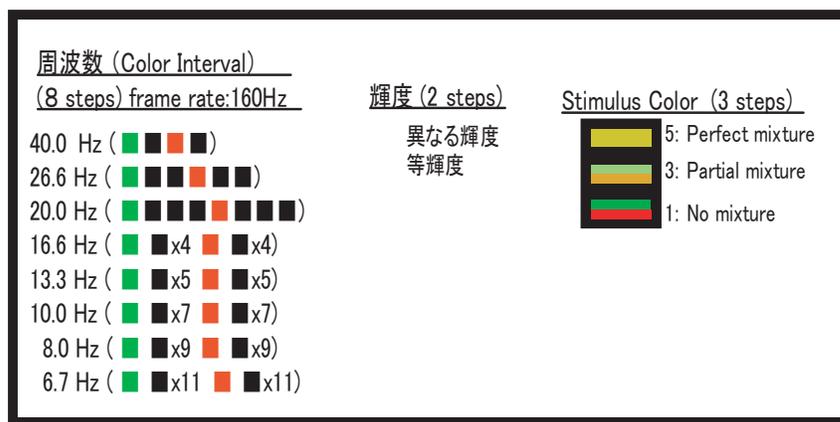
5.6.2 実験結果

実験結果を図 5.15(a)(b) に示す。図 5.15 は被験者 5 人の評価値を平均したものである。上段が赤・緑の最高輝度の条件の結果、下段が等輝度条件の結果である。左の列は色相が赤・緑（テスト刺激の値で 1）、中央の列は色相が黄味がかかった赤・緑（テスト刺激の値で 3）、右の列は色相が黄色（テスト刺激の値で 5）の試行である。赤い が運動条件、緑の がフリッカー条件のデータである。各グラフの横軸は色の点滅周期、縦軸が被験者の評価値である。左の列、中央のデータを見ると、最高輝度、等輝度条件ともに周波数全域で緑の が赤い より高い評価値を示している。このことは、網膜各位置では同じ周期で色が提示されているにも関わらず、運動条件に比べて、フリッカー条件のほうが混色して知覚されていることを意味する。右の列は黄色の刺激を提示した際には、被験者は黄色と報告しており、本実験の妥当性を支持するものである。図 5.15(b) に被験者 5 人全員の左の列（テスト刺激の値で 1）の結果を示したが、全ての被験者で同様の傾向が見られた。また、刺激のスケールを 6min ではなく、18min で行っても同様の結果が得られた。これらの結果は、図 5.13 の予測から考えると、運動軌道上の色統合機構を支持するものである。

[†]赤・緑を 16Hz で交互に提示し、最もちらつきが小さくなる緑の輝度を決定した（赤の輝度はディスプレイの最大値）



(c) 刺激の時空間表記



(d) Parameters

図 5.14: (a) 運動刺激の実験手順 (b) フリッカー刺激の実験手順 (c) 刺激の時空間表記 (d) 実験パラメータ

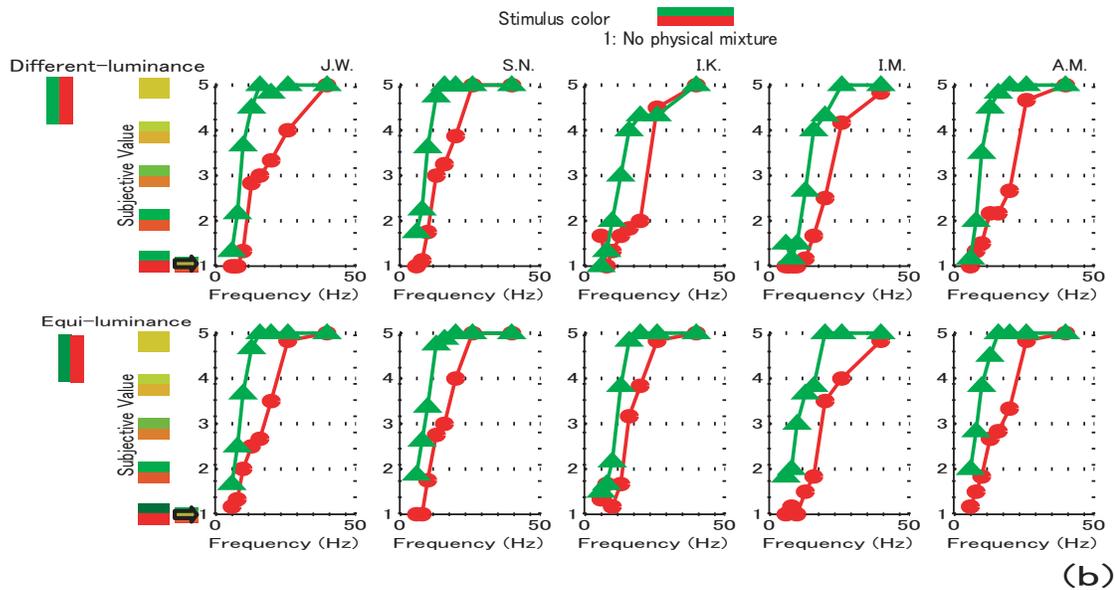
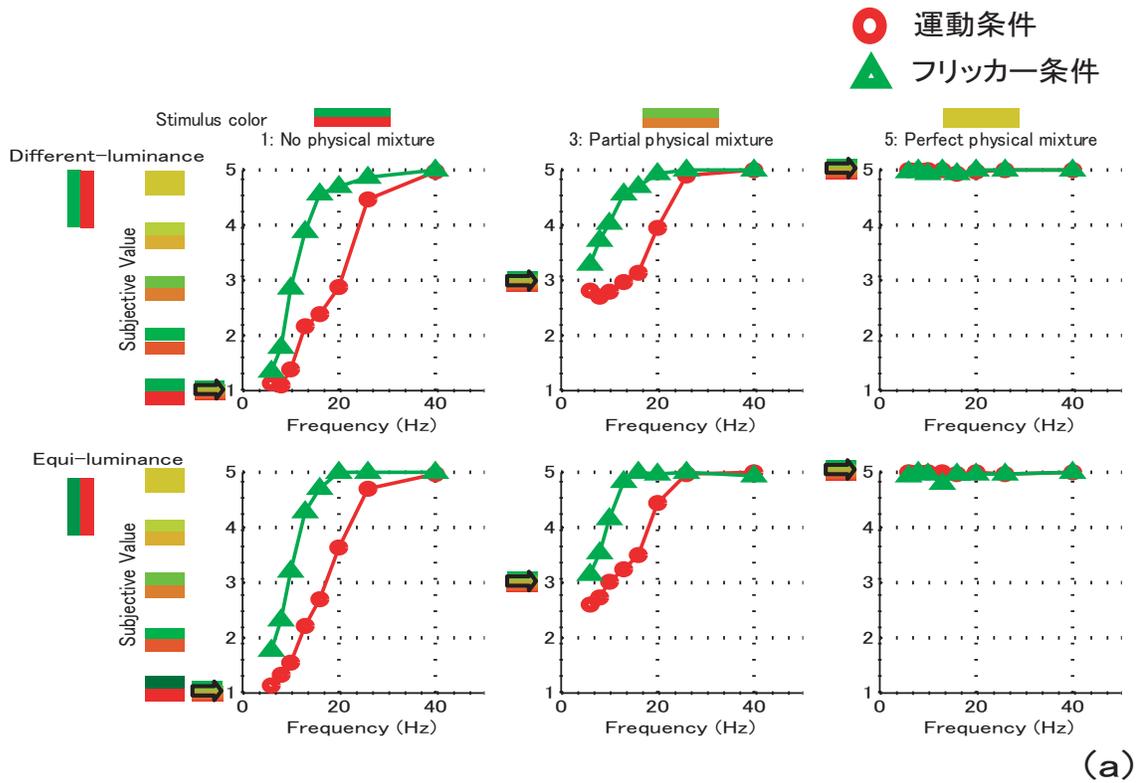


図 5.15 (a) 全被験者の平均データ (b) 全被験者のデータ

5.7 運動知覚と色統合に関する考察

実験 5-1~5-4 の結果は、網膜上異なる位置に提示されたとしても、同一物体の運動軌道にある色は統合（混色）して知覚されることを示すものであった。そして、この混色は眼球運動によって網膜上で生じた現象ではなく、運動知覚が深く関係している。このことは図 5.13(a) のような方向選択性の色混色メカニズムを示唆するものである。そして、色の混色は網膜上の情報のみに基づいた低次のメカニズムではなく、運動処理と密接に結びついたより高次の過程であることを示唆する。

これまで、運動情報と色情報は脳内の初期の段階では別々に処理されると考えられてきたが、本章の実験結果は、色知覚に運動情報が影響することを直接的に示すものである。このような情報処理が脳内のどの部位で行われているかを特定することは困難であるが、V1 等の初期視覚野でそのような処理が行われているか、MT 野等の高次運動処理機構からの情報が色情報を処理する V4 へ伝達されている可能性も考えられる。

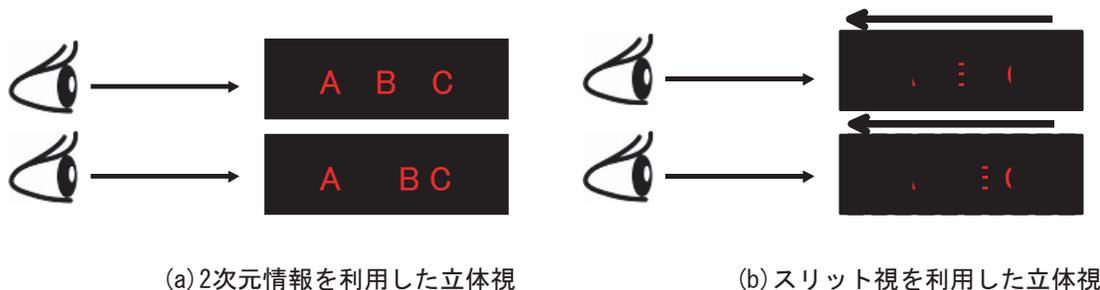
5.8 運動知覚と色統合のまとめ

実験 5-1~5-3 においては、知覚された色そのものを選ぶ主観的判断による方法、カラーマッチングによる客観的指標を利用した方法の 2 つの方法によって、網膜上ではなく知覚される運動軌道上で色が混色することを示した。そして、実験 5-4 において運動情報の知覚と色情報の統合の密接な関係を同一網膜上に提示された色が運動知覚によって分離するという現象によって確かめた。

5.9 スリット視を利用した3次元情報提示手法

5.9.1 目的と位置づけ

次に、運動知覚時の時空間知覚特性を利用した応用例、スリット視を利用した3次元情報提示手法について述べる。スリットを通した知覚では、瞬間瞬間には物体の一部分しか見えなくても物体の運動情報を利用することによって、物体の形態情報を再構成することが可能である [26][27][28]。このとき、スリットを通して左右眼に時間差をつけて視覚情報を提示すると、その時間差は物体の奥行きとして知覚されることが知られている [34][35][36]。そこで、この原理を利用して、2次元スリット状の少ない光源によって3次元情報を提示する簡便なディスプレイが実現可能である。本論文ではこのような3次元ディスプレイの設計指針となる、視差をつけたスリット視の際に知覚される奥行き量の大きさ、精度について調べた。



(a) 2次元情報を利用した立体視

(b) スリット視を利用した立体視

図 5.16 スリット視を利用した立体視

5.9.2 背景

3次元視覚情報提示においては、空間的視差をつけた画像を左右の眼に別々に提示する手法が多く用いられている。ただし、静止した3次元画像を提示するにあたっては空間的視差が重要な奥行き手がかりとなるが、3次元空間を運動する画像を提示する際には、左右眼に時間差をつけて画像を提示するだけでも奥行きが知覚される。このような知覚は、プルフリッヒ効果[‡]として古くから知られている。これは、左右眼の時間差を人間が位置の差として捉え、奥行き情報として利用しているからである。図 5.17c,d にあるように、左右眼網膜上の物体位置を同じ時空間表記上に記したとき、ある時間の、左右網膜上の物体位置の差が空間的視差であり、ある空間（網膜位置）を物体が通過する時間差が時間的視差である。奥行き知覚の手がかりとしては左右眼の位置の差、時間差は等価なものとして処理されている可能性がある。

スリット視を利用した3次元情報提示手法では、左右の眼に時間差をつけて視覚情報を提示する必要がある。両眼に対して別の情報を提示する手法は、アナグリフ方式、液晶シャッター方式、パララックスバリア方式、光線再現方式等、様々な方式が提案されているが [136]、眼鏡等の装置を装着しない裸眼立体視が可能であることが望ましいと考えられる。

[‡]片眼をサングラス等で減光して運動物体を見ると、知覚の時間差により左右に動く振り子が、円を描く様に、回転して見える現象 (5.17a,b)

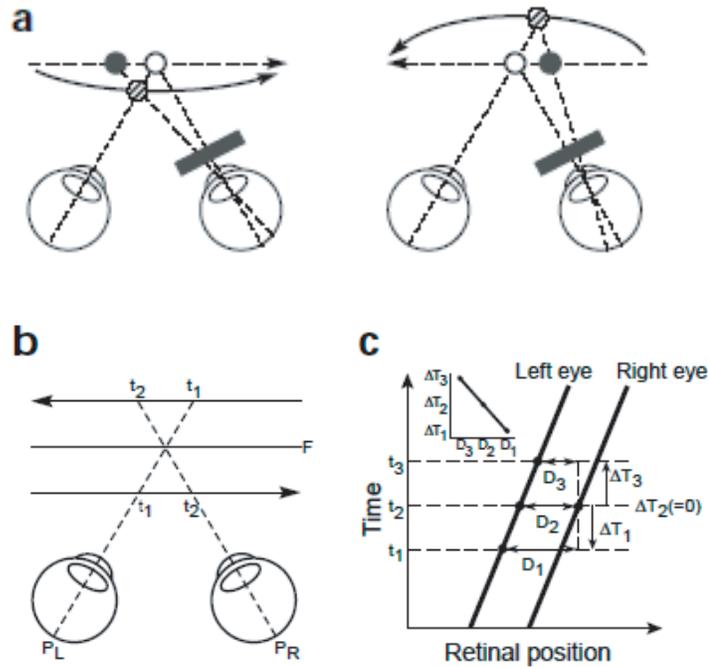
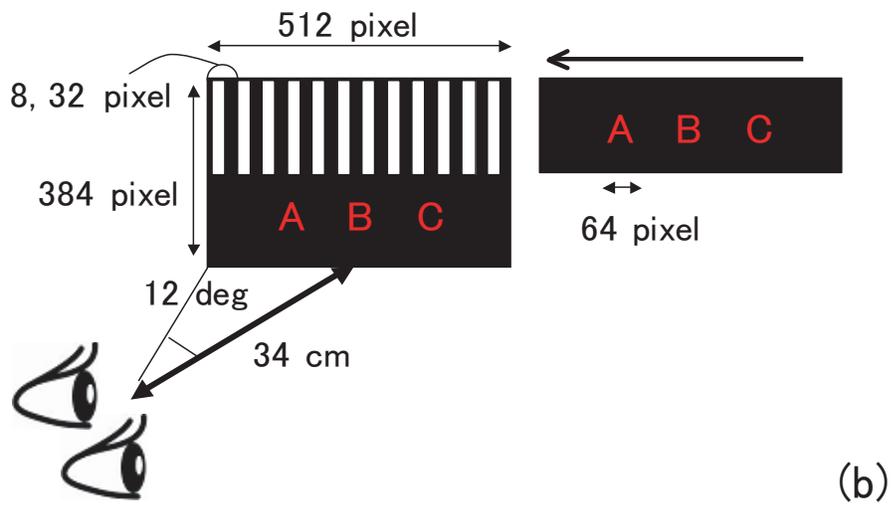
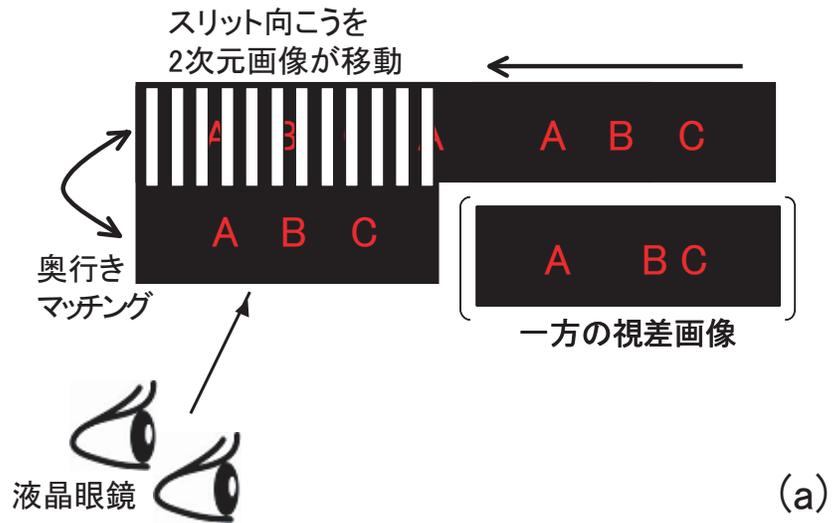


図 5.17 プルフリッヒ効果 ([135] より引用)

5.10 実験 5-5：スリットを通して知覚される奥行きの精度

5.10.1 実験装置と手順

図 5.18(a)(b) にあるように、被験者は頭部を顎台で固定し、立体視用液晶眼鏡 Crystal Eyes (Stereo Graphics Corp.) を使用して 34cm の距離からディスプレイを観察した。ディスプレイの解像度は 1024x768 ピクセル、立体視を行う際の画像更新周期は各眼それぞれ 30 Hz であった。提示刺激は画面中央 512x768 ピクセルの領域に提示され、スリット幅は 8 ピクセル、スリット間隔は 32 ピクセルであった。スリットの向こうで移動する画像は黒背景に赤で描かれた“ABC”の 3 文字の英単語 (各横幅 64 ピクセル) であり、“B”に視差をつけて提示された。提示された視差はマイナス (手前側) 5.2cm からプラス (奥側) 4.5cm の奥行きに対応するものである。画像の提示条件は、図 5.18(c) にあるように、スリットの有無 2 条件、画像の移動速度 3 条件: 静止, 4 pixel/frame (5.4 deg/sec), 8 pixel/frame (10.8 deg/sec), の計 6 条件である。これらの速度は単眼のスリット視において形態知覚が困難な速度 (5.4 deg/sec), 形態知覚が十分可能な速度 (10.8 deg/sec) として選んだ。画面上部に 6 条件いずれかの画像が提示され、被験者は知覚された単語“B”の奥行きを、画面下部に提示されているスリットなし静止画像の“B”の奥行きを同等の奥行きまで調整することによって答えた。各条件 20 段階の奥行き、各奥行きあたり 3 試行の計測を行った。



	スリットなし 	スリットあり 
静止条件	上下で同じ 静止画像 基準の奥行き	画像の一部のみ 視認可能 立体視不可能
移動速度 54 deg/sec	奥行き知覚可能 42 sec 提示	形態の再構成が やや困難
移動速度 108 deg/sec	奥行き知覚可能 2.1 sec 提示	形態の再構成が 十分可能

(c)

図 5.18 実験 5-5 の概要

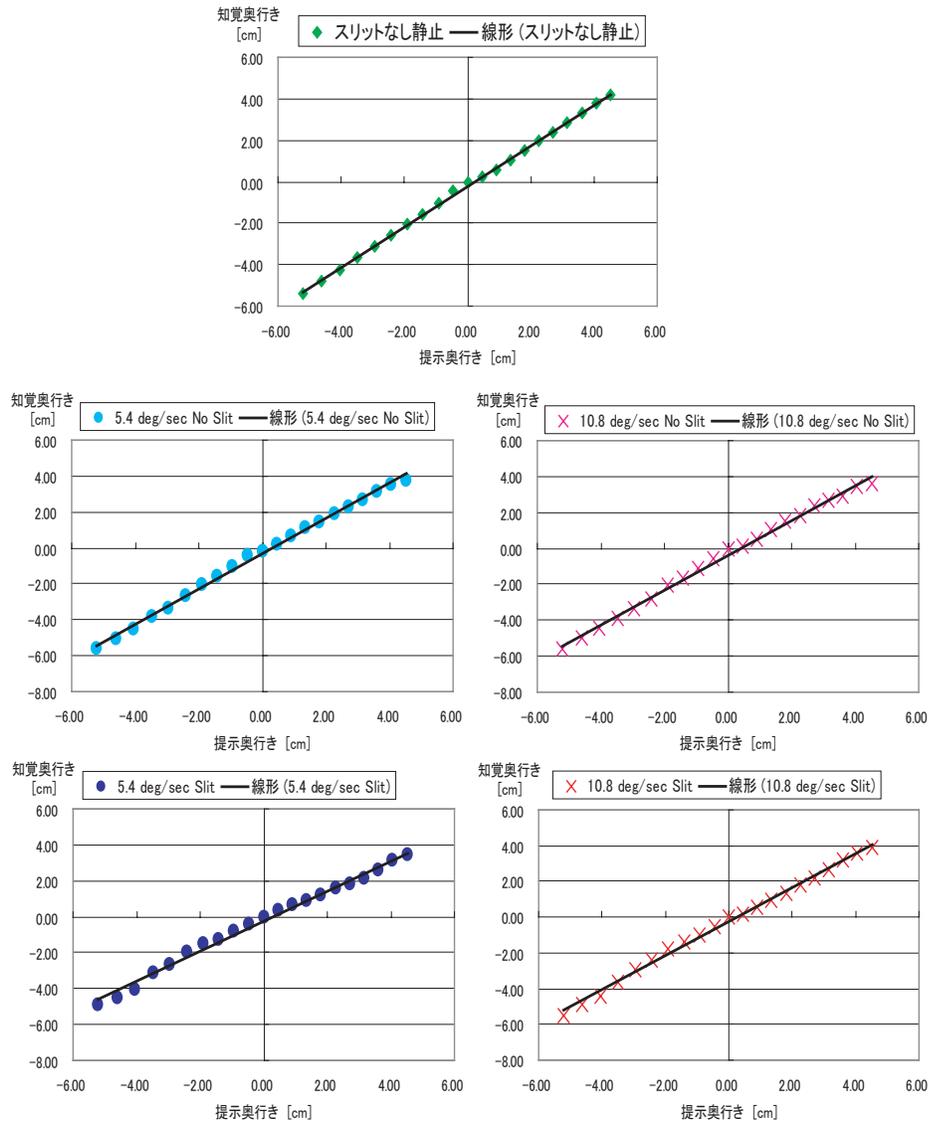


図 5.19 マッチングによって計測された奥行き

5.10.2 実験結果

計測された奥行きの例を図 5.19 に示す．横軸は画面上部に提示した奥行き量，縦軸は画面下部の静止画像によって計測された知覚奥行き量である．6 条件のうち，スリットありの静止条件を除いて，提示された奥行きとほぼ同等の奥行きが知覚された．スリットあり静止条件においては，奥行きを知覚するための視差情報がスリットによって遮蔽され，奥行きを知覚することはできなかった．

得られたデータから，スリット視における形態知覚と奥行き量の関係を探るために，速度 5.4，10.8 deg/sec の条件における知覚奥行き量から被験者の奥行き知覚の基準となる静止スリットなし条件の奥行き量を引いたものを計算した．その結果を図 5.20(a)(b) に示す．横軸が提示奥行き量，縦軸が計測された値から静止スリットなし条件の奥行き量を引いたものである．それぞれのグラフの下には手前，奥それぞれで平均したグラフも示す．

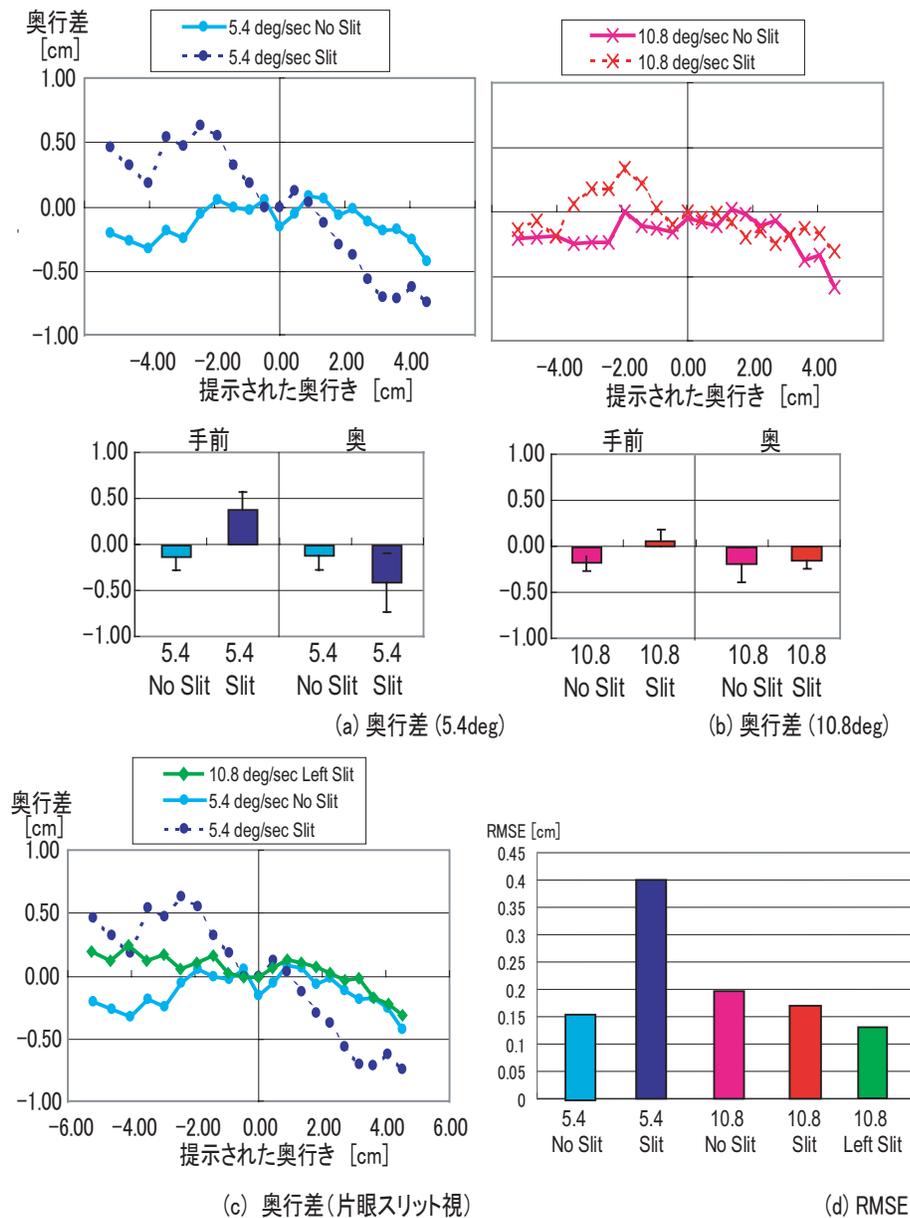


図 5.20: 奥行き差の平均:(a)5.4deg/sec (b)10.8deg/sec (c)片眼スリット視 (d)RootMeanSquareError

どちらの速度においても、スリットなし条件においては静止スリットなし条件とほぼ同等の奥行き量が知覚されている。一方、スリットあり条件においては、スリット視によって形態知覚が十分可能な 10.8 deg/sec 条件においてのみ、スリットなし条件と同等の奥行きが知覚され、形態知覚が困難な 5.4 deg/sec 条件においては、提示された奥行き量よりも、少ない奥行きが知覚されている。奥行き知覚の精度についても検証するために誤差の RootMeanSquareError を計算したが、図 5.20(d) に示すように 10.8 deg/sec 条件においてはスリットの有無によって精度が変化しなかった。

5.10.3 考察

スリット状の光源から両眼に対して視差のついた情報を提示したとしても、画像が運動していないと画像内の視差情報がスリットによって遮蔽され、奥行きを知覚することは不可能である。しかし、

スリット状の光源であっても，提示画像を運動させることによって，形態情報が知覚され，奥行きが知覚可能となる．本実験から，スリット視において，形態知覚と奥行き知覚の精度は深い関わりがあり，形態知覚が十分可能な条件においては，スリットがない条件とほぼ同等の精度で奥行きが知覚可能であることがわかった．本実験においては両眼に異なる視覚情報を提示するために液晶シャッター方式の提示方法を利用したが，ディスプレイとして実装する際には，パララックスバリア方式や光源再現方式を利用して提示することによって，多くの人に同時に 3 次元情報を提示することが可能となる．また，スリット視によって形態を再構成していることを確かめるために，片眼だけスリットを通して形態が再構成可能な 10.8 deg/sec で提示する実験を行ったが，図 5.20(c)(d) に示すように，スリット無し殆ど変わらない精度であった．

5.11 スリット視を利用した 3 次元情報提示手法のまとめ

運動知覚を利用した情報提示から得られる形態情報を立体視にしようした場合，どの程度の精度で立体視が可能であるかを調べた．その結果，スリット向こうの運動物体の速度が十分速く形態が再構成可能であれば，スリット視による形態情報でも，実際に 2 次元情報を提示した場合と同等の精度で奥行きが知覚されることがわかった．

第 6 章

結論

6.1 知覚世界と物理世界の時空間

6.1.1 時空間統合特性の変化

本論文では、サッカードを利用した情報提示手法、スリット視を利用した情報提示手法を取り上げ、その設計に必要な人間の時空間統合知覚特性を調べた。時間・空間を直交する軸として考え、その上で光源の移動を考えるというこれまでの一般的な考え方は、眼球運動（サッカード）や運動知覚が生じているときの知覚像を正しく説明できない。そこで、2章、3章においてはサッカード時の時空間知覚特性について、5章において運動知覚時の時空間統合知覚特性について調べた。各章の実験から得られた、眼球運動時、運動知覚時における時空間知覚の変化を図 6.1(a)(b) に示す。

2章の実験結果は、サッカード時に時間幅を持って提示された光点刺激は、形態生成処理（サッカード方向の大きさが半分になる）がなされた後に、定位処理が行われることを示唆するものであった。定位処理は、図 6.1(a) のような、サッカード前にはサッカード方向に、サッカード後にはサッカードと逆方向に歪んだ空間に対して行われている。この歪みは、脳内の眼球運動情報が実際の物理的な眼球位置が異なることによって生じると考えられている [43][46]。3章の実験結果は、サッカードによって生じる残像に関して、その時間特性は変化しないことを示唆するものであった。つまり、サッカード時の時空間は、図 6.1(a) のように、空間的には歪んでいるものの、時間に関しては物理的な時間と同様に扱えると考えられる。運動時の時空間知覚に関して、5章の実験結果は、移動物体の像は運動軌道上に沿って保持されていることを示唆し、図 6.1(b) のように時間軸が運動軌道方向に変換されていると考えられる。

眼球運動時では自分自身の眼球運動情報が、運動知覚時には外部の物体の運動情報が、時空間知覚に大きな影響を与えている。時間・空間が直交するような座標系に基づいて、網膜上で同じ場所に提示されたものが統合される、という考え方、つまり、網膜上の時空間において各位置で時間軸に沿った統合が行われるというこれまでの考え方は、運動知覚時の時空間知覚の一つのあり方を示したものでしかない。むしろ、このような知覚枠組みを前提とするより、ある一定時間、一定空間内に提示された視覚刺激は、自身の身体運動もしくは外部からの運動情報をもとにして知覚座標系内に再配置されると考えたほうが、より一般性を持つ。これまでのように時空間を区別して考えるのではなく、時空間の中でどの方向の情報を統合すればよいか、その方向を示すベクトルを一般的な「運動」と定義するならば、ある場所に留まっていれば、時間軸と水平方向の運動ベクトルを持ち、移動していれば、時空間で斜め方向の運動ベクトルを持つ。そう考えると、その場に留まっている物体も図 6.1(c) のように、運動軌道上で情報が統合されていると考えることができる。

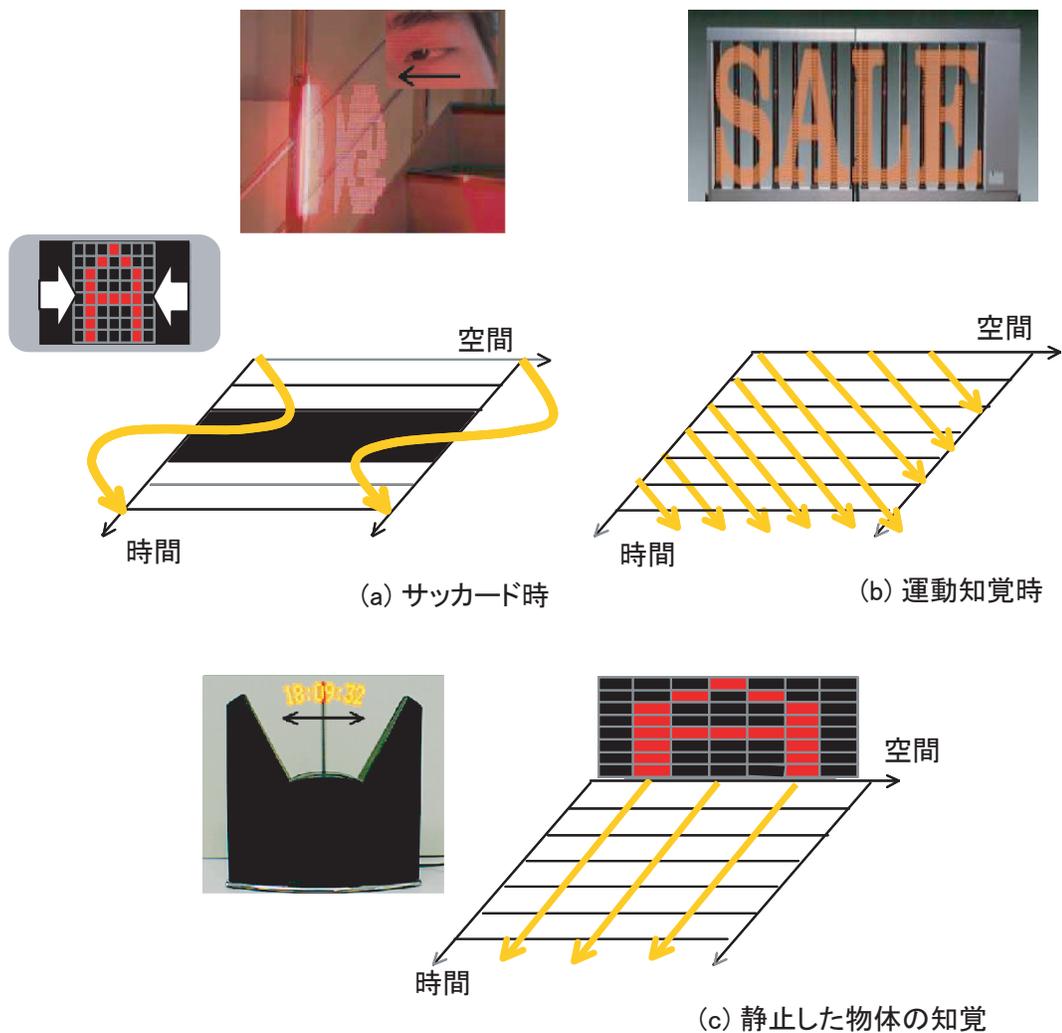


図 6.1: (a) サッカード時 (黒の領域がサッカード中) (b) 運動知覚時の時空間知覚の変化 (c) 静止した物体の知覚

6.1.2 時空間統合特性の変化に関する考察

知覚世界の時空間形成

人間は環境への働きかけとその応答の連鎖から環境を自分の中に再構成している。また、当然ながら、知覚世界の中に環境をそのまま再構成しているわけではなく、数学的・物理的矛盾を含みながら環境世界を再構成している。2～5章で示した眼球運動時、運動知覚時の時空間知覚の変化は、その数学的・物理的矛盾の端的な例である（当然ながら、知覚世界と環境が同じでなくてはならない理由もない）。

知覚世界と環境とのあいだの数学的・物理的矛盾は、眼球運動や運動知覚だけでなく、意識や考え方という高次の機構のあり方によっても生じる。例えば、図 6.2 左にあるように A と B を水平にそろえるように黒い点（白い点は固定）を動かす平行アレイ (paralell alley) と図 6.2 右にあるように C と D の距離を等距離にするように黒い点を動かす等距離アレイ (distance alley) は物理的には等価なはずであるが、人間の指し示す位置はそれぞれの条件で異なる [137]。これは、物理的に等価な現象でも、その概念を学習する履歴やその課題へのアプローチが異なることによって生じたものと考えられ

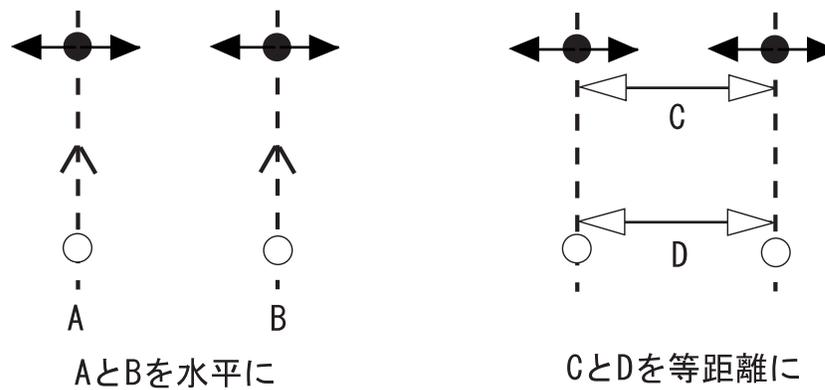


図 6.2 平行アレイと等距離アレイ

る．上記の平行アレイと等距離アレイの差に関しては，名義尺度 (1 対 1 対応)，順位尺度 (順番)，間隔尺度 ($y=ax+b$)，比率尺度 ($y=ax$)，という測定の 4 水準の中で水平と等距離はその水準が異なることにより学習の過程が異なるという説があり，そのモデル化の研究も存在する [138]．結局，人間の知覚システムは物理環境自体を学習するのではなく，自分の身体機構，思考の枠組みに制限されながらそれを学習し，それぞれの知覚世界を構成している [139]．

リアリティある情報提示

物理環境に対する知覚システムの数学的・物理的矛盾を明らかにすることは，情報提示，特にバーチャルリアリティシステムを使った，臨場感ある情報提示を行う上で重要な役割を担っている．前述のように，人間は自分の行為と環境からの安定した反応によって知覚世界を自分の中に構成している．そして，人間が環境から感覚器を通じて読み取っているものがリアリティなのではなく，自分の中で構成された，安定した行為と環境からの反応の関係性こそがリアリティだと考えられる．つまり，どれだけ感覚器に対して物理環境の刺激を再現してやれるかということよりも，数学的・物理的矛盾に添ったかたちで，人間にうまく誤解させてやることが重要となる．今後，自分の研究は知覚世界を調べていくだけでなく，情報提示の応用まで含めて考えていきたい．

情報提示手法としての利点

本論文で取り上げた，眼球運動時及び運動知覚時の特性を利用した情報提示について，その工学的利点，欠点を既存の手法と比較しながら検討する．

検討する情報提示手法は，図 6.3(a)～(d) の 4 種類とする．これらを，空間的効率化という点で分類すると，テレビ等，提示したいイメージと同じ大きさの空間的リソースを必要とする提示手法 (図 6.3(a)) と，本論文で提案してきた少ない空間的リソースでイメージを提示可能な手法に分類される．そして，空間的効率化の手法として，光点列自体の移動 (図 6.3(b))，眼球運動の利用 (図 6.3(c))，運動知覚の利用 (図 6.3(d)) という 3 つの手法が考えられる．(b) の光点列の移動による提示手法は，既に実用化されている．また，トンネルの中で電車の通過するタイミングに合わせて 1 列の光点列を点灯させ情報提示を行う手法も原理的には光点列の移動による提示と等価である．(c) の眼球運動を利用した情報提示手法としては，サッカーボールを利用した情報提示手法 (2 章，3 章，4 章) が挙げられ，(d) の運動知覚を利用した情報提示手法としてスリット視を利用した情報提示手法 (5 章) が挙げられる．これらの情報提示手法を，情報提示に必要な空間的リソース，エネルギー，一度に伝わる

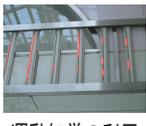
	空間的リソース	エネルギー	一度の情報量	一度の人数	情報提示の安定	受ける側の運動
(a)  空間的な効率化なし	× 提示イメージと 同じだけ必要	× 全画素分の 提示エネルギー	◎ 画素の分だけ 表示可能	○ 見ている人全員 に提示可能	○ 再現性あり	なし
(b)  光点列の移動による情報提示	○ 光点列1列	△ 光点列1列と 駆動部分の エネルギー	○ 光点列の大きさ と駆動形態 による	○ 見ている人全員 に提示可能	○ 再現性あり	なし
(c)  サッカードの利用	○ 光点列1列	◎ 光点列1列分の エネルギー	△ 数文字程度	△ 眼球運動を した人のみ	× 同じ眼球運動 を再現すること は困難	眼球運動
(d)  運動知覚の利用	△ 光点列数列	○ 光点列数列分の エネルギー	△ 数文字程度	△ 運動知覚を した人のみ	△ 運動知覚が 安定すれば 再現性がある	運動知覚

図 6.3 情報提示手法としての比較

情報量，一度に伝達可能な人数，情報提示の安定性，情報を受け取る側の運動，という視点から評価したものが図 6.3 である。

(a) のテレビなどの空間的効率化がなされていない情報提示手法は，一度に多くの情報を再現性よく提示可能である．このようなディスプレイでは，必ず伝達しなければならない情報を提示する手段としては優れている．しかし，必要とされる空間的リソースやエネルギーは多くなってしまふ．(b) の光点列の移動による情報提示手法は，光点列 1 列で再現性を持って情報提示可能であるが，必ず駆動部を必要とする．そして，エネルギー消費は少なくなるものの，提示に必要な空間的自体は，提示したい像と同じ大きさの空間が必要となる．眼球運動（サッカード）を利用した情報提示手法は，光源の点滅の時間変化を空間的な広がりに変換することが可能であり，空間的リソース，エネルギーとも効率よく利用することができる．しかし，一度に提示できる情報量は他の手法に比べると少なく，情報提示の再現性は低い．運動知覚を利用したディスプレイは少ない空間的リソース，エネルギーで情報提示が可能であり，サッカードを利用した情報提示手法に比べれば，提示可能な情報量が多く，情報提示の安定性は高い．このように，情報提示手法によってその利点・欠点は異なっており，提示したい情報の質，情報量によって提示手法を選ぶことができる．また，人間の知覚特性を利用している (c) や (d) の情報提示手法は 4 章，5 章後半で述べたような，これまでにない，新たな応用も考えられる．

6.2 本論文のまとめ

視覚情報提示において，情報を時分割で提示するという手法は，様々なディスプレイで採用されている．図 6.4(a) で示したような光源が高速運動するデバイスだけではなく，CRT ディスプレイの走査線や LED マトリックスのダイナミック点灯等，幅広い範囲で利用されている．さらに，人間の眼

球運動や運動知覚を利用して，時分割情報提示を行った図 6.4(b)（サッカーボールを利用した情報提示）や図 6.4(c)（スリット視を利用した情報提示）も提案されている。

これまで，時分割視覚情報提示における基本原理は図 6.4(a) 中段の時空間図のように，直交する時間・空間軸を前提として考えられてきた．光源自体が高速運動して 2 次元情報を提示する場合，光源は時間とともに点滅パターンを変化させながら時空間上を斜めに移動する．そして，ある一定時間内に提示された光点群は，それらを空間軸に射影したものと同等の視覚情報として知覚される．しかし，時間・空間を直交する軸として考え，その上で光源情報の移動を考えるというモデルは，人間自身の眼球運動や運動知覚が生じているときには，知覚像を正しく説明できない（図 6.4(b)(c) 中段の時空間図）．人間自身の眼球運動や運動知覚が生じているときには，根本的な時空間の構成原理から考え直す必要がある．そこで，本論文では眼球運動時，運動知覚時の時空間統合知覚特性がどのように変化するかを調べ，その視覚情報提示ディスプレイの設計指針を示した．

本論文 2 章，3 章，4 章においては，自身の眼球運動時の時空間特性を調べるために，サッカーボールを利用した情報提示を取り上げ，その時空間知覚特性を調べた．2 章においては，知覚像の空間特性（定位位置・形態）に関して述べた．2 章の結果は，サッカーボール時にある時間幅を持って提示された光点刺激は，刺激間の形態表象（一点や点列）が網膜像に基づいて形成され，その形態表象をまとめて定位していることを示唆するものであった．3 章においては，知覚の時間特性（像の知覚上の持続時間）について調べた．その結果，サッカーボールによって生じる残像も固視時に生じる残像と同等の持続時間を持つことがわかった．そして，4 章では点滅周期の最適化，眼球運動とあわせた応用の設計指針を示した．2 章，3 章の実験結果から，サッカーボール時の時空間特性は，図 6.4(b) 下段の時空間図のように，時間軸は不変であるものの，空間軸においてはその知覚特性が大きく変化している．その情報処理機構は形態生成，定位の 2 つのプロセスに分けて考えられ，形態生成時に知覚像は網膜像の約半分の大きさになる（この原因については様々な説があるが未だ決定的な議論はなされていない）．そして，その形態をまとめて定位が行われ，その際にはある一定の傾向をもって誤定位がなされる．

本論文 5 章においては，運動知覚時の時空間特性を調べるために，スリット視を利用した情報提示を取り上げ，その時空間特性を調べた．スリットを通して運動物体を観察するとき，瞬間瞬間には物体の一部分しか見えないにも関わらず，知覚される運動情報を利用して形態情報を再構成している．この知覚自体は眼球静止時においても生じている．そのため，図 6.4(c) 中段の網膜上の時空間図で考える限り，この形態知覚を説明することは困難である．そこで，5 章において，運動知覚時の物体属性情報の統合メカニズムについて調べ，その応用例を示した．5 章の実験結果は，物体の属性は，網膜上の同じ位置ではなく，運動軌道上で統合されるということを示唆するものであった．運動知覚時には，同じ場所に継時的に提示された光源情報を，知覚された運動軌道上に展開することによって，形態の再構成，色の統合を行っていると考えられる．つまり，運動知覚には，図 6.4(c) 下段の時空間図のように，基準となる軸が運動方向に変換されたという解釈が可能である．

眼球運動時，運動知覚時に基準となる時空間は，そのときの眼球運動や運動物体の運動情報によって修飾され，変化する．つまり，自身もしくは知覚している物体の「運動情報」が「時空間」を変化させていると考えられる．この考えは図 6.4(a) に対しても適用可能であり，図 6.4(a) において運動が知覚されないということは，そこにいるという運動信号，時空間図で考えると垂直方向の運動信号を持っており，その方向に対して時空間が修飾されている（変化しないという修飾）と考えることもできる（図 6.4(a) 下段の時空間図）．

以上，本論文においては，眼球運動時（図 6.4(b)），運動知覚時（図 6.4(c)）の時空間知覚特性の変化について調べ，そのメカニズムについて考察した．そして，その知覚特性を利用した視覚情報提示手法の設計指針を示した．

環境

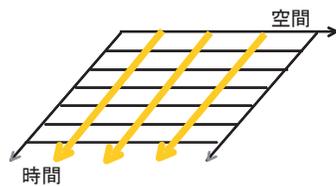
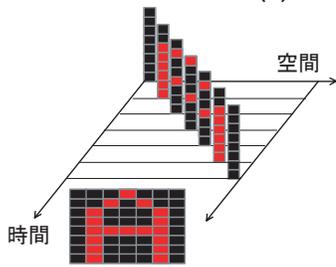
人間

知覚対象

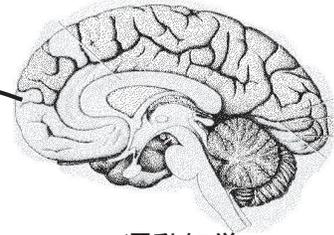


物体運動によって
像を空間的に展開

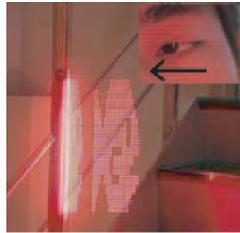
(a)



眼球運動

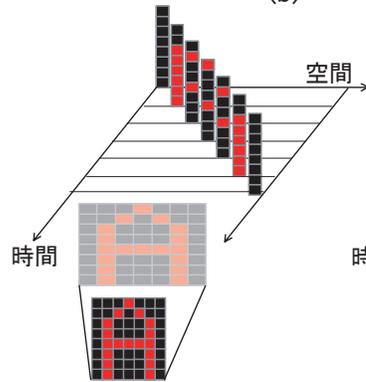


運動知覚

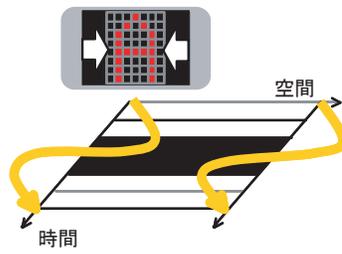


眼球運動によって
像を空間的に展開

(b)

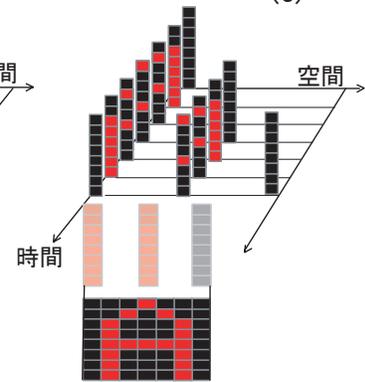


2章: 空間特性
3章: 時間特性
4章: 設計論, 応用例



運動知覚によって
像を空間的に展開

(c)



5章: 時空間特性, 応用例

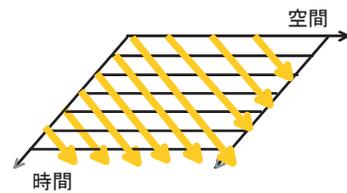


図 6.4 本論文において議論した内容

参考文献

- [1] J. J. Gibson: “生態学的視覚論 -ヒトの知覚世界を探る-”, サイエンス社 (1985)
- [2] 佐々木 正人: “アフォーダンス -新しい認知の理論-”, 岩波書店 (1994)
- [3] 三嶋 博之: “エコロジカル・マインド -知性と環境をつなぐ心理学-”, 日本放送出版協会 (2000)
- [4] H. R. マトゥラーナ, F. J. バレーラ: “オートポイエーシス-生命システムとはなにか-”, 国文社 (1991)
- [5] 河本 英夫: “オートポイエーシス”, 青土社 (1995)
- [6] ウンベルト・マトゥラーナ, フランシスコ・バレーラ: “知恵の樹”, 筑摩書房 (1997)
- [7] 日高 敏隆: “動物と人間の世界認識”, 筑摩書房 (2001)
- [8] ジェスパー ホフマイヤー: “生命記号論 宇宙の意味と表象”, 青土社 (1999)
- [9] 後藤 倬男, 田中 平八 編: “錯視の科学ハンドブック”, 東京大学出版会 (2005)
- [10] 井口 寿乃: “ハンガリー・アヴァンギャルド MA とモホイ=ナジ”, 彩流社 (2000)
- [11] 村上 龍: “13歳のハローワーク”, 幻冬舎 (2003)
- [12] 村上 龍: “人生における成功者の定義と条件”, NHK 出版 (2004)
- [13] 後藤 繁雄: “僕たちは編集しながら生きている”, 中央公論新社 (2004)
- [14] 西垣 通: “基礎情報学 生命から社会へ”, NTT 出版 (2004)
- [15] ゲオルク・クニール, アルミン・ナセヒ: “ルーマン社会システム理論”, 新泉社 (1995)
- [16] レジス・ドブレ: “メディアロジー入門”, NTT 出版 (2000)
- [17] 映像情報メディア学会 編: “電子情報ディスプレイハンドブック”, 培風館 (2001)
- [18] オーム社 編: “Ohm Mook 光シリーズ No.2 光ディスプレイ”, オーム社 (2002)
- [19] 渡邊 淳司, 前田 太郎, 館 すすむ: “サッケードを利用した新しい情報提示手法の提案”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 6(2), 79-87 (2001)
- [20] W. Hershberger: “Saccadic eye movements and the perception of visual direction”, Perception & Psychophysics, 41, 35-44 (1987)
- [21] W. Hershberger, J. S. Jordan: “Visual direction constancy: Perceiving the visual direction of perisaccadic flashes”, in the role of eye movements in perceptual processes, ed. E. Chekaluk & K.R. Llewellyn, 1-43, Elsevier, Amsterdam (1992)

- [22] W. Hershberger, J. S. Jordan, D. R. Lucas, " Visualizing the perisaccadic shift of spatiotopic coordinates ", *Perception & Psychophysics*, 60, 82-88 (1998)
- [23] J. S. Jordan, W. Hershberger: " Timing the shift in retinal local signs that accomanies a saccadic eye movements ", *Perception & Psychophysics*, 55, 657-666 (1994)
- [24] 日本視覚学会 編: " 視覚情報処理ハンドブック ", 朝倉書店 (2000)
- [25] 藤田 昌彦, 雨海 明博: " 眼球運動中のアイコニック・メモリの性質 (1) ", 電子情報通信学会技術研究報告, NC2000-41, pp. 1-5 (2000)
- [26] T. E. Parks: " Post-retinal visual storage ", *Am. J. Psychology*, 78, 145-47 (1965)
- [27] I. Rock: " Anorthoscopic perception ", *Scientific American*, 244, 103-111 (1981)
- [28] N. Bruno, M. Bertamini: " Identifying contours from occlusion events ", *Perception & Psychophysics*, 48, 331-42 (1990)
- [29] J. Ross: " A new type of display relying on vision's sensitivity to motion ", *Journal of Physiology*, 271, 2P-3P (1977)
- [30] S. Mateeff, D. Popov, J. Hohnsbein: " Multi-aperture viewing: perception of figures through very small apertures ", *Vision Res.* 33, 2563-2567 (1993)
- [31] S. Nishida: " Motion-based analysis of spatial patterns by the human visual system ", *Current Biology*, 14, 830-839 (2004)
- [32] S. Nishida, J. Watanabe, S. Tachi, I. Kuriki: " Motion-induced color mixture ", *Vision ScienceS Society 4th Annual Meeting Proceeding*, 142 (2004)
- [33] J. Watanabe, I. Kuriki, S. Tachi, S. Nishida: " Motion-induced Colour Mixture: Objective Evaluation by colour matching ", *Perception*, 33 supplement, 163-164 (2004)
- [34] J. Ross: " Stereopsis by binocular delay ", *Nature*, 248, 363-364 (1974)
- [35] C. W. Tyler: " Stereopsis in dynamic visual noise ", *Nature*, 250, 781-782 (1974)
- [36] M. Ogiya, K. Sakai, Y. Hirai: " Integration of space and time leading to the simultaneous perception of depth and motion - perception of objects moving behind a thin slit - ", *Proceedings of ICONIP*, 1424-1429 (2003)
- [37] L. Matin: " Visual perception of direction for stimuli flashed during voluntary saccadic eye movement ", *Science* 148, 1485, 488 (1965)
- [38] L. Matin, E. Matin, D. G. Pearce: " Visual perception of direction when voluntary saccades occur. I. Relation of visual direction of a fixation target extinguished before a saccade to a flash presented during the saccade ", *Perception & Psychophysics*, 5, 65-80 (1969)
- [39] " D. MacKay: Mislocation of test flashes during saccadic image displacements ", *Nature*, 227, 731-733 (1970)

- [40] L. Matin, E. Matin, J. Pola: “ Visual perception of direction when voluntary saccades occur: II. Relation of visual direction of a fixation target extinguished before a saccade to a subsequent test flash presented before the saccade ”, *Perception and Psychophysics*, 8, 9-14 (1970)
- [41] F. Holly: “ Saccadic presentation of a moving target ”, *Vision Research*, 15, 331-335 (1975)
- [42] F. W. Campbell, R. H. Wurtz: “ Saccadic omission: Why we do not see a grey-out during a saccadic eye movement ”, *Vision Research*, 18, 1297-1303 (1978)
- [43] S. Mateeff: “ Saccadic eye movements and localization of visualstimuli ”, *Perception & Psychophysics*, 24, 215-224 (1978)
- [44] H. Honda: “ Perceptual localization of visual stimuli flashed during saccades ”, *Perception & Psychophysics*, 45, 162-174 (1989)
- [45] H. Honda: “ Eye Movements to a Visual Stimulus Flashed Before, During, or After a Saccade ”, *Attention & performance*, 13, 567-582 (1990)
- [46] H. Honda: “ The time courses of visual mislocalization and of extraretinal eye position signals at the time of vertical saccades ”, *Vision Research*, 31, 1915-1921 (1991)
- [47] H. Honda: “ Saccade-contingent displacement of the apparent position of visual stimuli flashed on a dimly illuminated structured background ”, *Vision Research*, 33, 709-716 (1993)
- [48] P. Dassonville, J. Schlag, M. Schlag-Rey: “ The use of egocentric and exocentric location cues in saccadic programming ”, *Vision Research*, 35, 2191-2199 (1995)
- [49] J. Schlag, M. Schlag-Rey: “ Illustory localization of stimuli flashed in the dark before saccades ”, *Vision Research*, 35, 2347-2357 (1995)
- [50] R. H. Cai, A. Pouget, M. Schlag-Rey, J. Schlag: “ Perceived geometrical relationships affected by eye-movement signals ”, *Nature*, 386, 601-604 (1997)
- [51] J. Ross, M. C. Morrone, D. C. Burr: “ Compression of visual space before saccades ”, *Nature*, 386, 598-601 (1997)
- [52] M. C. Morrone, J. Ross, D. C. Burr: “ Apparent position of visual targets during real and simulated saccadic eye movement ”, *Journal of Neuroscience*, 17, 7941-7953 (1997)
- [53] M. Lappe, H. Awater, B. Krekelberg: “ Postsaccadeic visual references generate presaccadic compression of space ”, *Nature*, 403, 892-895 (2000)
- [54] L. Boucher, J. M. Groh, H. C. Hughes: “ Afferent delays and the mislocalization of perisaccadic stimuli ”, *Vision Research*, 41, 2631-2644 (2001)
- [55] K. Matsumiya, K. Uchikawa: “ Apparent size of an object remains uncompressed during presaccadic compression of visual space ”, *Vision Research*, 41, 3039-3050 (2001)
- [56] H. Sogo, N. Osaka: “ Perception of relation of stimuli locations successively flashed before saccade ”, *Vision Research*, 41, 935-942 (2001)

- [57] H. Sogo, N. Osaka: “ Effects of inter-stimulus interval on perceived locations of successively flashed perisaccadic stimuli ”, *Vision Research*, 42, 899-908 (2002)
- [58] A. Ma-Wyatt, M. C. Morrone, J. Ross: “ A blinding flash increases saccadic compression ”, *Journal of Vision*, 2(7), 569a (2002)
- [59] B. Krekelberg, M. Kubischik, K. P. Hoffmann, F. Bremmer: “ Neural Correlates of Visual Localization and Perisaccadic Mislocalization ”, *Neuron*, 37, 537-545 (2003)
- [60] H. Awater, M. Lappe: “ Compression of visual space under steady fixation ”, *Journal of Vision*, 3(9), 484a.(2003)
- [61] H. Awater, M. Lappe: “ Perception of visual space at the time of pro- and anti- saccade ”, *Journal of Neurophysiology*, 91, 2457-2464 (2004)
- [62] L. Michels, M. Lappe: “ Contrast dependency of saccadic compression and suppression ”, *Vision Research*, 44, 2327-2336 (2004)
- [63] M. Kaiser, M. Lappe: “ Perisaccadic mislocalization orthogonal to saccade direction ”, *Neuron*, 41, 293-300 (2004)
- [64] G. Spering: “ The information available in brief visual presentation ”, *Psychological Monographs: General and Applied*, 74, 1-29 (1960)
- [65] V. DiLollo: “ Temporal characteristics of iconic memory ”, *Nature*, 267, 241-243 (1967)
- [66] C. W. Eriksen, J. F. Collins: “ Some temporal characteristics of visual pattern recognition ”, *Journal of Experimental Psychology*, 74, 476-484 (1967)
- [67] M. Coltheart: “ Iconic memory and visible persistence ”, *Perception and Psychophysics*, 27, 113-228 (1980)
- [68] G.M. Long: “ Iconic memory: A review and critique of the study of short-term visual storage ”, *Psychological Bulletin*, 88, 785-820 (1980)
- [69] 本田 仁視: “ 眼球運動と空間定位 ”, 風間書房 (1994)
- [70] P. Y. He, E. Kowler: “ The role of location probability in the programming of saccades: implications for center-of-gravity tendencies ”, *Vision Research*, 29(9), 1165-81 (1989)
- [71] 渡邊 淳司, 前田 太郎, 舘 すすむ: “ サッカーボール前中後に渡って提示される連続点滅光点刺激の知覚と眼球運動との時間関係 ”, *電子情報通信学会論文誌 D-II*, J86-D-II, 1350-1357 (2003)
- [72] J. Watanabe, T. Maeda, S. Tachi: “ Time course of localization for a repeatedly flashing stimulus presented at perisaccadic timing ”, *Systems and Computers in Japan*, in press.
- [73] B. Fischer, E. Ramsperger: “ Human express saccades : extremely short reaction times of goal directed eye movements ”, *Experimental Brain Research*, 57, 191-195 (1984)
- [74] B. Fischer, E. Ramsperger: “ Human express saccades : effects of randomization and daily practice ”, *Experimental Brain Research*, 64, 569-578 (1986)

- [75] B. Fischer, H. Weber: “ Express saccades and visual attention ”, Behavioral & Brain Sciences, 16, 553-610 (1993)
- [76] R. P. Kalesnykas, P. E. Hallet: “ The differentiation of visually guided and anticipatory saccades in gap and overlap paradigms ”, Experimental Brain Research, 68, 115-121 (1987)
- [77] D. Braun, B. G. Breitmeyer: “ Relationship between directed visual attention and saccadic reaction times ”, Experimental Brain Research, 73, 546-552 (1988)
- [78] M. G. Wenzel-Smith, J.M. Findlay: “ Express saccades: is there a separate population in humans ? ”, Experimental Brain Research, 87, 218-222 (1991)
- [79] 青木美奈, 藤田昌彦: “ 走査サッカードと記憶誘導性サッカードの適応の転移について ”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J82-D-II, 1, 91-99 (1999)
- [80] D. C. Burr, M. C. Morrone: “ Temporal impulse response functions for luminance and colour during saccades ”, Vision Research, 36, 2069-2078 (1996)
- [81] H. E. Bedell, J. Yang: “ The attenuation of perceived image smear during saccades ”, Vision Research, 41, 521-528 (2001)
- [82] E. Castet, S. Jeanjean, G. S. Masson: “ Motion perception of saccade-induced retinal translation ”, Neuroscience, 99, 15159-15163 (2002)
- [83] 大石慎太郎, 海老澤嘉伸: “ 意識的サッカードに伴う連続点滅刺激の定位の注意方向依存性 ”, 映像情報メディア学会論文誌, 56, 1825-1829 (2002)
- [84] B. A. Brooks, A. F. Fuchs: “ Influence of stimulus parameters on visual sensitivity during saccadic eye movement ”, Vision Research, 15, 1389-1398 (1975)
- [85] F. C. Volkman, L. A. Riggs, K. D. White, R. K. Moore: “ Contrast sensitivity during saccadic eye movement ”, Vision Research, 18, 1191-1199 (1978)
- [86] D. C. Burr, M. C. Morrone, J. Ross: “ Selective suppression of magnocellular visual pathway during saccadic eye movement ”, Nature, 371, 511-513 (1994)
- [87] A. Bowling, W. Lovegrove, B. Mapperson: “ The effect of spatial frequency and contrast on visual persistence ”, Perception, 8, 529-539 (1979)
- [88] G. E. Meyer, W. M. Maguire: “ Spatial frequency and mediation of short-term visual storage ”, Science, 198, 524-525 (1977)
- [89] T. Ueno: “ Visual persistence: Effect of luminance, spatial frequency and orientation ”, Vision Research, 23, 1687-1692 (1983)
- [90] K. Yarrow, P. Haggard, R. Heal, P. Brown, J. C. E. Rothwell: “ Illusory perceptions of space and time preserve cross-saccadic perceptual continuity ”, Nature, 414, 302-305 (2001)
- [91] Junji Watanabe, Atsushi Noritake, Taro Maeda, Susumu Tachi, Shin'ya Nishida: “ Perisaccadic Perception of Continuous Flickers ”, Vision Research, 45(4), 413-430 (2005)

- [92] 安藤 新樹: “ 点滅光を利用した衝動性眼球運動速度の測定装置 ”, 神経眼科, 11, 318-325 (1994)
- [93] 廣瀬 通孝 編: “ バーチャルリアリティの基礎 3 -VR 世界の構成手法- ”, 培風館 (2000)
- [94] 安藤 英由樹, 野村 宜邦, 前田 太郎: “ ウェアラブル計測系による視覚-運動解析-パラサイトヒューマンの研究第 9 報- ”, 日本バーチャルリアリティ学会第 6 回大会論文集, 145-146 (2001)
- [95] 伴野 明, 岸野 文郎, 小林 幸雄: “ 瞳孔抽出と頭部の動きを許容する視線検出装置の試作 ”, 電子情報通信学会論文誌 J76-D-II, 3, 636-646 (1993)
- [96] , 渡邊 淳司, Maria Adriana Verdaasdonk, 田畑 哲稔, 安藤 英由樹, 前田 太郎, 舘 すずむ, “ MultiMedia Performance におけるインタラクティブ性と美 ” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, (in press)
- [97] 原島 博 編: “ 画像情報圧縮 ”, オーム社 (1991)
- [98] 小原 二郎, 加藤 力, 安藤 正雄: “ インテリアの計画と設計 ”, 彰国出版 (2000)
- [99] 乾 敏郎: “ 認知心理学 1 知覚と運動 ”, 東京大学出版会 (1995)
- [100] 古賀 一男: “ 眼球運動実験ミニ・ハンドブック ”, 労働科学研究所出版部 (1998)
- [101] 苧阪 良二, 中溝 幸夫, 古賀 一男 編: “ 眼球運動の実験心理学 ”, 名古屋大学出版会 (1993)
- [102] 大野 健彦, 武川 直樹, 吉川 厚: “ 眼球形状モデルに基づく視線測定法 ”, 第 8 回画像センシングシンポジウム, 307-312 (2002)
- [103] 竹上 健, 後藤 敏行: “ 角膜反射像と虹彩輪郭情報を併用した視線検出法 ”, 電子情報通信学会論文誌, J82-D-I, 10, 1295-1303 (1999)
- [104] 竹上 健, 後藤 敏行, 大山 玄: “ 視線方向検出におけるセルフキャリブレーションに関する研究 ”, 電子情報通信学会論文誌, J84-D-II, 8, 1580-1588 (2001)
- [105] 松田 圭司, 永見 武司: “ 汎用視線位置計測システム ”, 第 1 2 回生体・生理工学シンポジウム論文集, 173-176 (1997)
- [106] C. H. Morimoto, D. Koonsb, A. Amirb, M. Flicknerb: “ Pupil detection and tracking using multiple light sources ”, Image and Vision Computing, 18, 331-35 (2000)
- [107] Y. Ebisawa: “ Improved Video-Based Eye-Gaze Detection Method ”, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 47, 948-955 (1998)
- [108] A. Haro, M. Flickner, I. Essa: “ Detecting and tracking eyes by using their physiological properties, dynamics, and appearance ”. Proceedings IEEE CVPR 2000 (2000)
- [109] Q. Ji, X. Yang: “ Real time visual cues extraction for monitoring driver vigilance ”, Proceedings of International Workshop on Computer Vision Systems (2001)
- [110] K. Nguyen, C. Wagner, D. Koons, M. Flickner: “ Differences in the infrared bright pupil response of human eyes ”, Proceedings of the symposium on Eye tracking research & applications, 133-138 (2002)

- [111] 大山 正, 今井 省吾, 和気 典二: “ 新編 感覚・知覚 心理学ハンドブック ”, 誠信書房 (1993)
- [112] 知野 哲郎, 福井 和広, 鈴木 薫: “ 非言語メッセージ利用インタフェース”Gaze To Talk” システム ”, 電子情報通信学会技術報告 HIP98-26, 31-38 (1998)
- [113] 久野 悦章, 八木 透, 藤井 一幸, 古賀 一男, 内川 嘉樹: “ EOG を用いた視線入力インタフェースの開発 ”, 情報処理学会論文誌, 39, 5, 1455-1462 (1998)
- [114] 大和 正武, 門田 暁人, 高田 義広, 松本 健一, 鳥居 宏次: “ 一般的な GUI に適した視線・マウス併用型ターゲット選択方式 ”, 情報処理学会論文誌, 42, 6, 1320-1329 (2001)
- [115] 大野 健彦 “ 視線インタフェースから視線コミュニケーションへ 視線のある環境を目指して ”, 情処研報 2001-HI-95, 171-178 (2001)
- [116] 植野 彰規, 笠原 俊和, 高瀬 守一郎, 南谷 晴之: “ 覚醒水準に依存する視覚誘発サッケードの特性解析 脳波の同時計測にもとづく図形弁別課題負荷時と無負荷時の比較 ”, 計測自動制御学会論文集, 33 9, 861-868 (1997)
- [117] 植野 彰規, 立山 剛, 高瀬 守一郎, 南谷 晴之: “ 持続性覚醒変化に対するサッケード動特性の依存性 ”, 電子情報通信学会論文誌, J83-D-II, 4, 1172-1179 (2000)
- [118] 中山 実, 高橋 功次, 清水 康敬: “ 注視とサッカードの頻度が眼球の活動に及ぼす影響 ”, 電子情報通信学会論文誌, J85-D-I, 85, 9, 931-935 (2002)
- [119] 渡邊 郁緒, 新美 勝彦: “ イラスト眼科 ”, 文光堂 (2003)
- [120] M. Strupp, O. Schuler, S. Krafczyk, K. Jahn, F. Schautzer, U. Buttner, T. Brandt: “ Treatment of downbeat nystagmus with 3,4-diaminopyridine ”, *Neurology*, 61, 165-170 (2003)
- [121] D. C. Burr: “ Acuity for apparent vernier offset ”, *Vision Research*, 19, 835-837 (1979)
- [122] M. Fahle, A. Biester, M. C. Morrone: “ Spatiotemporal interpolation and quality of apparent motion ”, *Journal of the Optical Society of America References A Optical Image Science and Vision*, 18, 2668-2678 (2001)
- [123] S. Shimojo, W. Richards, “ Seeing shapes that are almost totally occluded: A new look at Parks’s camel ”, *Perception & Psychophys.* 39, 418-426 (1986)
- [124] M. S. Livingstone, D. H. Hubel: “ Segregation of form, color, movement and depth: Anatomy, physiology, and perception ”, *Science*, 240, 740-49 (1987)
- [125] S. Zeki: “ A Vision of the Brain ”, Oxford: Blackwel (1993)
- [126] P. Lennie: “ Parallel visual pathways: A review ”, *Vision Research*, 20, 561-594 (1980)
- [127] W. H. Merigan, J. H. R. Maunsell, “ How parallel are the primate visual pathways? ”, *Annual Review of Neuroscience*, 16, 369-402 (1993)
- [128] C. Yin, S. Shimojo, C. Moore, S.A. Engel: “ Dynamic shape integration in extrastriate cortex ”, *Current Biology*, 12, 1379-1385 (2002)

- [129] J. H. Maunsell, D. C. van Essen, “ The connections of the middle temporal visual area (MT) and their relationship to a cortical hierarchy in the macaque monkey ”, *Journal of Neuroscience*, 3, 2563-2586 (1983)
- [130] M. A. Schoenfeld, M. Woldorff, E. Duzel, H. Scheich, H. J. Heinz, G. R. Mangun: “ Form-From-Motion:MEG evidence for time course and processing sequence ”, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(2), 157-172 (2003)
- [131] C. M. Cicerone, D. D. Hoffman, P. D. Gowdy, J. S. Kim: “ The perception of color from motion ”, *Perception & Psychophysics*, 57, 761-777 (1995)
- [132] C. M. Cicerone, D. D. Hoffman, “ Color from motion: Dichoptic activation and a possible role in breaking camouflage ”, *Perception*, 26, 1367-1380 (1997)
- [133] J. Chen, C. M. Cicerone, “ Subjective Color from Apparent Motion ”, *Journal of Vision* 2, 424-437 (2002)
- [134] D. H. Kelly: “ Motion and vision. II. Stabilized spatio-temporal threshold surface ”, *Journal of the Optical Society of America*, 69, 1340-1349 (1979)
- [135] A. Anzai, I. Ohzawa, R. D. Freeman: “ Joint-encoding of motion and depth by visual cortical neurons:neural basis of the Pulfrich effect ”, *Nature Neuroscience*, 4, 513-518 (2001)
- [136] 原島 博 監修 元木 紀雄, 矢野 澄男: “ 3次元画像と人間の科学 ”, オーム社 (2000)
- [137] F. Hillebrand: “ Theorie der scheinbaren grose bei binocularen sehen ”, *denkschriften der wiener akademie, Mathematisch-Naturwissenschaft Klasse*, 72, 255-307 (1902)
- [138] 前田 太郎, 館 すすむ: “ ホロプタ現象における視空間幾何学の機序に関する一考察 ”, *電子情報通信学会論文誌 D-*, J81-D- (1), 162-173 (1998)
- [139] ヤーコブ・フォン・ユクスキュル, ゲオルク・クリサート: “ 生物から見た世界 ”, 新思索社 (1995)
- [140] 田口 ランディ: “ コンセント ”, 幻冬舎 (2001)
- [141] 田口 ランディ: “ アンテナ ”, 幻冬舎 (2002)
- [142] 田口 ランディ: “ モザイク ”, 幻冬舎 (2003)
- [143] 江國 香織: “ 落下する夕方 ”, 角川書店 (1999)
- [144] 江國 香織: “ 冷静と情熱のあいだ Rosso ”, 角川書店 (2001)
- [145] 荒川 修作, マドリン ギンズ: “ 建築する身体 人間を超えていくために ”, 春秋社 (2004)
- [146] 田村 知則, 小林 信也: “ 眼が人を変える ”, 草思社 (2001)
- [147] ロバート・L・ソルソ: “ 脳は絵をどのように理解するか -絵画の認知科学- ”, 新曜社 (1997)
- [148] A. L. Yarbus: “ Eye movements and vision ”, Riggs, L. A., New York:Plenum.
- [149] I. Murakami, P. Cavanagh: “ A jitter after-effect reveals motion-based stabilization of vision ”, *Nature*, 395, 798-801 (1998)

- [150] 日本めまい平衡医学会 編: “ 眼振・眼球運動の神経機構 -システムニューロサイエンスからみた- ”, 日本めまい平衡医学会 (2001)
- [151] 稲垣 達也, 大森 賢哉, 高橋 良文, 海老澤 嘉伸, 南谷 晴之: “ 意識的サックードと視覚誘発サックードの特性解析 ”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, J74-D-II, 1, 79-86 (1991)
- [152] 杉浦 光洋, 海老澤 嘉伸: “ 注視点と視標の有無による意識的サックードの動特性変動と視覚依存性反射的サックードとの比較 ”, 映像情報メディア学会誌, 51, 8, 1326-1333 (1997)
- [153] 海老澤 嘉伸, 杉浦 光洋: “ 視標と注視点条件の視覚依存性意識的サックード特性への影響 ”, 映像情報メディア学会誌, 52, 11, 1730-1737 (1998)
- [154] 海老澤 嘉伸, 杉浦 光洋: “ 注視点サイズが視覚依存性反射的サックードに与える影響 ”, 映像情報メディア学会誌, 52, 11, 1738-1743 (1998)
- [155] F. C. Volkman, A. M. Schick, L. A. Riggs: “ Time course of visual inhibition during voluntary saccades ”, Journal of the Optical Society of America, 58, 562-569 (1968)
- [156] V. Lederberg: “ Color recognition during voluntary saccades ”, Journal of the Optical Society of America, 60, 835-842 (1970)
- [157] B. Bridgeman, D. Hendry, L. Stark: “ Failure to detect displacement of the visual world during saccadic eye movement ”, Vision Research, 15, 719-722 (1975)
- [158] H. Deubel, W. X. Schneider, B. Bridgeman: “ Postsaccadic target blanking prevents saccadic suppression of image displacement ”, Vision Research, 36, 985-996 (1996)
- [159] S. Shioiri, P. Cavanagh: “ Saccadic suppression of low-level motion ”, Vision Research, 29, 915-928 (1989)
- [160] J. J. Zhu, F. S. Lo: “ Time course of inhibition induced by a putative saccadic suppression circuit in the dorsal lateral geniculate nucleus of the rabbit ”, Brain research bulletin, 41, 281-291 (1996)
- [161] M. R. Diamond, J. Ross, M. C. Morrone: “ Extraretinal control of saccadic suppression ”, Journal of Neuroscience, 20, 3449-3455, (2000)
- [162] K. V. Thilo, L. Santoro, V. Walsh, C. Blakemore: “ The site of saccadic suppression ”, Nature Neuroscience, 7, 13-14 (2004)
- [163] E. J. Ramcharan, J. W. Gnadt, S. M. Sherman: “ The effects of saccadic eye movements on the activity of geniculate relay neurons in the monkey ”, Visual neuroscience, 18, 253-258 (2001)
- [164] R. Kleiser, R. J. Seitz, B. Krekelberg: “ Neural correlates of saccadic suppression in humans ”, Current Biology, 14, 386-390 (2004)
- [165] A. Thiele, P. Henning, M. Kubischik, K. P. Hoffmann: “ Neural mechanisms of saccadic suppression ”, Science, 295, 2460-2462 (2002)

- [166] E. von. Holst, E. Mittelstaedt: " Das Reafferenz-Prinzip ", *Naturwissenschaften*, 37, 464-477 (1950)
- [167] E. von. Holst: " Relations between the central nervous system and the peripheral organs ", *British Journal of Animal Behavior*, 2, 89-94 (1954)
- [168] R. W. Sperry: " Neural basis of the spontaneous optokinetic response produced by visual inversion ", *Journal of Comparative Physiological Psychology*, 43, 482-489 (1950)
- [169] M. L. Davidson, M. Fox, A. O. Dick: " Effect of eye movements on backward masking and perceived location ", *Perception & Psychophysics*, 14, 110-116 (1973)
- [170] D. E. Irwin, J. S. Brown, J. S. Sun: " Visual masking and visual integration across saccadic eye movements ", *Journal of Experimental Psychology:General*, 117, 276-287 (1988)
- [171] W. Metzger: " Versuch einer gemeinsamen Theorie der Phänomene Frohlichs und Hazelhoffs und Kritik ihrer Verfahren zur Messung der Empfindungszeit ", *Psychologische Forschung*, 16, 176-200 (1932)
- [172] D. M. Mackay: " Perceptual stability of a stroboscopically lit visual field containing self-luminous objects ", *Nature* 181, 507-508 (1958)
- [173] R. Nijhawan: " Motion extrapolation in catching ", *Nature*, 370, 256-257 (1994)
- [174] M. V. C. Baldo, S. A. Klein: " Extrapolation or attention shift? " *Nature*, 378, 565-66 (1995)
- [175] G. Purushothaman, S. S. Patel, H. E. Bedell, H. Ogmen: " Moving ahead through differential visual latency ", *Nature*, 396, 424 (1998)
- [176] D. M. Eagleman, T. J. Sejnowski: " Motion integration and postdiction in visual awareness ", *Science*, 287, 2036-2038 (2000)
- [177] D. M. Eagleman, T. J. Sejnowski: " Response to Patel, Ogmen, Bedell and Sampath (2000) ", *Science*, 290, 1051a (2000)
- [178] D. M. Eagleman, T. J. Sejnowski: " Response to Krekelberg and Lappe (2000) and Whitney and Cavanagh (2000) ", *Science*, 289, 1107a (2000)
- [179] J. Schlag, R. H. Cai, A. Dorfman, A. Mohempour, M. Schlag-Rey: " Extrapolate movement without retinal motion ", *Nature*, 403, 38-39 (2000)
- [180] D. Whitney, I. Murakami: " Latency difference, not spatial extrapolation ", *Nature Neuroscience*, 1, 656-57 (1998)
- [181] D. Whitney, P. Cavanagh: " Motion distorts visual space: shifting the perceived position of remote stationary objects ", *Nature Neuroscience*, 3, 954-959 (2000)
- [182] D. Kerzel: " Eye movement and visible persistence explain the mislocalization of the final position of a moving target ", *Vision Research*, 40, 3703-3715 (2002)

- [183] J. R. Duhamel, C. L. Colby, M. E. Goldberg: “ The updating of the representation of visual space in parietal cortex by intended eye movements ”, *Science*, 255, 90-92 (1992)
- [184] M. Kusunoki, M. E. Goldberg: “ The time course of perisaccadic receptive field shifts in the lateral intraparietal area of the monkey ”, *Journal of Neurophysiology*, 89, 1519-1527 (2003)
- [185] J. Paillard, B. Amblard: “ in *Brain Mechanisms and Spatial Vision* ” 299-329 (1985)
- [186] P. Cavanagh, G. Mather: “ Motion: The long and short of it ”, *Spatial Vision*, 4, 103-129 (1989)
- [187] 塩入 諭, P. Cavanagh: “ 動き知覚の二重性 ”, *光学*, 18, 516-523 (1989)
- [188] T. Sato: “ Reversed apparent motion with random dot patterns ”, *Vision Research*, 29, 1749-1758, (1989)
- [189] E. H. Adelson, J. Bergen: “ Spatiotemporal energy models for the perception of motion ”, *Journal of the Optical Society of America A*, 2, 284-299 (1985)
- [190] P. Cavanagh: “ Attention-Based Motion Perception ”, *Science*, 257, 1563-1565, (1992)
- [191] W. Reichardt: “ Sensory Communication ”, W. A. Rosenblith, *Autocorrelation, a principle for the evaluation of sensory information by the central nervous system*, Wiley, New York, 303-317 (1961)
- [192] J. P. van Santen, G. Sperling: “ Elaborated Reichardt detectors ”, *Journal of the Optical Society of America A*, 2, 300-21 (1985)
- [193] A. B. Watson, A. J. Jr Ahumada: “ Model of human visual-motion sensing ”, *Journal of the Optical Society of America A*, 3, 300-307 (1985)
- [194] C. L. Fennema, W.B. Thompson: “ Velocity determination in scenes containing several moving objects ”, *Computer Graphics and Image Processing*, 9, 301-315 (1979)
- [195] A. Johnston, P. W. McOwan, H. Buxton: “ A computational model of the analysis of some first and second order motion patterns by simple and complex cells ”, *Proceedings of the Royal Society of London B*, 250, 297-306 (1992)
- [196] V. Bruce, P.R. Green, M. A. Georgeson: “ *Visual Perception: Physiology, Psychology and Ecology*, 3rd edition ”, Psychology Press, Hove, UK, (1996)
- [197] W. T. Newsome, A. Mikami, R. H. Wurtz: “ Motion selectivity in macaque visual cortex. III. Psychophysics and physiology of apparent motion ”, *Journal of Neurophysiology*, 55, 1340-1351 (1986)
- [198] K. H. Britten, M. N. Shadlen, W. T. Newsome, J. A. Movshon: “ The analysis of visual motion: a comparison of neuronal and psychophysical performance ”, *Journal of Neuroscience*, 12, 4745-4765 (1992)
- [199] F. W. Frohlich: “ Uber die Messung der Empfindungszeit ”, *Zeitschrift fur Sinnesphysiologie*, 54, 57-58 (1923)

- [200] F. W. Frohlich: “ Die Empfindungszeit ”, Verlag von Gustav Fischer, Jena, Germany (1929)
- [201] R. A. Finke, J. J. Freyd: “ Representational momentum ”, *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 10, 126-132, (1984)
- [202] S. Nishida, A. Johnston: “ Influence of motion signals on the perceived position of spatial pattern ”, *Nature*, 397, 610-612, (1999)
- [203] J. Schlag, M. Schlag-Rey: “ Through the eye, slowly: delay and localization errors in the visual system ”, *Nature Reviews Neuroscience*, 3, 191-200 (2002)
- [204] B. Krekelberg, M. Lappe: “ Neuronal latencies and the position of moving objects ”, *Trends Neuroscience*, 24, 335-339 (2001)
- [205] E. Brenner, J. B. J. Smeets, “ Motion extrapolation is not responsible for the flash-lag effect ”, *Vision Research*, 40, 1645-1648 (2000)
- [206] R. H. Cai, K. Jacobson, R. Baloh, M. Schlag-Rey, J. Schlag: “ Vestibular signals can distort the perceived spatial relationship of retinal stimuli ”, *Experimental Brain Research*, 135, 275-278 (2000)
- [207] R. Cai, J. Schlag: “ A new form of illusory conjunction between color and shape ”, *Journal of Vision*, 1, 127 (2001)
- [208] R. H. Cai and P. Cavanagh: “ Motion interpolation of a unique feature into stimulus gaps and blind spots ”, *Journal of Vision*, 2, 30 (2002)
- [209] B. Sheth, R. Nijhawan, S. Shimojo: “ Changing objects lead briefly flashed ones ”, *Nature Neuroscience*, 3, 489-495 (2000)
- [210] K. Moutoussis, S. Zeki: “ A direct demonstration of perceptual asynchrony in vision ”, *Proceedings of Royal Society of London B* 264, 393-399 (1997)
- [211] S. Nishida, A. Johnston: “ Marker correspondence, not processing latency, determines temporal binding of visual attributes ”, *Current Biology*, 12, 359-368 (2002)
- [212] F. C. Volkmann: “ Human visual suppression ”, *Vision Research*, 26, 1401-1416 (1986)
- [213] W. H. Ridder III, A. Tomlinson: “ Spectral characteristics of blink suppression in normal observers ”, *Vision Research*, 35, 2569-2578 (1995)
- [214] NTT 出版: “ Inter Communication 7 特集 ; インタラクティブアート ”, NTT 出版 (1993)
- [215] 伊藤 俊治: “ 電子美術論 ”, NTT 出版 (1999)
- [216] NTT インターコミュニケーション・センター [ICC]: “ Inter Communication 29 ダンスフロンティア 身体テクノロジー ”, NTT 出版 (1999)
- [217] 渡邊 淳司, Maria Adriana Verdaasdonk, 田畑 哲稔: “ Augmented Performance with Catalytic Devices ”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 7(4), 459-470 (2002)

- [218] 京都造形大学 舞台芸術研究センター: “ 舞台芸術 02 メディア・テクノロジー ”, 作品社 (2002)
- [219] 乗越 たかお: “ コンテンポラリー・ダンス徹底ガイド ”, 作品社 (2003)
- [220] 日本建築学会 編: “ 光と色の環境デザイン ”, オーム社 (2001)
- [221] cell/66b: “ test-patches ”, <http://www.vision.co.jp/66b/> (12/16 2004)
- [222] Junji Watanabe: “ Media Performance Unit cell/66b ”, <http://www.star.t.u-tokyo.ac.jp/junji/> (12/16 2004)
- [223] 渡邊 淳司, Maria Adriana Verdaasdonk, cell/66b: “ test-patches ”, 芸術科学会論文誌 1(4), 160-162 (2002)
- [224] 平田 オリザ: “ 演劇入門 ”, 講談社 (1998)
- [225] 中津 良平, 星野 准一: “ バーチャルリアリティとエンタテインメント -ゲストエディタ巻頭言- ”, 日本バーチャルリアリティ学会誌, 9(1), 6-9 (2004)
- [226] 三井 秀樹: “ メディアと芸術 -デジタル化社会はアートをどう捉えるか ”, 集英社新書 (2002)
- [227] 神林 恒道 編: “ 現代芸術のトポロジー ”, 勁草書房 (1987)
- [228] Frankfurt Ballet: “ The Official Frankfurt Ballet Web Site ”, <http://www.frankfurt-ballett.de/frame.html> (12/16 2002)
- [229] 浅田 彰 監修: “ フォーサイス 1999 ”, NTT 出版 (1999)
- [230] dumb type: “ dumb type ”, <http://dt.nttice.or.jp/> (12/16 2002).
- [231] Leni-Basso: “ Leni-Basso ”, <http://www.kk.ij4u.or.jp/~wildhany/leni.html> (12/16 2002)
- [232] nest: “ NestTV.com ”, <http://www.kt.rim.or.jp/~nest/> (12/16 2002)
- [233] M. Lemieux / V. Pilon: “ 4D art ”, <http://www.4dart.com/4Dart.html/en/menu.html/> (12/16 2002)
- [234] Laurie Anderson: “ Laurie Anderson ”, <http://www.laurieanderson.com/> (12/16 2002)
- [235] Stelarc: “ Stelarc ”, <http://www.stelarc.va.com.au/> (12/16 2002)
- [236] 鶴本 正三: “ パフォーマンス・ノウ ”, 東急エージェンシー出版 (1986)
- [237] 長嶋 洋一, 照岡 正樹, 井口 征士: “ 生体センサによる音楽表現の拡大と演奏表現の支援について ”, 情報処理学会研究報告, 98(74), (1998)
- [238] 河口 洋一郎: “ GEMOTION ”, <http://www.race.u-tokyo.ac.jp/~yoichiro/> (12/16 2002)
- [239] Ed Tannenbaum: “ Electrons Tamed for the Arts ”, <http://www.et-arts.com/> (12/16 2002)
- [240] Jeffrey Shaw: “ Jeffrey Shaw ”, <http://www.jeffrey-shaw.net/> (12/16 2002)
- [241] 間瀬健二, フェルスライナーズ: “ Iamascope(インタラクティブ万華鏡): グラフィックな楽器の提案 ”, ビジュアルコンピューティングとグラフィクス CAD シンポジウム, 91-96 (1998)

- [242] Flavia Sparacino: “ Dance Space ”, [http:// web.media.mit.edu/~flavia/DanceSpace/DanceSpace.html](http://web.media.mit.edu/~flavia/DanceSpace/DanceSpace.html) (12/16 2002)
- [243] 岩館 祐一, 井上 正之, 鈴木 良太郎: “ 身体動作からの感性特徴量の抽出に関する検討 ”, 映像学技報, 24(29), 7-12 (2000)
- [244] ルドルフ・ラバン, 神沢和夫訳: “ 身体運動の習得 ”, 白水社 (1985)
- [245] Ars Electronica: “ ARS ELECTRONICA CENTER ”, <http://www.aec.at/> (12/16 2004)
- [246] 大山 正: “ 視覚心理学への招待 -見えの世界へのアプローチ- ”, サイエンス社 (2000)
- [247] 谷口 高士: “ 音は心の中で音楽になる -音楽心理学への招待- ”, 北大路書房 (2000)
- [248] 伊藤 キム + 輝く未来, <http://www.geocities.co.jp/Hollywood-Miyuki/3773/> (12/16 2004)
- [249] D. Maynes-Aminzade, R Pausch, S. SeitzK: “ Techniques for Interactive Audience Participation ”, ACM SIGGRAPH2002 Abstract and Applications, 257 (2002)
- [250] Gil Kuno: “ Unsound ”, <http://www.unsound.com/> (12/16 2004)
- [251] J. Watanabe, M. Sugimoto: “ Visual Resonator ”, Ars Electronica Cyber Art 2004, 301 (2004)
- [252] 渡邊 淳司, 田畑 哲稔, 前田 太郎, 舘 すすむ, “ 眼球運動を利用したディスプレイとパフォーマンスの融合 ”, 信学技法, 103(165), 19-23 (2003)
- [253] J. Watanabe, T. Tavata, M. A. Verdaasdonk, H. Ando, T. Maeda, S. Tachi: “ Illusory Interactive Performance by Self Eye Movement ”, ACM SIGGRAPH2004 Abstract and Applications, (2004)
- [254] NTT インターコミュニケーション・センター, “ E. A. T. 芸術と技術の実験 ”, NTT 出版 (2003)
- [255] 平田オリザ: “ 芸術立国論 ”, 集英社 (2001)
- [256] 渡邊 淳司, 波多野 健介, 野嶋 琢也, 稲見 昌彦, 舘 すすむ: “ re-cognition project ”, <http://www.star.t.u-tokyo.ac.jp/~junji/re-cog/indexj.htm> (12/16 2004).
- [257] 渡邊 淳司, 板垣 貴裕, 野嶋 琢也, 稲見 昌彦, 舘 すすむ: “ Beings - Haptic artwork with SmartTool - ”芸術科学会論文誌 2(4), 116-122 (2003)
- [258] しらい あきひこ, 上條 慎太郎, 長谷川 晶一, 佐藤 誠: “ Dynamo: 触覚 VR 開発環境 SPRING-HEAD を用いたアートワーク習作 ”, <http://diva-exhibition.art-science.org/> (12/16 2004).
- [259] SensAble Technologies: <http://www.sensable.com> (12/16 2004)
- [260] 筧 直之, 矢野 博明, 斉藤 允, 小木 哲朗, 廣瀬 通孝: “ 没入型仮想空間における力覚呈示デバイス Haptic GEAR の開発とその評価 ”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 5(4), 1113-1120 (2000)
- [261] 吉江 将之, 矢野 博明, 岩田 洋夫: “ ジャイロモーメントを用いた力覚提示装置 ”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 7(3), 329-337 (2002)

- [262] 安藤 英由樹, 尾花 和俊, 渡邊 淳司, 杉本 麻樹, 前田 太郎: “ 回転モーメントを利用した機械ブレーキ式力覚提示装置の開発 ”, ヒューマンインタフェース学会論文誌 5(2), 29-36 (2003)
- [263] T. Nojima, M. Inami, I. Kawabuchi, T. Maeda, K. Mabuchi, S. Tachi: “ An interface for touching the interface ”, Conference Abstracts and Applications of SIGGRAPH 2001, 125 (2001)
- [264] 野嶋 琢也, 関口 大陸, 稲見 昌彦, 舘 すすむ: “ 力覚提示を利用した実時間実環境作業支援システムの提案 ”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 7(2), 193-199 (2002)
- [265] 野嶋 琢也: “ Nojima's Page -the Smart Tool- ”, <http://www.star.t.u-tokyo.ac.jp/~tnojima/> (12/16 2004).
- [266] 前田 太郎: “ パラサイトヒューマンによる人間機能の研究 ”, 日本バーチャルリアリティ学会第4回大会論文集, 425-426 (1999)
- [267] 前田 太郎, 安藤 英由樹, 渡邊 淳司, 野村 宜邦, 三木 健: “ 行動モデル化のためのウェアラブルロボティクス-パラサイトヒューマンの研究第6報- ”, 日本バーチャルリアリティ学会第6回大会論文集, 153-156 (2001)
- [268] 財津 義貴, 稲見 昌彦, 前田 太郎: “ 腱反射を利用した新たな運動提示装置の提案 ”, 日本バーチャルリアリティ学会論文集, 6, 99-105 (2001)
- [269] 板生 潔: “ ウェアラブルへの挑戦-マイクロ情報端末が拓く世界- ”, 工業調査会 (2001)
- [270] 佐藤 方彦 監修: “ 人間工学基準数値数式便覧 ”, 技報堂出版 (1992)
- [271] 日本体力医学会学術委員会: “ スポーツ医学の基礎 ”, 朝倉書店 (1998)
- [272] R. A. Brooks: “ How To Build Complete Creatures Rather Than Isolated Cognitive Simulators ”, Architectures for Intelligence, Erlbaum, Hillsdale, NJ, 225-239 (1989)
- [273] 安藤 英由樹, 野村 宜邦, 前田 太郎: “ ウェアラブル計測系による視覚-運動解析 -パラサイトヒューマンの研究第9報- ”, 日本バーチャルリアリティ学会第6回大会論文集, 145-146 (2001)
- [274] 野村 宜邦, 前田 太郎: “ 爪センサーを用いた指の接触及び屈曲検出の研究 ”, 日本バーチャルリアリティ学会論文集, 6(3), 215-220 (2001)
- [275] 三木 健, 野村 宜邦, 安藤 英由樹, 前田 太郎: “ 指の屈曲を検出する爪センサの開発-パラサイトヒューマンの研究第8報- ”, 日本バーチャルリアリティ学会第6回大会論文集, 147-148 (2001)
- [276] 渡邊 淳司, 吉野 治香, 安藤 英由樹, 前田 太郎: “ シューズ型インターフェイスを用いた歩行周期の誘導-パラサイトヒューマンの研究第10報- ”, 日本バーチャルリアリティ学会第6回大会論文集, 47-48 (2001)
- [277] 渡邊 淳司, 安藤 英由樹, 前田 太郎: “ 腕部と脚部の相関に着目した歩行運動の解析 ”, 第16回生体・生理工学シンポジウム論文集, 419-420 (2001)
- [278] 福島 省吾, 鈴木 健之, 村上 宗司, 仲島 了治: “ 映像表示機能を備えた軽量型瞳孔・眼球運動計測器の開発 ”, ヒューマンインターフェイス学会研究報告集, 3(2), 75-78 (2001)

- [279] S. Mascaro, H. Asada: " Photoplethysmograph Fingernail Sensors for Measuring Finger Forces without Haptic Obstruction ", IEEE Transactions on Robotics and Automation, 17(5), 698-708 (2001)
- [280] 安藤 英由樹, 渡邊 淳司, 杉本 麻樹, 前田 太郎: " 独立成分分析による爪装着型センサの接触力と屈曲の分離 ", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 8(4), 379-387 (2003)
- [281] 田村 正秀, 一色 学, 橘 秀光, 久保 良彦, 田村 知巳: " 近赤外レーザー光を用いる無侵襲生体計測 ", 人工臓器, 18(5), 1573-1580 (1989)
- [282] 鳶田 聡, 佐藤 敦, 大塚 作一, 新井 雅信: " 足圧中心軌跡による健常者の歩行分析 ", 信学技報, MBE97-89 (1997)
- [283] 野村 宜邦, 前田 太郎: " 行動情報による身体構造モデルの獲得過程-パラサイトヒューマンの研究第7報- ", 日本バーチャルリアリティ学会第6回大会論文集, 49-50 (2001)
- [284] 坂上 雅道, 小泉 昌司: " 行動抑制と前頭葉 ", BRAIN MEDICAL, 13(1), 29-35 (2001)
- [285] 松波 謙一, 内藤 栄一: " 運動と脳 ", サイエンス社 (2000)
- [286] ランニング事典: " ティム・ノックス ", 大修館書店 (1994)
- [287] 清水 博: " 生命を捉えなおす 増補版 ", 中公新書 (1990)
- [288] ハーマン・ハーケン: " 脳機能の原理を探る -非平衡協同現象としての脳神経活動・行動・認識- ", シュプリンガー・フェアラーク東京 (2000)
- [289] M. A. アービブ: " ニューラルネットと脳理論 ", サイエンス社 (1992)
- [290] S. Grillner: " Neurobiological bases of rhythmic motor acts in vertebrates ", Science, 228, 143-149 (1985)
- [291] 岡田 英孝: " 高齢者の歩行とランニング ", 体育の科学, 50(1), 6-12 (2000)
- [292] 淵本 隆文: " 歩行とランニングにおけるエネルギー変換 ", 体育の科学, 50(1), 20-24 (2000)
- [293] 渡部 和彦: " 高齢者の歩行運動の特徴 ", 保健の科学, 50(1), 506-511 (1999)
- [294] 南谷 和利: " 歩行と健康 ", 保健の科学, 41(7), 494-499 (1999)
- [295] 古市 保一: " インテリジェント義足膝継手 ", 油圧と空気圧, 28(1), 90-92 (1997)
- [296] 山崎 信寿: " 身体運動の力学的原理 ", システム/制御/情報, 36(12), 784-789 (1992)
- [297] 山崎 信寿: " 仮想人類学 ", 数理科学, 394, 14-20 (1996)
- [298] 田村 寧健, 三宅 美博: " 相互適応的な歩行介助システム ", 第10回自立分散システム・シンポジウム資料, 247-250 (1998)
- [299] G. Taga: " A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion ", Biological Cybernetics, 73, 97-111 (1995)
- [300] 多賀 巖太郎: " 歩行の創発 ", 日本ロボット学会誌, 15(5), 581-586 (1997)

- [301] 真武 友一, 今井 康文, 高瀬 徹, 松本 俊久: “ 歩行に影響する腕の振りの基礎的研究 ”, 長崎大学工学部研究報告第 14 号, 1-8 (1980)
- [302] 福岡 泰宏, 木村 浩: “ 四速ロボットの生物規範型不整地適応動歩行-体性感覚・前庭感覚による調節- ”, ロボット学会誌, 19(5),1-8 (2001)
- [303] 宮腰 清一, 多賀 巖太郎, 国吉 康夫, 長久保 晶彦: “ 神経振動子を用いた三次元 2 足足踏みシミュレーション ”, 日本ロボット学会誌, 18(1), 87-93 (2000)
- [304] 水野 美邦 編著: “ パーキンソン病ハンドブック ”, 中外医学社 (2001)
- [305] 久保田 浩司, 前田 典彦, 菊池 保文: “ 歩行ナビゲーションシステムの提案と評価 ”, 情報処理学会論文誌, 42(7), 1858-1865 (2001)
- [306] J. J. Fruin: “ 歩行者の空間 -理論とデザイン- ”, 鹿島出版会 (1974)
- [307] 杉本 麻紀, 渡邊 淳司, 安藤 英由樹, 前田 太郎: “ 前庭感覚刺激による歩行方向の誘導 -パラサイトヒューマンの研究第 17 報- ”, 日本バーチャルリアリティ学会 第 8 回大会論文集, 339-342, (2003)
- [308] 高幣 俊之, 野村 宜邦, 前田 太郎, 舘 すすむ: “ 歩行における視覚と運動感覚の整合性に関する研究 ”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 5(2), 831-835 (2000)
- [309] Y. Miyake, H. Shimizu: “ Mutual entrainment based human-robot communication field ”, Proc. of 3rd. IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication, 118-123 (1994).
- [310] Y. Miyake, T. Miyagawa: “ Internal observation and co-generative interface ”, Proc. of 1999 IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 229-237 (1999)
- [311] E. Thelen, L. B. Smith: “ A dynamic systems approach to the development of cognition and action ”, MIT Press (1998)
- [312] 田村 俊世: “ 訓練機器 ”, 総合リハビリテーション, 29(6), 503-507 (2001)
- [313] 藤江 正克: “ 歩行支援ロボット ”, 日本ロボット学会誌, 14(5), 628-631 (1996)
- [314] T. Maeda, H. Ando, M. Sugimoto, J. Watanabe, T. Miki: “ Wearable Robotics as a Behavioral Interface -The Study of the Parasitic Humanoid- ”, Proc of 6th International Symposium on Wearable Computers, 145-151 (2002)
- [315] T. Maeda, H. Ando, M. Sugimoto, J. Watanabe, T. Miki: “ Parasitic Humanoid: Human Behavior Measurement by Wearable Technologies ”, SICE Annual Conference (2002)
- [316] 武藤 剛, 三宅 美博: “ 歩行介助を目的とする人間 - ロボット協調系における共創出過程の解析 ”, 計測自動制御学会論文集, 38(3), 316-323 (2002)
- [317] 高梨 豪也, 三宅 美博: “ 共創型介助ロボット'Walk-Mate' の歩行障害への適用 ”, 計測自動制御学会論文集, 39(1), 74-81 (2003)

- [318] T. Muto, Y. Miyake: “ Analysis of the Co-emergence Process on the Human-Human Co-operation ”, Proc. of 2002 IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, pp. MP1J2 (2002)
- [319] 宮崎 信次, 石田 明充: “ 床反力連続計測のための容量性トランスデューサー ”, 医用電子と生体工学, 22, 103-109 (1984)
- [320] 川上 博: “ 生体リズムの動的モデルとその解析-ME と非線形力学- ”, コロナ社 (2001)
- [321] 柳原 大: “ 歩行運動における小脳の役割 ”, 神経進歩, 44(5), 793-800 (2000)
- [322] 柳原 大: “ 運動学習と小脳 ”, 体育の科学, 46(6), 455-463 (1996)
- [323] M. Ito: “ The Cerebellum and Neural Control ”, Raven Press New York (1984)
- [324] 伊藤 聡, 湯浅 秀男, 羅 志偉, 伊藤 正美, 柳原 大: “ リズム運動の環境適応に関する数理モデルについて ”, 計測自動制御学会論文集, 34(9), 1237-1245 (1998)
- [325] 戸田 盛和: “ 非線形力学 ”, 共立出版株式会社 (1984)
- [326] K. Matuoka: “ Mechanisms of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators ”, Biological Cybernetics, 56, 345-353 (1987)
- [327] 野村 泰伸, 佐藤 俊輔, 土居 伸二, J. P. Segundo, M. D. Stinber: “ 自発的神経活動のモデル-BVP モデルから mRIC モデルへ- ”, 信学技報 MBE 93-25 (1993)
- [328] A. T. Winfree: “ The Geometry of Biological Time ”, Springer (1980)
- [329] J. P. Keener, L. Glass: “ Global bifurcation structure of a periodically forced biological oscillator ”, Journal of Mathematical Biology, 21, 175-190 (1984)
- [330] 池田 憲昭: “ 不整脈生成の力学系モデル ”, BME 9(10), 60-71 (1995)
- [331] 山崎 大河, 野村 泰伸, 佐藤 俊輔: “ 周期運動の制御に運動リズムリセットが与える影響 ”, 信学技報 NC2000-112 (2001)
- [332] 大同 寛明: “ 結合振動子系における協同的引き込みとその周辺 ”, システム/制御/情報, 43(10), 511-518 (1999)
- [333] Y. Kuramoto: “ Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence ”, Springer (1984)
- [334] 長尾 智晴: “ 最適化アルゴリズム ”, 昭晃堂 (2000)
- [335] G. J. Borese: “ MATLAB 数値解析 ”, オーム社 (1998)

付録 A

サッカー時の知覚特性の詳説

A.1 視知覚のための感覚器官

視知覚のための感覚器官において、環境からの光情報は眼球-網膜-脳という順で伝達される。はじめに、それぞれの感覚器官の構造を示すとともに、視覚情報処理の流れを追う。

A.1.1 眼球の構造

眼球(左目)の断面を図 A.1 に示す。外界からの光は角膜、前眼房、水晶体、ガラス体を通過し網膜に達する。この時、外界の像は角膜と水晶体の適度な屈折により網膜に結像する。可視光以外の波長の光は途中で吸収されてしまい網膜まで到達せず、知覚されない。

角膜と水晶体の間には透明な澄んだ房水があり、その中に目に入る光量を調節している虹彩がある。虹彩の中央の円形開口部が瞳孔である。ちなみに、目の色は虹彩の含有する色素の量によって決まる。水晶体はカメラのレンズの働きをする。水晶体は毛様体筋の働きにより厚みを変化させ、屈折率の微調整を行って網膜の中心窩に焦点を合わせる。これは、網膜上に鮮明な像を得るための作用で、調節と呼ばれる。中心窩には色を感じる視細胞の錐体が密集しているため、中心窩で外界を捉えようと眼球運動を行う。また、視神経が収束している点は盲点と呼ばれ、そこには視細胞が存在せず、その位置に対応する部分は知覚できない。

A.1.2 網膜の構造

網膜の構造を図 A.2 に示す。網膜は厚さ約 250 μm の薄膜で、厚さ方向に沿って光の入射する側から順に神経節細胞、アマクリン細胞、双極細胞、水平細胞、視細胞が並んでいる。信号の流れは反対で、視細胞 双極細胞 神経節細胞の順である。水平細胞とアマクリン細胞は主に横方向の信号伝達を行う。視細胞では、光エネルギーが膜電位に変換される。視細胞には明順応状態で働く錐体と暗順応状態で働く桿体の 2 種類があり、さらに、錐体は赤・緑・青に感じる 3 種類に分かれ、網膜の中心に分布している。錐体は約 600 万個、桿体は約 1 億 2000 万個存在する。

A.1.3 視覚情報の脳内での流れ

視覚情報の脳内での流れの概要を図 A.3 に示す。網膜から入力された視覚情報は視床を通過した後、視覚野へ入力される。そして、視覚野から情報の流れは頭頂葉へ向かう流れ (Dorsal Path) と側頭葉を経て前頭葉へ向かう流れ (Ventral Path) の 2 系統に分かれる [124]。頭頂葉へ向かう情報の流れは主に空間知覚に関する情報処理を担い、側頭葉を経て前頭葉へ向かう流れは主に形態・色知覚の情報処理を行っている。

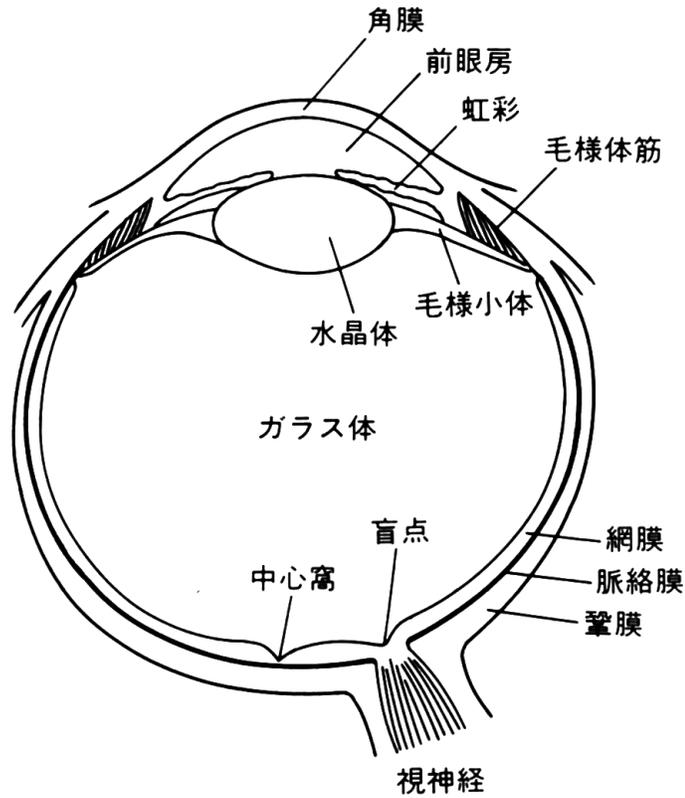


図 A.1 眼球の構造 ([111] より引用)

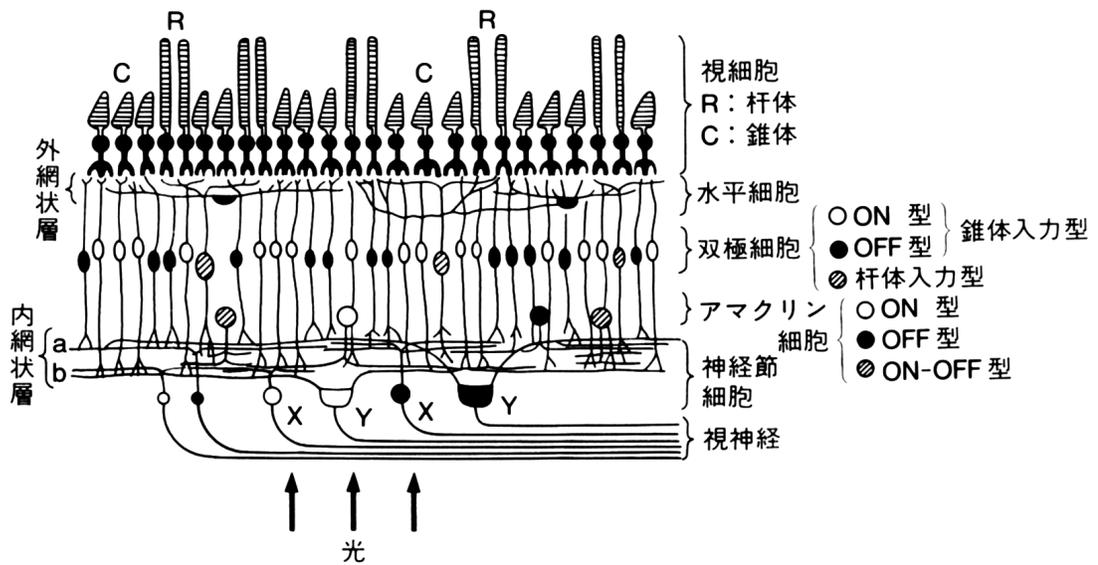


図 A.2 網膜の構造 ([111] より引用)

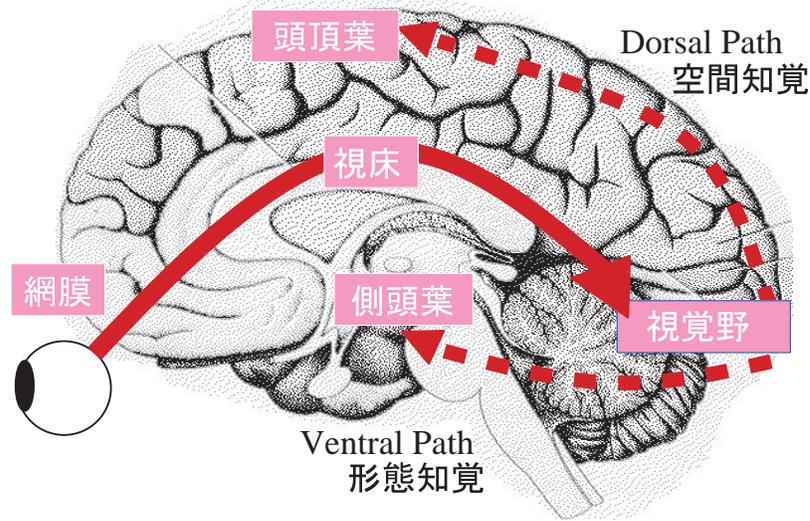


図 A.3 脳の視覚情報処理の流れ

A.2 視知覚のための眼球運動

A.2.1 眼球運動を引き起こす眼筋

視覚情報を得るための、上下、左右、回転の眼球運動が可能なのは、眼球に筋肉がつながっているからである。図 A.4 のように眼球には上斜筋、上直筋、内直筋、下直筋、外直筋、下斜筋の 6 本の筋肉がつながっている。それらは総称して外眼筋と呼ばれる。

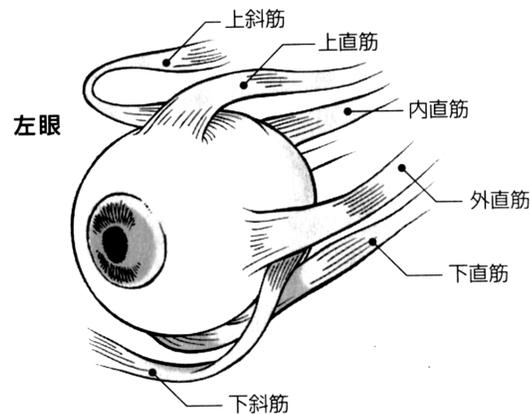


図 A.4 眼球を動かす筋肉 ([146] より引用)

A.2.2 眼球運動の種類

眼球運動の分類

視覚情報を得るための眼球運動を分類し、それぞれの特徴を以下に示す。また、眼球運動ではないが瞬目は視覚システムにおいて大きな役割を果たしているおり、その情報提示への応用も考えられる。

- 随意性眼球運動

- 共同運動...両眼が同方向に運動する．

- * サッカード: 極めて高速な眼球運動で, 最高速度は 500deg/sec に及ぶ．振幅は 15deg 以内．途中で随意的に運動を止めることはできない．
- * スムースパーシュート: ゆっくり動く視標を注視したときに生じる滑らかな追跡性の運動．運動視標が無ければ起こらない．

- 輻輳開散運動...両眼が反対方向に運動する．視方向を一定に保った状態で遠近方向に注視点を移動させる時に生じる運動．両眼が反対方向に低速度で滑らかに運動する．要因は左右の網膜上での像の不一致と像のボケ．

- 不随意的な眼球運動

- 補償性眼球運動

- * 前庭動眼反射: 一点を注視して頭部を動かしたときに網膜上の像を安定させるために眼球が頭部運動と逆方向に動く．
- * 前庭性眼振: 暗中において頭部を一定方向に持続的に回転すると, 視覚刺激が無くても頭部の回転方向と反対方向に動き, 眼球の稼動範囲を越えると眼球は急速に元の位置に戻り, 再び眼球は頭部の回転方向と反対方向に動き始める．
- * 視運動性眼振一定方向に動く視界を見たときに, 視界の動きに追従して動く滑らかな動きと追従しきれなくなり眼球が元の位置に瞬間的に戻る動きを繰り返す．

- 固視微動: 一点を固視しているときにも起こる微小な眼球運動．

日常生活における眼球運動

日常生活において人間の眼球はせわしなく動いている．人間の網膜は中心部分に視細胞が集中しているため, 物を見るためには網膜の中心を見る対象の方向に合わせねばならない．そのため, サッカードと呼ばれる高速な眼球運動やスムースパーシュートと呼ばれるゆっくり物の動きを追跡する眼球運動等が常に行われている．しかし, 我々はその眼球運動に気付くことはほとんど無い．例えば, 絵を見るときは図 A.5 のように, 作品の中で興味深い部分を発見するとその特徴を短時間注視し, 次に目を動かし, また別の特徴を注視しさらにまた目を動かすということが繰り返される．絵を見るとき注視時間は平均すると約 300ms 程度なので [147]．目を動かすサッカードの時間を 50ms とすると 350ms に 1 回, 1 秒で約 3 回眼球運動が起きている．文字を読むときには目は普通, 直線軌道をとる．読んだものに注意を引かれたり, 書かれている内容や単語を見直したりする場合には目が戻る．わかりにくいところを読む場合には 300ms よりも長く目を留める．一方, 重要な単語や語句を探して目が文章全体を飛ぶこともある．また, 視野の中で何かが光った時には, その光点の点灯がトリガーになりその方向に向けて反射的なサッカードが生じる．そして, 眼球運動は人間自身の運動によっても生じる．人間が方向転換をするときには必ず眼球運動を伴い, 首が回転した場合にも前庭動眼反射によって眼球運動が引き起こされる．このように眼球は, 環境の情報を得るために我々が意識するよりはるかに多くの運動を行っている．

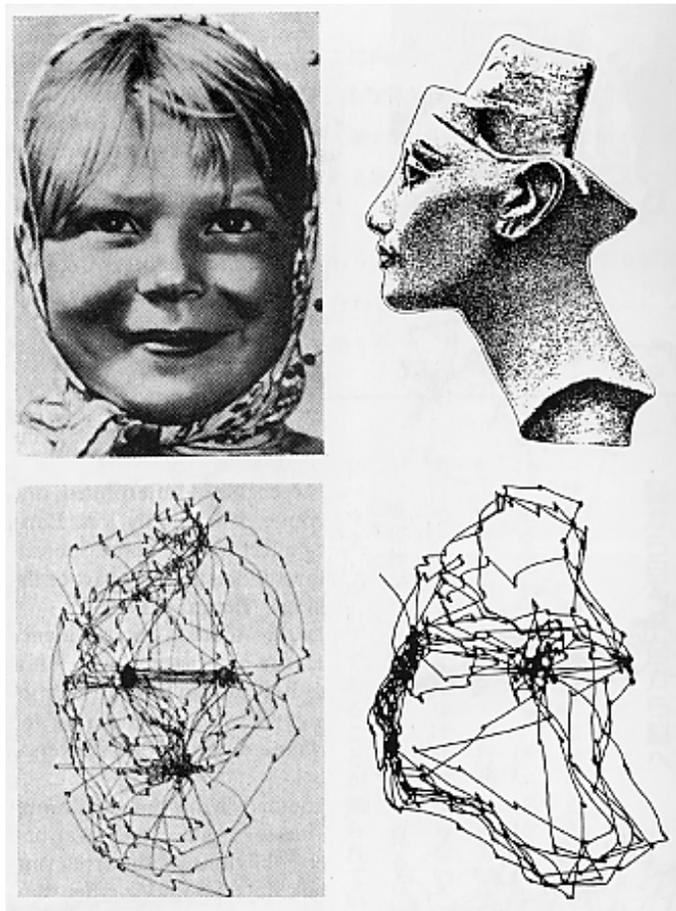


図 A.5 絵や写真を見るとききの視線の動き ([148] より引用)

スムースパーシュートの特徴

スムースパーシュートとは運動する視覚対象を追視するときに生じる随意性の眼球運動である。運動する視対象の像を網膜中心窩に保持するために行われ、追跡眼球運動とも呼ばれる。ウサギのような中心窩を持たない動物では生じない。

静止刺激が一定速度で動き出した場合、それを追視するスムースパーシュートの潜時は 100 ~ 150ms である。この値はサッカードの潜時より短い。この追視は運動速度が約 30deg/s まで可能である。しかし、しばしば視標の動きに追いつかず、その不足分はサッカードによって補われる。サッカードが刺激の位置情報によって生起すると考えられているのに対して、スムースパーシュートは運動視標の速度情報によって引き起こされると考えられている。また、スムースパーシュートが生起するためには必ずしも実際に運動視標が提示される必要はない。イメージされた運動視標や残像を追視したり、暗中で動かした手の動きや音刺激の運動をを追視することもできる。これはスムースパーシュートが脳内に形成された視標運動のモデルに基づいて生起される比較的高次のレベルの眼球運動であることを示唆している。

A.2.3 固視微動の特徴

固視微動は微小眼球運動とも呼ばれ、一点を固視している場合でも常に起きる眼球の微小な不随意運動である。トレモア、ドリフト、マイクロサッカードの三つの成分から構成される。それぞれの特性を表 A.1 に示す [111]。振幅-持続時間特性、及び振幅-速度特性等からドリフトは微小のスムースパースhoot、マイクロサッカードは文字通り微小のサッカードと考えられている。

表 A.1 固視微動の種類 ([111] より引用)

	振幅	最高速度	両眼での相関	特徴
トレモア	平均 15''	10'/sec	なし	30 ~ 100Hz の振動
ドリフト	2 ~ 5'	1 ~ 4'/sec	なし	30'/sec 程度の低速運動
マイクロサッカード	5 ~ 30'	-	あり	0.2 ~ 0.3 秒に一回発生

固視微動の役割を説明したものには様々な説が存在する。静止網膜像が形成されると約 1 ~ 2 秒でその像は知覚できなくなるということから固視微動によって知覚像の消失を防いでいるという説や、いくつかの視細胞上を網膜像が移動することで視力が向上する可能性があるという説がある。また、固視微動中は当然、網膜像が微小に揺れているはずであるが、日常生活においてそれを知覚することは無い。この揺れを知覚しないメカニズムはまだ解明されていないが、ジター錯視 [149] と呼ばれる錯視はこのメカニズムによって起こされると言われ、その錯視生成のメカニズムが注目されている。

A.3 サッカードの特徴

A.3.1 サッカードの動特性

サッカードとは、ある注視点から別の注視点に向かって視線方向をステップ状に変化させる時に両眼同時に生じる高速な眼球運動である。サッカードは図 A.6 にあるように、振幅 10deg で 30 ~ 40ms、20deg で 60 ~ 80ms かかる。30deg 以上のサッカードについても計測されているが、日常生活においては、10deg 前後のサッカードがほとんどである。サッカードは極めて高速な眼球運動で、最高速度は 500deg/sec に及ぶ。図 A.7 にあるように、振幅が大きくなるほど最高速度も大きくなる。また、持続時間についても振幅が大きくなるほど長くなる。ただし、持続時間は振幅とおおよそ比例の関係にあるが、最高速度との関係は非線形である。サッカードを発生させる環境からの信号が入力されてから眼球が動き出すまでの時間は潜時と呼ばれ、およそ 200 ~ 250ms である。振幅が大きくなると潜時は増加する。ただし、潜時はサッカードを誘発させる信号によって大きく異なる。サッカードから次のサッカードまでの不応期は約 200ms であり、また、運動が始まると途中で随意的に運動を止めることはできない。

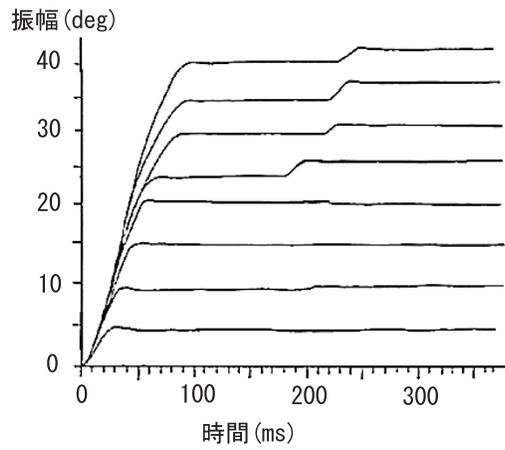


図 A.6 サッカーの振幅と時間の関係 ([111] より引用)

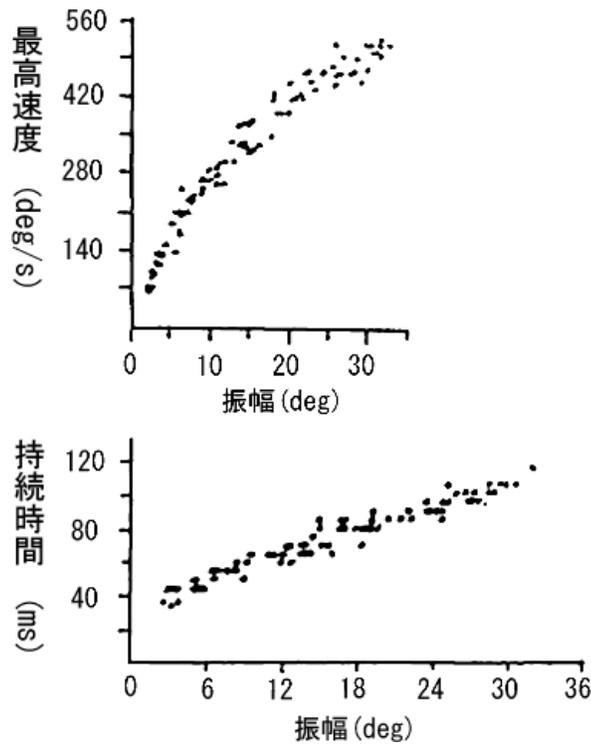


図 A.7 振幅と最高速度, 振幅と持続時間の関係 ([111] より引用)

A.3.2 サッカードの生成機構

サッカードが生成される神経機構の大まかな流れを追うと図 A.8 のようになる [150] .

1. 網膜から視覚情報が取り込まれる
2. 情報が視床を経て後頭葉の視覚野に送られる
3. 頭頂連合野で空間知覚を形成し, 前頭眼野へ
4. これらの上位中枢から脳幹にある上丘を入力
5. 脳幹にある運動神経を活動させる

実際には上記の経路以外にも網膜から直接, 上丘へ繋がる経路や大脳基底核を通過する経路も存在する. 上丘は網膜座標系での物体位置をサッカードの方向と振幅に変換する. そして, サッカード時には上丘中間層のバーストニューロンが高頻度で発火し, 脳幹へ出力を送っている. サルを使った実験では, 中間層を電気刺激すると特定の方向・振幅を持ったサッカードを生じることが確認されている.

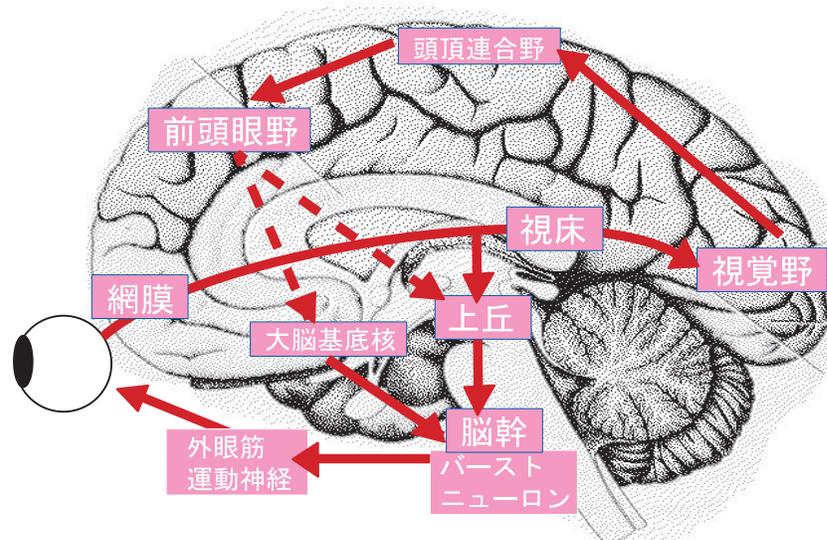


図 A.8 サッカードの脳内での生成機構

A.3.3 サッカードの種類

サッカード前に注視している点 (注視点), とサッカードのターゲットとなる点 (視標) を光らせるタイミングによって, 潜時, 最高速度, ゲイン等の特性が異なるサッカードが誘発されることが知られている [79]. 主なサッカードの種類とその代表的な誘発刺激を図 A.9 に示す.

主なサッカードとして, 視標の現れる位置をあらかじめ予測して起こされた予期性サッカード (図 A.9 左上), 注視点と視標が両方光っている状態から意識的に起こされた視覚誘導内発性サッカード (図 A.9 左下), 注視点が消えるとともに視標が光り, それに誘導される視覚誘導外発性サッカード (図 A.9 右上), 注視点が消えた後ある一定時間経ってから視標が光るエクスプレスサッカード [73][76] (図 A.9 右下) がある. 予期性サッカードは視標の現れる位置をあらかじめ予測しているため潜時 (この場合は注視点が消えてからの時間) が 20ms ~ 80ms と短くばらついている. 視覚誘導内発性サッカードは潜

時 150ms ~ 200ms 程度, 視覚誘導外発性サッカードは潜時 150ms ~ 200ms 程度で視覚誘導内発性サッカードと同程度であるが, 視覚誘導内発性サッカードより最高速度が速く, ゲインが大きい。エクスプレスサッカードは, 注視点の消灯から視標の出現までに時間的ギャップを与えることにより, 潜時が 100ms 前後とギャップがない場合や視標が出現してから注視点が消失する場合よりも短くなっている。ギャップ条件では視標の出現に先立って注視点が消灯することにより, 視標出現よりも前に注意の解除が開始されるため, 反応時間が早くなると言われている [73]。また, エクスプレスサッカードは反復することによって潜時がより安定する [75] ことも知られている。

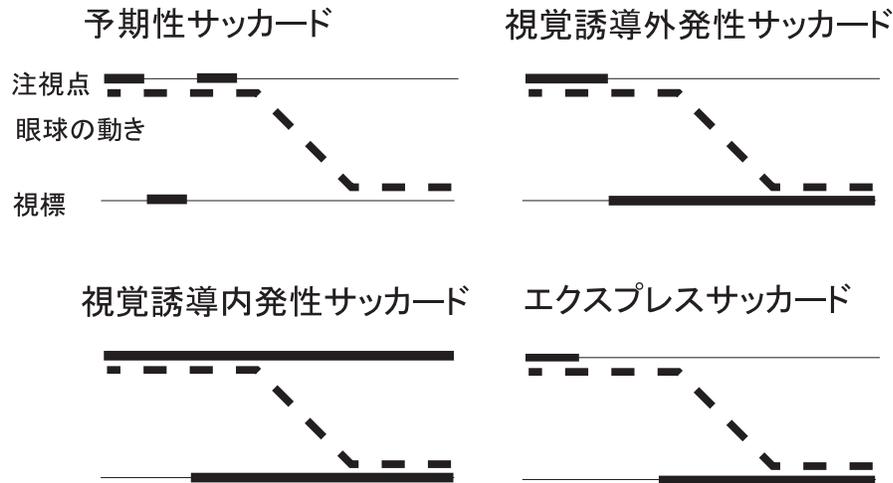


図 A.9 サッカードの種類と代表的な誘発刺激

上記 4 つのサッカードは反射的か意識的かという視点で大きく 2 つに分けられる。

- 意識的サッカード 上記, 予期性サッカードと視覚誘導内発性サッカード
- 反射的サッカード 上記, 視覚誘導外発性サッカードとエクスプレスサッカード

この 2 つのサッカードは異なる神経経路で並列に発生する。それぞれの一般的な特性を表 A.2 に示す [151]。最高速度は反射的サッカードのほうが速く, サッカード間の時間間隔は意識的サッカードのほうが短い。これは, 意識的サッカードはあらかじめ記憶しておいた目標をトリガーとして起きるため, 発生前に必ずしも一定の時間を必要としないことによる。反射的サッカードは発生前にある一定時間 (100 ~ 200ms), 視線を固定する必要がある。不応期中に視線を固定して, 視線の位置と目標の位置の情報を取り入れ, その情報をもとに, サッカードを起こす準備をしなければならない。サッカードの正確さは意識的サッカードでは視標偏位に依存せずほぼ一定である。予期性サッカードも記憶さえ正確であれば正確なサッカードが生じる。一方, 反射的サッカードは視標偏位が大きくなると位置偏差も大きくなる。反射的サッカードは網膜からの視標目標の位置情報によりサッカードを起こすため, 振幅の大きなサッカードを起こす場合は目標を分解能の低い網膜周辺部で捉えることとなりサッカードが不正確になってしまう。

意識的サッカードは, 視標が存在したほうが存在しない場合と比べ最高速度が高く継続時間が短い。注視点の有無による動特性への影響はない [152]。

視覚誘導内発性サッカードは, サッカード前の注視が強いときに正規化最高速度 (サッカードの最高速度を振幅に依存しないように正規化したもの) が低下する。注視点から視標へ意識的にサッカードを起こす場合, 視標が大きくなるほど, 輝度が高くなるほど, 注視点が大きくなるほど, サッカード

の振幅が小さくなり、正規化最高速度が低下する [153]。注視点の直径と視覚誘導外発性サッカードの振幅・正規化最高速度・反応時間の関係は、注視点が大きいほうが上丘の注視領域を広範囲に刺激するため、振幅と正規化最高速度が減少する。一方、注意の解除の際に単に注視が弱まるだけでなく、注意の向けられる空間的範囲が経時的に広がるため反応時間は減少する [154]。

表 A.2 意識的サッカードと反射的サッカードの特性

	意識的サッカード	反射的サッカード
最高速度	小さく継続時間が長い	大きく継続時間が短い
時間間隔	数 10ms	100 ~ 200ms
正確さ	視標偏位によらず一定	視標偏位が大で位置偏差も大

A.4 サッカードと網膜上の変位の補償

A.4.1 サッカード抑制

サッカード抑制の性質

サッカードとは注目の対象を変化させる時に起こる急速な眼球運動であるが、そのときの網膜像は急速に大きく変化する。サッカードは非常に頻繁に行われ、その度に大きな網膜像の変化が生じているにも関わらず、我々が日常生活においてその変化を知覚することは無い。例えば、自分で鏡を見ながら眼球を動かすとき、動いている眼球を見ることはできない。これはサッカード中の網膜像に対する感度が低下している、つまり、サッカード中の知覚は抑制されていると考えられる。この抑制は、様々な物理特性に対して報告されている。例えば、光点の検出閾 [155] や、色度コントラスト [86]、色検出 [156]、空間位置変化検出 [84][157][158]、運動知覚検出 [159] 等が挙げられる。これらの検出閾や弁別閾における上昇は物理特性によっても異なるが、サッカード抑制はサッカード開始の数 10ms 前から始まり、その後徐々に回復しサッカード終了後 100 ~ 200ms で完全に回復する [160]。サッカード抑制の大きさは刺激の物理特性や提示条件に大きく依存し、その大きさは 100 倍以上になるものからほとんど抑制の無い場合までである。例えば、低空間周波数の輝度刺激に対して閾値は上昇したが、等輝度刺激で色みのパターンや高空間周波数における刺激に対する閾値は上昇しないという報告もある [86]。以下に、抑制の大きさを決める主たる要因をまとめる [101]。

- 背景が高輝度である程、抑制効果が大きく、暗黒では抑制はほとんど無いか非常に小さい。
- 刺激の空間周波数が低い程、抑制効果が大きい。
- 輪郭の明瞭なテスト刺激に対しては輪郭線が多い背景パターンは大きな抑制効果を示すが、一様テスト刺激に対しては背景パターンはほとんど影響しない。
- サッカードが大きいほど抑制効果は大きい。

サッカード抑制のメカニズム

サッカード抑制を説明する主要なモデルは以下の 2 つに大きく分けられる。

1. 神経系のメカニズムによる抑制作用による説明

2. サッカー前後の網膜像によるマスキング効果による説明

1 はサッカーに伴う特別な神経活動を仮定するのに対して, 2 はそのような特別な機構を仮定せず, 眼球運動に伴う網膜像の変化のみで説明する.

神経系の抑制モデルではサッカー中の網膜像抑制の信号源として外眼筋の動きによる筋受容器の信号, 及び眼球を動かすための外眼筋に送られる信号のコピーの2種類の説が考えられ, 前者は求心的信号によるので in flow 説, 後者は遠心的信号によるので out flow 説と呼ばれる. in flow 説はサッカー抑制が眼球が動き始める前から始まることを説明できず, また眼球を指で動かしたときに抑制が生じないことから不適切である. out flow 説ではサッカー抑制の大きさが順応レベルなど刺激条件に強く依存することを説明することは難しいが, サッカー時と, サッカー中に見られる網膜像をシミュレーションした画像を提示した場合とでは抑制の特性が異なりという報告があり [161], 抑制が脳内のなんらかの信号に起因していることを強く示唆する. 抑制が生じている処理段階に関して, Thilo らの実験結果 [162] は, サッカー抑制が初期の視覚処理段階で生じていることを示唆している. また, ネコやサル Lateral Geniculate Nucleus(LGN) における単一ニューロン記録の結果から, サッカー抑制に LGN が大きく関わっていることが明らかにされている [163][164]. ただし, サッカー抑制によって生じた信号が MT/MST 付近の領域まで影響を及ぼしているという報告もあり [165], サッカー抑制に明確に対応している処理段階は特定されておらず, 様々な処理段階に関与している可能性が高い.

マスキング効果とは2つの刺激が連続して提示されたとき, 一方が他方の知覚を損なうことを言い, 影響を受けた刺激はもう一方にマスクされたという. サッカーに伴う網膜像は, 鮮明な像 流れた不鮮明な像 鮮明な像の順に変化する. 通常サッカーの持続時間は20~50ms程度であり不鮮明な像が網膜上に存在する時間は, その前後の鮮明な像の存在する時間に比べて非常に短い. 不鮮明な像はマスキング効果によって容易に削除され得る. 事実, マスキングが不鮮明な像を知覚させない要因であることを示す以下のような実験が報告されている [42]. サッカーの開始とともに暗黒の室内を照明し, サッカー終了後ある時間まで照明を続け, 再び室内を暗黒にするという実験条件を設定し, そこで知覚される像について調べる. サッカーの終了後20ms以内に消される条件では流れた不鮮明なシーンが観察されるが, 終了後40ms以上継続すると鮮明な像のみが知覚されることを見出した. この結果は, サッカー後の網膜像からマスキング効果によりサッカー中の不鮮明像が見えない事実を説明できる可能性を示している.

サッカー抑制が生じるメカニズムとして, 大きく分けて神経系の抑制作用による説明とマスキング効果による説明がこれまでなされているが, 上記のようにそれぞれのメカニズムの可能性は示されている. これらのメカニズムは必ずしも排他的に生じるものではなく, 二つメカニズムの効果が刺激の特性や提示条件により変化しながら生じていると考えられる.

A.4.2 サッカーにおける視野の安定

サッカーの前後では網膜像が大きく変位するがそれにも関わらず, 我々は安定した視覚像を得ている. その要因の1つはサッカー中の不鮮明なが知覚されないというサッカー抑制による働きといえる. しかし, 視野の安定を得るためにはそれだけでは十分とは言えない. サッカー中の像が全く処理から除外されたとしてもサッカー前後における網膜像の変位は確実に存在する. そして, それは眼球静止時では仮現運動として知覚される性質のものである. ということは, このような網膜像の移動を外界の運動として知覚することを防いでいる何らかの機構が存在するはずである.

視野の安定を説明する典型的なモデルとして相殺説 [166][167][168] が挙げられる. 相殺説とは, 図 A.10 にあるようにサッカーのための制御信号のコピーであるコロラリ放電と網膜から送られる

画像の位置情報を比較し対称の位置座標を補正していると考えられる。この相殺説は多くの研究者に受け入れられており、後述のサッカード時のフラッシュの定位誤りに関する説明にも採用されている。

また、視野の安定は相殺説のような座標変換以外の要因としては、動き知覚の抑制が挙げられる。位置の変化だけでなく動きに対してもサッカード抑制が働いているため、安定な視覚像が得られると考えるものである。ここに帰着する場合は、相殺説のような座標変換は必要ないことになる。動き知覚の抑制がサッカードの視野の安定に関わっているようであるが [159]、それだけで全てが説明できるわけではない。サッカード前後の情報統合に関して、Davidson らの実験 [169] は、サッカードの前後で位置情報は何らかの形で統合されるが、その形態としては網膜像の重ね合わせで得られる種類のものではないことを示唆している。また Irwin らは、この統合は視覚的持続で得られるような重ね合わせ的統合とも異なるということも指摘している [170]。

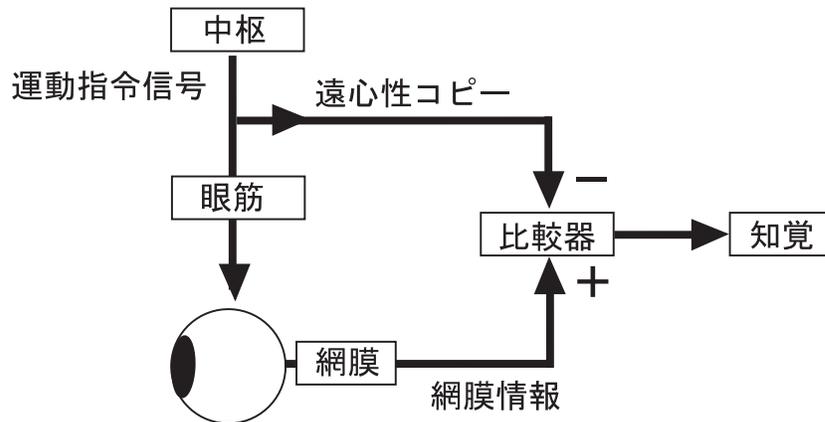


図 A.10 相殺説

A.5 サッカード時の空間知覚特性

A.5.1 サッカード時のフラッシュ刺激に対する定位

視覚システムは何らかの方法でサッカード前後の物体の網膜上の位置変化を補償している。これは位置の恒常性 (Space Constancy) と呼ばれ、一般に、脳内の眼球運動信号を利用して網膜上の位置変化をキャンセルすることによって実現されていると考えられてきた (相殺説)。

これまで、このサッカード前後の位置の恒常性を実現しているメカニズムを調べるために、サッカード周辺の様々な時間にフラッシュ刺激を提示することによって調べた研究が多く存在している [37]- [63]。特に暗闇の中で提示されたフラッシュ刺激 (光点が数 ms 非常に短い時間提示される刺激) を定位する課題 [37]-[50] [54] [56] [57] では、定位のための手がかりは環境には存在しないため、サッカード時の定位メカニズムを直接的に示唆するものと考えられてきた。サッカード周辺の時間に暗闇の中でフラッシュ刺激を定位すると、ある傾向を持って誤定位することが知られている [44] [45] [46]。図 A.5.1 はサッカード開始時間に対してフラッシュの提示された時間 [ms] に対して誤定位の大きさ [deg] をプロットした定位誤りの例である。-4deg から +4deg へのサッカードが行われ、0deg にフラッシュが提示されたとする。時間軸上、サッカードが行われている時間帯は時間軸 0 ~ 50ms (黒枠) のおよそ 50ms である。一般に、光点がサッカード前に提示されるとサッカードと同方向に誤定位され、サッカード中は誤定位の位置が徐々に変化し、サッカード終了後にはサッカードと逆方向に

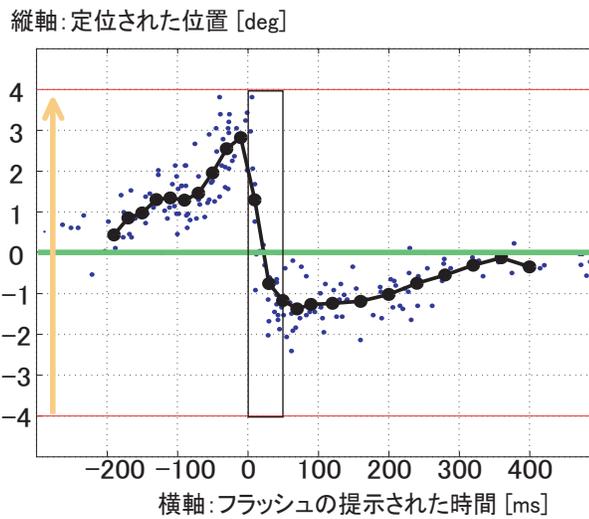


図 A.11 サッカー前中後における空間定位誤りの時間変化（再掲）

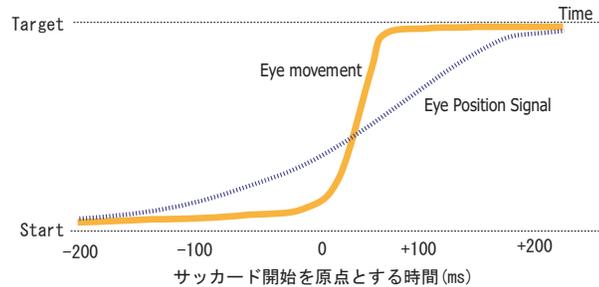


図 A.12 知覚上の眼球位置情報

誤定位される．サッカーの開始，終了時刻付近で定位誤りの絶対値が最大となる．この現象は一般に眼球運動位置情報と網膜情報の相殺説によって以下のように説明される [43] [44][69]．定位対象の知覚上の位置と実際の物理位置を式で表すと

$$P^p = E^p + R^p \quad P^r = E^r + R^r$$

と表せる． P は対象の位置， E は眼球位置情報， R は網膜からの相対位置情報を表し，添え字 p は知覚上の情報， r は実際の物理的な情報とする．上述の脳内での眼球位置情報は E^p である．このとき，網膜からの情報は知覚上と物理的な情報は等しい， $R^r = R^p$ とすると，知覚上の定位誤り $P^p - P^r$ は $E^p - E^r$ となる．つまり，知覚上の眼球位置情報 E^p が物理的な眼球位置情報 E^r と異なることから知覚上の定位誤りが形成されると考えられる．定位誤りから予測される知覚上の眼球位置情報は，図 A.5.1 のように，実際のサッカーに先立ち，サッカー開始の 100～200ms 程度前からサッカー方向に変化し始め，その変化は実際のサッカーと比べて緩やかであり，サッカー開始時付近ではその差が最大となり，サッカー後 200ms ほど遅れて追いつくことになる．

これまで，フラッシュ刺激を利用し，位置の恒常性のメカニズムについて調べられてきたが，フラッシュ刺激自体はそのメカニズムを調べるには適した刺激とは必ずしもいえない．フラッシュ刺激はサッカー時でなくても，網膜上の他の運動情報によって位置情報が修飾を受けることが知られて

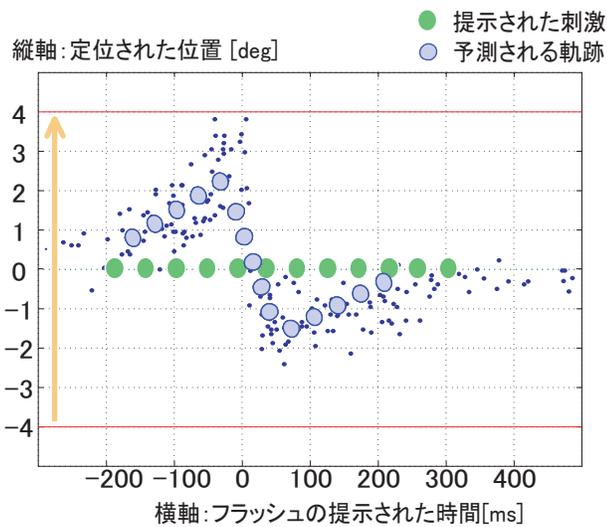


図 A.13 フラッシュの定位誤りから予測されるフリッカー刺激の知覚軌跡（再掲）

いる [171][172][173][174][175][176][177][178][179][180][181][182] .そのため, 図 A.5.1 のような定位誤りも, サッカード時の位置の恒常性のメカニズムを表したわけではなく, フラッシュ刺激自体の特性を含んでいるように考えられる. 実際, いくつかの先行研究ではフラッシュ刺激と連続点滅刺激の定位の特性が異なるという報告がなされている [41][43][49][56][42]. 例えば, Schlag らはサッカード前に連続点灯する刺激を提示しても, 定位誤りが起きず, 一点に知覚されるという報告をしている [49]. Cai らによる, サッカード前に連続点灯刺激の消灯とともにフラッシュ刺激を提示し, フラッシュ刺激のみ, 実際に提示された位置と異なる位置に知覚されるという報告も存在する [50]. また, Sogo らは二点のフラッシュ刺激をある ISI (Inter-Stimulus Interval) で提示したとき, 二点間の距離は ISI が 120ms 以下であると網膜上の距離に一致し, それ以上長いと二点をそれぞれ個別のフラッシュとして定位したときの距離に一致する. このように, 普段我々が目にするような連続点滅, 連続点灯する刺激の定位に関しては, 単純にフラッシュ刺激の定位誤りから予測できるものではない.

A.5.2 サッカード時の連続点滅刺激に対する定位

これまで, サッカード中に提示される時間幅を持った光点刺激に関する研究は少ない. Hershberger は, サッカード中に 1つの光点を 120Hz で連続点滅させた場合, サッカードと逆方向に順に光るサッカード振幅の半分程度の大きさを持った点列が知覚されると報告している [20][21][22][23]. しかし, この知覚される点列の眼球運動との時間関係やその定位位置についてはこれまで研究がなされていない. ある時間幅を持って提示される光点刺激の知覚に関して, これまでの研究から 2つの仮説が考えられる.

1. 時間幅を持った光点刺激をフラッシュ刺激の集まりと捉え, 光点刺激のそれぞれを独立に定位したと考え, 連続点滅する光点の知覚軌跡は図 2.2 のような瞬間提示される光点の知覚軌跡の時間変化を結んだ逆 S 字状の像が知覚される
2. 時間幅を持った光点刺激をフラッシュ刺激を一つのまとまった像として捉え, サッカードによって広がった網膜上の像と同様の像が知覚される

前者の仮説では，時間幅を持った光点刺激をフラッシュ刺激の集合として捉え，それぞれの光点を独立に定位していると考える．そこから予測される知覚像の時間軌跡はフラッシュ刺激の定位の時間軌跡に沿ったものになる．例えば，図 A.13 のようにサッカード前後を含めて光点が提示されたとすると，予測される知覚軌跡は逆 S 字型の軌跡になる．サッカードの前後の時間帯では，サッカードと同方向に，サッカード中ではサッカードと同方向に移動しているはずである．この場合，知覚される長さはサッカード振幅の約半分であり，これまでの報告と一致するが，サッカード前後の移動に関してはそのような主観的知覚は報告されていない [20][21][22][23]．一方で，後者の仮説ではサッカード中のみ光点刺激は網膜上で点列として広がり，サッカードと逆方向の像が知覚されることが予測される．このことは，主観的報告と一致するが，知覚される形態に関しては大きな食い違いがある．もし，網膜上の長さがそのまま知覚されいるとするならば，サッカード振幅と同じ長さの点列が知覚されるはずであるが，実際にはサッカード振幅の約半分の長さが知覚されている．また，この仮説における定位メカニズムについてはこれまでの研究から予測することができない．

A.5.3 サッカード時の連続点滅刺激による 2 次元像の提示

前述のように，サッカード中に一点の光点を連続点滅させると，点列に広がることが知られている．この現象を芸術に応用した例として，光源を縦一列に並べ，2 次元イメージを横からスキャンする形で高速点灯させると，その光点列の前でサッカードを行うと 2 次元イメージが知覚されるという作品がある．サンフランシスコの Exploretorium* やボストンサイエンスミュージアム† に展示されている．図 A.14 はボストンサイエンスミュージアムに設置されているものであり，図 A.15 はサッカードによって知覚される像である．

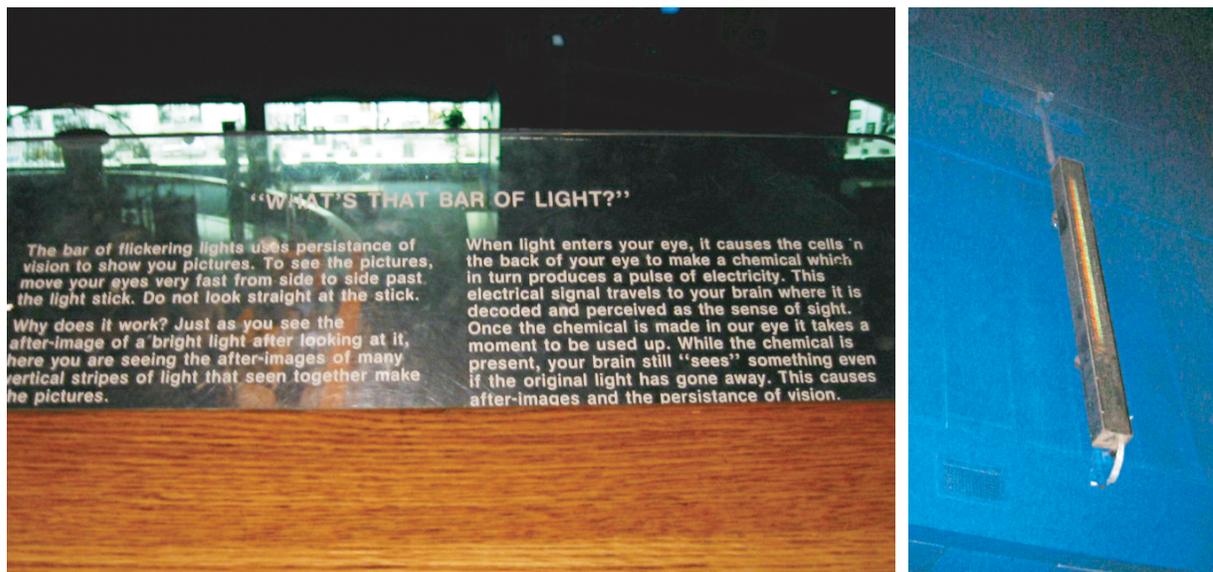


図 A.14 ボストンサイエンスミュージアムの展示 (左:原理の説明 右:作品)

* <http://www.exploratorium.edu/>

† <http://www.mos.org/>

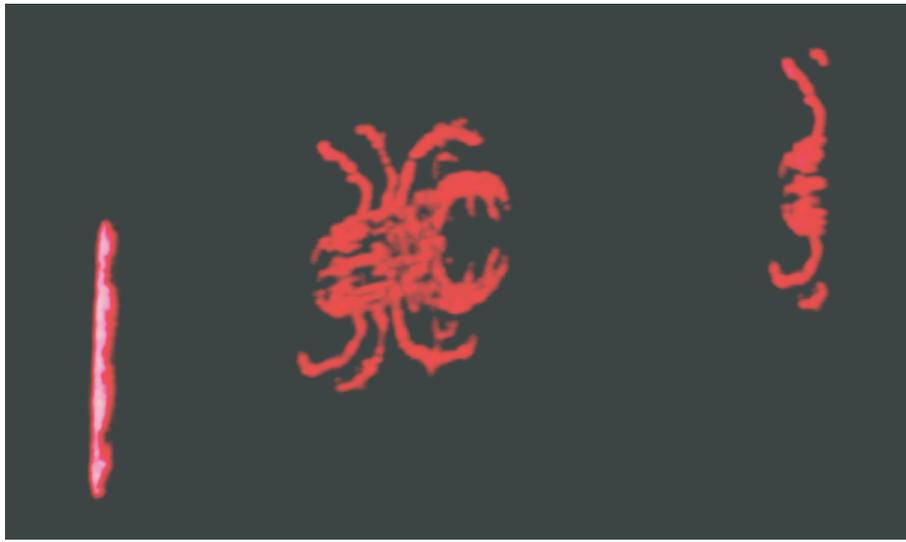


図 A.15 作品によって知覚されるイメージ

A.5.4 サッカー時の空間圧縮

これまで、サッカード時に暗闇の中で光点を提示した際、ある傾向を持って定位誤りが生じることが知られている。また、ある程度明るい状況下、構造化された背景の中でフラッシュ刺激を定位すると、視野内の提示位置によって異なる時間変化をし、あたかも視野全体がサッカードターゲットに向かって圧縮する (Saccadic Compression) ように知覚されることが報告されている [37][47][51][52][53][55][58][60][61][62][63]。サッカードターゲットより向こう側に配置された刺激に対しては、サッカード直前約 50ms の時間を最大に、サッカードターゲット側 (サッカード方向とは逆の方向) に定位される。そして、サッカードターゲットより注視点に近い側に配置された刺激に対しても、サッカードターゲット側 (サッカード方向と同方向) に定位される。この現象は、特にサッカード後に視覚参照刺激が存在することが重要であるといわれている [53]。Morrone らは、サッカード時に生じる視覚像をシミュレーションした画像を生成し、それらを注視している被験者に呈示したところ、このようなサッカディック・コンプレッションのような定位誤りは生じなかった [52]。この結果から、サッカディック・コンプレッションはサッカード時に生じる情報処理によって引き起こされることが示唆される。このサッカディック・コンプレッションは (Lateral Intraparietal Area, LIP) のニューロンとの関係が示唆されている [183][184]。LIP の一部のニューロンは、サッカード前にその受容野がサッカードターゲット付近に移動し、その移動の受容野位置による時間差によってコンプレッションが生じているという説もある [63]。

付録 B

運動情報とその属性情報の統合に関する概説

本章では、運動知覚メカニズム及び運動情報と形態・色等の運動物体の属性情報の統合に関して概説する。

B.1 運動刺激の分類

物理学的に運動は、物体の位置変化を時間で割ることにより算出可能であり、時間と位置という基本属性から派生した 2 次の情報である。しかし、人間の知覚システムでは、運動情報は初期視覚情報処理において直接抽出されるより属性の一つであることがわかっている [185]。

運動刺激は大きく分けて、輝度の変調を伴う 1 次運動 (First-order Motion) と輝度の変調を伴わない 2 次運動 (Second-order Motion) に分けられ、それぞれ異なるメカニズムによって検出されていると考えられている [186][187][188] (ただし、刺激の分類と検出メカニズムの分類は厳密には一致するものではない)。1 次運動は輝度情報自体が変化するので、時空間プロット上で方位をもった直線として直接表現される量である。また、その運動速度は直線の傾きとして表現される。Adelson & Bergen はこれに基づいて時空間上で傾きをもったフィルタとして運動検出器をモデリングした [189]。2 次運動は、コントラスト変調や時空間周波数等によって定義される運動であり、時空間プロットでは単純に検出することはできない。このような 2 次運動は、注意による特徴点追跡によって検出されているということが示唆されている [190]。

B.2 運動検出メカニズム

B.2.1 運動検出モデル

運動検出器の研究の中で最も初期のものは、Reichardt[191] による蠅の運動検出器モデルの研究である。このモデルは、運動は時空間プロット上で傾きとして表現されるため (図 B.1(a)(b))、運動検出は時空間上で傾きを検出するような受容野が実現できれば可能である (図 B.1(c))、という考えに基づいている。具体的には、図 B.2(a) のように、1 つのレセプターからの信号に時間的遅れ δt を生じさせ、もう一方からの出力と掛け合わされることで実現される。すなわち、2 つのレセプター間の距離 δX を移動するのにかかる時間が δt の運動に対しては、2 つのレセプターからの出力は全く同一となり、出力は最も大きくなる。そして、図 B.2(b) のように、180 度異なる運動方向選択性を持った 2 ユニットの出力の差を計算し、最も大きな出力の運動検出器から運動信号を検出する。このモデルが現在あるいくつかのモデルの原型であるといえる。現在、初期の運動検出器のモデルは数種類のものが提案されているが [189][191][192][193][194][195]、それぞれ、数学的にはほぼ同等であると言われている [196]。図 B.3 に代表的なモデルの概略図を示す。

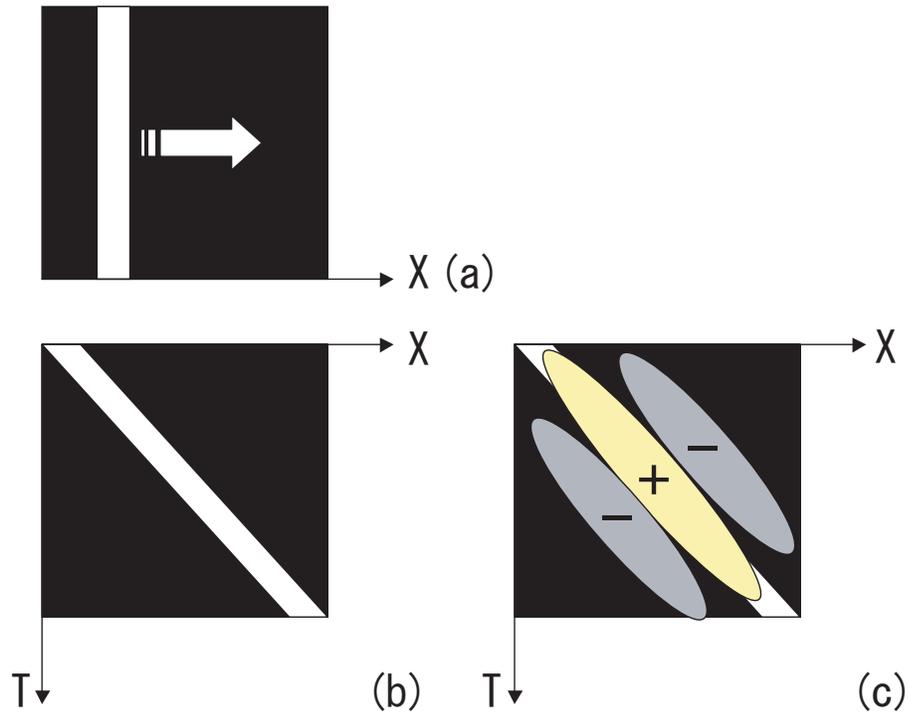


図 B.1 (a) 物体の運動 (b) 運動の時空間プロット (c) 運動検出に最適な受容野

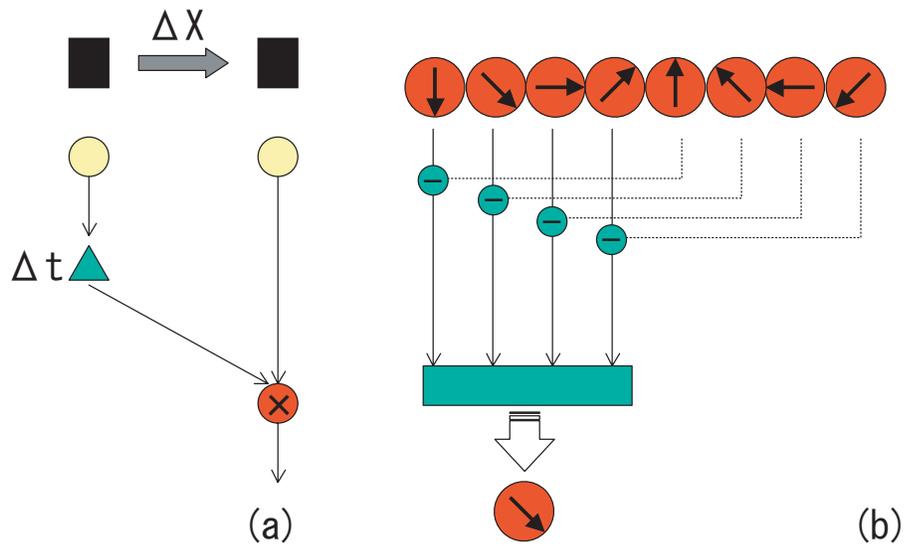


図 B.2: Reichardt 相関モデル (a) 時間遅れを導入した速度検出ユニット (b) 180 度異なるユニットの差を取った運動方向検出

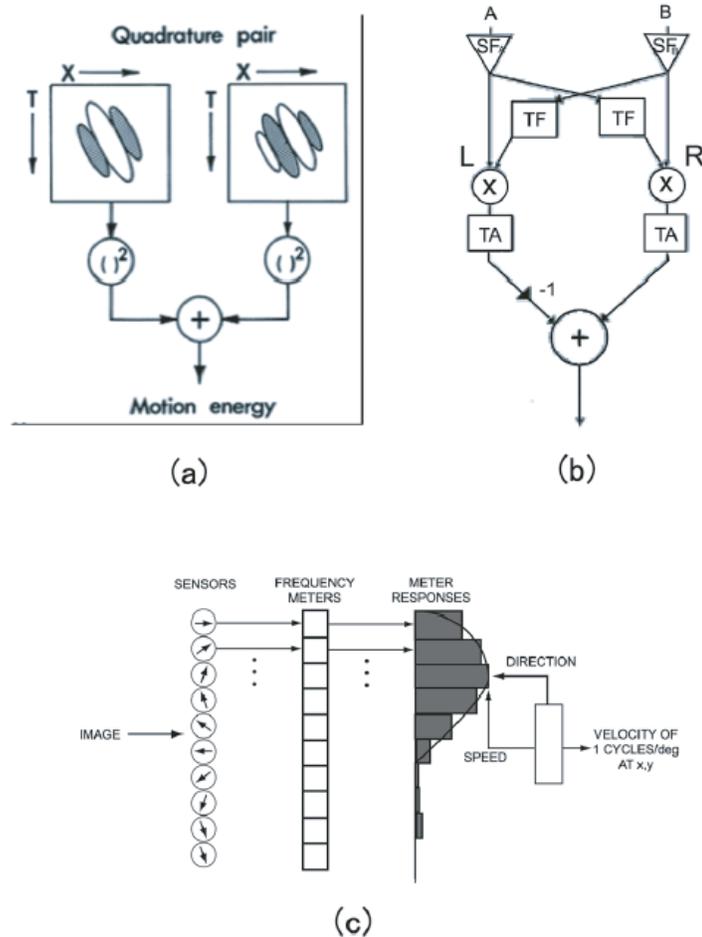


図 B.3: 初期的運動検出モデル (a)Adelson & Bergen のモデル ([189] より引用) (b)van Santen & Sperling のモデル ([192] より引用) (c)Watson & Ahumada のモデル ([193] より引用)

B.2.2 神経生理学的検証

これまでの生理学的な研究において多く認められていることは、V1 における運動検出はある方位、あるいは方向に沿ってのみ行われるということである。一方で MT 野の細胞は成分の運動には関係なく、パターン運動の方位に選択性を持っている事が知られている [197][198]。すなわち、2次元刺激の運動は2段階で検出されると考えられる。第1段階目ではある空間方位に沿ってその方位の運動成分の有無が検出される。次に、2段階目でそれらの出力が2次的に統合され、2次元刺激の運動の方位・速度が検出される。

B.3 運動と空間属性の統合

B.3.1 運動と位置

これまで、運動物体の定位に関して、系統的な誤差が起こることが知られている。運動物体の動き始め位置が運動方向にずれて知覚される Frohlich 効果 [199][200] や運動物体の消失位置が運動方向にずれて知覚される Representational Momentum[201] と呼ばれる現象が報告されている。また、このような定位位置の変化は、運動時だけでなく運動残効時にも生じる [202]。

B.3.2 Flash lag

近年ではFlash lag と呼ばれる現象についての議論が盛んに行われている [171][172][173][174][175][176][177][178][179][180][181][203][204]。Flash lag は連続運動物体に対して瞬間提示（フラッシュ）した物体の相対位置は運動物体に対して時間的に遅れた位置に定位されるという現象である。例えば、図 B.4 のように、連続的に回転するバーに対して一直線になるように直線部が瞬間提示されると、回転体が進んで（フラッシュ部が遅れて）定位される。この現象に関しては、これまで以下のような性質が報告されている。

- 速度の変化：速度が変化すればラグの量が大きくなる [173]（図 B.5 参照）
- 運動物体の輝度が大きくなるとラグは大きくなる [175]
- フラッシュの輝度が小さくなるとラグの量は大きくなる [175]
- フラッシュと同時に運動が終わる：ラグなし [176]
- フラッシュと同時に運動が始まる：ラグあり [176]
- フラッシュ後の運動の変化:直後にリバースするとラグは小さくなる 80ms 以降は関係ない [176]
- いつフラッシュが現れるか予測できるとラグは大きく減る [205]
- 回転物体の回転を停止と、フラッシュのテンポラルオーダージャッジメントをすると正しいく、回転しているバーの明るさを変えても同じ [176]

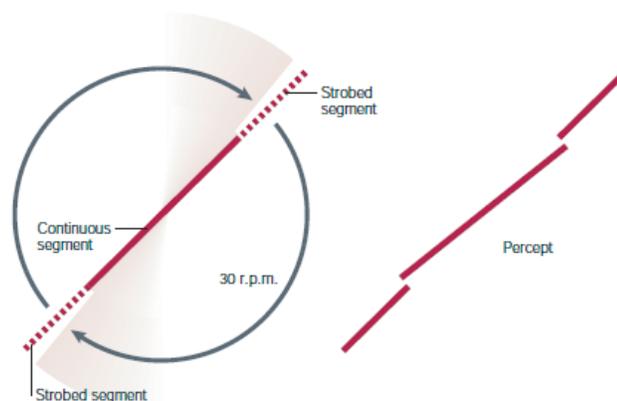


図 B.4 Nijhawan1994 の実験 ([203] より引用)

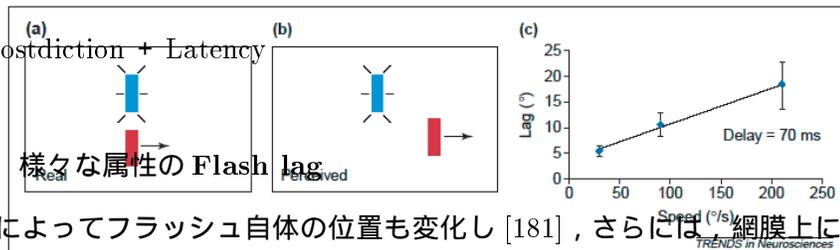
図 B.5 Flash lag のラグ量と運動速度の関係 ([204] より引用)

B.3.3 Flash lag のモデル

Flash lag のメカニズムモデルとして、大きく以下の4つが挙げられる。Motion Extrapolation モデル [173] (図 B.6 左上) は、フラッシュ前の運動物体の情報を使って位置の先読みをしている、と考えるモデルである。しかし、フラッシュ前の運動情報を使用する Motion Extrapolation モデルでは、フラッシュ後の運動による変化や運動と同時にフラッシュした場合が説明できない。Latency difference モデル [175][180] (図 B.6 右上) は運動刺激とフラッシュ刺激の潜時差によってラグが生じていると考えるものである。確かに、初期視覚においては運動刺激の処理時間はフラッシュの処理時間よりも短いことが知られているが、運動・フラッシュ刺激のテンポラルオーダージャッジメントが正確であることが説明できない。Postdiction モデル [176] (図 B.6 左下) はフラッシュの後の速度をアベレーシングすることによって位置を決定していると考えられるものである。フラッシュ後およそ 80ms 後くらいまでの情報を使用していると報告されている。また、潜時差を含めた Postdiction モデル (図 B.6 右下) も考えられる。

- Motion Extrapolation, Nijhawan (1994)
- Latency difference, Purushothaman (1998)
- Postdiction, Eagleman (2000)
- Postdiction + Latency

B.3.4 様々な属性の Flash lag



運動によってフラッシュ自体の位置も変化し [181]、さらには網膜上に速度成分が無くてもラグが生じることが報告された [179]。Schlagらは頭部前方にLEDを固定し、上半分は常につきっぱなし、下半分はフラッシュするようにする。頭部はサインカーブで横に動かす。このとき2つの光点の位置を報告すると、連続に光っているほうが進んでいるように知覚される。また、同様のことは自身の回転による前庭感覚によっても生じる [206]。フラッシュするよってバインドされる属性が形態 [207][208] や色 [209] であってもラグは生じる。このように、物体の運動オンセット、オフセット、フラッシュのような瞬間的なイベントに対する処理と運動中の「運動している」という認識をもってトラッキングをしている物体に対する処理は異なることが考えられ、Flash lag は運動と定位というよりフラッシュ刺激自体の特性を計測しているとも考えられる。

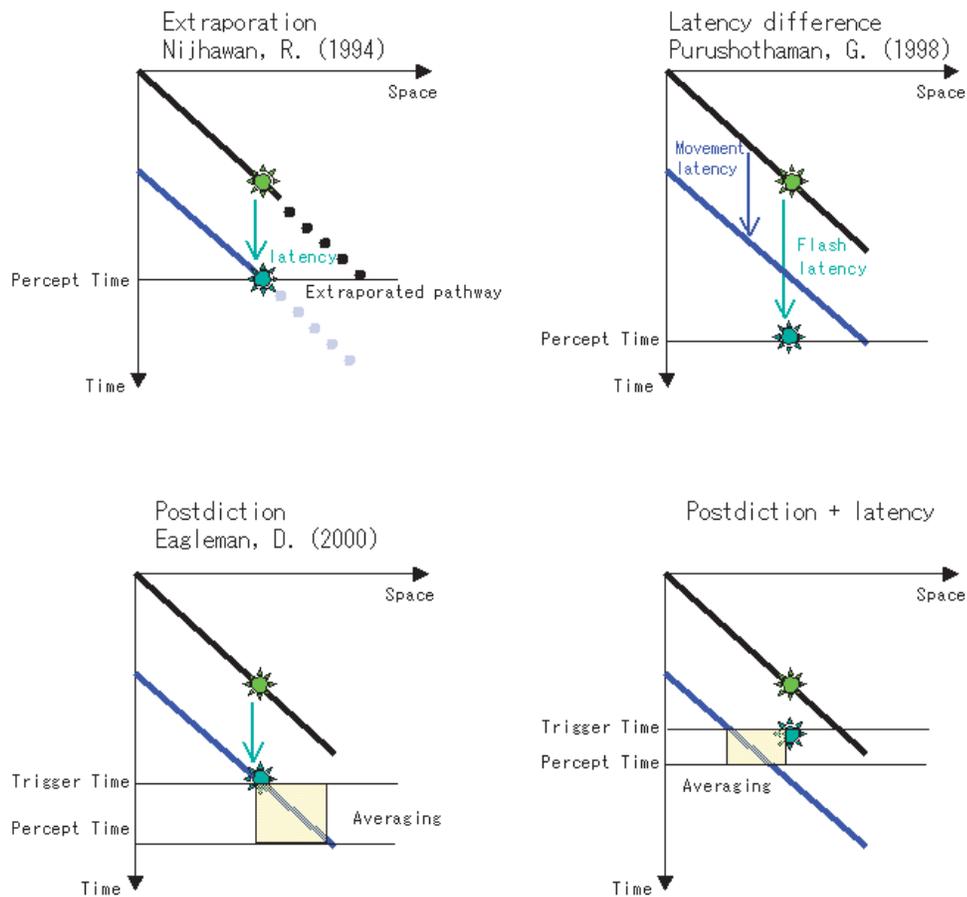


図 B.6 Flash lag のモデル

B.3.5 色運動非同期錯視

Flash lag は、フラッシュ刺激と運動刺激の属性バインディングのずれ現象であったが、そのような属性バインディングのずれは周期的に変化する属性同士でも生じる。色運動非同期錯視と呼ばれ、色の変化と運動方向の変化が同時に起こったとしても、それが同時に知覚されないという現象である [210]。色の変化と速度方向の変化のタイミングが、速度変化が約 100ms 早く変化したとき色と速度変化が同時に知覚される。特に、変化が高周波 (250ms, 2hz 程度) のときにその現象が生じる。その現象の原因として、色と速度の処理時間の差が考えられるが、TOJ (Time Order Judgement) を行うと正確に行うことができる。(高周波だと計算された処理時間が大きくなることはない) この色運動錯視は 1st オーダー (色変化) と 2nd オーダー (速度方向の変化) の知覚を行う上での錯視であり、色と運動という属性の処理時間の違いではない。西田らは以下のような説明をしている [211]。

問題なのではなくどこに対してジャッジメントをするかの問題である。例えば、処理時間は日本とイギリスが衛星放送を使って時間遅れでアンサンブルをするようなものであり、どちらが早く歌いだすかは衛星回線の速さによる。それぞれの日本とイギリスは同じところにいるが、どちらのほうが早く変化するかは、例えば、動詞 (Verb) を使って判断する。同じところからしゃべり始めるが日本語の動詞は最後に使われるから日本のほうがあとに聞こえる。時間の相対判断をするときには必ずどこかにマーカーをつけるが、それをどこにつけるかの問題である。1 次運動同士の比較はただの相関だが、1 次と 2 次の関係付けはアテンションが必要となる。

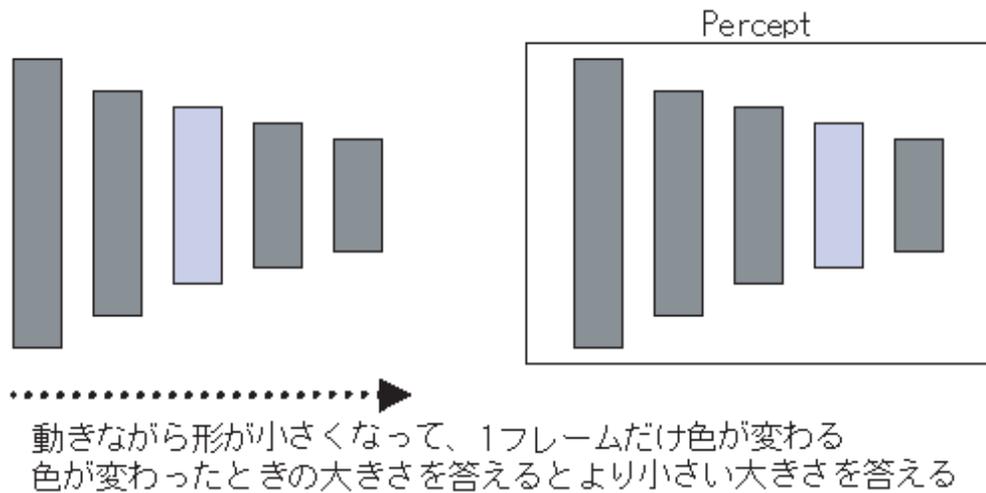


図 B.7: 形態のフラッシュラグ. 運動しながら形態が変化する. 青色であったときの形態を答えると実際にはない青色の大きさを答える.

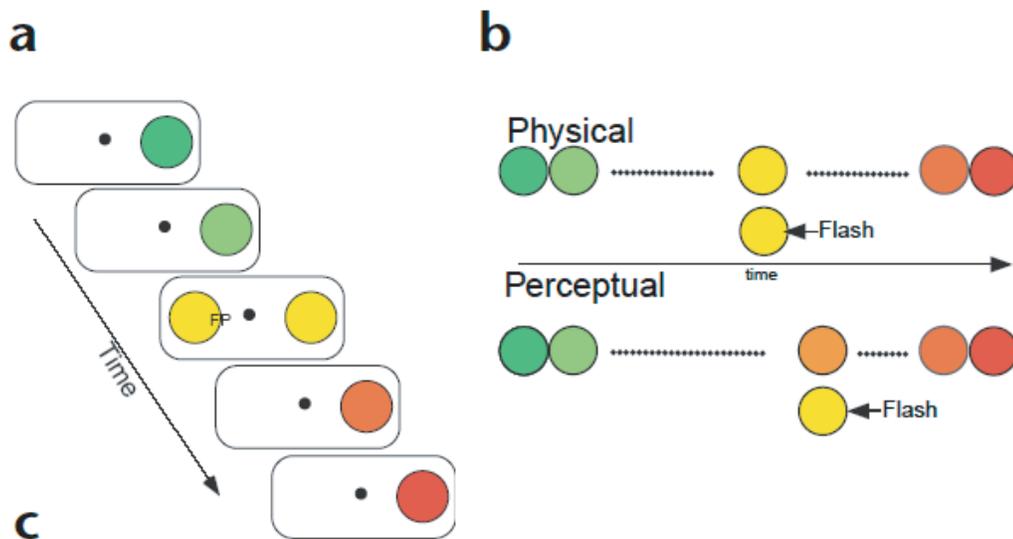


図 B.8: 色のフラッシュラグ. 2つのディスクがあって片側は連続的に赤から緑に変化し, もう片方はフラッシュ. どちらが緑っぽいかわかる. 時間に換算すると 392ms ものラグがある ([209] より引用)

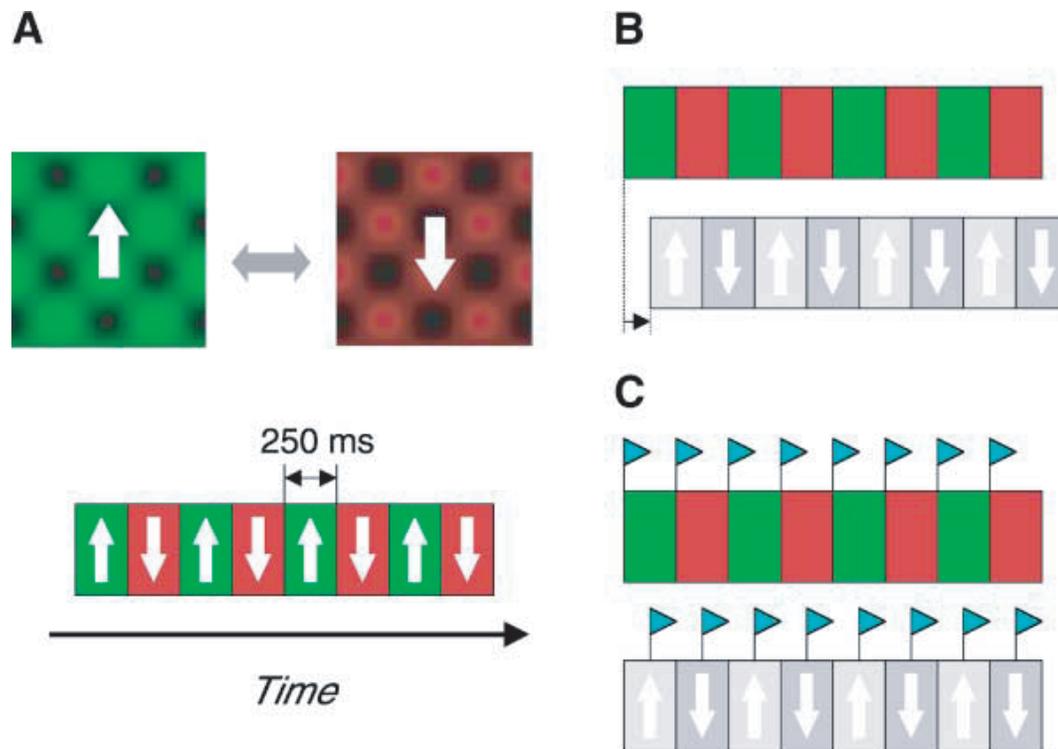


図 B.9: A:Color Motion Asynchrony の概念図 B:同時にそろって見える色と運動のずれ C:マーカー仮説 ([211] より引用)

付録 C

瞬目時の知覚特性を利用した情報提示手法

本論文では、眼球運動、運動知覚を利用した情報提示手法について論じてきたが、本章では瞬目を利用した新たな情報提示手法を提案する。瞬目は眼球運動ではないが視知覚形成に密接な関係がある運動である。提案する手法では、瞬目時の知覚特性を利用して、瞬目をしていない状態と瞬目の瞬間で異なる画像を提示することが可能である。

C.1 瞬目の特徴

瞬目（まばたき、Blink）は人が覚醒しているとき、1分間に平均15回前後、無意識に起こる両眼の眼瞼の速い開閉運動である。瞬目の機能的役割としては角膜の乾燥を防ぎ、眼を保護するという生理的・防御的機能がまず挙げられるが、それだけではなく心理学的要因や眼球運動にも密接な関連がある[24]。

瞬目は普段無意識に起こる自然瞬目（Spontaneous Blink）、意識的に行うことのできる随意瞬目（Voluntary Blink）、角膜や眉間への機械的刺激や閃光等によって誘発される反射瞬目（Reflex Blink）の3つに大別できる。個々の瞬目の持続時間は自然瞬目で350～450ms、随意瞬目で250msと随意瞬目のほうが短い。自然瞬目・随意瞬目ともに閉瞼時より開瞼時のほうが遅い動きであり、特に自然瞬目の閉瞼時後半はかなり緩徐になる。

瞬目が起こると閉瞼時に眼球が3deg程度、外上転する。これはBell現象と呼ばれ、眼輪筋、上直筋の共同収縮によるものである。また30deg以上の振幅の指向性の運動では運動の開始に付随して瞬目が起こりやすい。

瞬目時には図C.1のように、視覚の抑制が生理的に働き、視覚の感度が低下する現象が見られる。またその特性は、サッカーボール時に見られる視覚抑制とその特性が類似している。視覚の感度低下は瞬目の開始前約100msから始まっており、上眼瞼が瞳孔を覆う（瞬目の瞬間）30～40ms前に最大値に達し、瞬目開始から100～200msで回復する。視覚抑制は自然瞬目、随意瞬目、反射瞬目のどの瞬目でも起こる。この抑制は背景輝度を暗くしたほうが感度低下は大きく観察され、この結果は色チャンネルではなく輝度チャンネルで抑制が起こっていることを示唆する。また、低い空間周波数の刺激のほうが抑制されやすい。さらに瞬目時に視覚が遮られることを自覚しないのは、視覚抑制とマスキングの効果による説が一般的であるが、視覚遮断が起こる寸前の視覚情報を超短期記憶として補充することによって視覚が暗転することを防いでるともいわれている。

C.2 提案する情報提示手法の概要

瞬目をした瞬間だけ、通常見えているイメージと異なるイメージが見えるという、人間の瞬目によって見えるイメージが変化する情報提示手法を実現する。これまでの情報提示手法は図C.2のように、異なる画像を高速に継時的に提示し、それらを1つの画像に見せることを提示原理としてきた。

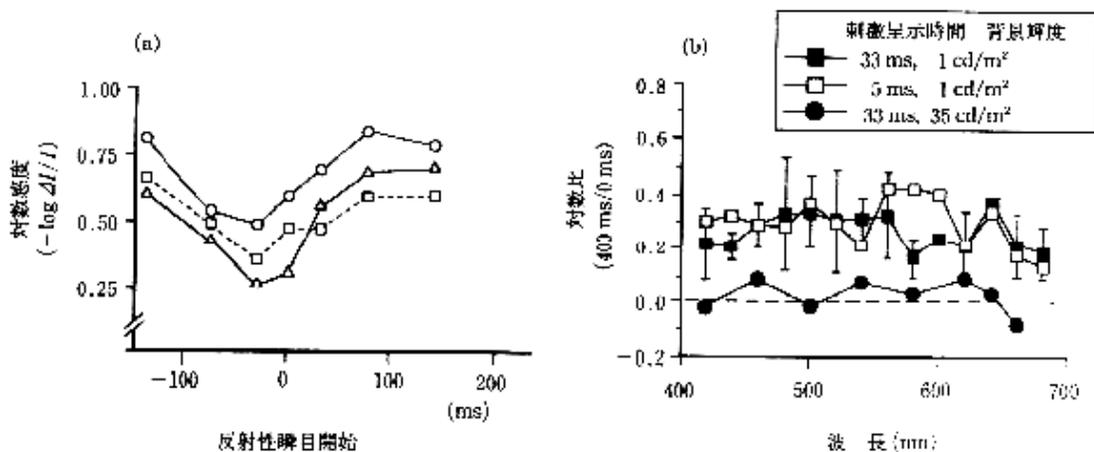


図 C.1 瞬目中の視覚抑制 ([212], [213] より引用)

例えば、普段目にする CRT ディスプレイの走査線の原理は上述の原理によるものである。一方、提案する手法本研究では図 C.3 のように、1 つに見えている残像から、残像を構成している一部のイメージを瞬目によって切り出すことを提示原理としている。

この手法は、これまでの情報提示の原理とは逆の立場をとっている。日常生活においては瞬目の瞬間のイメージが保持されていても瞬目後のイメージと似ていてそれが知覚されないが、それが知覚できるようなデバイス側の特性およびイメージパターンは存在する。

本情報提示手法は以下のような特徴を持つ。

- 瞬目をした人のみ見えるイメージがあり、見る側の運動によってイメージが知覚されるという、提示側と人間側の両方の作用によって初めて情報提示を可能にする新たなインターフェイスのコンセプトを提案する。
- 瞬目によって見える能動的運動によるイメージと、通常の残像によって見えている受動的なイメージの両方を提示可能である。
- 瞬目という日常生活において自然に起こる運動を利用しているので、見るほうの注意のリソースを消費しない。
- 本手法は従来のデバイスの駆動方法のままで、提示イメージの時間的關係を変えることで実現が可能である。

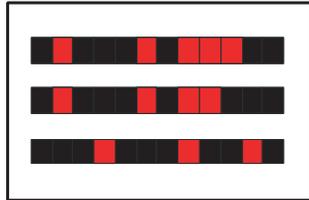
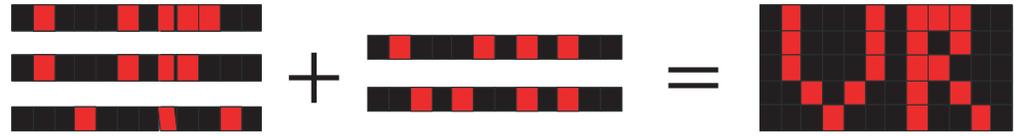
また、応用先としては個人的に情報が変わるもの、例えば「占い」や「隠れメッセージ」などが考えられる。そして、通常見える画像と同時に異なるメッセージを埋め込むことが可能なので、映画等にも使用可能である。

C.3 実現方法

C.3.1 提示デバイス

現在使用可能な視覚情報提示デバイスの中で本手法に合うデバイスを選定する。代表的な視覚情報提示デバイスとその提示可能な周波数と周波数を決定するのに重要な要素を示す。現在のところ、

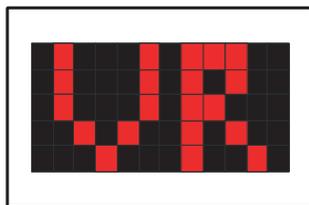
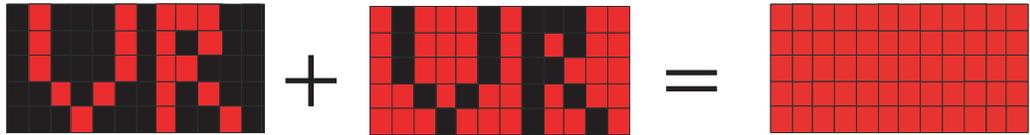
基本原理：残像を利用してひとつの画像に統合



瞬目によってゲインが変わるが通常知覚されない

図 C.2 これまでの情報提示原理

基本原理：残像から一部を切り出す



瞬目の瞬間だけ異なる画像が知覚される情報提示が可能

図 C.3 本手法の情報提示原理

LED による実現が一番可能性高く、実験での周波数の変化を詳細に決定できる。

- CRT(Cathode-Ray Tube)：電子ビームによる表示方式
発光素子の残光特性 120Hz ~
- LCD(Liquid Crystal Display)：液晶の偏光による表示方式
液晶の偏光の時間特性 60Hz 程度まで。
- PDP(Plasma Display Panel)：蛍光体の放電による
蛍光体の残光特性 100Hz
- LED(Light Emitting Diode)：電流によって LED が発光
LED の発光の時間特性 kHz オーダー
- セラミックディスプレイ：圧電マイクロセラミックアクチュエータ
アクチュエータの時間特性 1kHz 程度まで可能

C.3.2 予備実験

本手法を利用してどの程度の情報提示が可能か予備実験を行った。実験条件としては、2 値画像のポジ (A) とネガ (B) を 150Hz で交互に表示し、瞬目の瞬間の知覚を調べた。以下にその観察結果を示す。

- 瞬目によって通常見えている画像 (上記の C) と異なる画像 (上記の A or B) が知覚される。瞬目によってイメージの切り出しに成功しているが、それが瞬目の直前の画像なのか、瞬目直後の画像なのかマスキングの特性を調べる必要がある。また、一度ではどんな画像か判別するのは困難であった。
- 明るさ変化の位相差が知覚されており、ポジとネガを加算してもグレーに知覚されない。画面のリフレッシュレートをあげる (時間的解決)。もしくは、ディザやボケた画像にする (空間的解決)。また、2 値以外の画像を使用すると輝度 $1+255=128$ と $127+129=128$ は同じではなく、明るさによるフリッカーの限界を調べる必要がある。
- 瞬目と同じ効果が目の前で手を振ると起こる (ある種のシャッター)。

付録 D

視知覚特性を利用した舞台演出

D.1 本章の目的と位置付け

これまで、視知覚特性を利用した情報提示手法について述べてきた。本章では、その知覚特性の舞台芸術（パフォーミングアート）への応用について述べる。

パフォーミングアートとはパフォーマーの身体運動を通して、観察者に新たなイメージ、価値観を想起させる行為である。そして、パフォーミングアートにおいてパフォーマーの身体運動は音楽、映像、舞台装置等と結びつき、その表現能力を拡張してきた。近年、コンピュータを使用し、体験者の動きに応じて作品が様々に反応するメディアアートと呼ばれる芸術作品が数多く制作され [214][215]、そのコンピュータを使用したインタラクション技術は舞台芸術の演出にも応用されつつある [216][217][218][219]。また、コンピュータの計算能力の向上やプロジェクターの光量の増加によって [220] プロジェクターを使ったコンピュータグラフィックス映像の付与も可能になった。しかし、このように、より複雑な情報をパフォーマンスに対して付与できるようになったとしても、それを作品の中でどのように使用し、一つの表現として成立させるかが重要な問題となってくる。筆者はメディアパフォーマンスユニット cell/66b [221] [221] [223] (図 D.1) の舞台において、パフォーマーの身体運動を映像・音楽に直接反映させるデバイス及び眼球運動を利用した舞台演出装置を利用し、身体運動と映像・音楽の関係性をテーマとして作品を制作した。本章では、実際に制作した作品を紹介しながら、身体運動と映像のインタラクションによって身体表現を強化し、観察者のイメージを想起させるような舞台演出方法の提案を行う。



図 D.1 cell/66b のパフォーマンス

D.2 身体表現の強化

D.2.1 表現の定義と表現の強化

本節ではまず、本論文で使用する「表現」という用語の定義を行う。本論文では「表現」を「作者の世界に対するイメージを作品という形で具現化し、観察者の中に新たな世界に対するイメージ及び価値観を生み出すこと」と定義する。例えば、パフォーマンスアートにおける表現とは、パフォーマーの中にあるイメージを身体を使って具現化し、観察者がそのパフォーマーの動きの中から新たな何らかのイメージを想起させたとき、そのパフォーマンスは「表現」として成立する。そして、パフォーマーの身体表現に映像や音楽等の身体運動以外の要素を加えて作品を構成し、より多くのイメージを観察者に想起させることができたとき、身体表現の強化が行われたと考える。

D.2.2 イメージの想起

想起と伝える

前節の表現の定義において、観察者にイメージを「想起させる」という言葉を用いたが、このイメージを「想起させる」ということはイメージを「伝える」とことは異なる。イメージを「伝える」ことにおいては、図 D.2 にあるように、作者が感じているイメージと観察者が受け取るイメージを一致させることが重要であるが、イメージを「想起させる」ことにおいては、作者のイメージと観察者のイメージの相違は問題ではなく、どれだけ新しいイメージを観察者に思い起こさせたかということが重要となる。また、この作者の意図を含んだ「伝える」という作業は説明的な過程を経ることが多い。そして、説明的な過程を経た表現は得てして観察者にとってリアリティの無いものとなる。人間は外部から説明的に与えられた情報よりも、観察者の内部から生み出された情報をリアリティを持って知覚することも多い [224][225]。例えば、似顔絵という少ない線情報からでも我々はリアリティを持って人の顔を想起する。観察者にとって欠けている情報は観察者の側で補完され、観察者の中で再構成された人の顔は中途半端な写真よりリアルな感覚を持って知覚されるのである。

非写実性と想起

古代ギリシャから 19 世紀、写真が発明されるまで、芸術においては写実的であることが重要な意味を持っていた。写真以前の絵画芸術では、奥行きを再現するための遠近法、材質感を再現するための陰影法、色を再現するための併置法等が考案され、キャンバスを現実世界と見間違ふような写実的な絵画が美しいとされていた。しかし、1839 年ダゲールによって発明された写真術（ダゲレオタイプ）によって現実世界を完璧な精度で写し取ることが誰にでも可能となった。それによって、写実を理想とした美の探究が写真術の出現によって揺らぎ、芸術家は写実性以外の要素にも美を求めるようになった [226]。以後、モンドリアンによる幾何学的抽象表現やピカソに代表されるキュビズム等、写実とは異なる要素に対して美を探求した作品群が制作されるようになった。そして、作品が写実的でなくなるにつれ、鑑賞者は作品を鑑賞する際、直接的に作品から受けるメッセージに加え、できる限り想像力を働かせて作品のイメージを膨らませる（想起する）ようになった。このように、写真以降の芸術は鑑賞者個人の想像力による非再現性や個人性を含むようになり、表現として、観察者にどれだけ新たなイメージを想起させたかということが重要となった。そこで、本論文においては、写実性によってではなく、観察者自身の知覚によって様々な思いを想起させる演出手法について述べる。

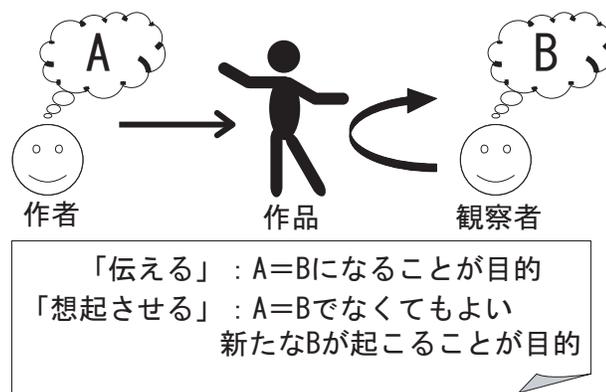


図 D.2 表現の目的

D.2.3 Media Art, MultiMedia Performance

本論文では、物理的相互作用（e.g. てこの原理、ばねによる反力）とは異なる作用・反作用の関係（e.g. どこかを見るとその部分の色が変わる）をコンピュータを使用することによって実現し、体験者の動きに応じて作品が様々な反応する芸術作品をメディアアートと呼ぶ。また、このようなコンピュータによるインタラクション技術を使用して舞台演出を行ったパフォーマンスをマルチメディアパフォーマンスと呼ぶ。例えば、パフォーマーにセンサを装着し、その動きに合わせて舞台に投影される映像の位置や大きさを変化させるようなパフォーマンスはマルチメディアパフォーマンスの一例といえる [217]。

D.2.4 Media Art, MultiMedia Performance の問題点

近年、体験者の動きに反応するインタラクティブ性を持ったメディアアートと呼ばれる作品が多く制作され、それらを鑑賞する機会も増加した。しかし、それらの作品から、鑑賞者に様々な思いを想起させる非再現性・個人性を感じることは少ないように思われる。ひとつの原因として、これまでのメディアアートでは、鑑賞者の動きによって引き起こされる反応の意外性や複雑さが作品の評価につながることもあり、そのインタラクティブ性を強調するあまり、鑑賞者と作品の反応の関係が非常にわかりやすく写實的に表現されていたことが考えられる。例えば、触ったところが光って音が聞こえるという作品があったとしても、触る場所に対する光と音の関係性が単純すぎると、ただのインタラクション技術のデモに感じられてしまう。つまり、写實的な芸術表現においては、作品から受ける情報が具体的でありすぎるため、鑑賞者が何かを思い起こす解釈の余地がなくなってしまう。また、マルチメディアパフォーマンスにおいても、映像や音楽とパフォーマーの相互作用を実現しているデバイスのデモンストレーションのような写實的な演出がなされることがあり、そこから非再現性や個人性を感じることは少ない。

非再現性・個人性を備えた表現の強化という観点から考えると、そのインタラクティブ性を写實的に表現することよりも、作品全体から受ける造形美や、鑑賞者に何かを思い起こさせるような表現性が重要となる。

D.3 これまで行われた身体表現の強化手法

本節では、どのように映像・音楽による身体表現の強化が行われてきたか、その歴史を概観し、本研究の位置付けについて述べる。これまでの映像・音楽による身体表現の強化について、D.3.1では舞台上のパフォーマーが観察者に対してどのように表現の強化を行ってきたか、これまでの作品を振り返る。D.3.2では身体運動から映像・音楽へどのような関係付けが行われてきたか、インタラクティブアート、つまりは体験者(=観察者)の身体運動によって映像・音楽を変化させるという視点からその関係性について述べる。

D.3.1 パフォーミングアートにおける映像と音楽

パフォーミングアートはパフォーマーのイメージを身体を使って表現することが基本となる。伝統的には舞台の装飾や音楽、衣装等によって身体表現は強化されてきた。そして最近では、コンピュータグラフィックスの進化により、より多くの、より複雑な映像を使って表現の強化が可能となった。現在、パフォーミングアートは様々なアプローチからその身体表現の追究が行われ、映像、音楽をはじめ、ファッション等とも融合が進み、パフォーミングアートといっても多様な形態が存在している。

舞台上の身体表現を映像・音楽によって強化した作品としては、1960年代に行われた John Cage の電子音楽と Merce Cunningham 舞踊団によるダンス・パフォーマンスの共演 [227] がこの分野における先駆けと考えられる。これ以後、舞台上でもコンピュータによる映像・音楽が使用されることが多くなった。特に、William Forsythe のフランクフルト・バレエ団 [228] では演出に映像・音楽が多用されている。Forsythe の舞台では、ワルツではなく大音量の電子音楽が使用され、記号化された身体表現及び映像が表現のテーマとなっている。そして、Forsythe は作品の構成・振付にも積極的にコンピュータを導入し、1995年初演の“ エイドス：テロス ”では、コンピュータによる二進法振付バレエ [229] も行われている。

また、身体、映像、音楽を融合したマルチメディア・パフォーマンスを1980年代から行ってきたグループとして dumb type [230] が挙げられる。dumb type は古橋悌二を中心として1984年に結成されたグループであり、テクノロジーを駆使して作り上げられた舞台は世界的に注目を集めてきた。これら以外にも近年は、テクノロジーを使って身体表現を行うパフォーマンスグループは多く存在するが [231][232][233]、これらの舞台で使用される映像・音楽は身体との関係性よりも作品のテーマを補完することに焦点が当てられ、具体的な言葉によるメッセージや具体的なシンボル等が使用されることが多い。

舞台ではなくパフォーマンスに焦点を当てた作品としては、額や頭や手といった身体の各部にセンサーを着け、そこに触ると大きな反響音を起こすパフォーマンスを行った Laurie Anderson [234] や身体運動から光や音を発散させた Stelarc [235] 等、身体にセンサを着けることで身体を楽器やビデオエフェクタに変化させるという視点からのパフォーマンスも存在する [236][237]。しかし、これらは様々な身体運動によって音が鳴ることや映像が変化することそれ自体に表現の中心が置かれ、その対応付けや変換基準は示されていない。

また一方、コンピュータグラフィックスをパフォーマンスによって強化するという視点からパフォーマンスを取り入れた試みも存在しており [238]、本研究とは逆からのアプローチであるが、その方法論は興味深い。

D.3.2 身体運動とインタラクティブアート

本節では、身体運動と映像・音楽のインタラクションという視点から、特に体験者 (= 観察者) の身体運動によって映像・音楽が変化するインタラクティブアートを取り上げ、その関係性のあり方について述べる。

身体運動を映像や音楽へ変換する試み自体は古く、Ed Tannebaum “ Recollections ”(1981)[239]、Myron Krueger “ Video Place ”(1983)、Vincent John Vincent “ Mandara System ”(1989)等の試みは成されていたが [214]、当時のコンピュータの性能では、ビデオで撮影した身体像に何らかの加工をする程度の単純なインタラクションのみであった。

1990年代のコンピュータ技術の急速な発展によって、リアルタイムインタラクションはより速く、より繊細に、より複雑になった。Jeffrey Shaw “ EVE ”(1993)[240]は3Dメガネをかけてドーム状空間に入った体験者が2つのプロジェクタが装備されたロボットをコントロールしながら立体映像を体験するという複雑なインタラクションを備えた作品である [215]。Knowbotic Research “ smdk ”(1993)はセンサのついたグローブと小型ディスプレイを頭に装着して指先のセンサがある点に接触すると、大音響と様々な映像が流れ出すという繊細かつ暴力的な作品である [214]。Ulrike Gabriel “ Breath ”(1992)は人間が自由に制御できない呼吸のような身体的要素を入力として構成された作品である [214]。近年では、実空間に存在するデバイスを使ったデジタル万華鏡 “ Iamascope ”[241]のような作品も存在し、様々な身体運動と映像・音楽の関係性のあり方が提案されている。しかし、これらの作品における身体運動と映像・音楽の関係性は、当然ながら、体験者の視点からデザインされたものであり、舞台演出のように身体運動を行う人間とその運動によって生成される映像を、第三者的に観察する観察者の視点からデザインされたものではない。

また、映像・音楽を付与することによって身体運動のイメージを拡張しようとする研究も存在する [242][243]。MITのFlaviaらは、身体運動の軌跡を色のついた線で表すことによって身体表現の強化を行っている。岩館らのインタラクティブダンスシステムMidasは、ラバノテーション [244] というダンスの分析手法を使用して、身体運動から運動者の感性情報を分析し、それにあわせて映像・音楽を運動者に付与するというものであるが、この研究においては身体と映像の関係付けそのものよりも、身体運動からどのように感性情報の分析を行うかということに重点が置かれている。

このように表現としての観点、つまりは表現者と映像・音楽のインタラクションから観察者がどれだけイメージを想起できるかという観点から身体運動と映像・音楽の関係を探る研究及び作品は非常に少ない。そこで、本研究では特に身体運動と映像の関係を表現の強化という観点から分析し、制作した作品をもとに、その関係付けについて論じていく。

D.4 Media Performance Unit cell/66b

本節以降では、筆者がともに活動を行っている cell/66b のこれまでの作品に触れ、身体運動と映像のインタラクションを実現し、表現の強化を行ったシーンを紹介し、その関係付けの基準及び構成したシステムを示す。

cell/66bはMedia drive unit “ cell ”とPerformance unit “ 66b ”のコラボレーションユニットであり1993年から演劇、パフォーマンス、クラブイベント等ジャンルを問わず、数々の映像とパフォーマンスによる空間アートを展開している。2001年より身体性と映像・音楽の関係性をテーマとした作品 “ test-patches ”の公演を世界各地で行っており、2002年夏にはメディアアートの祭典 Ars Electronica[245]をはじめ、ヨーロッパ3都市を回るツアーを行い、2003年冬には Seoul International Dance Festival において公演を行った。

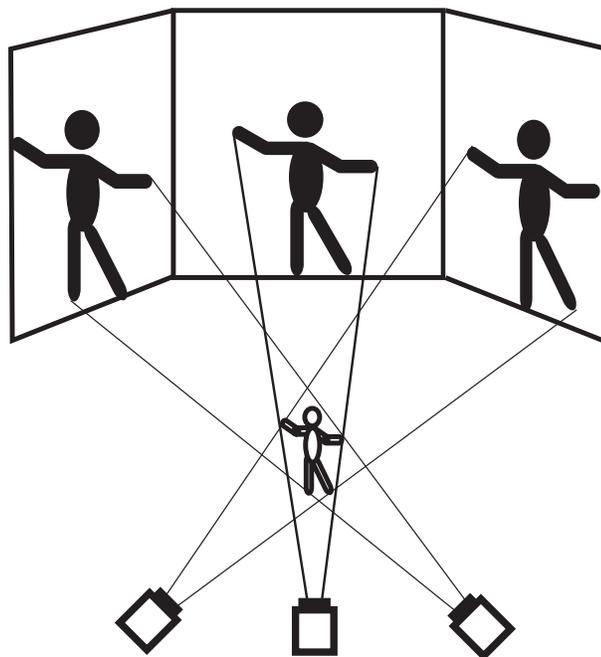


図 D.3 “ test-patches ” の舞台構成図

作品“ test-patches ”においては、モノクロの単純な幾何図形の映像とリズムを作り出すための音をパフォーマンスに付与してステージは構成されている。これは、身体表現に映像・音楽を付与するにあたって、観察者のイメージ、価値観を想起させるための最小限かつ本質的な部分を抽出した結果といえる。複雑な映像を多く、同時に付与することも可能となった現在において、あえてモノクロで単純な幾何図形の映像及びリズム音のみの音楽を使用することによって、パフォーマンスにおける身体表現と映像・音楽のあり方を問い直している。単純な映像と単純な音というそれぞれだけでは表現として成立しない要素が、パフォーマーの身体運動と適切に結びつくことにより、そこに新たな関係性が生まれ、その関係性が観察者のイメージ想起を促進する。付与される映像・音楽は最小化される一方で、映像・音楽と身体運動との間に、観察者のイメージを想起させるような関係性を作り出すことによって表現が構成されている。

また、“ test-patches ”は全体でひとつのストーリーを持つものではなく、数分で完結するいくつかのシーンによって構成されている。各々のシーンはメンバーが身体性と映像・音楽の関係性について何らかの実験的意図を持って持ち込んだ断片 (test patch) であり、各々のシーンごとにテーマが存在する。そして、その全体を“ test-patches ”と呼ぶ。

シーンにおいてはパフォーマー及び背後のスクリーンに対して、プロジェクターで映像を投影することによってパフォーマーの身体表現を強化する。パフォーマーの衣装は全て白もしくは黒であり、ある時はパフォーマー自身がスクリーンとなり映像に立体感を生み出すとともに、またある時は、パフォーマーは黒い影となってステージから消滅する。通常の舞台では、図 D.3 のようにスクリーンを3つ角度をつけて並べることによって、舞台や投影される映像に立体感を与えている。また、3つのスクリーンそれぞれに対してプロジェクターで映像を投影するので、パフォーマーの立ち位置によっては一人のパフォーマーから複数の影が生じる。

例えば、図 D.4 のシーン“ Montage ”では、白い衣装を着たパフォーマーに対して、黒塗りの映像から一部を切り取った映像を投射することによって、映像をパフォーマーの身体を切り取る道具とし



図 D.4 シーン：“ Montage ”

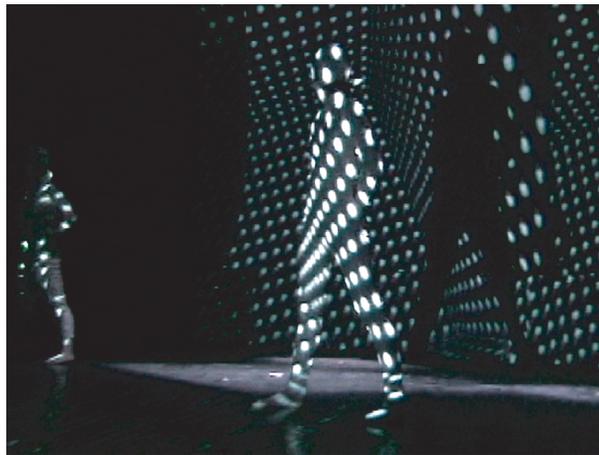


図 D.5 シーン：“ Signal ”

て使用している．観察者が一度に知覚できるのは身体の一部のみであるが，継時的に現れるパフォーマーの身体の断片から一人の人間の身体を再構成していく．身体の一部のみを順番に観察者に示すことによって，観察者はその隠された身体イメージを想像し始める．

シーン“ Signal ”では図 D.5 のように白い衣装を着たパフォーマーに対してある奥行き構造を持った映像を付与する．パフォーマーが踊っている間はパフォーマーの身体及び運動の立体感を映像によって強化する一方，パフォーマーの静止とともにパフォーマーの身体はスクリーンの一部となり舞台から消滅する．また，このシーンでは観察者の感じる奥行き感も重要なテーマとなっている．パフォーマーの身体が存在する奥行きとスクリーンの奥行き，さらには映し出される映像の中の奥行きというようにこのシーンの中には少なくとも3つの奥行きが存在し，それらに関係性を持たせながら変化させることで，日常では起こりえない奥行き感を引き起こしている．

D.5 映像による身体表現の強化

D.5.1 パフォーマーの身体と映像の関係性

舞台の上に映像が投影されたとき、観察者は通常、身体運動と映像のあいだに何らかの関係付けを行う。もし、身体運動と映像の関係が非常に弱いもしくは全く無い場合、観察者がそこから何かを感じ取り、イメージを想起するのは困難である。また一方で、関係が非常に強く観察者にわかりやすかったとしても、観察者のイメージが必ずしも想起されるとは限らない。例えば、パフォーマーの右手を上げれば右の方の画像が変化するような、観察者にとって非常にわかりやすい関係性は、イメージを想起させるというよりはむしろ、身体運動変換デバイスのデモンストレーションとして認識される可能性もある。このように、わかりやすいということは必ずしもイメージの想起に結びつかず、それよりも、関連付けが一見わからない中から関係性が現れ、それを見つけたときに観察者のイメージは想起され、表現の強化が行われると考えられる。そういう意味では、因果関係が微かにわかるが予想のできない程度の弱い関係性の中において表現の強化は行われていくと考えられる。

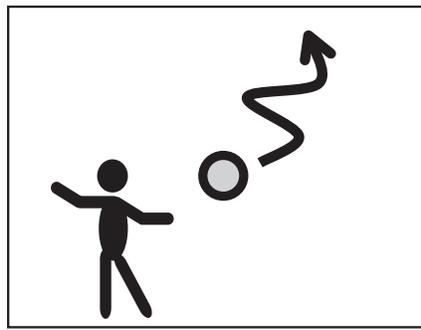
次に身体運動から生み出される映像の性質について述べる。近年、コンピュータの進歩によりリアルタイムに複雑なインタラクションが可能となったが、表現の強化として重要なのは、どれだけ観察者に新たなイメージ、新たな価値観を想起させたかであり、複雑で派手な視覚情報を同時に与えることが可能だとしても、必ずしもそれが表現の強化に繋がるとは限らない。観察者にあまりにも多くの情報、あまりにも複雑な情報を与えてしまうと、観察者はその情報量の多さ、複雑さからイメージを想起し始めることを放棄してしまう。また、あまりにも派手な映像を前にしたとき、観察者はその関係性よりも映像自体に意識を集中させてしまう。これではパフォーマーの表現力を強化したとは言い難い。そして、このような刺激の強い映像の効果は時間とともに急激に低下する。このように複雑な視覚情報を与えすぎて、観察者のイメージ想起を阻害するよりも、少ないが意味のある情報を与えるほうが、観察者の想起を促すと考えられる。このように、関係性がある程度弱く、関係性の本質を表す映像による、身体運動と映像のインタラクションこそが観察者のイメージを想起させ、表現の強化に繋がると考えられる。

cell/66b のパフォーマンスにおけるテーマは、パフォーマーの身体運動と映像や音楽との関係性の中に新たな表現を生み出していくことであり、アナログな身体運動とフレームで区切られたデジタルな映像や音楽との時間関係、空間関係の中から表現は生み出される。そして、本作品において筆者と cell/66b はパフォーマーの身体運動を直接映像や音楽に変換可能なデバイスを開発し、そこから引き起こされるインタラクションによって表現の強化を行うシーンを構成した。本作品“test-patches”においては、2つのシーンで身体運動と映像のインタラクションを利用して表現の強化を行っている。以降では、その2つのシーンにおける身体運動と映像の関係付けの基準及びそのシステムについて具体的に述べる。

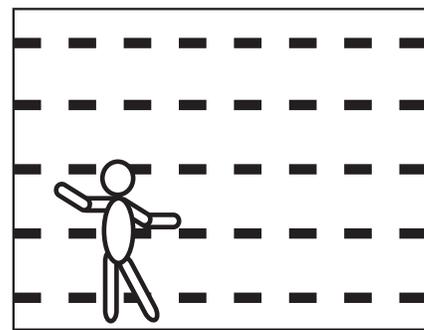
D.5.2 身体運動と映像の具体的な関係付け

身体運動と映像の関係付けを考えると、身体運動には様々な分類があり、さらに映像の種類、それらのインタラクションも多様である。そのため、多種多様な運動、映像に対して個別に基準を設けることはケーススタディとしては可能かもしれないが、一般的な議論を行うことは困難である。そこで、本論文では映像をテクスチャという視点から図と地のある映像と地のみの映像の2種類に分け、インタラクションのあり方を時間的に一致したインタラクションと空間的に一致したインタラクションの2種類に大きく分けて議論を行うこととした。

図と地のある映像とは、図 D.6 左にあるような、映像の中のある小さな閉じた領域(図)がその他



図と地のある映像と身体



地のみの映像と身体

図 D.6 身体と映像の図と地の関係

の部分(地)と異なるように動く映像である。このとき、観察者にとっては映像全体の中で図の部分が浮き上がって知覚されるため [246]、インタラクションの中心となるのは小さな図の部分とパフォーマーの身体運動である。そして、この図の動きと身体運動が空間的に一致している、つまり図の動きが身体運動と同じ方向、同じ大きさ、同じ速度であると、観察者はその図と身体運動の関係性を見出しやすい。しかし、空間的關係性が崩れた場合、そこに關係性を見出すことは非常に困難となる。また一方で、その空間的關係性が維持されていれば、時間的に一致していなくても、図の動きと身体運動の關係性が認識されることも多い。つまり、図と地のある映像を投影したとき、観察者が身体と映像の關係を見出すためには空間的インタラクションは一致している必要があるが、時間的インタラクションには關係性を变化させる余地が存在する。

地のみの映像とは、図 D.6 右にあるような、一様なテクスチャによって作られた映像である。この地の動きが身体運動と時間的に一致している、つまり、身体運動と同時に映像が変化すると、観察者はそこに關係性を見出しやすい。また、空間的インタラクションについては、身体運動と映像変化が時間的に一致していれば、空間的にそれほど一致していなくても、そこに關係性を見出し得る。つまり、地のみの映像を投影したとき、観察者が身体と映像の間に關係を見出すためには、時間的インタラクションは一致している必要があるが、空間的インタラクションには变化させる余地が存在する。

以降、図と地のある映像と地のみの映像それぞれについて、時間的・空間的インタラクションという視点から身体運動と映像の關係性を構築した具体的なシーンについて述べていく。

D.5.3 構成したシーン

Liquid Dream

はじめに、図と地のある映像と身体運動のインタラクションによって表現の強化を行ったシーン“Liquid Dream”(図 D.7)について述べる。このシーンにおいては、図 D.7 右側の黒いコスチュームのパフォーマーの手にジャイロセンサが装着され、パフォーマーの手の動きに合わせて背後の波面中心(図 D.7 中央)が移動する。身体運動と使用されている映像の図である波面中心の關係は図 D.8 のように、腕の Yaw 方向の回転(背骨を軸とした回転)を波面中心の X 方向の移動に対応させ、腕の Pitch 方向の回転(頭を下げてお辞儀をする方向の回転)を Y 方向の移動に対応させた。このように、このシーンにおける空間的インタラクションは非常にわかりやすい。一方、時間的インタラクションについては、ジャイロの値を映像に変換するかどうかパフォーマー側でオンオフ可能であり、常に手に合わせて波面中心が移動するわけではなく、パフォーマーがオンにしたときだけ手に合わせて波面

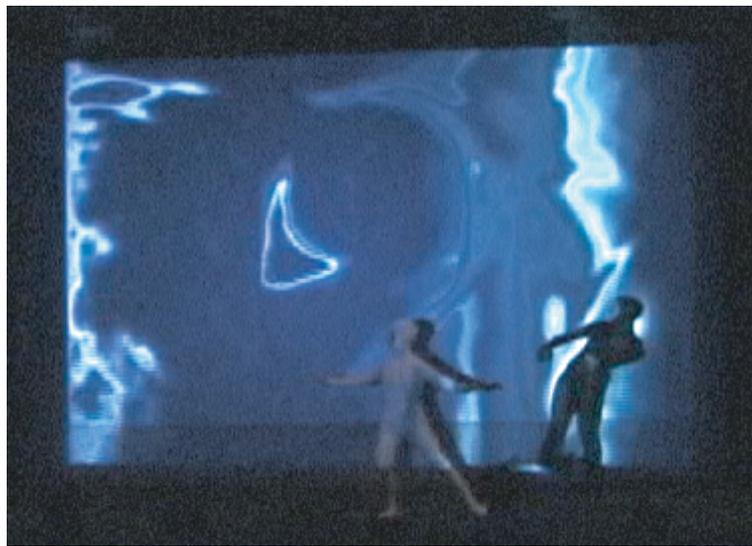


図 D.7 シーン：“ Liquid Dream ”

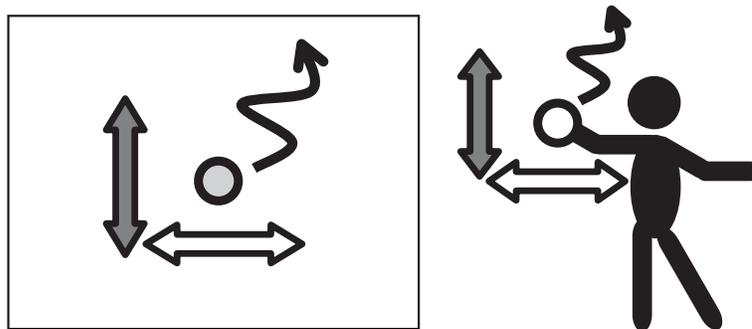


図 D.8 “ Liquid Dream ”における関係付け

の動きが構成される．さらにこのとき，ジャイロの値からすぐに映像を変化させるのではなく，ある一定の遅れを入れることで時間的インタラクションを変化させている．このようにパフォーマーの身体運動と映像の波面中心の関係を空間的にはわかりやすくするとともに，時間的には不安定な関係を構築することによって，その弱い関係性の中に観察者がイメージを想起させる余地を作っている．

Signal

次に，地のみ映像と身体運動のインタラクションによって表現の強化を行ったシーン “Signal (with device)” (図 D.9) では，パフォーマー (図 D.9 中央下) の背中にジャイロを装着し，その動きに合わせて，背後の格子模様を変化させている．その身体運動と映像変化の時間関係は常に一定に保たれ，時間的インタラクションは非常にわかりやすい．一方，このシーンの空間的關係性については図 D.10 のように，映像は立方体モデルに対して格子模様のテクスチャが貼り付けられているものであり，パフォーマーの Pitch 方向の回転 (頭を下げてお辞儀をする方向の回転)，Roll 方向の回転 (首をかしげる方向の回転) の運動に合わせてその立方体モデルの縦幅，横幅がそれぞれ変化する．そしてそれに加えて，身体運動の大きさ (Pitch 方向，Roll 方向の運動の大きさの 2 乗和) というパラメータを映像を生成するためカメラ視点の前後移動に割り当てた．身体運動によって格子模様の縦横の幅が

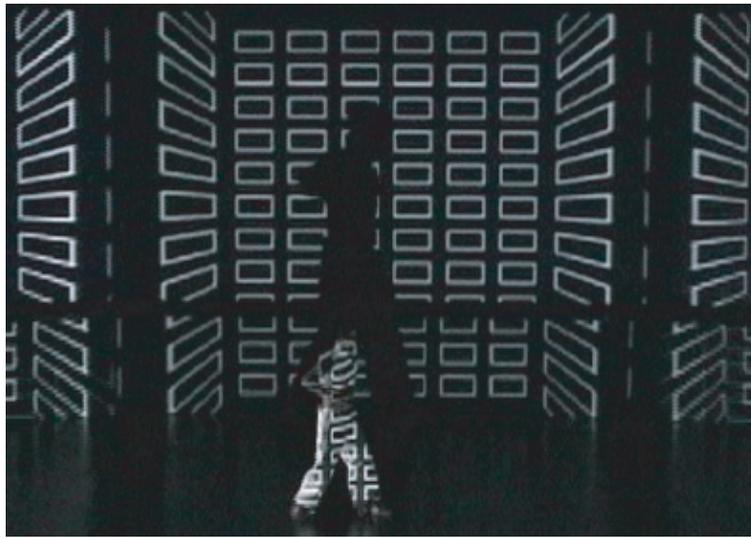


図 D.9 シーン:“ Signal (with device) ”

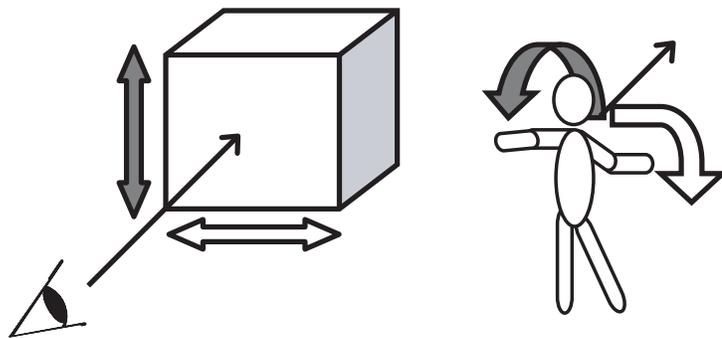


図 D.10 “ Signal (with device) ”における関係付け

変化するとともに、カメラ視点の移動によって奥行き感が現れる。特に、カメラ視点が立方体内部に入り込んだ瞬間、突然奥行きが変化する。このシーンでは、身体運動と映像変化の強い時間的インタラクションのもとで、縦横のややわかりやすい関係性と、カメラ視点による奥行き変化という予測できない空間的対応付けを設定し、その空間的インタラクションの変化から、観察者のイメージの想起を促進している。

D.5.4 システム構成

前節で述べたようなシーンをどのように実現しているか、そのシステム構成について述べる。システム構成の概要を図 D.11 に示す。パフォーマーの身体運動の姿勢角を無線通信を通じて計測し、計測したデータを MIDI 信号へ変換して、映像及び音楽システムへ入力する。映像システムは Genemagic* とのコラボレーションワークである、MIDI 信号で駆動されるリアルタイムレンダリンググラフィックソフト cVA を使用している。その制御画面を図 D.12 に示す。cVA は OpenGL で記述された 3D モ

* <http://www.genemagic.com/>

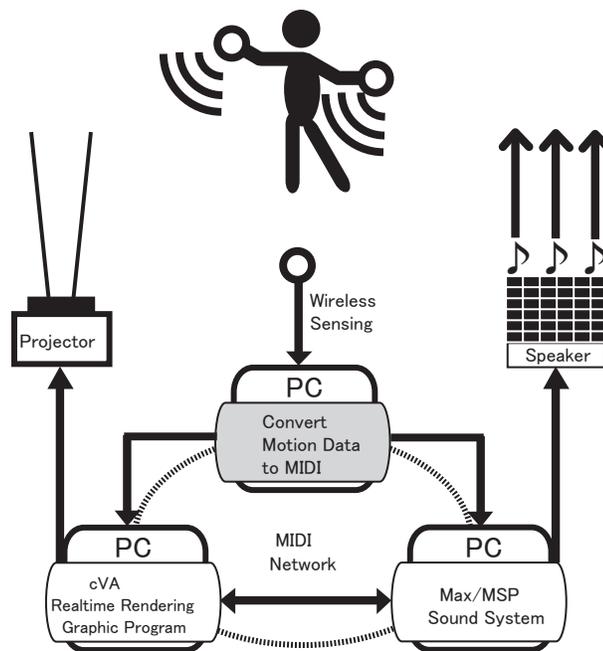


図 D.11 システムの構成

デルに対してテクスチャを貼り付け、映像をリアルタイムで生成するソフトである。さらに、cVAはその3Dモデルのパラメータを外部からのMIDI信号によって変更可能である。cVAでは多くの電子楽器で使用されているMIDI信号を使用しているため、身体運動から映像・音楽に同じプロトコルで信号を送ることが可能となり、映像と音楽の同期を取ることも容易となる。

また、一部のシーンでは身体運動から音楽への変換を行っているが、その基準はまだ試行錯誤の段階であるためここでは詳細に述べないが、システムはCYCLING[†]74社のMax/MSPを使用している。

このように身体運動をMIDI信号に変換し、さらにMIDI信号で駆動するグラフィックソフトを使用することによって、パフォーマー、映像生成者、音楽生成者の全てが、共通のプロトコルで通信し、お互い影響を及ぼしあうことが可能なプラットフォームを構築した。

パフォーマーに装着するデバイスは、現在、姿勢角を計測する3Dモーションセンサ(NEC/TOKIN社[‡])を使用し、それぞれの値をマイクロチップ(PIC16F873)を使ってAD変換を行い、RS-232Cシリアル信号として無線通信を行い計測している。そして、計測された値をPC側でMIDI信号に変換するプログラムを作成し、映像システム、音楽システムそれぞれへ信号を送っている。無線通信には東京電子設計社[§]のUB-6010を使用している(図D.13)。また、デバイスの開発にあたっては、パフォーマーの動きの性質に合わせてセンサの装着位置を決定することが重要となる。そして、センサ自体は小型であることと共にパフォーマーの激しい身体運動に耐えられる頑強性が要求される。

[†]<http://www.cycling74.com/>

[‡]<http://www.nec-tokin.com/>

[§]<http://www.tds.co.jp/>



図 D.12 cVA (Genemagic) の操作画面

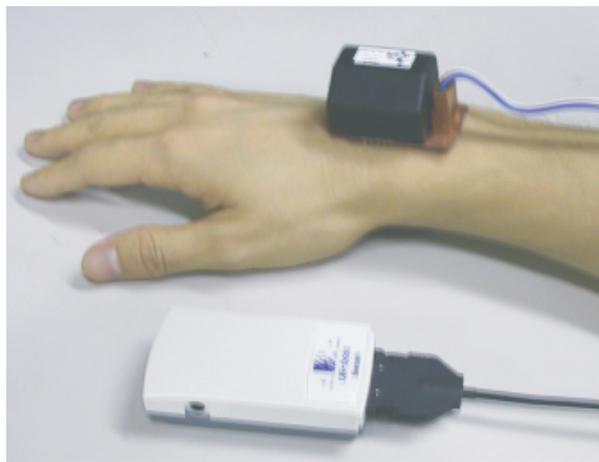


図 D.13 ジャイロセンサと無線通信装置

D.5.5 演出手法の評価

提案する演出手法が表現の強化へ繋がるか、つまりは観客者のイメージ想起を促進するか、その有効性の評価を行う。また、2002年 cell/66b は、“test-patches”の公演を国内のクラブイベントや第7回日本バーチャリアリティ学会大会懇親会、アルスエレクトロニカを含むヨーロッパ3都市での公演等、国籍、年齢、専門知識の異なる観客者（観客）の前で行ってきた。そこで得られた反応の中から、特にデバイスを使ったシーンについてのコメントをまとめる。

本論文で提案する演出手法は、身体運動に関係付ける映像の図と地の有無によって、身体運動と映像の時間的・空間的關係性を変化させる手法である。具体的には、前述の“Liquid Dream”のような図と地のある映像では空間的インタラクションを一致させる一方で、時間的にずれを生じさせている。“Signal”のような地のみ映像では、時間的インタラクションを一致させる一方で、空間的対応付けを変化させている。

この手法の有効性を評価するためにデバイスを使用したシーン“Liquid Dream”、“Signal”において時間的・空間的關係性を変化させた場合、観客者の印象はどのように変化するか調べた。身体運

動と映像の関係を (a) 空間的にも時間的にも全く同期させた状態, (b) 空間的対応は一致しているが時間的にずれを生じさせた状態, (c) 時間的には同期しているが空間的対応がずれている状態, (d) 空間的にも時間的にもずれている状態, に対応する状態をこれまでリハーサルで撮影したビデオ等から選び出し, 20 人の観察者に各シーン 4 種類の映像を見てもらい, 4 つを印象的であった順番に並べてもらった。(最も印象的であった状態が 3 ポイント, 以下, 印象的であった順に 2, 1, 0 ポイントとした。)そして, 並べてもらった後に, その理由を述べてもらった。20 人は身体運動や映像自体に評価の焦点がいかないように, ダンスや映像芸術のバックグラウンドを持たない観察者を集めた。

本節の目的は, 提案手法によってより多くのイメージが想起されるのを確かめることであるが, 想起されるイメージ自体は観察者によって様々なので, 今回はイメージ想起の度合いを観察者の印象深さに対応付けた。各シーンの 4 状態は以下のような関係付けを想定した。

Liquid Dream

- (a) 手の動きと同じ方向に同時に波面中心が移動
- (b) 手の動きと同じ方向に遅れて波面中心が移動
- (c) ランダム方向に手と同時に波面中心が移動
- (d) 時間も空間もランダムに波面中心が移動

Signal

- (a) 背中の動きと同じ方向に同時に格子が移動
- (b) 背中の動きと同じ方向に動きが遅れて格子が移動
- (c) 背中の動きと対応しない方向に同時に格子が移動
- (d) 時間も空間もランダムに格子が移動

本論文の提案手法は“ Liquid Dream ”では (b), “ Signal ”では (c) にあたる。20 人の評価ポイントの合計を表 D.1, 表 D.2 に示す。“ Liquid Dream ”においては, 空間的に一致した 2 つの状態が印象的で, その中で時間的に不一致である, 現在舞台で行っている状態が僅かであるがより印象的であるという結果であった。つまり, 図と地のある映像では, 身体運動と映像が空間的に一致していれば時間的一致に関わらず印象深く感じられるが, 提案手法のほうが僅かではあるが, より印象深いシーンを構成していた。“ Signal ”では空間的には不一致で時間的に一致した, 現在舞台で行っている状態が他の状態に比べて強く印象的であるという結果であった。つまり, 地のみの映像では提案手法による身体運動と映像の関係が最も印象深いシーンを構成していた。

また, それぞれの状態を選んだ理由を調べると, “ Liquid Dream ”で (a) の状態を選んだ理由としては, 主に, 空間的に合っていないとわけがわからない。さらに時間も合っているときれいでわかりやすい。という理由が多かった。(b) の状態を選んだ理由としては, 空間的に合っていると同時に, 時間的にずっと合っているとわかりやすすぎて飽きてしまうという理由や, 時間遅れがあると何かが伝わっている感じがするという理由が挙げられた。“ Signal ”で (c) の状態を選んだ理由としては, 映像自体が構造化されているので空間的に合っていないなくても気にならず, 身体との関係付けがわかる必要は無い。さらに, 空間的に合いすぎるのはわざとらしい, という理由が主に挙げられた。また, 動く映像が視覚の大部分を占めるので時間的にずれると気持ち悪いという意見もあった。

表 D.1 Liquid Dream の評価結果

	空間的に一致	空間的不一致
時間的に一致	40	29
時間的不一致	44	7

表 D.2 Signal の評価結果

	空間的に一致	空間的不一致
時間的に一致	38	55
時間的不一致	22	5

D.5.6 観察者のコメントとそれに対する考察

本節では、公演後寄せられたコメントの中からデバイスに関する代表的なコメントを取り上げ、それに対して考察を加える。

コメント 1

デバイスを使ったシーンを見た人のほとんどは、身体と映像の関係について何らかの意識を持ち、その関係性についてコメント寄せていた。また、コメントを寄せた人には大きく分けてデバイスの存在に気付いた人と気付かなかった人の 2 種類の人があり、気付かなかった人の中には、練習によって身体と映像を合わせていると考え、その練習時間を聞いてきた人もいた。また一方で、気付いた人では、そのセンサのスペックにまで言及する人もいた。

考察 1

デバイスによる表現の強化を行うためには、身体運動と映像のインタラクションが観察者に知覚される必要があるが、デバイスの存在自体が観察者に知覚される必要は無いと考えられる。デバイスはパフォーマーの身体運動から映像を生成し、そこから観察者のイメージ想起を促進するための見えない触媒のような存在が望ましい。

コメント 2

コメントの焦点として「日本的ワビサビがあった。」「モノクロが新鮮である。」とステージ全体としての印象を多く語る人と、インタラクションに注目して「何故、ジャイロセンサを使用しているのか。」「この映像はどういう意味があるのか。」とその関係付けに何らかの意味を持たそうとする人の 2 種類がいた。

考察 2

後者のようなコメントをした、関係付けに何らかの意味を持たそうとする人にとっては、因果関係がわかる強い関係性を見て、その関係を理解することがイメージの想起を始める重要なきっかけになるようである。その一方で、ステージ全体について語っていた人にとって、あまりにも強い関係性はデバイスのデモンストレーションになりかねない。このように、注目する点や知識によって最もイメージを想起させる関係の強さは異なり、様々な観察者に同時に表現の強化を行うことは難しい。しかし、例えば、シーンの初めに多くの観察者が気付く程度に関係性を強くしたり、関係性を強調した数秒のシーンを入れることによって、インタラクションに注目する観察者がその関係性についてイメージを想起し始めるきっかけとし、その後は説明的にならないように関係性を弱めていくという演出方法も存在する。

コメント 3

インタラクションに興味のある観察者からは、「身体運動から映像への変換はどのような基準で行われているのか。」と聞かれることが多かった。

考察 3

本作品では、自由度の大きい身体運動を MIDI という非常に制限された信号へ変換し、さらにその

変換が表現の強化に繋がるかということの問題としている。変換方法だけを見ると、計測された値をそのまま線形変換するのか、閾値を持つような非線形変換を行うのか、過去の状態を使用して因果性を付与するのか。と変換方法は様々である。本論文では、映像の図と地、インタラクションの時間性・空間性に着目して変換基準を示したが、どのような変換方法を使用したとしても、観察者のイメージを想起させる、観察者が何かを想像するきっかけを作るという視点が重要な評価基準となる。

また、これまでは、人間が音等の感覚入力に対してどのように合わせて動くか、どのようにリズムを知覚するか [247] という現象に関する研究は行われてきたが、cell/66b のパフォーマンスにおいて問題となっているのは、どのような動きから映像や音などの感覚入力を出させれば、表現として成立し得るのかということであり、これまでにその基準が確立されていない新たな分野であると考えられる。

D.5.7 表現者による評価とそれに対する考察

次にデバイスを使用したパフォーマーからの評価及び映像作成者からの評価について述べる。test-patches の公演において、5 名のパフォーマーがジャイロデバイスを装着しパフォーマンスを行った。3 名が図と地のある映像を使った“ Liquid Dream ”において使用し、残り 2 名が地のみの映像を使った“ Signal ”で使用した。

コメント 1

どのパフォーマーも、初めは自分に投射されている映像を知覚することは困難であり、デバイスを使用したとしてもその動きはほとんど知覚できなかった。しかし、何度も使用していくうちにその動きがだんだん知覚できるようになり、長期間デバイスを使用している 1 名のパフォーマーは「自分の身体を使ってステージに絵を描いている感覚がする。」とコメントしていた。さらに、デバイスの使用、映像を使ったパフォーマンスに慣れてくると、映像と自分の関係、ステージ全体における身体運動と映像の位置付けを考えるようになり、ステージ演出にもアイディアを出すようになった。

考察 1

パフォーマーはデバイスを使用すると、自分の動きによってステージ全体の映像や音楽に影響を与えるとともに、前もって作ろうとしても不可能な微妙な変化を含んだ表現を行うことが可能となる。パフォーマーにとってデバイスの装着は新たな道具による身体表現の拡大を意味する。しかしその一方で、パフォーマーには自身の動きから作り出されるステージ全体に広がった映像や音楽を感じ取り、そこから新たな表現を生み出す能力が要求される。パフォーマーがデバイスを使用するということは、表現能力の拡大とともに知覚しなくてはいけない領域の拡大をも意味する。

コメント 2

「これまでのデバイスを使用しない舞台においては、映像に対して自分が合わせないと、身体運動が一コマでもずれたら、舞台が台無しになるという緊張感が存在したが、デバイスを使用した場合は、逆に自分の身体運動によって舞台全体が影響を受け、自分の運動一つ一つが舞台を創っているという、自分が中心であるという緊張感が存在する。」という意見があった。

考察 2

パフォーマーは自身の身体運動のフィードバックを映像や音楽から感じる事が可能となり、そのフィードバックによって新たな身体表現が創られる。例えば、身体運動によって音楽のテンポが変わり、そのテンポの変化が次の身体運動に変化を与えるということが起こり、仮想の相手とのセッションを行うような状態になり、そこから予定調和でない新たな身体表現が生み出される。パフォーマーにとってデバイスの使用はパフォーマーが感じる緊張感を変化させるとともに、新たな表現を見つけるきっかけとも成り得る。

コメント 3

映像作成者からは「デバイスを使うことによって、同じ映像は二度と生成されないし、パフォーマーによって生成される映像も特徴がある。さらに、個人の中でも毎回、舞台によってその動き方が異なる。そこからパフォーマーの調子や勢い等も感じることもできる。」というコメントがあった。

考察 3

身体運動に基づいて映像を変化させる場合、その変換方式は様々な方法が存在し、そこから生み出される映像効果は多様である。パフォーマーの身体運動によって生み出される映像は、マウスとキーボードを使って前もって作ることは非常に困難であり、その映像の変化するタイミングも練習によって合わせられる性質のものではない。そして、その場で身体運動と映像・音楽の関係性を変化させながら舞台を構成することも可能であり、パフォーマーの反応、観察者の反応を見ながら、観察者のイメージ想起に繋がるように関係性のあり方自体も時間変化させて、即興的に舞台を構成することも可能である。

D.5.8 身体運動と映像の関係付けのまとめ

本論文では筆者が cell/66b と制作した作品を紹介しながら、パフォーマーの身体に着けたセンサを用いて映像・音楽を変化させるシステム及び、身体運動と映像のインタラクションによって観察者のイメージを想起させるような演出方法の提案を行った。

観察者のイメージを想起させるには、デバイスのデモンストレーションにならない、観察者のイメージを引き出すような解釈の余地を残したインタラクションが重要である。身体運動を映像や音楽に変換する作品はこれまでも存在していたが、その変換基準を示した作品、研究は非常に少ない。本論文では、身体運動と映像の関係を、映像の図と地の有無という視点と時間的・空間的インタラクションの強さという視点からその変換基準を提案し、実際に作品として具現化した。そして、簡単ながらその評価を行った。

今後はデバイスによる表現能力の拡張をさらに進めていきたい。具体的には指先の曲げや重心移動等、観察者に見えないような小さな運動であるがパフォーマンスにとって表現の本質であるような運動を拡張してステージ上に映像や音楽として表出させるシーンや、床を踏みつける現実の音とデバイスによって創り出される音が重なり合って新たな表現を作り出すようなシーンを考えている。

D.6 観客とのインタラクションを実現した舞台演出

D.6.1 背景と位置づけ

近年では、コンピュータによるインタラクション技術を利用した舞台演出も多く見られるようになってきた [219]。これらのインタラクション技術は、主に映像や音楽等の舞台演出とパフォーマーの動きの関係性のなかで使用されている。このような舞台演出では、図 D.14(a) のように、舞台上でインタラクションが起きていたとしても、見る位置による違いを除けば、どの観客も同じシーンを知覚することになる。一方で、図 D.14(b) のように、観客個人個人が多少なりとも異なる知覚、体験を得られる舞台は、非再現性・個人性を併せ持った美へつながると考えられる。これまで、観客が各所で行われているパフォーマンスの中を歩き回るような演出によって、観客が個人的な体験を得られる作品は存在していた [248]。しかし、観客席と舞台が分けられた一般的な舞台芸術においては、観客個人個人が異なる体験を得ることは、これまでの演出手法では困難であると考えられる。

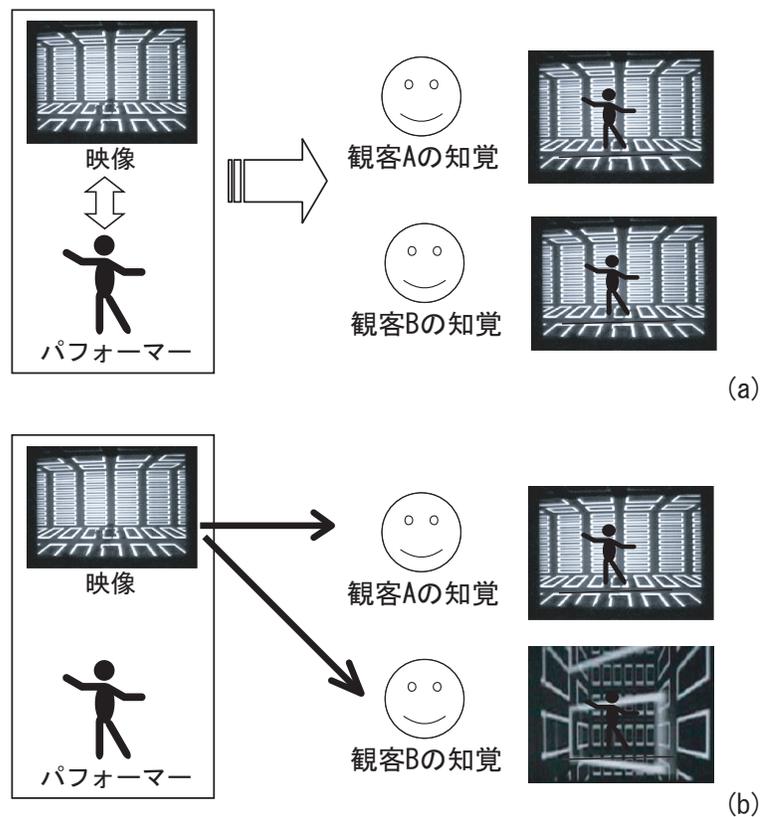


図 D.14 インタラクシオン技術を利用した舞台演出 (a) パフォーマーと映像 (b) 観客と映像

D.6.2 実現手法

非再現性・個人性を併せ持った美を舞台芸術において実現するひとつの手法として、図D.14(b)のような、観客一人一人に合わせて映像等の舞台演出が変化する手法が考えられる。しかし、これまで、観客全体の動きに応じて舞台上の映像が実時間で変化するという演出手法は存在していたが[249]、観客一人一人と舞台演出が何らかの関係性を持つ演出は殆ど行われてこなかった。

観客一人一人に対して舞台演出を変化させる手法としては2つの手法が考えられる。観客一人一人に何らかのデバイスを持ってもらいそれを使用する手法と、観客自身の個人的な動きを利用する手法である。

デバイスを使用して、それぞれの観客の見える映像や聞こえる音楽を変化させる試み自体は、これまでもイベント等では試みられている。例えば、観客にラジオチューナーのようなデバイスを持ってもらい、観客の好みに合わせて聞こえる音楽を変化させるイベント[250]や見ている方向の音だけが聞こえるデバイスの提案もなされている[245]。

もうひとつの、観客の何らかの運動を利用して、観客と舞台のインタラクシオンを実現する手法について考えると、一般的な舞台芸術において、観客の座っている位置は固定であるが、観客それぞれの視線の動きや手足の細かな動きは異なっている。そこで、デバイスなしに、観客の動きに応じて映像や音楽を変化させることができれば、簡便に舞台と観客それぞれとのインタラクシオンを実現可能である。また、実現可能性を考えると、この観客自身の運動を利用した手法のほうが、多人数の観客が鑑賞する舞台演出では有効である。

観客が、舞台を見ている際に異なる動きを示すもののひとつとして視線が挙げられる。観客は興

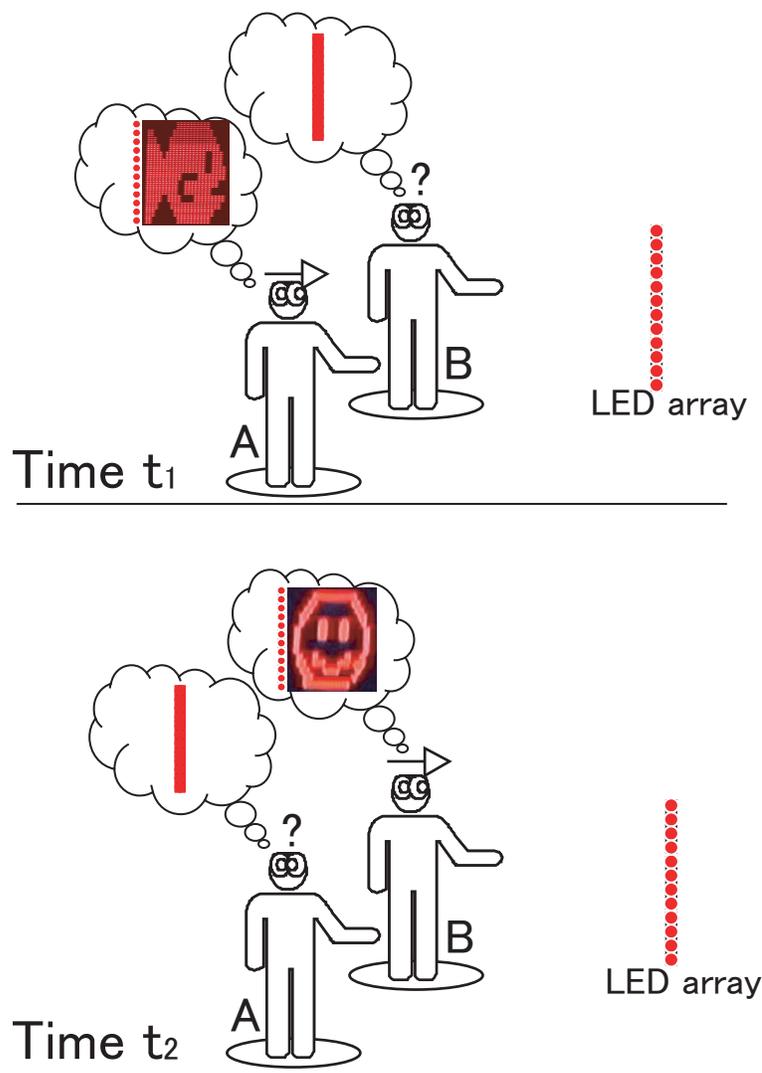


図 D.15 観察者の眼球運動と知覚されるイメージの関係

味の対象を追いかけるように様々なタイミング、様々な場所に視線を移動させている。そこで、本論文では、この観客それぞれの視線の動きと筆者らが研究を行ってきた眼球運動を利用した情報提示手法 [19][252] を組み合わせることで、舞台と観客のインタラクションを実現できないかと考えた [253]。それぞれの観客の視線に動きに応じて、それぞれの観客は異なるイメージを知覚し、その個人的な体験が非再現性・個人性を併せ持った舞台の実現につながると考えられる。

D.6.3 眼球運動を利用した舞台演出

舞台演出に、2, 3, 4章で述べたで眼球運動を利用した情報提示手法を使用した。この情報提示手法は、人間の眼球運動自体を利用しているので、十分暗い環境においてならば、空中等の投影面のない空間に対しても提示が可能である。そして、知覚される像の形態、大きさは、観察者の眼球運動によって決定されるため、同じような位置から観察したとしても観察者の眼球運動が異なれば観察者それぞれの知覚像も異なることになる。また、図 D.15 にあるように、ある時刻 t_1 において、観察者 A が眼球運動を行い、時刻 t_2 において、観察者 B が眼球運動を行った場合、それぞれのタイミングで異なるパターンで LED 光源が点滅していると観察者 A, B は異なる像を知覚することになる。

パフォーマンスを鑑賞する際に観客は、パフォーマーの動きやスポットライトによって様々なタイミング、様々な場所に眼球運動を行う。本情報提示手法を利用したパフォーマンスでは、舞台上に高速点滅する1次元LED光源を設置し、身体運動や映像によって観客の眼球運動を誘導して、それぞれの観客に様々な2次元イメージを提示した。知覚される像の大きさ、形態は観客一人一人の眼球運動の大きさ、タイミングによって異なるため、それぞれの観客は、自身の眼球運動によってそれぞれ異なるイメージを知覚することになる。

D.7 提案する演出手法の実現

D.7.1 舞台構成

2003年5月15,16日(東京)及び2003年10月12,13日(韓国ソウル)のメディアパフォーマンスグループ cell/66b[221][222]の公演において本手法を利用したパフォーマンスを行った。高さ1.8m、縦方向の解像度128pixelの1次元LEDアレイ(アビックス株式会社製[¶])を4本舞台後方に設置し、LEDの前で4人のパフォーマーがパフォーマンスを行った。LEDは図D.16(a)のようにパフォーマーを照らす照明として、また、図D.16(b)のように観客の眼球運動によって像を生み出す装置として機能していた(図D.16(b)はカメラを高速回転させて撮影した)。LEDはあるパターンで高速点滅しており、観客がパフォーマーの動きに合わせて水平方向の眼球運動を起こすと、眼球運動によってLED列の点滅パターンが網膜上で空間的に展開されて、2次元イメージが知覚される。LEDは1ms周期で点灯しており、この装置によって知覚される像の横方向の解像度は約50pixelである。

D.7.2 本演出手法の特徴

舞台においては、眼球運動時に生じる残像を利用して、1次元のLED列から2次元像を提示しているが、その残像は眼球運動終了後も知覚され続け、眼球運動後のイメージと重なることになる。図D.17のように、パフォーマーよりもステージ奥にあるLEDの光によって知覚される像はLEDよりも前にいるパフォーマーの身体の上に描かれる形で知覚される。また、実際に存在する位置よりも前の位置に像が知覚されるということは、図D.18のように残像が重なるパフォーマーの位置によって像の知覚される大きさが変化し、残像が身体と結びつくことにより、ステージ上での物理的な奥行き関係とは異なる奥行き関係を生み出す効果を持っている。具体的には5m程度離れた位置にLEDをおいて像を観察すると、LEDの位置よりも2m~3m程度前にパフォーマーが立っていても像が身体に重なって知覚される。パフォーマーがある程度以上近づくと知覚像が身体をよけるように知覚されたり、知覚像が極端に小さくなったり、知覚像の奥行き関係をうまく構築することが困難となる。また、像を知覚するためにはLED全体が見えている必要は無く、両脚の間から像が広がり身体に重なるような演出も可能となる。

D.7.3 演出に対するコメント

本節では、演出手法の評価として、舞台を鑑賞した人から得られたコメントを記す。5月15,16日の東京公演及び10月12,13日ソウル公演、各公演約20人からコメントが得られた。コメントを寄せた殆どの方は、LEDの光から何らかの2次元イメージを知覚していた。コメントの多くは、何より2次元イメージが知覚されたことに対する驚きについてであった。日常生活においてあまり意識しない自分の視線の動きによって、イメージが知覚されることが、多くの人には新鮮な体験であるようで

[¶]<http://www.avix.co.jp/>



(a)



Performer

(b)

図 D.16: 固視時に知覚されるパフォーマーと LED (a) 眼球運動時に知覚される像 (b)(この画像はビデオカメラを高速回転させることによって撮影した)

あった。そして、公演後、隣に座っていた観客同士が見えたものについて話をしても、それぞれが異なるイメージを知覚しており(2次元イメージが見えずに1列のLEDが光っているだけだと思った観客も存在した)、同じ公演を見たにも関わらず異なる舞台が知覚されることが面白いというコメントも多かった。また、2次元イメージが見える原理について考え、首を振っている観客も存在した(情報提示の原理的には首を動かす必要はない)。

D.7.4 考察

これまでの多くのパフォーマンスは、舞台側から一方的にシーンを観客に提供するものであった。一方、本公演は観客の眼球運動自体をもシーンの構成要素とし、観客と舞台との間にインタラクティブ性を構築した新たな特徴を持ったパフォーマンスである。一般的には、観客がステージから受ける心的印象は異なることがあっても、舞台を見ることによる知覚は殆ど変わることはない。しかし、本公演は舞台から生じる印象だけでなく、見えているもの自体、知覚レベルで異なるものが提示されている。

本手法を使用した舞台において、観客は自身の眼球運動という普段は意識しない主体的な働きかけを再認識する。何かを見るという行為は、周りの環境を脳内に写し取る受動的な過程ではなく、環境の中から自分の興味の対象を自分自身の運動によって選び取り、解釈する過程である。普段は環境から選び取られた結果しか意識に上ることはないが、本公演ではその「見るという行為」自体が、自ら

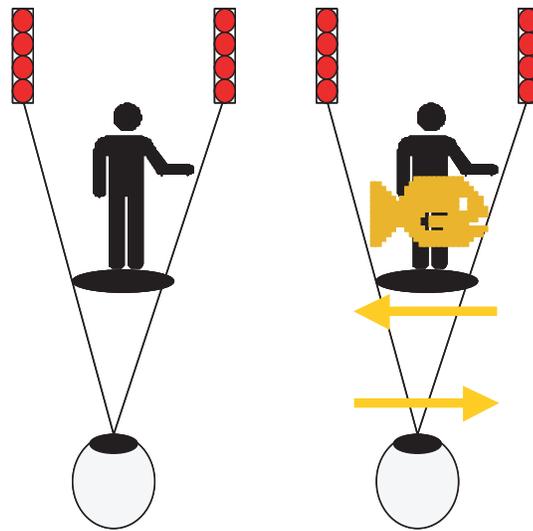


図 D.17 パフォーマーの背後の LED による知覚像が身体の上に重なる



図 D.18 パフォーマーの位置による知覚像の大きさの違い

の知覚像として具現化されている。本演出は、古くは1930年代モホイ・ナジ [10] が行ったように、人間がどのように環境を解釈しているかというコンセプトから、視覚的演出を行ったものである。今後は、視覚的要素だけでなく、音など聴覚的な要素を含めて演出手法を考えていきたい。

また、近年、LEDは高輝度化によりスポットライトや舞台全体を照らすフラッドライトとして使用されるようになった [220]。LEDは他の照明機材と比べて、高速に点滅が可能であり、寿命も長く、発光による発熱も少ない等利点が多い。本公演では、50ms程度の眼球運動中に像を提示するために、1秒間に1000回以上の点滅を行う必要があったが、LEDであればこそ実現可能であった。これまで、新技術が新たな芸術表現手段として使用されてきたように [254]、LEDも、その明るさ、時間特性から、今後ますます舞台演出に使用されていくと考えられる。

D.7.5 観客とのインタラクションを実現した舞台演出のまとめ

本論文では、非再現性・個人性を併せ持った美を舞台芸術において実現するひとつの手法として、観客の眼球運動を利用し、それぞれの観客に異なる像を提示する演出手法を提案した。本手法を使用したステージでは、物理的存在（1列のLED）以上のイメージを観客は自身の眼球運動から知覚するとともに、観客と舞台演出の間にインタラクティブ性を導入している。そして、そのインタラクティブ性は非常に個人的な営みである。眼球運動の大きさや方向、タイミングといった個人差がそのまま観客の知覚として現れるが、ある観客の眼球運動が隣の観客の知覚に影響を与えることはない。本作品はLEDとともにそれを見る観客の眼球運動があって初めて成立する作品であり、本演出によって観客と作品を一体化する一方で、一人一人の観客にとって舞台をオリジナルなものにしている。

D.8 本章のまとめ

本論においては、VR 技術の舞台芸術への応用に関して述べてきたが、残念ながら、まだ日本において舞台芸術は日常生活の中に浸透していないように感じられる。欧米において舞台芸術は、より生活に根付いた公共的な意味を持ち、老人から子供までが日常生活のなかで舞台芸術に触れている [255]。日本においても、公共空間をも舞台に変化させることが可能な VR 技術によって、多くの人が舞台芸術を初めとする芸術作品に触れる機会が増えることになれば幸いである。

また、本作品を芸術作品という視点から見ると、身体性と先端技術を舞台芸術に対し、いかに有機的に融合させていくかを問う実験的な作品といえる。そして、技術の日常生活への応用ということを考えると、舞台という場は技術を社会に応用する前段階としての、ある目的のために技術を適応させた応用例とも捉えることができる。そして、技術の応用としての芸術作品が成立していくためには、その評価手法を確立していくことが重要となる。

付録 E

視触覚の関係性とメディアアート

E.1 本章の目的と位置づけ

これまで、視触覚それぞれの知覚特性について調べ、その情報提示への応用について述べた。しかし、人間は日常生活においてその両方、さらには聴覚など様々な感覚を同時に働かせて環境を認識している。物体が存在すれば、それを見て、手を伸ばして触り、叩けば音を聞くことができる。このように人間は1つの物体を様々な感覚から知覚することが可能であり、それらを合わせることでひとつの物体イメージを作り上げている。そして、この感覚を統合してひとつのイメージを創り出すという作業は、日常生活においては無意識にのうちに行為されるため、我々がこの過程に気付くことはほとんどない。本章では、この感覚統合によるイメージ創出の過程に注目し、体験者に普段の生活ではありえない感覚の組み合わせを体感してもらうことによって、何かが“存在する”ということの意味を問いかけることをねらいとしたメディアアート作品“re-cognition”[256]、“Beings - Haptic artwork with Smart Tool - ”[257]について述べる。

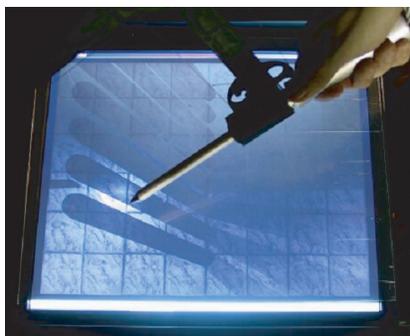
近年、体験者の運動に合わせて映像や音楽が変化するインタラクティブアートやメディアアートと呼ばれる作品が多く制作されるようになったが [214][215]、その多くは、体験者が何かを触る、動かすことによって、それに合わせて映像や音楽が生じるというものである。しかし、これまで、体験者の働きかけに対して力覚、つまりは反力を返すという形のインタラクションを行う作品は近年、散見されるようになったものの [258]、その数は少ない。一方、アートではなくバーチャルリアリティの分野においては、様々なタイプの力覚提示装置が提案されている。PHANToMのような外部に装置を固定して力覚を提示する外部固定型 [259]、支点を人間に固定する身体固定型 [260]、回転モーメントを利用した非固定型 [261][262] の方式が提案されている。これらの方式の中で、本作品では触るというメタファに近い外部固定型の力覚提示装置である Smart Tool [263][264][265] (図 E.1) を使用した。



図 E.1 力覚提示装置 -Smart Tool-

E.2 re-cognition

“ re-cognition ”は、2003年3月東京都写真美術館にて行われた「インフォメーションアートの想像力展」*にて展示された。この作品は館研究室で開発された Smart Tool を使って見えない物体を触るというコンセプトで作られ、図 E.2(a) のような見えない状態の物体を触るとその物体の形に合った反力が返ってくるとともに、音が聞こえてくるという作品である（図 E.2(b) は物体が見えている状態である）。



(a) 物体が見えていない状態



(b) 物体が見えている状態

図 E.2 (a) 物体が見えていない状態 (b) 物体が見えている状態 (CG: 波多野健介)

E.2.1 作品コンセプト

人間は、自分の環境への働きかけとそこから反応によって環境情報を自分の中に構成していく。人が環境から感覚器を通じて読み取っているものが情報なのではなく、自分の行為に対する反応の関係性こそが情報であり、その情報をもとに環境を認識している。人間は環境との相互作用の中で情報処理系を作り替えており、常にそのシステムは変化し続けている。その一方、一度関係性を作ってしまったものに関しては、なかなかそれを捨てることはできない。

普段我々は、見えているものに何気なく手を伸ばし、触っている。我々にとって物体があるということは、それが見えると同時に触れるということを意味する。しかし、本作品において、物体は見える形で存在しない。一方、その影は見え、形には触れることはできる。普段最も頼っている、物体を見るという行為ができなくなったとき、我々はどのように環境を認識するであろうか。本作品の体験者は、照らす・触る等の様々な働きかけによって、視覚と触覚の新たな関係性を体験する。

E.2.2 作品概要

体験者は Smart Tool の銀色のグリップを握って、影だけが見える物体を触ろうとする（図 E.2(a)）。物体に接触すると反力が帰ってくると共に音が鳴り、視覚ではなく、触覚と聴覚のみでその物体の存在を知る。10 程度の形が用意され、それぞれが 30 秒程度で切り替わる。触る形自体は円柱という単純な形であるが、その数、大きさは図 E.3 のように様々であり、触ったときに聞こえる音もピアノやベル、電子音等様々であった。

本作品の力覚提示部には Smart Tool を利用したいいる。Smart Tool は人が握るスタイラスの位置を計測するとともに、スタイラス部に 3 軸の力覚を提示することが可能である。作品においては、Smart

* <http://www.humanmedia.co.jp/iaa2003/exhibition/14.html>

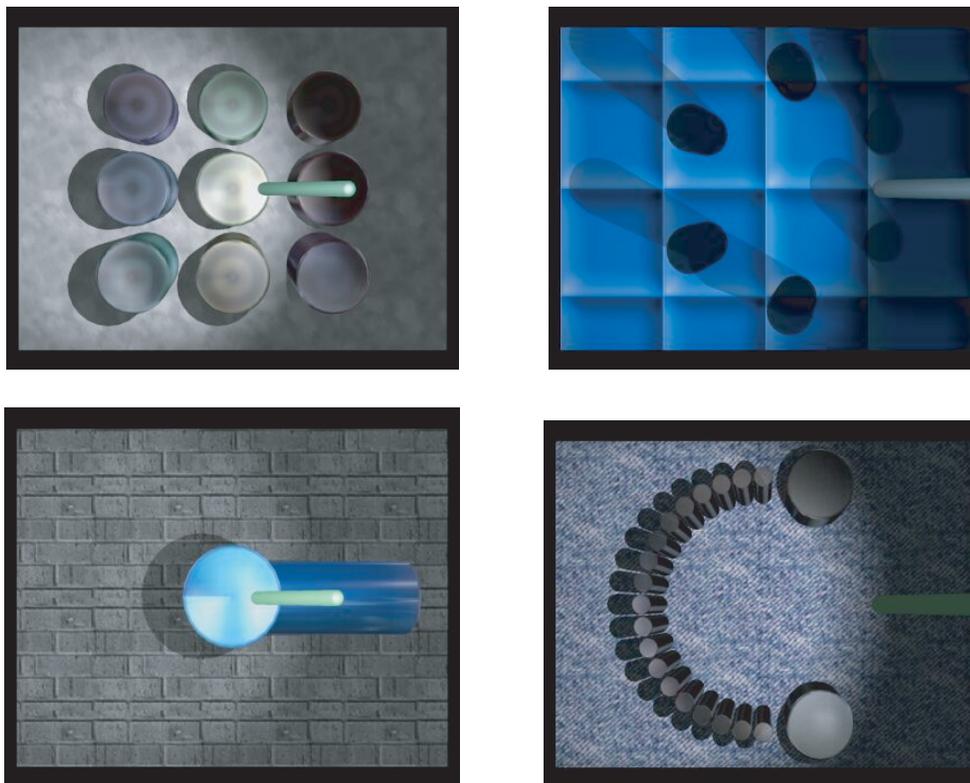


図 E.3 提示した画像（CG：波多野健介）

Tool が用意された仮想物体に触れた時，力覚を発生させている．また，スタイラスの位置によって，仮想の物体の影の形，位置が変化する．Smart Tool は力覚提示装置であるとともに物体を照らす光源として機能している．

この作品において Smart Tool を使用したのは，デザイン性もあるが第一の理由は，スタイラスの先端部には何も装着されていないにもかかわらず，あたかも先端部分から反力が帰ってきているように感じられるため，見えないものを実際に触っている感覚を引き起こしやすいという点にあった．もし，スタイラス先端にまでリンク機構があると，リンク機構が見えることで，自分は力覚提示装置を使っているということを再認識させてしまい，体験者の見えないものを触って力が返ってくるという驚きを損なうものと考えられたためである．

E.3 Beings - Haptic artwork with Smart Tool -

本作品“ Beings - Haptic artwork with Smart Tool - ”は 2003 年 5 月 19 日～23 日，芸術科学会 DiVA 展，東京工業大学大岡山百人記念館において展示された（図 E.4）．本作品では，力覚提示装置 Smart Tool を利用して，体験者に見えているのに触れない小人，見えないのに触れることはできる小人を触ってもらい，視覚もしくは触覚のどちらかの感覚だけで小人の存在を感じてもらった．そうすることによって，何かがある“存在する”ということは，見えるということなのか，それとも，そこに物質が存在し触覚を感じられることなのか，ということを経験者に問いかけた．体験者は作品の中で感覚間の食い違いを感じることによって，感覚の統合過程を再認識する．



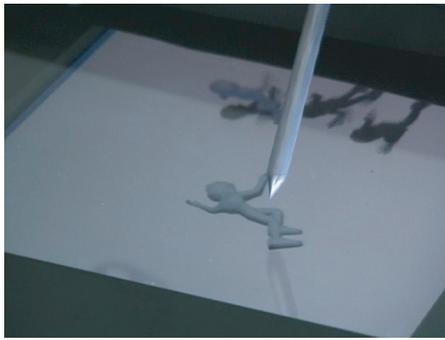
図 E.4 作品展示の様子

E.3.1 作品コンセプト

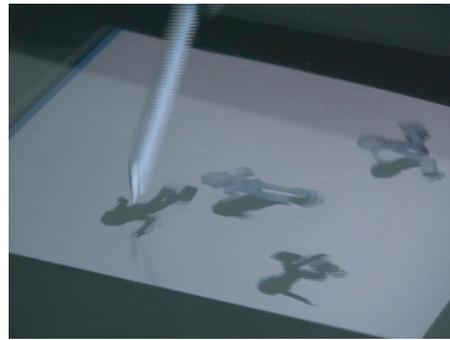
見える物体は触ることができる。普段我々は、見えているものに何気なく手を伸ばし、触っているが、それはあたりまえの行為なのであろうか。私たちの世界にある物体は、そこに物質として存在するとともに、可視光を反射することにより、視覚的にその存在を明らかにしている。普段我々は何気なく見えているものに手を伸ばして触っているが、見えるものを触ることで何かの存在を確かめているようにも思える。我々にとって、何かがある存在するという事は、そこに物質が存在し触覚を感じられることなのか、それとも、見えるということなのであろうか。日常生活の中で、見えるけど音のない物体、見えるけど匂いのない物体は多く存在するのに、何故触れられるのに見えない、音がするのに見えない物体には驚きがあるのではあろうか。また、見えるけれども触れないもの、例えば、ホログラフィーにはどの程度の存在感を感じるであろうか。そして一方で、見えないけれど触れるものには存在感を感じることができるであろうか。本作品ではそれぞれの感覚における“存在”がテーマであり、体験者は画面の中で走り回る小人を触ることで、視覚と触覚による存在感の違いを感じる。小人は見える小人と影だけの小人の2種類の小人が存在し、図 E.5(a) の見える小人は視覚では知覚することはできるが、触覚によっては感じられない。一方、図 E.5(b) の見えない小人は触ることによってその物質性は確認することはできるが、見ることはできない。このように、バーチャルリアリティの技術を利用すれば、実際には存在しない、これまでに無い物体を作りだし、それを体験することが可能である。

E.3.2 作品概要

体験者は作品の前に立ち、ヘッドフォンをつける。体験者が図 5 にあるようなタイトル画面を力覚提示装置で触ることによって作品はスタートする。作品がスタートすると図 E.6(a) にあるように真っ白な画面の中に小人が走って入ってくる。このとき入ってくる小人には灰色の身体が見えるものと、身体は見えず黒い影だけが見えるものの2種類の小人がいる。体験者は力覚提示装置を使ってこれらの小人を触ることができる。ただし、このとき身体が見える小人を触ったときには、力覚は感じられずに小人が転び、衝突音のみが聞こえてくる。一方、身体は見えずに影だけが見える小人を触ったと



(a) 身体の見える小人



(b) 身体の見えない小人

図 E.5 (a) 身体の見える小人 (b) 身体の見えない小人



(a) タイトル画面



(b) コメント画面

図 E.6 (a) タイトル画面 (b) コメント画面

きには、衝突時のみ小人の身体が現れ、体験者は衝突音とともに力覚（反力）を感じることができる。現れる小人の数やタイミングはあらかじめプログラムされており、1人から徐々に数が増えていき、最終的には6人の小人が画面内に同時に現れる。体験時間は1分30秒で、小人が画面から消えると体験者に対して図 E.6(b) のようなコメントが提示される。コメントは体験者の触った小人の数によって変化し、感覚間の関係性をイメージさせる以下のようなものを選んだ。“木目模様のアルミ”、“雲の抱き心地”、“空気の鼓動”、“雨上がりの匂い? ”、コメントと触った小人の数の関係性は、見えている小人に多く触った体験者に対しては“木目模様のアルミ”等の視覚イメージが想像されるコメントを提示した。一方、見えない小人を多く触った体験者に対しては視覚以外の感覚イメージが想起されるようなコメントを提示した。例えば、「雲の抱き心地」のようなコメントでは視覚から触覚、「空気の鼓動」では視覚から聴覚、「雨上がりの匂い? 」では視覚から臭覚が想像されることを意図した。

E.3.3 作品システム

作品のシステム全体図を図 E.7 に示す。システムは大きく分けて力覚提示装置 Smart Tool と制御用 PC、映像出力用液晶ディスプレイの3つによって構成されている（図中、黄色の丸）。また、Smart Tool 先端にはスタイラスが搭載されており、体験者はそのスタイラスを通じて小人を触る。図 E.7 の矢印は情報の流れを表し、白い矢印は PC への入力、赤い矢印は PC からの出力を表している。作品

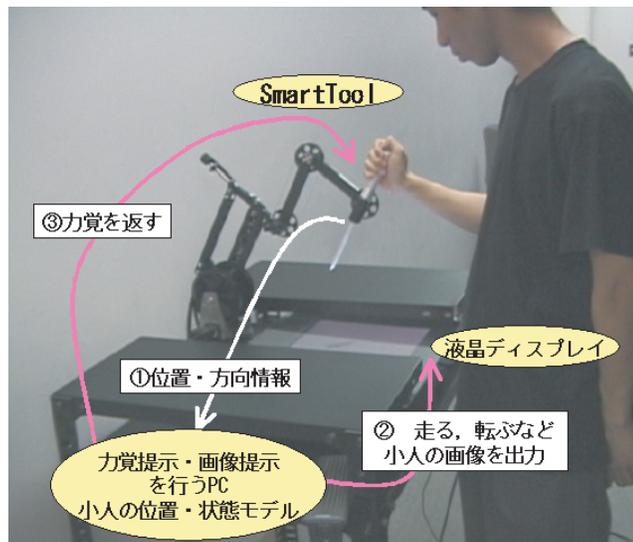


図 E.7 作品のシステム全体図

においては、まず、力覚提示装置 Smart Tool 先端部のスタイラス位置及び姿勢情報がエンコーダによって取得され、PCへ送られる（ ）。PCはプログラム内部に持つ小人の位置、状態（走行中、転倒中）を参照し、小人の次の状態を決定する。小人と Smart Tool の位置関係を計算し、スタイラスが小人と接触した場合には小人のグラフィックスを走行状態から転倒状態に変化させて液晶ディスプレイに出力する。接触が無い場合には走行状態を維持しながら小人の位置を変化させる（ ）。ただし、走行、転倒のグラフィックスはあらかじめ作られており、グラフィックスの描画には DirectX9.0 が利用されている。また、先端部が小人と接触した場合には Smart Tool によって体験者に力覚を返した（ ）。力の大きさは衝突のスピードによらず一定とし、力の方向は衝突と反対方向とした。

E.3.4 作品の評価

体験した人の多くは、力覚を使った作品に触ることが初めてであり、返ってくる力覚自体に驚いていた。2種類の小人についてはその力覚の有無に多くの人が気付き、何らかの問いかけをしてきた。出てきた小人を触るという単純な行為自体が楽しいという感想が多く、小人という人間に似たものに対して、画面の上から、ある意味、神の視点から影響を与えることが体験者に優越感に近い感情をもたらしたのかもしれない。また、小人に走る、転ぶ以外のアクション、例えば、耐える、謝る等のアクションがあるとよいという意見や、他にも形状の異なる小人がいてもよいという意見があった。

E.4 本章のまとめ

“ re-cognition ”, “ Beings - Haptic artwork with Smart Tool - ”はバーチャルリアリティの力覚提示技術を利用し、視覚、触覚の存在感をテーマとして制作した。人間は1つの物体を様々な感覚から知覚することが可能であり、それらを合わせることによってひとつの物体イメージを作り上げている。本作品のなかで、実世界ではあり得ない視触覚の関係性が断絶した経験をすることで、体験者に、何かが存在するというこの意味を問いかけ、自分の知覚過程を再認識してもらうことをねらいとした。

付録 F

感覚入力を利用した歩行誘導

本論文ではこれまで、人間の知覚特性を利用した情報提示手法及びその応用について述べてきた。本章では、情報提示を行うだけでなく、人間の知覚特性を利用して運動の誘導を行うウェアラブルデバイス及び、その提示手法について述べる。本章の研究は NTT コミュニケーション基礎科学研究所 主幹研究員 前田太郎氏の戦略的創造研究推進事業 さきがけタイプ (PRESTO)「協調と制御」領域「人間共生型インターフェイス」パラサイトヒューマン [266] の研究のなかで行われたものである。本章ではプロジェクトの概要及び、自分が研究を行った運動誘導を行うウェアラブルデバイス、具体的には、歩行周期を誘導する靴型インターフェイスについて述べる。

F.1 パラサイトヒューマンプロジェクト

F.1.1 目的と概要

パラサイトヒューマン (“Parasitic Humanoid” 以下 PH) は人間の nonverbal な感覚-運動モデルを獲得することを目的とするウェアラブルな人型ロボットシステム [267] である。人間と同位置、同機能のセンサ群、センサからの情報によってモデルを学習する神経系、及びモデルからの出力を装着者に伝える運動提示装置の 3 要素からなるシステムである。

人間の感覚-運動モデルの獲得は人間の感覚器と同位置、同機能のセンサ群によって、環境からの情報と人間の運動との関係を常時計測することによって行われる。使用するセンサ群として、人間の両眼と共役な位置にカメラ、両耳の位置にマイクロフォン、指先に圧覚感知センサ、全身の関節に姿勢角度センサ等が考えられる。そして人間の感覚-運動モデルを獲得した後、PH はそれを装着している人間との間に共生関係を構築しようとする。これはのどのようなことかということ、PH は図 F.1 のように、獲得された感覚-運動モデルを用いて装着者の次の行動を予測し、装着者にその行動をとるよう運動指令を出す。ただしこの時、行動を強制することはせず、装着者が運動指令に対してどのような行動を起こしたかを観察する。もし装着者が「PH が指令した行動は自分の行動の邪魔になる」と思えば、装着者はその行動指令を無視する。そうすると、PH は装着者が行動指令と違う行動をとったことを受けて PH 内の感覚-運動モデルを装着者の実際の行動に沿うように修正する。また、もし装着者が「PH が指令した行動は自分の行動よりも都合がいい」と思えば装着者はその運動指令に従う。これはすなわち装着者が PH の運動指令によって装着者自身の運動モデルを修正したことになる。このように PH と装着者は互いの行動モデルに影響を及ぼしあうことによって共生関係を構築する。PH と装着者との間に共生関係を構築するという目的を実現するためには、PH から装着者に運動を提示する装置が不可欠である。しかし、PH 自体は人間の身体を直接駆動させる力学的な出力機構を持っていないので、人間の筋骨格系、感覚系を利用し、運動の部位と方向を指示することによって人間に運動を提示する [268]。この装置の機能としては、運動のタイミングと運動部位、運動方向を正確に提示する小型のウェアラブルデバイスであることが求められる。

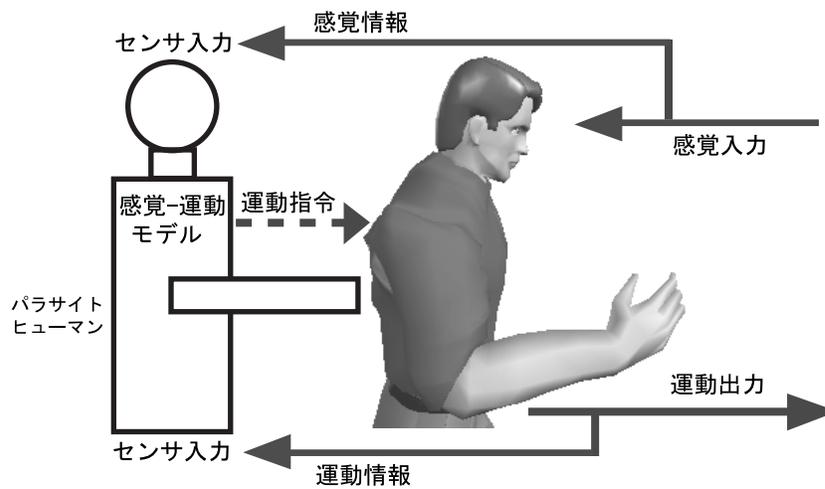


図 F.1 パラサイトヒューマンの概要

F.1.2 背景と特徴

近年、コンピュータの小型化・高機能化に伴ってウェアラブルコンピューティングの研究 [269] がなされているが、これらの研究では、小型計算機端末を身につけて情報提示に利用するという立場、もしくは小型センサを身につけて人間及び動物の運動状態を計測するという立場のどちらかである。PHは上記のどちらでもなく、環境の情報及び人間の運動情報の計測と装着者に対しての感覚-運動モデルに基づいた情報提示の両方を一つのウェアラブルシステムで実現したものである。装着者の全身計測という観点からは、人間工学 [270] やスポーツ医学 [271] の観点からいくつかの試みがなされているが、被観測者と同一視点からの感覚情報と運動情報の同時計測を継続的に行った例はなく、また、その過程から学習・適応した行動教示を行うシステムも存在していない。

PHは人間に寄生し、人間の行動を同一位置、同一精度で計測しつづけることによって人間の感覚-運動のモデル化を行う。人間と同スケールのセンサ群による適応的感覚-運動モデルとしては、ブルックスらのサブサンプリングアーキテクチャ [272] が存在するが、彼らの研究は、環境と相互作用する自立したロボットという観点からモデル化を行ったのに対し、本研究では、人間に寄生して計測を行うことにより、身体の制約を含めた形で人間の感覚-運動をモデル化することが可能である。また、自由度の多いシミュレーション環境の中で感覚-運動のモデル化を行うことも可能であるが、自由度の設定が問題となる。人間行動の記録・解析と、行動原理のモデル化においては実際の人間を、人間と同じスケールで計測することが最も近道であると考えられる。

また、PHは自立型ではなく寄生型のロボットデバイスととらえることができる。これは従来のロボットがアクチュエータを持ち、人間の活動を物理的に支援するように設計されてきたのに対して、PHは感覚情報によって人間の物理的運動を引き起こすことを狙った運動提示装置を有している。これはこれまでの自立型ロボットの視点とは異なり、人間の活動を感覚・情報の側面から支援する寄生型ロボットとして位置付けられることになる。

以上 PH の特徴をまとめると

- 環境・運動情報の計測と感覚-運動モデルによる情報提示の両方をウェアラブルシステムで実現
- 人間と同位置、同精度のセンサによって人間の感覚-運動の一次近似モデルを獲得
- 感覚情報によって人間の物理的運動を引き起こすことを狙った運動提示装置

ということが挙げられる．本研究の効果としては自然科学的な人間のモデル化，行動原理の基礎的研究に加えて，工学的応用として，新しい設計思想による適応型マンマシンインターフェースの構成が考えられる．

F.1.3 デバイスの実装

PHにおいて実装されたデバイスについて述べる．

全身の構成

本研究の第一目標は，環境の情報を記録すると同時に装着者自身の行動を記録，解析することによって，人間の感覚-運動システムのモデル化を行うことである．PHはウェアラブルコンピューティングの分野での既存技術を利用したシンプルな構成になっている一方，人間のサブセットとして必要な精度の情報を得ることができるよう設計されている．本システムにおけるセンサ群は常時装着して計測することができ，リアルタイムに環境及び人間の運動を記録することを目的として選定されたが，その際，重要視していることは計測によって人間の自然な行動に影響を及ぼさないということである．その構成を表 F.1 に示す．姿勢角度センサが頭部，胴部，各四肢の 16 箇所設置され，全身の姿勢角を計測する．頭部には視線方向検出センサ [273]，両眼カメラ+両耳マイクが設置される．また，指には接触点検出用の爪センサ [274][275] が各手 3 指に取り付けられる．鞋底には圧力センサ [276] が取り付けられ，移動中の足裏圧力分布の変化を計測する．これらのセンサ群の総重量は中継基板や配線を含めても 500g 以下であり人間の運動を損なうものではない．また，信号伝送には USB 規格を用いることによって柔軟性の高い構成となっている．一方，PH の運動出力系については直接的な力の入力によって装着者の身体を駆動するのではなく，人間自身の感覚-運動系の内部システムを利用して運動を誘導する方法 [277] をとる．これはリアルタイムに人間の感覚-運動系の内部状態モデルを獲得することで可能となる方法である．センサ群の実装例を図 F.2 に示す．また，センサの状態を表示させた PC 上の画面を図 F.3 に示す．

表 F.1 センサ群の構成

センサ種別	検出情報	検出信号数
姿勢角度センサ	頭部 1, 胴部 3, 各四肢 3 箇所	$16 \times 3 = 48$
視線方向検出センサ	各眼球 2 自由度 + 瞳孔径検出	$3 \times 2 = 6$
視聴覚センサ	両眼カメラ + 両耳マイク	2 画像 + 2 音響
爪センサ各手 3 指の曲げ	接触点の検出	$3 \times 3 \times 2 = 18$
鞋底圧力センサ	各足 5 点計測 + 衝撃センサ 1	$6 \times 2 = 12$

姿勢角度センサ

本研究では，関節角の角度が 3 軸，100Hz 程度の時間分解能で得られるが必要である．姿勢角度センサとして (株) トーキン社* 製のセラミックジャイロ，加速度センサ，磁気センサを組み合わせ，本体の 3 次元姿勢角度をリアルタイム検出するセンサユニット (MDP-A3U7) を利用する．体各部 18 個所に装着した状態で同時にサンプリングすることができる．既存のモーションキャプチャシステムと

* <http://www.tokin.co.jp/>



図 F.2 センサ群の装着図

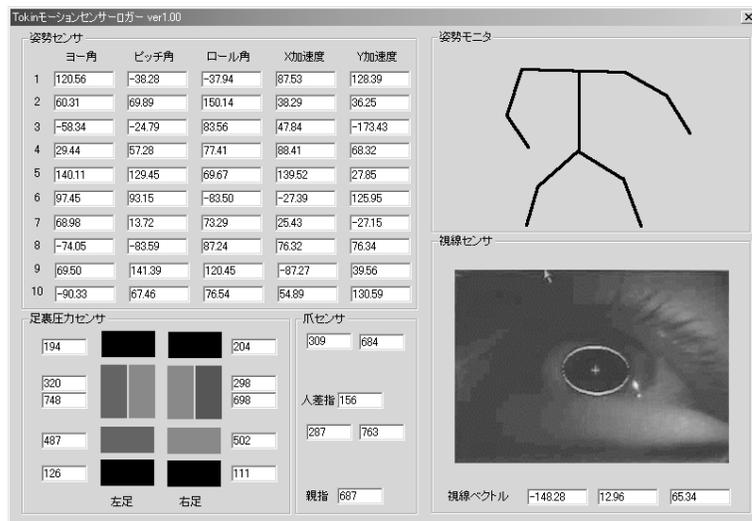


図 F.3 センサの状態表示画面

比較して、計測位置を選ばず長時間の計測が可能であるといった特徴を持つ。インターフェースとして USB 規格を採用しているため、パソコンへの接続が容易である。

セラミック・ジャイロは物体の回転速度を測ることに優れたなセンサで、非常に素早い動きにも対応することができる。このジャイロだけでも時々刻々変化する回転速度を足し合わせていけば、最終的な移動距離を知ることはできが、回転速度を足しあわせる方法では誤差が加算されていくという問題がある。一方、加速度センサは重力の大きさを検出するセンサで、これを 2 つ直交させて配置すると水平面に対しての傾斜角を検出するセンサとして使用できる。ところが、加速度センサは、素早く動かすと慣性による信号と重力の信号を判別できないため、正確な傾きが得られない。また、磁気センサは方位磁石と同じように、東西南北の絶対値を示すことができるが、これも素早い動きには追従できない。つまり、セラミック・ジャイロは素早い動きの計測に優れているおり、加速度センサと磁気センサは遅い動きの計測に優れている。そこで、上下、左右、前後の 3 次元方向のそれぞれに 1 つづつジャイロを配し、それとペアになるように、上下方向に磁気センサ、前後左右方向に加速度センサを組み合わせてやり、素早い動きがあった時はジャイロが重力センサや磁気センサに補正をかけ、ゆっくり動いている時は重力センサや磁気センサがジャイロを補正してやることで、すべての状態で正確に 3 次元姿勢角度を捉えるセンサを構成可能になる。センサの装着図を図 F.4 に示す。固定には強力なマジックテープを使用し、USB の配線は装着着の中を通してている。また、センサの仕様を表 F.2 に示す。



図 F.4 姿勢角度センサの装着図

視線方向検出センサ

PH において最も重要なことは、人間の行動の妨げにならないように計測を行うことである。しかし、従来の眼球運動計測装置 [278] には使用者の運動を一切妨げることなく長時間、眼球運動を計測することができる計測装置は存在しない。そこで、電子技術総合研究所の松田・永見氏が開発した、CCD カメラ、IrLED、PC の組み合わせによる無侵襲、簡便、安価、高精度な視線追従デバイス [105] を PH 向けにカスタマイズし、眼鏡上で実装することで人間の運動を妨げない視線方向検出センサを

表 F.2 TOKIN3D センサの仕様

項目	仕様内容
出力形式	Z-Y-X オイラー角
検出角度範囲	γ (ロール角, X 軸) : $\pm 60^\circ$
	β (ピッチ角, Y 軸) : $\pm 60^\circ$
	α (ヨー角, Z 軸) : $\pm 180^\circ$
インターフェイス	USB
サンプリングレート	125Hz
電源電圧	5V
消費電流	100mA 以下
外形寸法	幅 25mm × 奥行 36mm × 高さ 22.5mm

実現した [273] . 従来の視線位置計測には瞳孔画像のみを用いていたため, 校正および視線位置計測の際に被験者の頭部を拘束する必要があり, 被験者の負担が大きかった. 一方, 松田・永見氏らのデバイスは, 角膜に反射する照明光を検出することにより, CCD カメラに照明の反射点及び瞳孔が写る範囲であれば, 頭部が動いても視線位置を計測できる手法であり, 被験者への負担の少ないシステムが構築することができる. 計測器の原理は図 F.5 に示すように赤外 LED を光源とし, HotMirror(赤外光のみを反射するミラー) を介して眼球の映像を CMOS イメージセンサで撮像するものである. 赤外光の点光源で瞳孔を撮影すると, プルキンエ像と呼ばれる角膜表面での反射像が鮮明に見られる. このプルキンエ像の移動をカメラで検出しその移動量と眼球回転角度の関係から視線方向を検出する. 実装したセンサを図 F.6 に示す. サンプリングレートは 100Hz, 空間分解能は 0.1deg, 重量は 54g である.

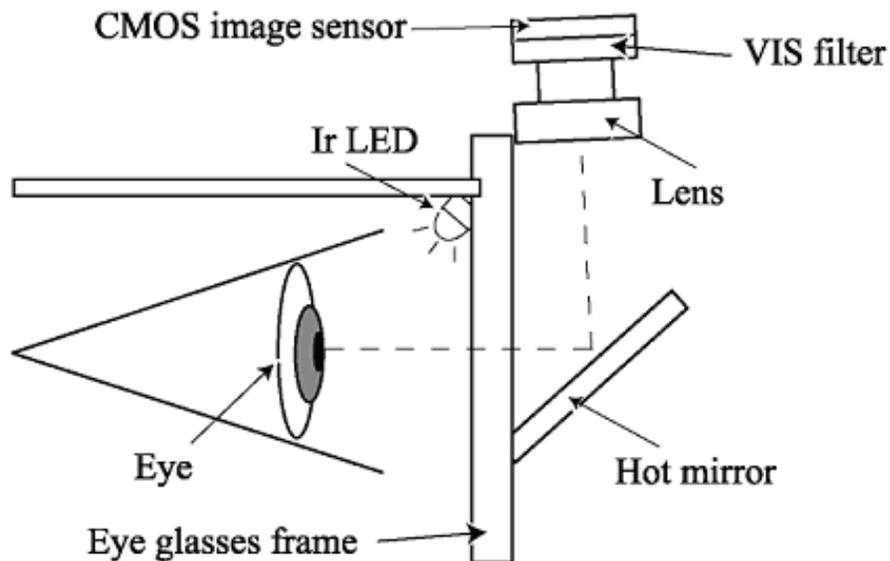


図 F.5 視線方向検出センサの原理

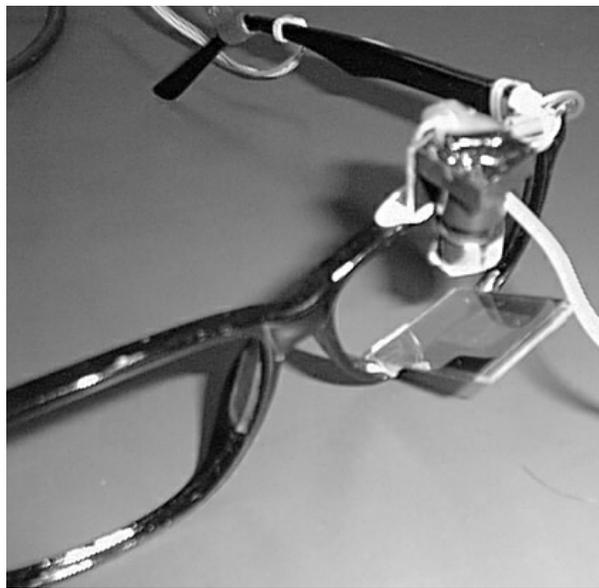


図 F.6 視線方向検出センサ

接触検出爪センサ

指先が物に触れた時に爪の色が変化することを利用したタッチセンサである [274]。爪の色を利用した指の接触検出はすでに研究されている [279] が、指の曲げによっても爪の色が変化することから、同時に屈曲も計測することができると考えている [280]。センサが爪上に配置されていることにより、指先の自然な感覚を損ねることなく接触の検出を行うことができる。爪の色の変化は、指先の血液の状態変化によるものであり、これは近赤外光を用いて測定することができる [281]。図 F.7 のように爪の上から発光ダイオード (LED) で指先を照らし、離れた位置でフォトトランジスタ (PT) により反射光を検出する。吸光度は血液の量と酸素飽和度に影響されるので、明るさの変化が血液の状態変化の指標になる。現在実装している爪センサは STANLEY 社製チップタイプ赤色 LED (BB1101W, 波長 660nm) の出射光を東芝社製フォトトランジスタ (TPS603A) で検出した後増幅し、Microchip Technology 社製マイコン PIC16F873 によって A/D 変換後、シリアル通信を通じて PC で計測している (図 F.8)。

靴底圧力センサ

靴底の圧力センサによって移動中の足裏圧力分布を計測する靴型デバイスを図 F.9 に示す [276]。圧力センサ (イナバゴム社[†] 製イナストマーシート) を 5 分割して靴の中敷部分に挿入する。この分割の形状は、歩行中の足裏圧力分布が図 F.10 のように変化することからそれにあわせて圧力センサを分割したもので、歩行状態を圧力センサ群から効率よく知ることが可能である。実際に計測した右足の圧力データを F.11 に示す。[282] のデータと同様に、足裏の圧力は踵の部分から上昇し始め、足の右側、左側、つま先の順に圧力が上昇していくのがわかる。圧力センサからのデータはシリアル通信によって PC に送られているが、靴に小型のマイコンを取り付けることで、データを靴の段階で処理し、装着者に対し歩行状態に合わせて何らかの働きかけを行う靴システムを構成可能である。

[†]<http://www.inaba-rubber.co.jp/>

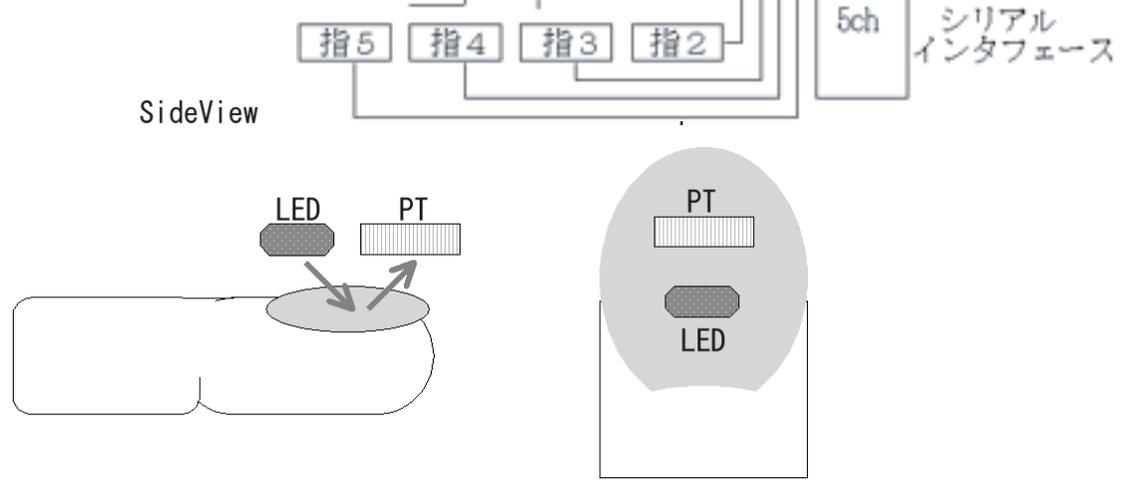


図 F.7 爪センサの概要

図 F.8 爪センサの構成図



図 F.9 靴底圧力センサ

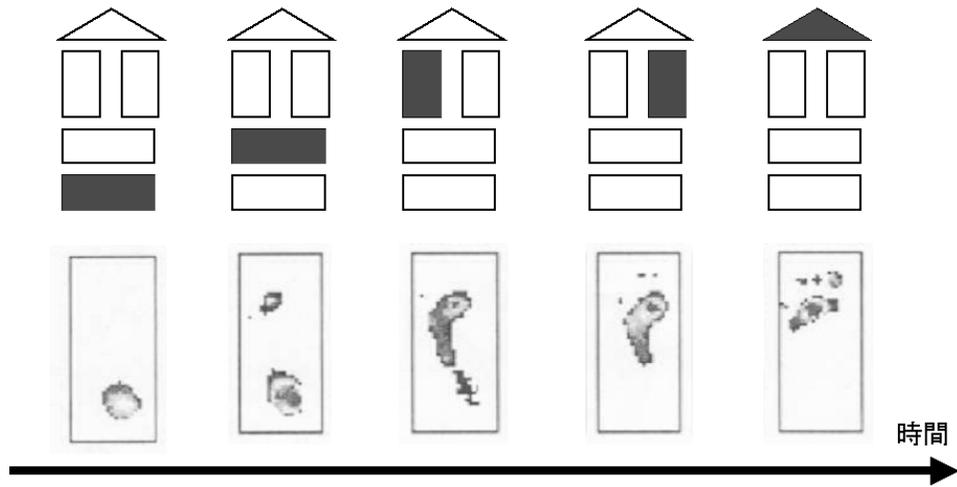


図 F.10 歩行中の足裏圧力分布の変化 [282] から引用

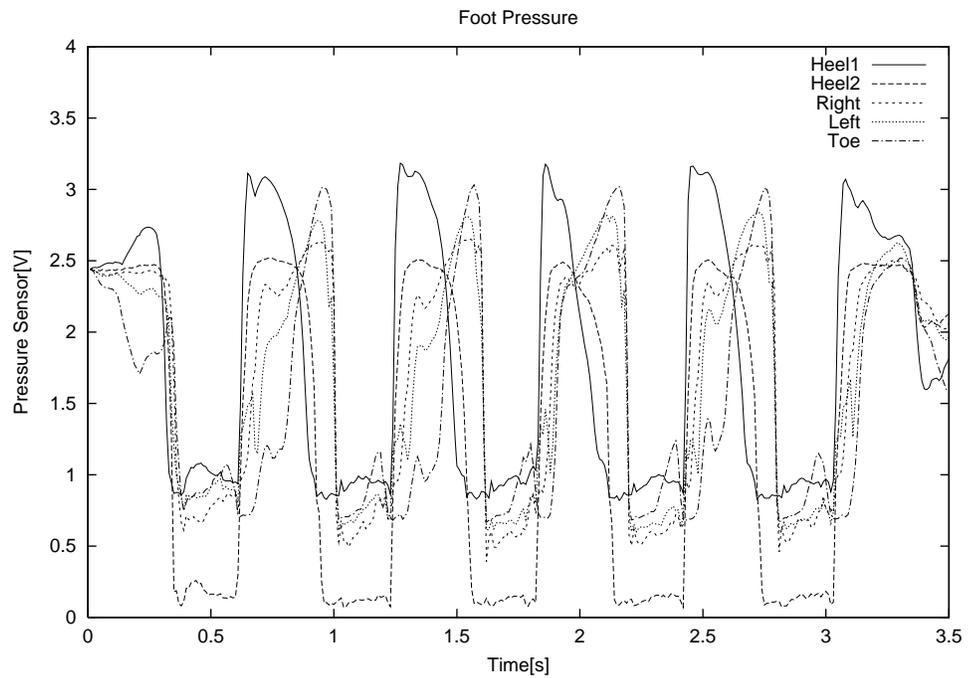


図 F.11 計測した歩行中の足裏圧力分布（右足）

モデル化の方針

PHは人間の近似モデルを得ることを目的としているが、人間のモデル化を行うということは感覚器から上がってくる様々な情報を脳が如何に処理し、どのように行動に反映しているのかということを書述することである。人間のサブセットとして人間の感覚-運動を計測するPHも脳(神経系)を持つ。PHは体各部のセンサから大量のデータを取得し、得られた情報から自己組織的に学習をおこなうことで人間の身体構造モデルを獲得する。モデルの獲得過程においてはオフラインでの統計的な数理処理をおこなう一方、オンライン学習型の神経系を持ち、感覚-運動間の情報統合を行う[283]。神経系の構成には人間の脳研究から得られている知見を積極的に用いるが、PH神経系はノートPC上で実時間オンライン処理が可能な形でモデル化されなければならない。PHは人間に装着された状態で人間と同相の感覚情報と運動情報を得ることができる。この情報を元に以下の2つの段階を経て人間の運動モデルを獲得することを目指す。

1. 初期状態のPHが内部に持つ行動モデルが学習前の状態の場合、直前までの感覚-運動履歴と現在状態からモデルを用いて次の行動を予測し、その正誤に基づいて内部モデルの修正を繰り返す、この段階のPHは受動的に情報を観測し予測と修正を繰り返す。
2. 上記予測モデルが十分な予測性を持つに至った時点で、PHはその予測に外れた装着者の運動に対して直接的に自分の運動出力をもって異を唱えることを始める、このとき、装着者がその出力を妥当だと判断すればそれに従い、そうでないとすれば行動を修正しない。この新たな行動結果をもとにPHもまた内部モデルの修正の有無を決定する。

こうして、人間とPH双方において行動の内部モデルを修正・整理することを繰り返す共生系を確立することを目指す。同段階において、PHと装着者の間にはある種の非言語コミュニケーションが確立されることになり、この様式に共生的に装着者が馴染むことが、PHの非言語コミュニケーションインタフェースとしての応用の端緒になると期待される。

モデル化の手法

近年の脳科学の知見によれば、脳の行動生成メカニズムは感覚情報から行動を生成するにあたって、状態を分類・検出するデジタルな判断生成系と連続量を扱うアナログな行動生成系から構成されていると考えられている[284]。各種感覚情報は常に頭頂系(Dorsal Path)及び側頭系(Ventral Path)の2つの経路に分岐して投射されるが、主として頭頂連合野が定量的な感覚情報・運動情報を統合、変換するアナログ系として働き[285]、側頭連合野は定性的な弁別・分類を行うデジタル系として働く。前頭連合野は側頭系からデジタルに判別された情報に基づいて、どの種類の行動を行うのかを選択決定する。その結果、運動野は行動指令を頭頂系から量的に決定され、前頭系からの抑制解除によって行動の種類を質的に決定される。このアナログ系による連続的な量の処理とデジタル系による決定論的な質の処理の複合が脳の行動生成プロセスの基本構成であると考えられる。これらと同構造のメカニズムをPHの内部モデル上に自己組織型神経回路モデルを基礎として構成する。

F.2 歩行誘導の概要

本節からは、PHにおいて自分が研究を行った、感覚入力による歩行誘導の研究について述べる。

これまで歩行運動の誘導は主にランニングマシンのように筋骨格系を直接駆動することによって実現されてきた [286]。しかし、歩行運動とは図 F.12 にあるように視覚、足裏の圧力感覚などの感覚入力から神経系が影響を受け、その神経系が運動指令を出し、筋骨格系を通じて環境との力学的相互作用の結果生じるものと考えられる。そこで、本研究では、筋骨格系を外力によって直接駆動するのではなく、感覚入力を通じて神経系に影響を与え歩行の誘導を行う。

実際、歩行運動などのリズム運動において、その運動リズムは感覚からの周期的入力に影響を受け、そのリズムとリズムの間に同調現象が生じる。この同調現象は一般に引き込み [287][288] と呼ばれている。この引き込み現象は日常生活においても頻繁に観察される。例えば、歩く周期に近いマーチのリズムを聞きながら歩いていると、歩行リズムは聴覚を通じて影響を受け、やがて、合わせようと意識しなくてもマーチのリズムに合ってしまう。また、マーチと同一のリズムで歩行している途中に、マーチのリズムが少し早い周期になると、歩行者は無意識のうちにマーチのリズムに合わせて速く歩いてしまうということが観察される。

また、生理学的にも人間の歩行リズムは CPG (Central Pattern Generator) [289] と呼ばれる神経振動子によって生み出されており、その神経振動子の振動パターンは感覚入力から影響を受け、振動パターンを変化させることが動物実験では確かめられている [290]。

具体的には、図 F.12 に示すようにリズム運動の周期等の運動状態を計測し、その運動状態に合わせた何らかの感覚入力を加えてやることにより、リズム運動の周期を誘導する。この時どのような入力を加えると引き込みが起こりやすいのか、実際に感覚入力を行い、その歩行状態を計測することにより安定した歩行誘導のための感覚入力を決定する。そして、感覚入力と歩行周期の変化の関係を、これまでの歩行モデル及び実際の人間の神経構造を考慮して、モデル化を行い歩行誘導のための設計論を構成する。次いで、得られた設計論をもとに歩行誘導インターフェイスを実装する。

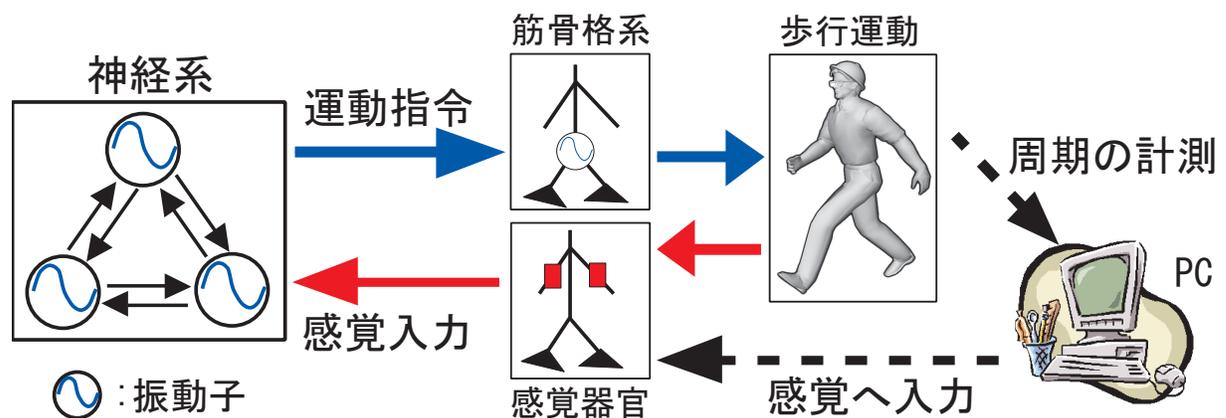


図 F.12 歩行誘導の概要

F.3 歩行誘導研究の背景と特徴

F.3.1 背景

人間にとって歩行運動は様々な意味で欠かすことが出来ない。歩行運動は、人間にとって最も基本的な移動手段であると同時に、現代ではスポーツや健康のための手段としても重要視されている。また近年では歩行(ウォーキング)への注目は益々上昇し、工学・医学など多岐にわたる分野で様々な角度から計測及び解析が進められている。歩幅・歩行速度・歩調などの歩行形態の計測 [291] から、酸素消費量などのエネルギーまで含めた計測 [292] 等歩行の様々な状態が計測されている。バイオメカニクスや医療の分野では子供や高齢者歩行の特徴抽出 [293] や健康のための歩行運動 [294] などの研究もある。また、歩行介助の機器として計算機を利用した義足に関する研究 [295] も行われている。

人間の歩行モデルは多くの分野で必要とされるため、その研究も多岐にわたる。関連する研究としては、人間の筋骨格系を力学的にモデル化した山崎らの研究 [296][297] や、神経系に着目して振動子モデルを用いた三宅らの研究 [298] が存在する。また歩行運動は筋骨格系と神経振動子系の相互作用によって生成されると考えられ、それを非線形微分方程式によって記述した多賀の研究 [299][300] も存在する。二足歩行ロボットに関する研究では力学系を考慮した安定歩行生成 [301] や、振動子を用いた歩行生成などの研究 [302][303] もされている。

F.3.2 特徴

本研究の第1の特徴としては、外部から強制的な力によって歩行の周期を変化させるのではなく、人間自身の神経システムが持っている引き込み現象を利用し、効率的に運動の誘導を行うという点が挙げられる。この手法を利用して歩行誘導デバイスを実装した場合、筋骨格系ではなく神経系への働きかけを行えばよいので、少ないエネルギーで実現可能である。また、本手法は神経系に働きかけを行っているが、感覚入力に対して人間側が意識的に合わせることを強制するものではない。人間側の状態を計測し、その状態からある状態へ人間が意識しなくても自然に誘導されるものである。もちろん、感覚入力を無視することも可能である。

第2の特徴は、感覚と運動の関係を実際の計測データを使ってモデル化したことである。これまで、歩行の神経系モデルの研究では、コンピュータ上でのシミュレーション [299][303] もしくは4足ロボットの歩行 [302] でしかその有用性が検証されていなかったが、実際に人間に適用していくことにより、詳細なモデルが得られるものと考えられる。また、本研究では聴覚や腕、脚の振動感覚等、様々な感覚へ入力を加え引き込みを起こさせるが、感覚間の相違や関係性をモデルの中に組み込むことが可能である。

F.3.3 応用

本研究の応用として以下のものを考えている。

- リハビリテーション及び福祉への応用

パーキンソン病 [304] など筋骨格系は健全であるが、神経系の障害によって歩行が困難な患者のリハビリに本システムは利用可能である。また、高齢者に対しても安定した歩行をサポートし、またそれにともなって健康の増進を図ることが可能である。歩行は単なる移動手段ではなく、健康という面でも人間に対して大きな意味を持っている。

- スポーツへの応用

競歩やマラソン等、歩行・走行能力を競う競技では、練習時にペースメーカーが利用されているが、

それはペースメーカーからの感覚入力に対して人間側が意識的にペースを合わせる事が前提とされている。本研究の提案する誘導方法では人間側の状態にあった感覚入力を入れてやることによって無理なく歩行・走行の状態を誘導するものである。また、近年マラソンではラビットと呼ばれる、トップランナーのペースを誘導するためのランナーがいるが、ペースを誘導するにはトップランナーの状態にあった誘導が必要であり、ペースメーカーとしては本システムのほうがラビットより優れている可能性がある。

- 歩行制御モデルの構成

歩行だけでなく走行時の状態も測定することにより歩行・走行両面に適用可能なモデルを構成できる。また、歩行動作から走行動作に移行する際の条件などを特定することが可能になる。本研究によるモデルにより、歩行と走行のモード切り替え時の状態などを明確にし、人間の動作に対してより広範囲に適用可能なモデルを構成することが可能である。また、得られたモデルをロボットに組み入れることにより安定した歩行動作を可能にする。

- 歩行誘導サービスの実現

人の歩行を誘導可能な新たなインターフェイスを作成可能。人に対する情報提示は視覚・聴覚に作用するものが多いが、身体に何らかの力や振動を加えることにより方向などの情報を伝える新しいインターフェイスを作成可能である。例えば安定した歩行状態のもとで、これと異なるリズムを与えることにより何かに注意を向けさせることができる。或いは左右の腕に異なる力を作用させることによって、左右2値の方向を提示することも考えられる。また個人の移動方向を制御することによって集団の人の流れを制御することも可能となる。

F.4 歩行誘導サービスの実現

本節では、感覚入力を利用した歩行誘導の応用例として、健常者に対する歩行誘導サービスを取り上げ、サービスを実現するためのデバイス、刺激入力方法について述べる。

F.4.1 歩行誘導サービスの背景

歩行は人間にとって最も基本的な移動手段であり、歩行者は周囲の環境によって様々な歩行状態を変化させている。例えば、信号の変わり目では早歩きになり、前方の歩行者に近付き過ぎれば歩行速度を遅くする。また、人を避けるために左右への移動も行う。このように、日常生活において歩行者は、常に環境の状態に対して注意を払い、判断し、歩行状態を変化させ続ける必要がある。しかし、何らかの方法で、例えば、ウェアラブルデバイスで環境情報を取得し [305]、歩行者を適切な歩行速度や方向にナビゲートすることができれば、信号を気にせずとも信号に止まらず歩行する、時計を見ることなくある時刻に合わせて到着する等、効率的に移動することが可能になる。また、このような歩行ナビゲーションを多人数が同時に受けることによって、混雑した場所でも周囲の歩行者と快適な距離 [306] を保ちながら移動することが可能となる。そこで、本論文においては、このような歩行ナビゲーションを実現するための靴型歩行周期誘導インタフェース（図 F.13）を実装し、誘導を効率的に実現するための刺激の入力方法について論ずる。



図 F.13 提案する靴形歩行周期誘導インタフェース

F.4.2 感覚入力による歩行周期誘導

前述のような歩行ナビゲーションを実現するためには、歩行者の歩行方向と歩行速度を制御することが重要である。これまで筆者らは、歩行方向に関して、前庭感覚を刺激して歩行方向を誘導する研究を行ってきており [307]、本論文では歩行速度の制御について論じていく。歩行速度は歩幅と歩行周期によって決定されるが、先行研究において、歩行速度の増減は歩行周期の増減によって決定されていることが報告されている [308]（実際、本論文の実験条件においても、歩行周期によって歩幅は

表 F.3 三宅らの先行研究との違い

	三宅らの先行研究	本研究
目的	高齢者・障害者の歩行介助	健常者の歩行誘導
感覚入力	聴覚への音入力	足の甲への振動入力
引き込み	相互引き込み	強制引き込み

ほとんど変化しなかった)。そのため、本研究では歩行者の歩行周期を誘導することで歩行速度の制御を実現することとした。

歩行周期を誘導するにあたっては、「速く」「遅く」等の誘導情報を音声や映像によって与えることも可能であるが、周期をどの程度変化させればよいのか、直接的に示すことは困難である。一方、このような言語的誘導に対し、直感的に解釈しやすい周期誘導の手法として、感覚入力に対してリズム入力を加え、その入力に対して人間が半無意識的にあわせてしまう、引き込み [287][288] と呼ばれる現象を利用した手法が考えられる [309][310][311]。また、引き込みを利用して歩行誘導インタフェースを実装した場合、ランニングマシンのように筋骨格に物理的に働きかける [312][313] のではなく、感覚へ働きかけを行えばよいので、少ないエネルギーで歩行周期の誘導が実現可能となる。そのため本研究では、感覚入力による引き込みを利用して歩行周期の誘導を行うこととした。

歩行誘導のための刺激を入力する主な感覚として、視覚（点滅する光点）、聴覚（リズム音）、触覚（周期振動） [277] が考えられる。しかし、歩行中に周囲の環境から得られる視聴覚情報が歩行誘導のための入力刺激によって妨げられることは望ましくないと考えられ、振動入力を採用した。また、歩行誘導デバイスとしては、歩行の際には必ず装着し、歩行の邪魔にならない靴型インタフェース [314][315] を採用し、足の甲へ振動入力を行うこととした。

そして、歩行ナビゲーションを実現する上では、誘導のための感覚入力が心理的に邪魔にならない、つまりは、歩行者が自然に合わせることができ（大股・小股の歩行になる等、歩行が不自然にならない）、歩行中の他のタスクの能率を損なわないことが重要である。そこで、本論文においては、歩行を物理的に阻害しない靴型インタフェースを実装するとともに、歩行者に対して様々な条件で感覚入力を行い、心理的に邪魔にならない感覚入力の条件を特定した。

F.4.3 本手法の特徴

これまで、引き込みを利用した歩行誘導の研究として、三宅らの人間と機械が互いに協調し合う共創モデルを用いた歩行安定化の研究が存在する [309][310][316][317][318]。これらの研究においては、歩行リズムを足裏のタッチセンサによって計測し、聴覚へ引き込みのための音刺激を入力することで歩行を安定化させ、高齢者や障害者の歩行介助を実現している。一方、本論文で提案する手法は、表 F.3 にあるように、健常者が日常生活において効率的な歩行移動を実現するために、歩行者の歩行を物理的に、心理的に阻害しない範囲で誘導（制御）することを目的としている。

三宅らの研究では、引き込みの形態として、相互引き込み、つまりは、感覚入力と歩行周期が相互に変化しながら、ある周期へ安定していく引き込み形態を利用しているのに対して、本研究では強制引き込み、つまりは、一定の感覚入力に対して人間側が半意識的にあわせる引き込みの形態を採用している（強制引き込みという名称は感覚入力は変化せず一定であるのに対して、人間側が合わせるという引き込みの形態を表しており、人間に対して何らかの強制力があるという意味ではない）。相互引き込みはお互いが徐々に変化していくため、引き込み状態になるまで時間がかかるが、その状態は

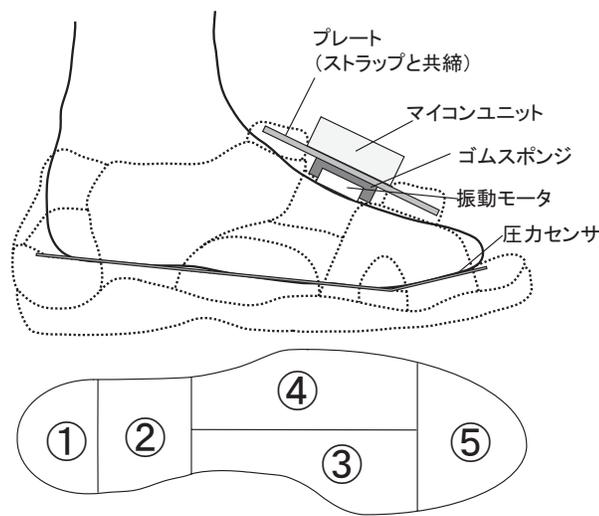


図 F.14 靴形歩行誘導インタフェースの構造

非常に安定しており、歩行安定化に適していると考えられる。一方で、本研究で採用している強制引き込みは、引き込み状態に至るまでの時間が短く、即時性を持っているため、歩行を誘導（制御）するという観点からは、この強制引き込みが適していると考えられる。

本研究は、これまでの研究とは異なり、健常者の効率的歩行移動をサポートすることを目的としている。誘導手法の特徴としては、外部視聴覚情報取得の邪魔にならない足の甲への振動刺激を利用して引き込みを起こしている点、計測・感覚入力システムをひとつの靴型インタフェースとして実装されている点が挙げられる。

F.5 振動入力による歩行誘導実験

提案する歩行誘導手法においては、靴型インタフェースによって歩行者の歩行を物理的に阻害することなく誘導を実現するとともに、感覚入力も心理的にも歩行を阻害しないことが重要である。本論文においては、心理的に歩行を阻害しないということ、歩行中に行われている他のタスクの能率が損なわれないということによって評価し、タスクの能率が損なわれずに引き込みが可能な感覚入力の条件を特定した。以下、実験 1, 2 では、実際に歩行中の人間に振動刺激を加え、歩行誘導実現における以下の項目について検証した（項目番号は実験番号を表す）。

1. 引き込みを起こしやすい振動刺激のタイミング
2. 他のタスクを阻害しない刺激周期の変動範囲

F.5.1 具体的歩行誘導手法

実験に使用した靴型インタフェースの外観を図 F.13 に、構造を図 F.14 に示す。靴底に中敷き状の圧力センサ（イナバゴム社 イナストマーシート）が図 F.14 下のように 5 分割されて敷かれており、その圧力分布を計測することによって立脚や遊脚の歩行状態を検出する。また、足の甲が触れる箇所に小型の振動モータ（TPC 社 FM23A）がスポンジゴムによって固定されており、このモータによって周期的な振動刺激を行う。一度の振動刺激は周波数 160Hz で振動量 1.0G の刺激を 200ms 与えた。この振動刺激は靴の上から与えられるものであるが、被験者はその振動を充分知覚可能であった。そ

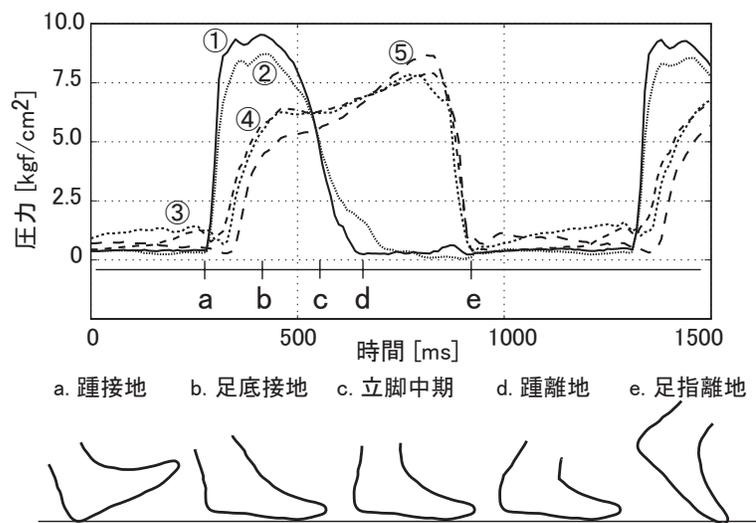


図 F.15 足裏の圧力分布と歩行状態

して、その振動は歩行を阻害するものでもなかった。足裏圧力の計測および振動の制御は 100Hz で行った。具体的な誘導手法は、はじめに、歩行者の平均歩行周期を靴底の圧力センサによって計測する。そして、その計測された歩行周期近傍の振動刺激を靴の甲についた振動モータによって与え、歩行者にその周期に合わせて歩行してもらうという手順で行った。

F.5.2 歩行誘導実験におけるデータ処理

各実験においては同じ靴型インタフェース、同じデータ解析手法を用いた。本節では実験で用いた周期と位相の計測手法、データ処理について述べる。

歩行時における足裏の圧力分布の例を図 F.15 に示す。この図は歩行時の左足 1step を抜き出したもので、横軸が時間、縦軸が計測された圧力を示している。各丸数字は図 F.14 下の圧力センサの値である。足裏が接地するにあたって、はじめに踵部（ ）の圧力が上がり始め、順につま先（ ）方向へ圧力分布が移っていくことが観察される。人間の歩行動作は立脚と遊脚を繰り返すが、立脚している状態でも踵接地、足底接地、立脚中期、踵離地、足指離地とさらに分類される。これらの歩行状態は図 F.15 のように、足裏分布から推定可能である [282][319]。また、右足と左足はほぼ半周期前後にシフトした波形となる。

次に歩行周期と刺激周期の定義について図 F.16 に示す。歩行周期は、圧力センサ の圧力が閾値 5kgf/cm^2 を越えた時刻 A_t から次に閾値を越えた時刻 A_{t+1} の時間差を求めたものである。刺激周期は、振動モータ通電時刻 B_t から次の通電時刻 B_{t+1} の差を求めたものである。また、この 2 つの周期の位相差 ϕ は式 (F.1) によって求めた。

$$\phi = \frac{2\pi(A_t - B_t)}{B_{t+1} - B_t} \quad (\text{F.1})$$

図 F.17 は振動刺激に合わせて歩行するように指示した場合と、振動刺激を無視して歩行するように指示した場合の、歩数と位相差の関係を示したものである。刺激に合わせて歩行し、引き込みが起きた場合は歩行周期と刺激周期が等しくなるので、位相差は一定に収束する。一方、刺激を無視した場合には、歩行周期と刺激周期に一定の差があり、歩数に対して位相差は単調増加（歩行周期が刺激周期より長い場合）もしくは単調減少（歩行周期が刺激周期より短い場合）する傾向がみられる。

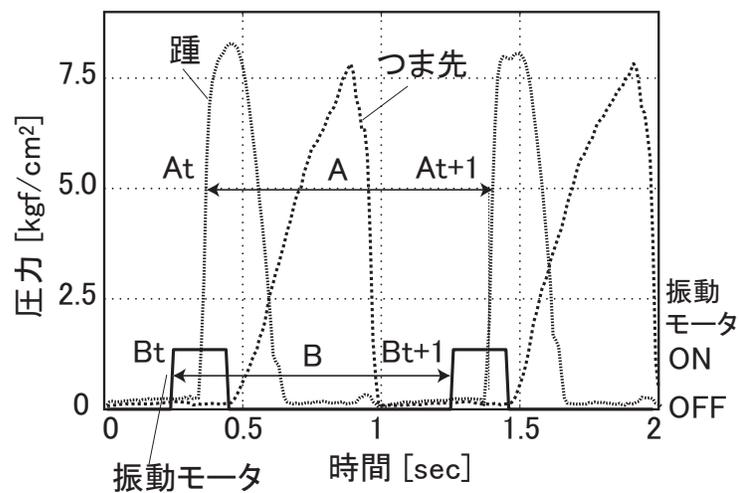


図 F.16 歩行周期と振動刺激周期の定義

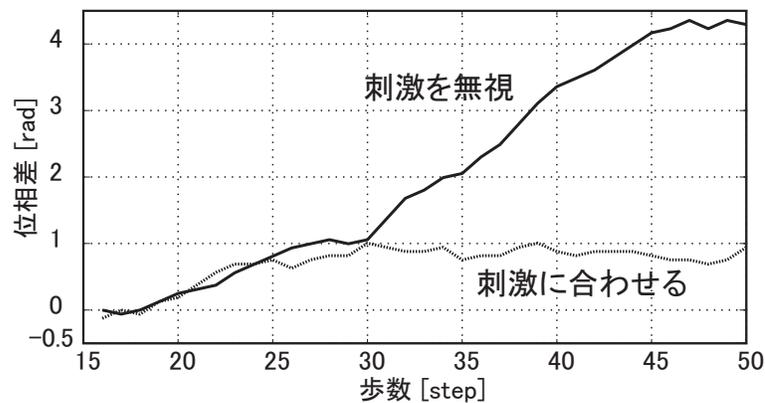


図 F.17 同期の有無による位相差の変化

F.6 実験 F-1：振動刺激のタイミングの同定

歩行動作は大きく立脚と遊脚に分けられ，さらに立脚時は図 F.15 のように細かく分類される．本実験においては，これらの歩行状態の遷移において，どの状態のときに振動刺激を与えることが，歩行誘導を行ううえで効率的であるかを調べた．

F.6.1 実験条件

被験者は広い平坦な運動場を片足あたり 60 歩，約 120m 歩行する．このとき，5 つの歩行状態のいずれかに合わせて振動刺激を与え，被験者がどの歩行状態に振動刺激を合わせて歩行するかを調べた．実験手順は以下の 2 つのフェーズに分かれる．

1. 足裏の圧力変化による歩行平均周期の計測．
2. (1) の周期を固定周期として 5 つの歩行状態のいずれかのタイミングで振動刺激を与える．

フェーズ 1 では，5～15step の 10step の歩行平均周期を求め，これを基準周期とした．フェーズ 2 では，16step から 60step まで，踵接地（足裏圧力が閾値を超えて 0ms 後），立脚中期（200ms 後），踵

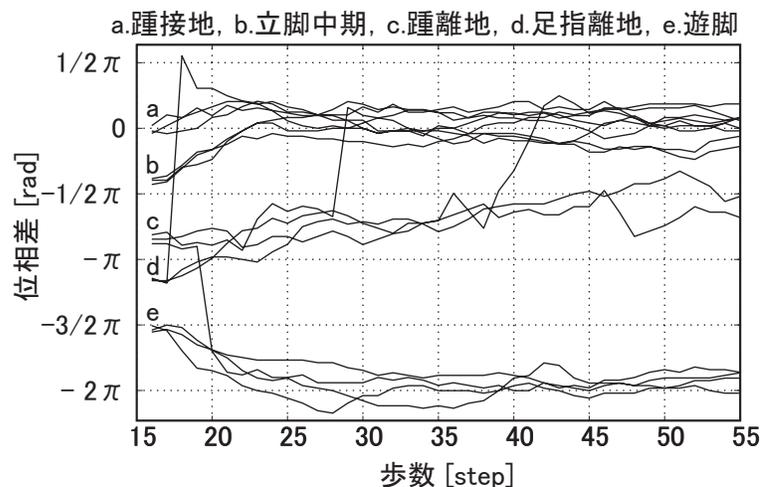


図 F.18 引き込みを起こしやすい振動刺激のタイミング

離地 (400ms 後), 足指離地 (600ms 後), 遊脚 (800ms 後) の 5 つのタイミングのどれかで, フェーズ 1 で得られた基準周期の振動刺激を与える. ただし, 16step からどの歩行状態のタイミングで刺激が入るかはランダムとし, 被験者には振動刺激がある歩行状態に合わせて入れられていることや, 振動刺激の周期が平均歩行周期と一致していることは知らされていない.

被験者へのインストラクションは, 実際に歩行ナビゲーションを行う状態を想定し, 特にどの歩行状態に合わせるかは指定せず, 単に「なるべく振動刺激にあわせて歩行してください」というものであった. また, 提案する歩行誘導手法では, 感覚入力に対して半無意識的に歩行周期があってしまう引き込み現象を利用しているため, 被験者が入力される振動刺激に集中することがなくても歩行誘導が可能であると考えられる. そこで, 本実験においては, 被験者の意識を振動刺激以外のものにも向けるため, 歩行と同時にスイッチ押し作業によるダブルタスクを行ってもらった. このタスクは 100mm × 70mm の長方形の基板に赤と青の LED とプッシュスイッチがそれぞれ一組ずつ実装されており, 赤の LED が点灯したら赤のスイッチを, 青の LED が点灯したら青のスイッチをできるだけ早く押すものである. LED はスイッチを押すことにより消灯し, 歩行とは関係ない周期でどちらがランダムに点灯し, 点灯までの時間も 0.5 ~ 3sec のランダムに設定した (このダブルタスクには視覚遮断することなしに視覚による位置・速度の確認を困難にする効果もある). この条件の下, それぞれのタイミングで 3 セット計 15 試行を健常な歩行能力を持つ 20 代成人男性 3 名に対して行った.

F.6.2 実験結果

計測された 3 名の歩行周期の平均 (標準偏差) はそれぞれ 1017 (22.4), 1003 (18.9), 1047 (16.3) ms であった.

歩行周期と振動刺激の位相差を式 (1) に基づいて計算した結果を図 F.18 に示す. この図は一人の被験者の全試行について示したものである. 図 F.18 中の a, b, c, d, e はそれぞれ踵接地, 立脚中期, 踵離地, 足指離地, 遊脚の 5 つの状態では振動刺激を与えた試行である. 多くの試行において, 歩行が進むにつれ位相差が 0 rad に収束する傾向, つまり振動刺激を踵接地時に一致させる傾向が見られる. また, -2π rad に収束する場合もあるが, これは 1 周期あとの踵接地のタイミングに一致する. その他 $-1/2\pi$ rad から π rad にも若干見られる, これらは立脚中期と足指離地の間に相当する. 他の被験者も同様の傾向を示し, 踵接地に収束する割合は 3 名それぞれ 86.7%, 66.7%, 73.0% であった.

この結果より、歩行者が最も引き込まれやすい（強制引き込みが起こりやすい）振動刺激のタイミングは踵接地時であると考えられる。この理由として、日常の歩行において足が最も刺激されるのは着地時（踵接地）であり、振動刺激においても踵接地のタイミングに合わせることが自然に行われたと推測される。次章からの実験においては、踵接地時に振動刺激を与えることとする。

F.7 実験 F-2：他のタスクを阻害しない刺激周期の変動範囲

本実験では、提案する歩行誘導手法において、どの程度の振動周期の変動ならば、歩行者に心理的負荷をかけることなく歩行周期の誘導が可能であるかを調べる。具体的には、被験者に実験 1 と同じスイッチ押しタスクをしながら歩行してもらい、歩行周期と振動刺激の周期が同期している状態から振動刺激の周期を変動させたときに、スイッチ押しタスクの成績が落ちない変動範囲を特定した。本実験では、歩行者の心理的負荷を歩行中に行われているスイッチ押しタスクの反応時間によって評価し、振動刺激への追従によって心理的負荷がかかった場合、スイッチ押しの反応時間が長くなると考えた。

F.7.1 実験条件

被験者は実験 1 と同じ 3 名で、同じく 60 歩、約 120m を歩行する。インストラクション、ダブルタスクも実験 1 と同様のものを与えた。実験は以下の 3 つのフェーズに分かれる。

1. 足裏の圧力変化による歩行平均周期の計測。
2. (1) の周期を固定周期として振動刺激を与える。
3. (1) の周期に一定の時間 α ms だけ進ませた（遅らせた）振動刺激を加える。

フェーズ 1 では、実験 1 同様 5 ~ 15step において歩行平均周期（基準周期）を求めた。フェーズ 2 では、16 ~ 35step まで踵接地のタイミングに基準周期で振動刺激を与えた。フェーズ 3 では、36 ~ 60step まで基準周期を一定の時間 α ms ($\alpha = -200, -150, -100, -50, 0, 50, 100, 150, 200$) だけ変化させて振動刺激を与え続けた。この条件の下、それぞれのタイミングで 3 セット、27 試行を行った。また、ダブルタスクにおける LED が点灯してからスイッチを押すまでの反応時間も同時に計測した。

F.7.2 実験結果

刺激周期の変動と歩行周期の関係の典型例を図 F.19 に示す。階段状の直線は各脚に与える刺激周期であり、 $\alpha = -200, -100, 0, 100, 200$ ms のデータが示されている。35step までの刺激周期は 5 ~ 15step に得られた基準周期によって決定されているため、各試行によって若干異なっているが周期自体に変動はない。36step 以降は基準周期に α ms の変動が与えられている。また、この直線に振動的に追従する曲線が歩行周期である。刺激周期を目標周期として、それぞれの歩行周期が追従するように変化していることがわかる。

観察された被験者の歩行状態としては、 $\alpha = 200$ のときはゆっくりとした歩行が観察されたが刺激周期に歩行周期を合わせるのが非常に困難に見えた。 $\alpha = -200$ では刺激周期に同期可能であるものの競歩に近い歩行状態であり、被験者によっては走行しなければ追従が不可能であった。

本実験では、歩行者の心理的負荷を歩行中に行われているスイッチ押しタスクの反応時間によって評価した。表 F.4 に各刺激周期の変動幅における位相同期時（フェーズ 1 と 2 : 5 ~ 35step）、位相変

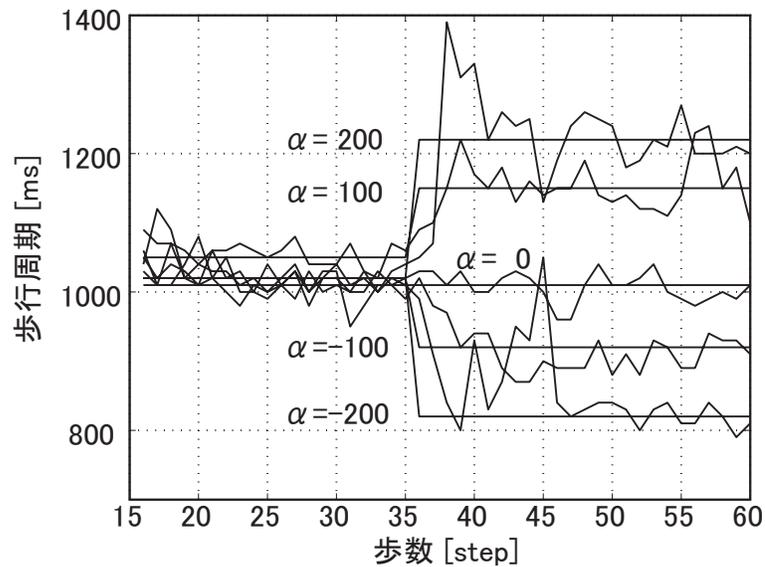


図 F.19 振動刺激の変動幅と歩行状態の変化

化時（フェーズ3：36～60step）の反応時間の平均，標準偏差，それらの値の同期時と変化時の比率を示す．位相同期時の反応時間の平均（平均の欄，各被験者1行目）は被験者3人ともおよそ300ms程度であり，また，標準偏差（標準偏差の欄，各被験者1行目）も全ての被験者において100ms以内に収まっており，安定したタスクが行われている．一方，位相変化時（各被験者2行目）においては，反応時間の平均は同期時と同等であるものの，標準偏差においては変動幅による大きな違いが見られる．特に周期の変動幅の絶対値が大きくなると標準偏差が大きくなっている．このような位相同期時と位相変化時のタスク効率の違いを定量的に判断するために，位相変化時の値を同期時の値で割ったものを計算し，周期変動によるタスク反応時間の平均，標準偏差の増加率を計算した．その結果を図F.20に示す．横軸が刺激周期の変動幅 α であり，縦軸が位相同期時を1とする位相変化時の比率である．被験者3人と3人の平均のデータを示す．図F.20aに示されている平均値の増加率は α が-200msの条件においてやや増加が見られるが，他の条件においては，刺激周期の変動による影響は殆ど見られない．一方，図F.20bに示される標準偏差は，速い歩行速度が誘導される α が-200msの条件，被験者によっては-150msの条件において著しく増加していることが観察される．

F.7.3 考察とまとめ

本手法では歩行周期を誘導するために強制引き込みを採用しているが，歩行周期が誘導周期に達するまでの時間はおよそ5～10秒程度である（図F.19）．一方，相互引き込みを利用した三宅らの研究[317]では，安定した歩行周期に達する十数秒程度の時間が必要となっており，歩行周期の誘導には強制引き込みが適していると考えられる．

また，タスクの反応時間に関して，図F.20bに示された標準偏差の増加率が2倍以下である条件をスイッチ押しタスクを阻害しない刺激周期の変動範囲，つまりは歩行を心理的に阻害することなく歩行誘導が可能な刺激周期の変動範囲と考えると，誘導のための刺激周期の変動幅 α は-100～150msであることが望ましいといえる（被験者3人の平均データを使用）．また， α が200ms，-150ms，-200msの条件における標準偏差の著しい増加は，歩行中を通してのタスク反応時間のばらつきが大きくなったというよりむしろ，歩行中に数度，反応時間が非常に大きくなってしまいうタイミングがあることに起

表 F.4: 刺激周期の変動幅と位相同期時，位相変化時における反応時間の平均，標準偏差，その値の比率

	-200	-150	-100	-50	0	50	100	150	200
反応時間の平均									
位相同期時 H.A.	301.3	380.3	313.1	294.3	288.3	289.5	258.5	257.9	374.9
位相変化時 H.A.	487.8	314.3	285.6	355.6	278.3	343.3	303.4	381.5	334.5
比率（変化／同期）H.A.	1.62	0.83	0.91	1.21	0.97	1.19	1.17	1.48	0.89
反応時間の標準偏差									
位相同期時 M.S.	311.2	320.7	354.1	292.3	282.1	312.7	302.0	269.1	374.6
位相変化時 M.S.	422.8	374.2	340.5	309.7	278.0	325.0	303.4	282.2	333.0
比率（変化／同期）M.S.	1.36	1.17	0.96	1.06	0.98	1.04	1.00	1.05	0.89
反応時間の標準偏差									
位相同期時 T.I.	341.5	298.3	301.9	301.8	304.4	332.5	297.7	331.3	299.1
位相変化時 T.I.	803.3	418.1	313.3	311.3	318.5	362.5	311.2	392.7	323.4
比率（変化／同期）T.I.	2.35	1.40	1.04	1.03	1.05	1.09	1.05	1.19	1.08
反応時間の標準偏差									
位相同期時 H.A.	59.1	69.4	67.8	81.8	73.2	58.1	68.3	67.6	85.3
位相変化時 H.A.	470.5	115.9	72.5	79.1	85.7	86.5	91.1	114.2	185.6
比率（変化／同期）H.A.	7.96	1.67	1.07	0.97	1.17	1.49	1.33	1.69	2.18
位相同期時 M.S.	84.2	86.3	75.1	58.1	76.1	85.2	87.3	66.3	86.8
位相変化時 M.S.	300.4	127.8	123.4	88.4	80.6	53.0	91.1	86.5	142.0
比率（変化／同期）M.S.	3.57	1.48	1.64	1.52	1.06	0.62	1.04	1.30	1.64
位相同期時 T.I.	60.8	72.0	54.8	68.7	81.9	86.0	59.3	78.2	76.8
位相変化時 T.I.	892.6	644.6	119.2	84.1	82.0	189.9	69.1	127.8	175.7
比率（変化／同期）T.I.	14.68	8.96	2.17	1.22	1.00	2.21	1.16	1.63	2.29

困っていた。

本章では，歩行者が周囲の状況を意識せずに移動可能な歩行ナビゲーションのための靴型歩行周期誘導インタフェースを提案し，誘導を効率的に実現するための刺激の入力手法について調べた．本実験を通して，振動刺激は踵が接地するタイミングに行うと効果的に誘導が可能であり，歩行周期に対する刺激周期の変化が-100ms から+150ms の範囲ならば，装着者に心理的負荷をかけずに誘導可能であることがわかった．

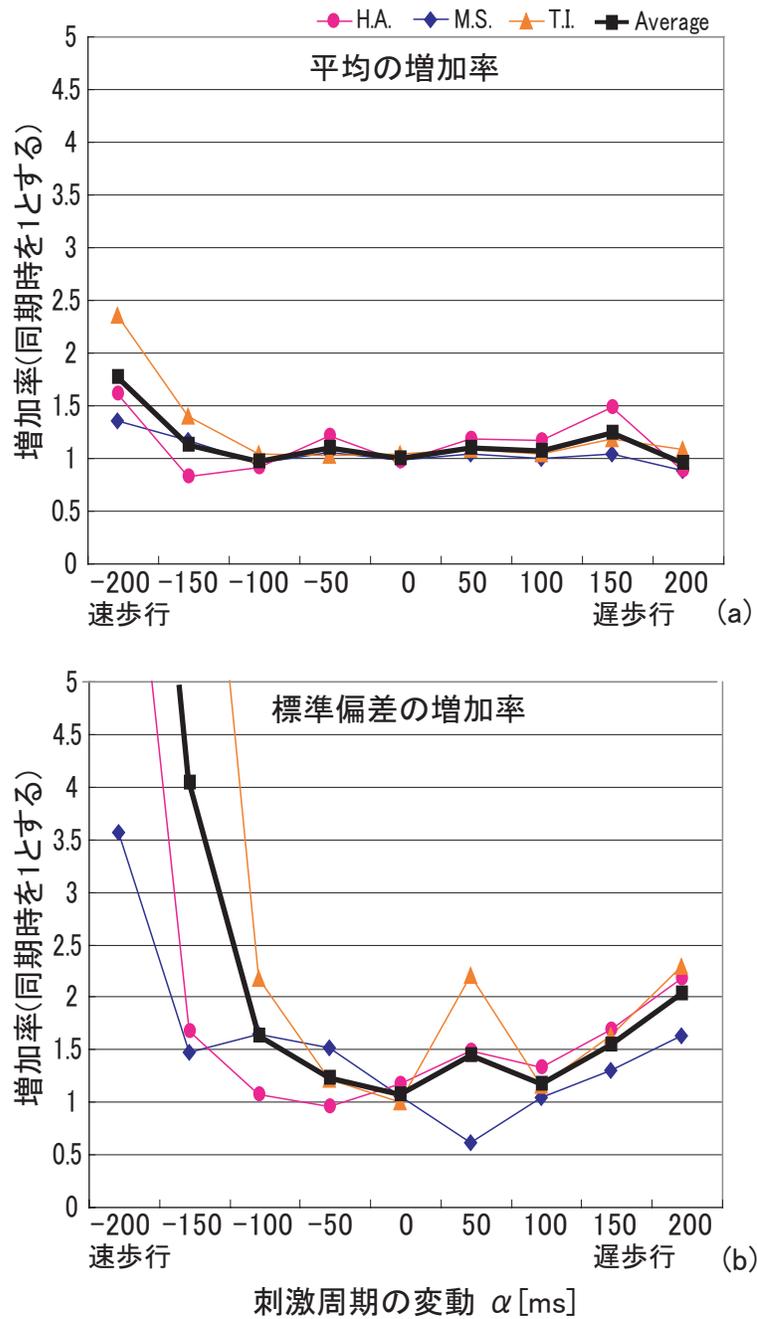


図 F.20 振動刺激の変動幅とタスクの反応時間の変化 (a) 偏差の平均 (b) 偏差の標準偏差

F.8 神経系のモデル化

本節では、実際の人間の歩行を計測し、そのデータから感覚入力と歩行運動の関係のモデル化を行う。そして、そのモデルをもとに歩行誘導の設計論を構成する。モデル化においては、先行研究の多くで用いられている非線形振動子モデル [320] を中心に実際の人間の神経構造を考慮してモデル化を行う。また、得られたモデルをもとにシミュレーションを行い実際のデータとの比較を行う。

F.8.1 モデル化の概要

歩行のメカニズムは神経系と筋骨格系とが相互作用する非線形力学系と考えられる [300]。神経系は歩行リズムを生成する神経振動子から構成され、神経振動子間のリズムの引き込みによって安定した歩行リズムが生成されることがコンピュータシミュレーションによって示されている [299]。また、生理学的には、神経振動子に対応する運動パターンを生成する神経回路網の存在が動物では知られている [289]。一方、筋骨格系は人間の身体に対応した剛体リンクからなり、各部位は神経系からの出力によって駆動される。

歩行のメカニズムを詳細に見ると、図 F.21 のようになる。図 F.21 左の神経系から、神経振動子の相互作用により安定した運動出力が生成され、その運動出力が筋骨格系に入力される。そして、その筋骨格系と環境と力学的相互作用の結果、歩行運動が発現する。次にその歩行運動の状態は視覚、足裏の圧力感覚などの感覚入力を通じて、運動出力との予測誤差をとり、神経系にフィードバックされる。そして、神経系はそのフィードバックの影響を受けて運動出力を変化させる。日常の歩行では、その予測誤差がゼロになるように状態を変化させる。

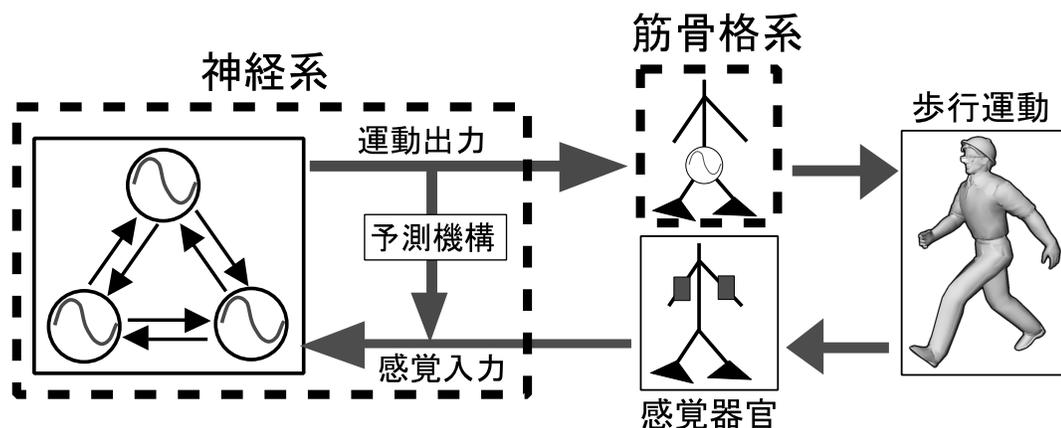


図 F.21 歩行運動のモデル

歩行のモデル化を精密に行うためには、神経系と筋骨格系の両方をモデル化する必要がある。しかし、本研究では感覚入力によって運動リズムを誘導することを目的としているため、計測される運動のリズムが神経系の運動出力のリズムに対応すると考えると、神経系の感覚-運動出力の関係をモデル化することが本研究においては重要である。そこで、感覚入力と運動リズムの関係を実際の計測データに基づいてモデル化を行った。

F.8.2 神経系の生理学的モデル

神経系のモデル化を行う前提知識として、人間の歩行リズムが生成される生理学的機構についてふれる。周期運動のリズムは脳幹・脊髄にある CPG(Central Pattern Generator) と呼ばれる神経振動子によって生み出されている。CPG は、その神経回路網の存在がネコ、サンショウウオ、ヤツメウナギなど動物で生理学的に確かめられており、人間の歩行においても、CPG 自体の存在は確かめられてはいないが、同様の機構によって歩行リズムが生み出されていると考えられる。

また、リズム運動の環境適応として興味深い現象が報告されている。図 F.22 に示すように除脳ネコを 3 つのベルトが独立に駆動できるトレッドミルの上で歩行させる。通常、3 つのベルトは等速で動くように駆動されるが、この実験では、左前脚の 1 つのベルトだけ回転速度を速めることによって外乱を与える。ネコは頭部を固定されているため、強制的に歩行させられる。最初のうちは脚間の協調が取れず、周期が異なるなど、その歩行パターンは安定しない。しかし、次第に左前脚が速い環境に適応し、新しいパターンで歩行を始める。

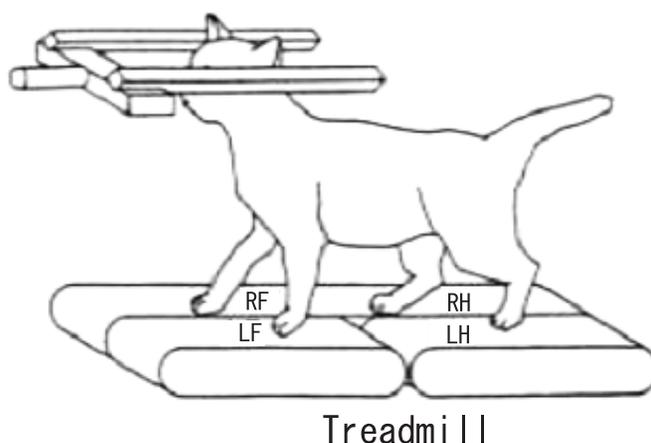


図 F.22 除脳ネコでの歩行実験 ([322] より引用)

このように CPG によって生み出されるリズムは、高次神経の関与なしに環境と適応的にパターンを作り上げる。この適応には CPG の他に小脳が深く関わっている [321]。歩行における CPG と小脳の間を関を図に示す。歩行中、脊髄の CPG の活動はその信号の遠心性コピーが腹側脊髄小脳路を介して小脳にフィードバックされる。また、体性感覚系の受容器からの情報も背側脊髄小脳路を介して小脳にフィードバックされる。苔状線維系として小脳に送られてくるこれらの情報は顆粒細胞-平行線維を経由してプルキンエ細胞に伝達される。プルキンエ細胞はこの入力を CPG に対する出力に変換するが、この時、登上線維からの入力によってプルキンエ細胞の出力は抑圧 (長期抑圧 [322]) を受ける。登上線維は、各プルキンエ細胞に対して 1 本しか入力がなく、運動の誤差信号を表現しているといわれる [323]。

F.8.3 神経系の数理モデル

CPG はその周期性よりしばしば自励発振の性質を持った非線形微分方程式によってモデル化されてきた [324]。代表的なものとして、自励発振する最も基本的な微分方程式である van der Pol 方程式 [325] や、松岡によって提案された神経振動子モデル [326]、RIC(Radial Isochron Clock) モデル [327]

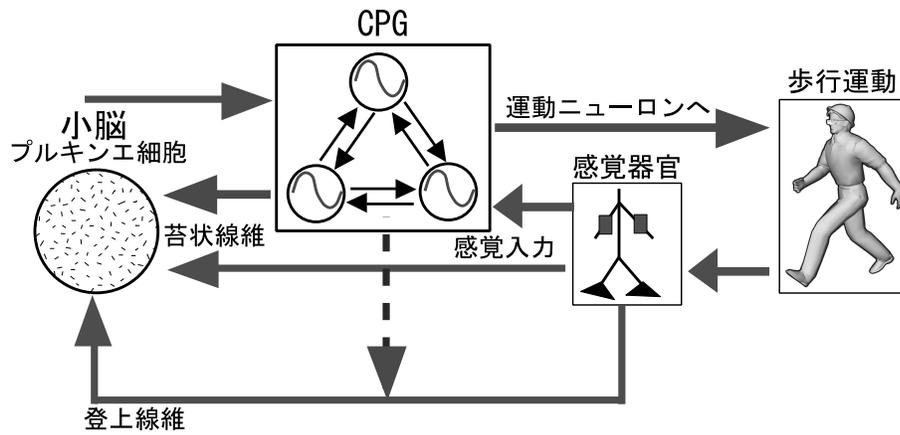


図 F.23 小脳と CPG の関係

が挙げられる．また，振動子間の位相関係のみに着目した位相方程式 [328] を使ったモデル化も存在する．以下それぞれについてその概要を述べる．

van der Pol 方程式

van der Pol 方程式は以下の式によって表される．

$$\ddot{x} - \mu(A - x^2)\dot{x} + x = 0 \quad (\text{F.2})$$

これは $\mu > 0$ の時，安定なただ一つの周期解を持つ．式 F.2 を

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = \mu(A - x^2)y - x \end{cases}$$

のように書き直せば，周期解は xy 平面での閉軌道に対応する．この場合，原点以外の任意の点を出発した点は，十分の時間の後，限りなく閉軌道に接近する．このような閉軌道をリミットサイクルと呼ぶ．式 F.2 を質点の座標 x に関する運動方程式と考えれば，左辺第 2 項はその抵抗を表す項であり， $\mu > 0$ のとき， $|x| < 1$ ならば \dot{x} の係数は負となって速さを増大させるように働く．逆に， $|x| > 1$ ならば \dot{x} の係数は正となり，速さを減少させるように働く．式 F.2 の解の振動波形は， μ が正で十分小さい値の時は，ほぼ正弦波形であるが， μ が大きくなるにつれて急速な変化とゆっくりとした変化の繰り返しからなる特徴的な波形となる．このような型の振動を緩和振動 (Relaxation Oscillation) と呼ぶ．

また，同一の van der Pol 方程式を 2 個何らかの方法で結合した場合，2 つの振動子はお互いに干渉しあって位相のそろったアトラクタを持つようになる．すなわち，全く同じ振動が両者に現れる場合や，互いに符号の反転した振動が現れる場合が起こる．前者を同位相に同期した状態，後者を逆位相に同期した状態という．いずれがアトラクタとして観察されるかは結合方法に依存する．このように，結合系に見られる位相がそろった現象を一般に位相同期現象，引き込み現象と呼ばれる．

松岡の神経振動子モデル

松岡の神経振動子モデル [326] は歩行のシミュレーション [299] やロボットの歩行 [302] 等多くの研究で利用されている神経振動子モデルである．このモデルにおいて，神経素子は順応効果 (自己抑制，

疲労) を持ち、それらの神経素子を複数個、相互抑制的に結合させることにより周期的なパターンを発生させる。個々の神経素子のモデルは式 F.3 によって表される。

$$\begin{cases} T_r \frac{dx_i(t)}{dt} + x_i(t) = - \sum_{j=0, j \neq i}^{n-1} a_{ij} g_j(t) - b_i f_i(t) + s_i \\ T_a \frac{df_i(t)}{dt} + f_i(t) = g_i(t) \\ g_i(t) = h(x_i(t)) \\ h(x) = \begin{cases} x & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \\ i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \end{cases} \quad (\text{F.3})$$

上式の各変数、定数は以下の通り

- $x_i(t)$: 時刻 t における i 番目の神経細胞の内部状態変数
- $g_i(t)$: 時刻 t における i 番目の神経細胞の出力変数
- $f_i(t)$: 時刻 t における i 番目の疲労状態を表す変数
- a_{ij} : j 番目の神経細胞から i 番目の神経細胞への結合係数
- b_i : i 番目の疲労度の係数
- s_i : i 番目の定常入力
- T_r, T_a : 時定数
- n : 神経細胞の数

式 F.3 に適当なパラメータ $b_i, T_r, T_a, a_{ij}, s_i$ を与えることにより、 i 番目の神経細胞の内部状態 $x_i(t)$ は周期解を持ち、それらに関節角として適用することで歩行を生成することができる。ここで s_i を K 倍すると方程式の解も K 倍される。このように入力強度を定数倍することによって、リズムの周波数やパターンの変化を引き起こすことはない。よって、もし系が入力強度によってリズム周波数を変える場合は構成する神経素子が時定数または、他のパラメータを強度に従って変化させる機構を持たなければならない。

RIC(Radial Isochron Clock) モデル

Keener らは典型的な生物振動子のモデルとして RIC(Radial Isochron Clock) モデルを提案した [329]。RIC は心臓の心筋細胞のモデル化 [330] や歩行のモデル化 [331] 等に用いられている。

xy 平面上の任意の点を (x, y) とすると、RIC は以下の式で表される。

$$\begin{cases} \dot{x} = kx - \omega y - kx(x^2 + y^2) \\ \dot{y} = ky + \omega x - ky(x^2 + y^2) \end{cases} \quad (\text{F.4})$$

ここで、 $k > 0$ は定数である。 $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta$ とおき、方程式を (r, θ) 極座標系で記述すると、式 F.4 は

$$\begin{cases} \dot{r} = kr(1 - r^2) \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (\text{F.5})$$

となる。式 F.5 からわかるように、RIC はその漸近安定なリミットサイクルは単位円であり、唯一の特異点は原点である。原点以外の任意の状態点は、原点の周りを半時計回りに回転しながら単位円

に接近していく。また、回転方向と半径方向のダイナミクスは独立である。RIC は周期運動を周期と位相で扱うモデルに適している。

位相方程式

リミットサイクル振動子集団における同期現象を位相のみを用いて解析したものが位相方程式 [328] である。具体例として、互いに似通った性質の 2 つの振動子が弱く結合した場合の解析を行いその性質を示す [332]。このような系では、個々の振動子の軌道がもとの周期軌道の近くにとどまるために位相 θ_i ($i = 1, 2$ は振動子番号) が定義でき、それらが次の形の方程式に従うことが示される [333]。

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = \Omega_1 + \epsilon h(\theta_2 - \theta_1) \\ \dot{\theta}_2 = \Omega_2 + \epsilon h(\theta_1 - \theta_2) \end{cases} \quad (\text{F.6})$$

$h(\theta)$ は振動子間の相互作用を表す周期関数で結合関数と呼ばれるが、詳しい形は振動子のダイナミクスや結合の様式に依存する。 ϵ は結合の強さを表すパラメータである。右辺第 1 項は固有振動数に相当するが、これが 2 つの振動子で違うものとして ($\Omega_2 > \Omega_1$)、結合を強めていくとき何が起こるか考える。そのために、位相差 $\theta_2 - \theta_1$ を ϕ とおくと

$$\dot{\phi} = \Delta - \epsilon \Gamma(\phi) \quad (\text{F.7})$$

式 F.6 から式 F.7 が得られる。ただし、 $\Delta > 0$ は固有振動数の差を表し、 $\Gamma(\phi) \equiv h(\phi) - h(-\phi)$ である。 $\Gamma(\phi)$ は奇関数であるため、その形は定性的には $\sin 2\pi\phi$ で近似可能である。従って、 ϵ が Δ/Γ_{max} よりも小さいときには位相差 ϕ は t に比例して増大し、一方 ϵ が Δ/Γ_{max} よりも大きくなると、位相差は初期条件によらず一定位置に収束する。つまり、結合の強さが固有振動数の差に比例する閾値を超えると引き込み (位相同期) が起こり、ロックされる位相差は結合強度の増大とともにゼロに近づくことがわかる。このように位相方程式を利用すると、振動子間の引き込み現象を簡便に表現することが可能である。

F.8.4 van der Pol 方程式によるモデル化

次に、実際に計測したデータをもとに人間の歩行における感覚-運動モデルを構成する。感覚-運動モデルを構成するにあたって、本節では実際の人間の歩行を非線形振動子によって再現することから始める。本節のモデル化では、歩行のリズムを生み出す非線形振動子として van der Pol 方程式を採用した。これは、歩行誘導を行うためのモデルとして振動子には、

1. 自励振動を行う。
2. 外部入力によって周期が変化する。
3. 外部入力によって振幅が変化する。
4. 外部入力によって位相が変化する。

という性質が必要であり、van der Pol 方程式は以上の条件を満たし、解析が比較的容易なため本節のモデル化に用いた。

歩行のリズムを生み出すために左右の腰、膝それぞれに 1 つの非線形振動子を割り当て、4 つの振動子を相互に結合させた。各振動子の出力は図 F.24 のように鉛直方向に対する各部位の角度を表す。また、振動子同士の結合の仕方は図 F.25 にあるように、左右の腰同士 (k_1)、片方の腰と膝 (k_2)、片

方の腰とその反対側の膝 (k_3) の3通りを左右対称に設定し、それぞれの結合は対等な相互結合 (例、振動子1 振動子2 と振動子2 振動子1 からの結合強度は等しい) とした。また、腰の振動子1, 2 と膝の振動子3, 4 の振動子の性質はそれぞれ同じものとした。

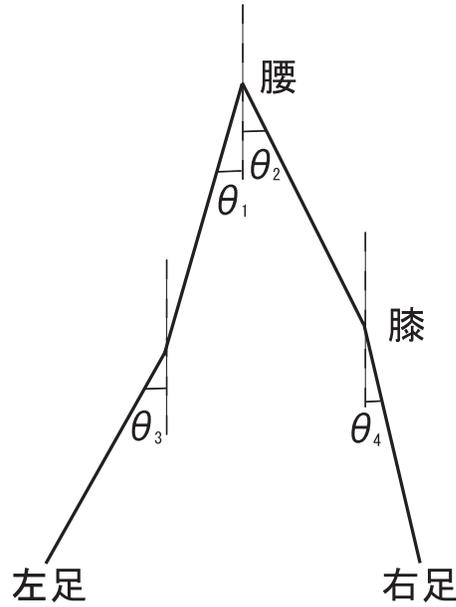


図 F.24 振動子と関節各の対応

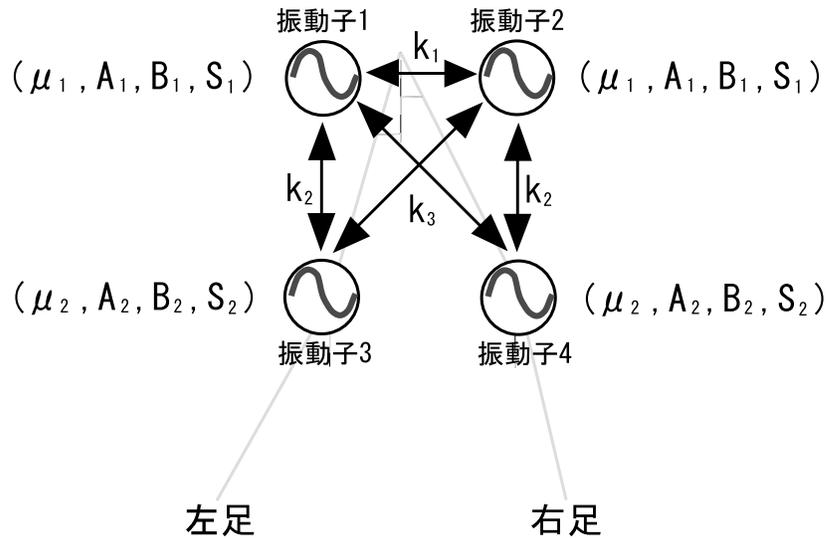


図 F.25 振動子の配置

方程式の性質を決めるパラメータは、1つの方程式あたり非線形に影響を与える μ 、振幅に影響を与える A 、周期に影響を与える B 、定常入力 S の4つが存在する。以上を微分方程式として書き下すと式 F.8-F.11 のようになる。

$$\ddot{x}_1 = \mu_1(A_1 - x_1^2)\dot{x}_1 - B_1x + S_1 + k_1x_2 + k_2x_3 + k_3x_4 \quad (\text{F.8})$$

$$\ddot{x}_2 = \mu_1(A_1 - x_2^2)\dot{x}_2 - B_1x + S_1 + k_1x_1 + k_2x_4 + k_3x_3 \quad (\text{F.9})$$

$$\ddot{x}_3 = \mu_2(A_2 - x_3^2)\dot{x}_3 - B_2x + S_2 + k_2x_1 + k_3x_2 \quad (\text{F.10})$$

$$\ddot{x}_4 = \mu_2(A_2 - x_4^2)\dot{x}_4 - B_2x + S_2 + k_2x_2 + k_3x_1 \quad (\text{F.11})$$

4つの方程式で合計11のパラメータが存在する．このパラメータを実際の計測データの波形に合うように調整し，非線形振動子群によって人間の歩行を再現する．実際の計測データは TOKIN 社製姿勢角度センサ（詳細は付録 F.1.3 を参照）を使用して，歩行時における腰，膝の鉛直方向に対する角度をサンプリングレート 100Hz で計測した．被験者は 25 才，男性で 100m の直線コースにおいて“ ゆっくり歩行”，“ 通常歩行”，“ ゆっくり走行”，“ 通常走行” の 4 種類の歩行を計測した．パラメータの調整には最急降下法 [334]，非線形微分方程式の解法には 4 次のルンゲクッタ法 [335] を時間刻み幅 0.01[s] で用いた．最適化の具体的な手法は，以下のとおりである．

1. 計測したデータから平均的な 1 周期の波形 $f(t)$ を取り出す．
2. この平均的な 1 周期の波形 $f(t)$ に対して，パラメータ群 $P_n(\mu_1, \mu_2, A_1, A_2, \dots)$ を手作業で大まかに調節する．
3. パラメータ群 $P_n(\mu_1, \mu_2, A_1, A_2, \dots)$ によって 1 周期分の波形 $g_n(t)$ を生成する．
4. $f(t)$ と $g_n(t)$ の 2 乗誤差の時間積分 $e = \int (f(t) - g_n(t))^2 dt$ を計算する．
5. それぞれのパラメータを独立に変化させ，もっとも e が小さくなる方向を決定する．
6. その方向に各パラメータを変化させ新たなパラメータ群 $P_{n+1}(\mu_1, \mu_2, A_1, A_2, \dots)$ を決定する．
7. 上記の 3-6 を 2000 回繰り返す．

4 種類の歩行について x, \dot{x} の初期値もパラメータに含めて最適化を行った．最終的に最急降下法の結果得られたパラメータを表 F.5 に示す．また 2 乗誤差の時間積分 $e = \int (f(t) - g_n(t))^2 dt$ の最終結果を表 F.6 示す．ただし，二乗誤差の計算では股関節，膝関節両方での誤差を加算している．1 で使用した一周期の平均的な波形 $f(t)$ を図 F.26，図 F.27 に示す．最適化には左足の波形のみを用いた．図の Angle1 は股関節を表し図 F.24 の θ_1 に対応し，Angle2 は膝関節を表し図 F.24 の θ_3 に対応する．

F.9 歩行シミュレーション

次に前節で得られた表 F.5 のパラメータを用いて van der Pol 方程式によって生成される関節角を図 F.28～図 F.31 に示す．左が振動子による歩行，右が実際に計測した人間の歩行である．そして得られた関節角を用いた歩行の軌跡を図 F.32～図 F.35 に示す．上が振動子による歩行，下が実際の人間の歩行である．ただし，現在のモデルでは腰と膝のみモデル化しているので，モデルが自律的に横に移動することが難しい．そこで，時間経過とともに描画を横にずらすことで擬似的に軌跡を作成した．

表 F.5 得られたパラメータ

	ゆっくり歩行	通常歩行	ゆっくり走行	通常走行
x_1	-0.076633	-0.335652	-0.046418	0.270946
x_2	0.455032	0.737922	0.478981	0.291173
x_3	-0.849229	-1.196300	-1.009417	-0.336625
x_4	0.175992	0.445918	-0.074796	-0.526245
\dot{x}_1	2.361394	-0.509873	1.567520	4.456737
\dot{x}_2	-2.357997	0.502359	-1.636838	-4.446766
\dot{x}_3	3.898910	-0.859264	2.156915	6.794146
\dot{x}_4	-3.912584	0.891789	-2.233174	-6.828761
μ_1	0.166832	0.151423	0.100166	0.083207
μ_2	0.097221	0.108041	0.100581	0.079918
A_1	0.004249	0.000010	0.109713	0.136676
A_2	0.281531	0.221763	0.318898	0.310930
B_1	27.356763	35.924097	76.028278	76.327095
B_2	27.237012	36.052215	76.021081	76.450896
S_1	5.093523	7.201132	16.800076	21.199254
S_2	-9.113841	-13.303239	-40.400187	-32.702585
k_1	-0.136388	-0.426422	0.175770	0.006504
k_2	-0.070385	-0.362877	-0.023024	0.137177
k_3	0.007459	0.466232	-0.266398	-0.145807

表 F.6 パラメータ調整による二乗誤差の変化 (単位は $[rad^2]$)

	調整前	調整後
通常歩行	28.06	20.68
ゆっくり歩行	41.92	15.06
通常走行	10.53	6.243
ゆっくり走行	3.301	2.387

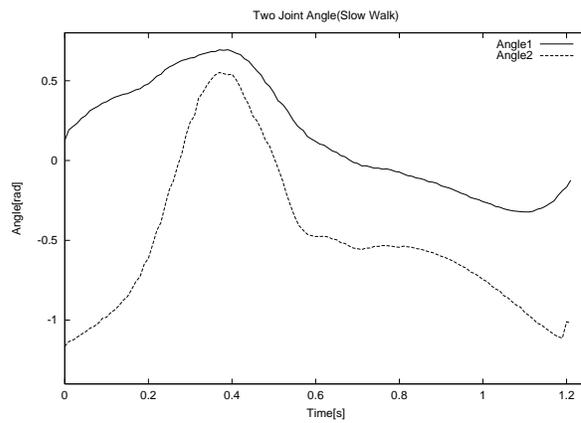
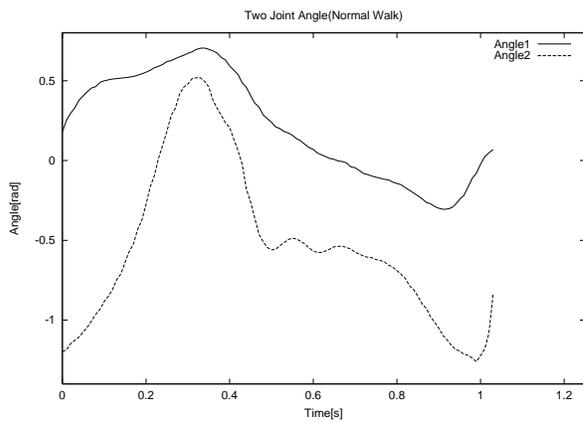


図 F.26 一周期の関節角度変化の平均 (左:通常歩行 右:ゆっくり歩行)

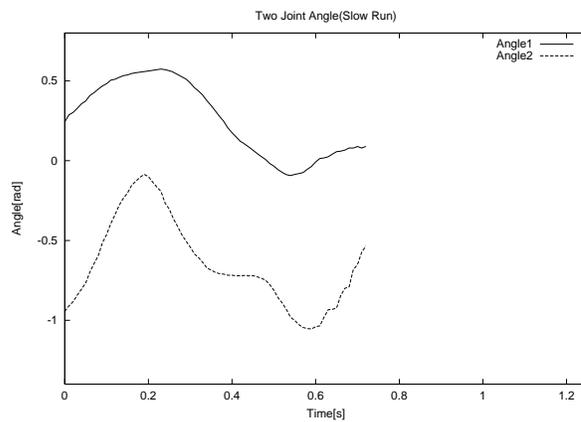
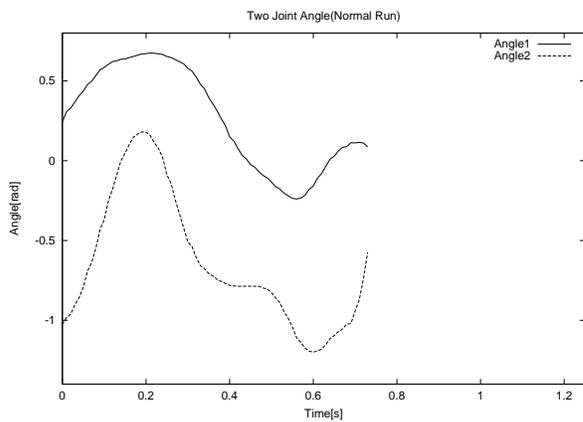


図 F.27 一周期の関節角度変化の平均 (左:通常走行 右:ゆっくり走行)

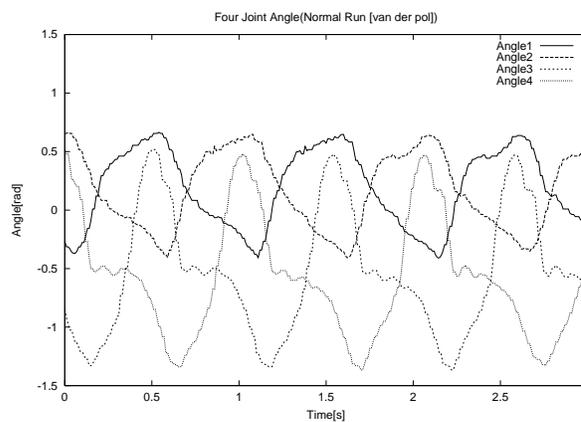
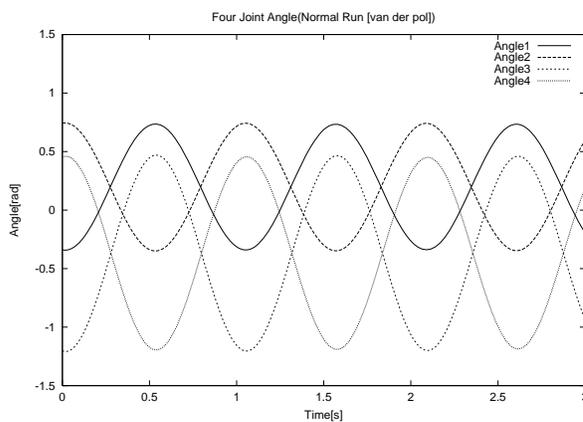


図 F.28 Van der Pol 方程式による“通常歩行”の関節角度 (左:モデル 右:計測データ)

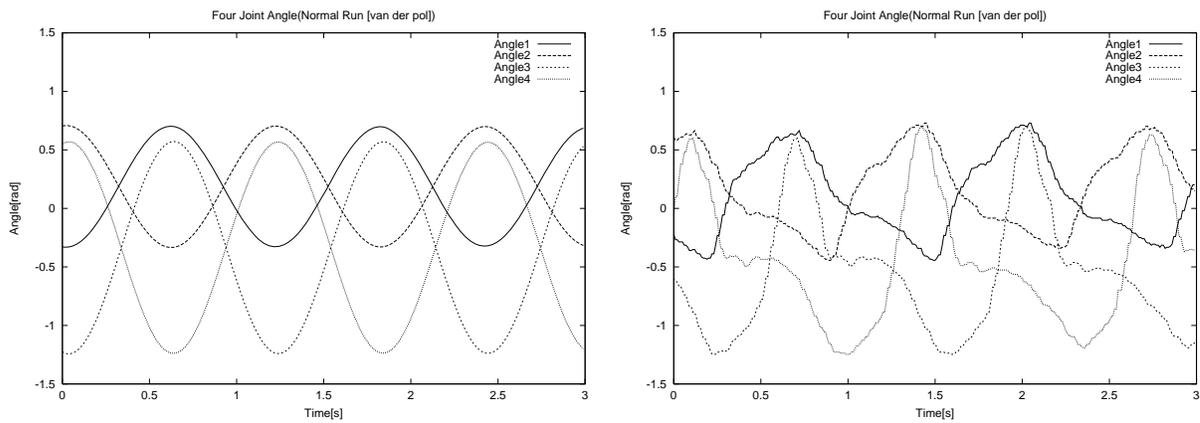


図 F.29 Van der Pol 方程式による“ ゆっくり歩行”の関節角度 (左:モデル 右:計測データ)

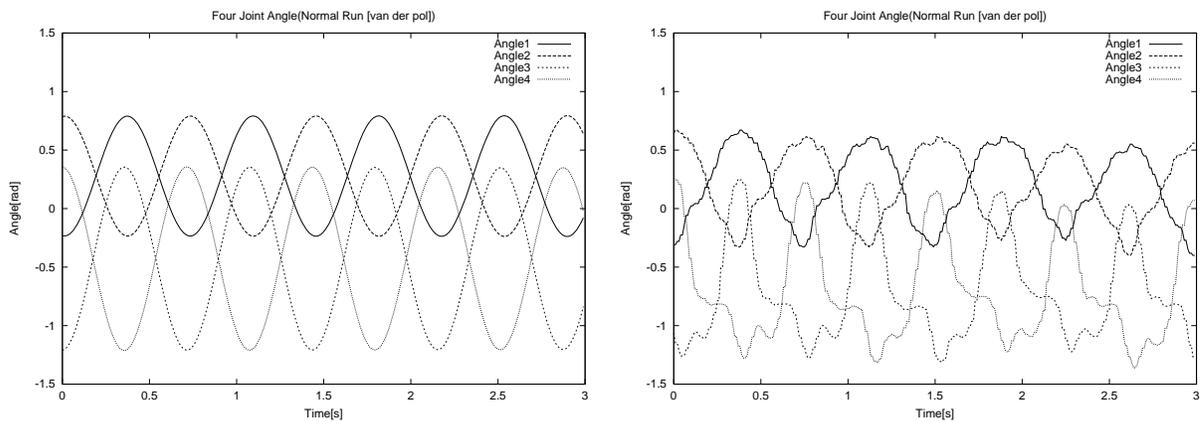


図 F.30 Van der Pol 方程式による“ 通常走行”の関節角度 (左:モデル 右:計測データ)

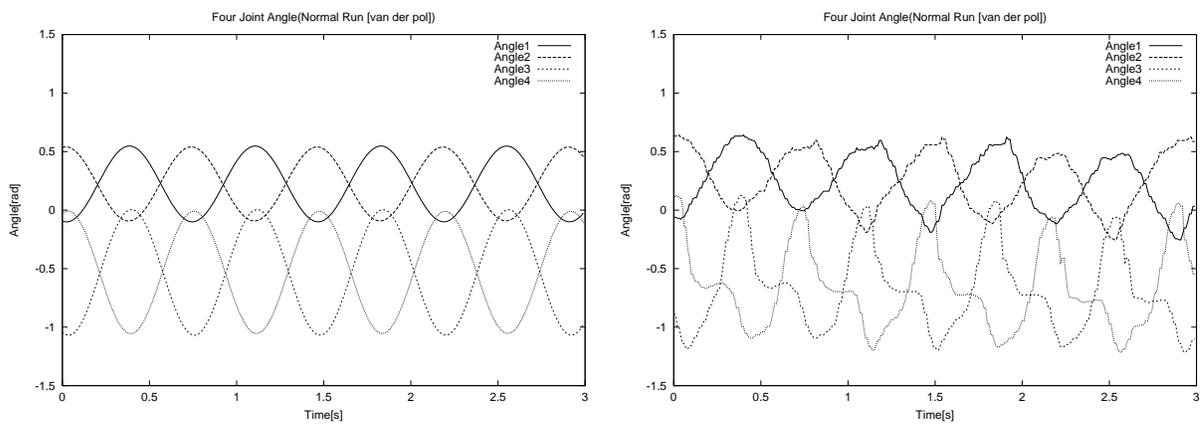


図 F.31 Van der Pol 方程式による“ ゆっくり走行”の関節角度 (左:モデル 右:計測データ)

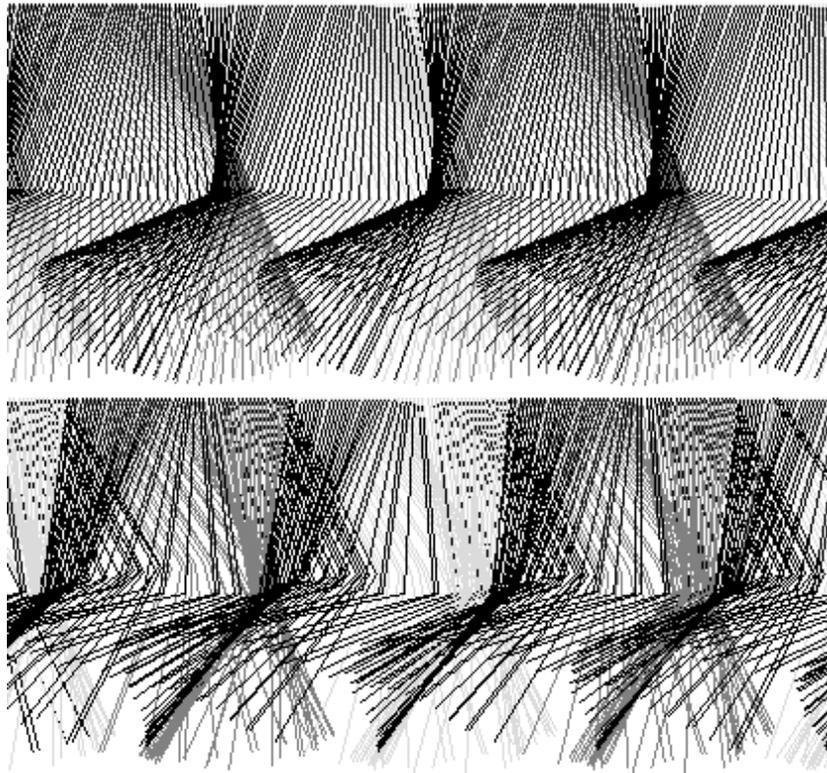


図 F.32 Van der Pol 方程式による“通常歩行”の歩行軌跡 (上:モデル 下:計測データ)

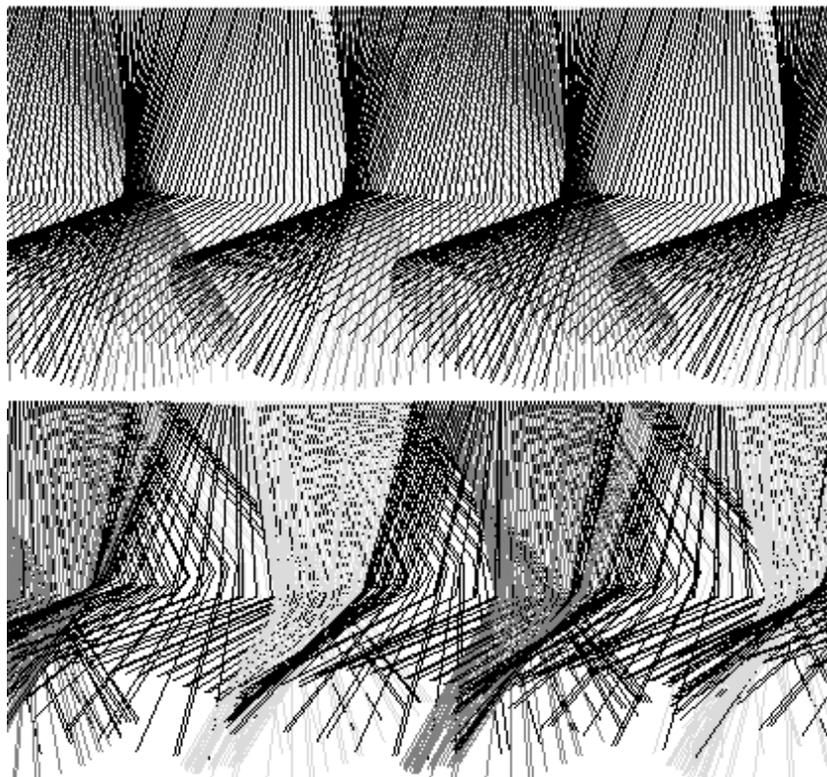


図 F.33 Van der Pol 方程式による“ゆっくり歩行”の歩行軌跡 (上:モデル 下:計測データ)

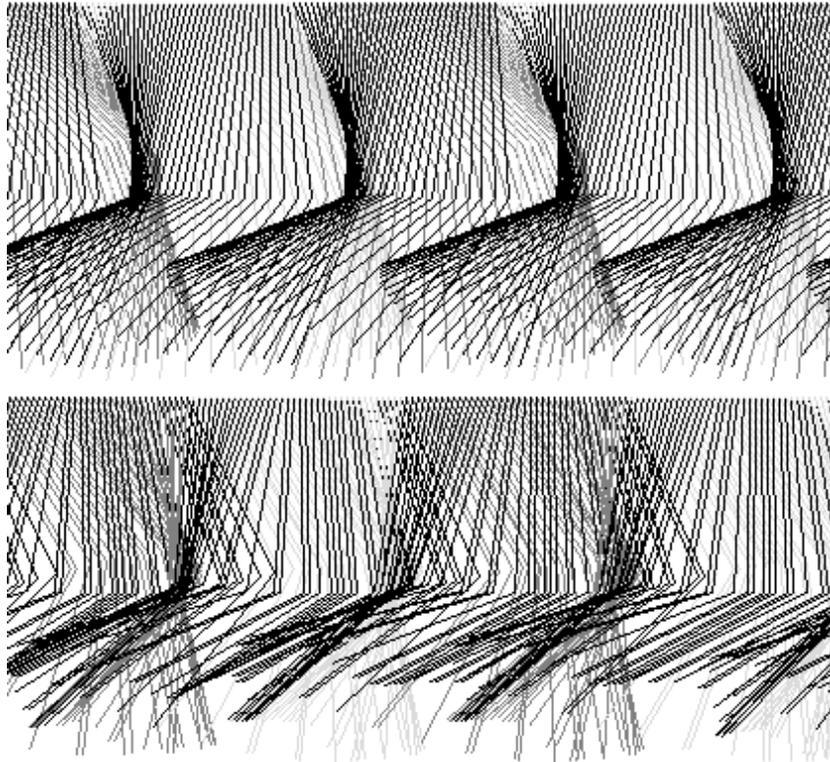


図 F.34 Van der Pol 方程式による“通常走行”の歩行軌跡 (上:モデル 下:計測データ)

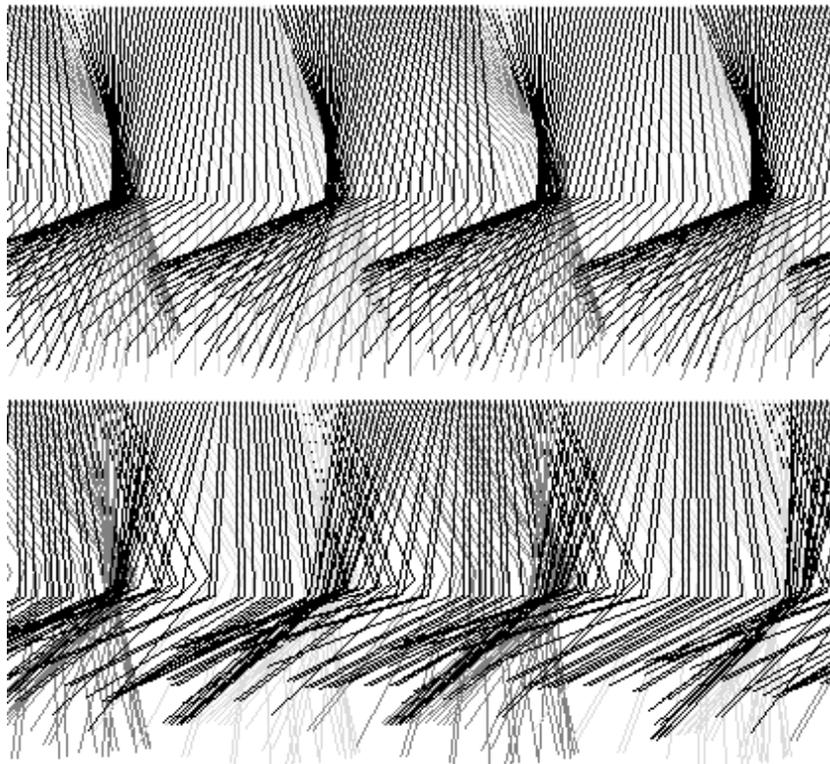


図 F.35 Van der Pol 方程式による“ゆっくり走行”の歩行軌跡 (上:モデル 下:計測データ)

F.9.1 モデルにおける引き込み現象

F.8.4 節では実際の歩行を van der Pol 方程式のモデルによって再現した．次に得られたモデルに対し感覚入力を加え，その挙動を観察する．実際の人間では，周期的な感覚入力を加えると，ある範囲の感覚入力によっては引き込みを生じる．そこで F.8.4 節で得られた歩行モデルに周期的な外力を与え，実際の計測結果と比較する．

F.8.4 節でパラメータを決定した通常走行のモデル（歩行周期は 1035ms）に感覚入力として図 F.36 のように，片側膝に外力 $f(t)$ を加えた．これは式 F.12-F.15 のように表される． $f(t)$ として正弦波状の $\alpha \sin \omega t$ ($\alpha = 0.08$ ，周期 1060ms) を加えたときの膝関節の周期運動と感覚入力のあいだの位相差の変化を，実際の計測データと共にプロットしたのが図 F.37 である．ただし，縦軸が位相差 [rad]，横軸が歩数 [歩] である．人間を計測したデータに関しては，引き込みの起きた音刺激周期 1130ms，振動刺激周期 1110ms のデータを使用した．同様に 260ms 毎に 30ms，振幅 100 の力を加えた結果を音刺激の刺激周期 1110ms，1150ms と共にプロットしたのが図 F.38 である．

人間の計測データの場合，引き込みが起こると，人間の歩行と感覚入力のあいだの位相差が一定に収束するが，van der Pol 方程式のモデルにおいても適切な感覚入力を選ぶことによって位相差が線形に増加することなく一定になる挙動を示している．ただし，図 F.37 の場合，20 歩を過ぎたあたりから位相差が小さくなる傾向も示している．このようにモデル上でも引き込みに近い現象が再現されることがわかった．今回は感覚入力として，正弦波，ステップを用いたが，その振幅や結合係数等恣意的な部分が多く存在した．また，入力波形としては他にもインパルス形状等が考えられ，その関係性については，議論の余地が残されている．

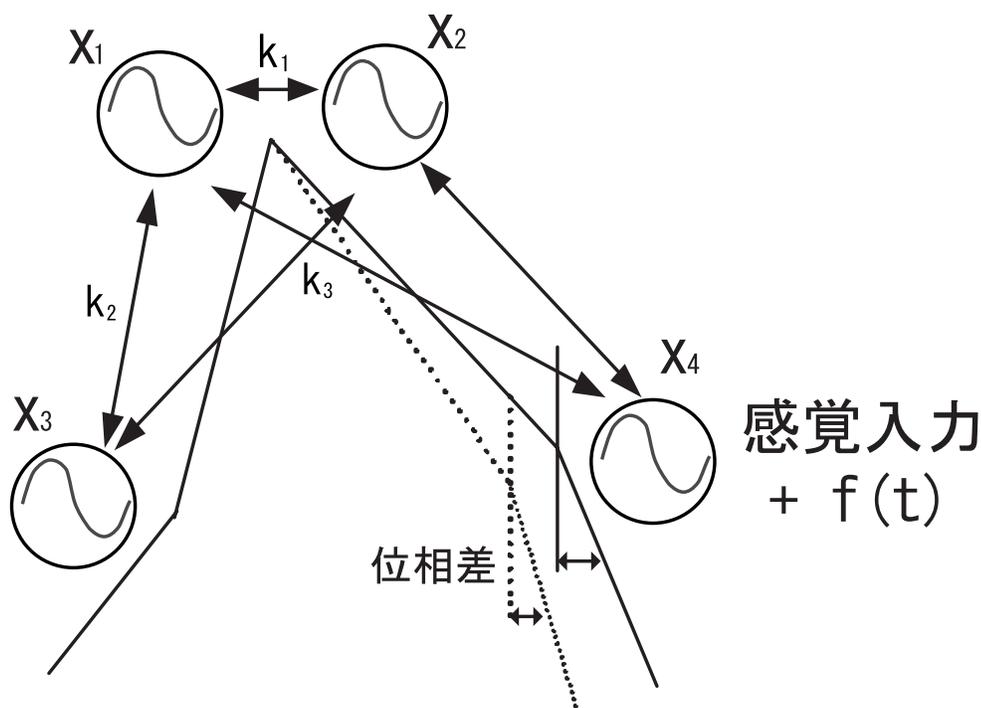


図 F.36 歩行モデルに対する周期外力の入力

$$\ddot{x}_1 = \mu_1(A_1 - x_1^2)\dot{x}_1 - B_1x + S_1 + k_1x_2 + k_2x_3 + k_3x_4 \quad (\text{F.12})$$

$$\ddot{x}_2 = \mu_1(A_1 - x_2^2)\dot{x}_2 - B_1x + S_1 + k_1x_1 + k_2x_4 + k_3x_3 \quad (\text{F.13})$$

$$\ddot{x}_3 = \mu_2(A_2 - x_3^2)\dot{x}_3 - B_2x + S_2 + k_2x_1 + k_3x_2 \quad (\text{F.14})$$

$$\ddot{x}_4 = \mu_2(A_2 - x_4^2)\dot{x}_4 - B_2x + S_2 + k_2x_2 + k_3x_1 + f(t) \quad (\text{F.15})$$

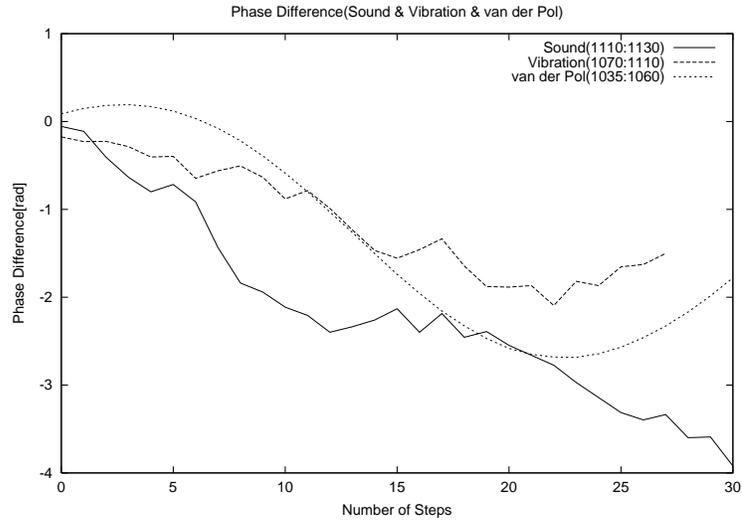


図 F.37 歩行モデルに外力を加えたときの位相差 1

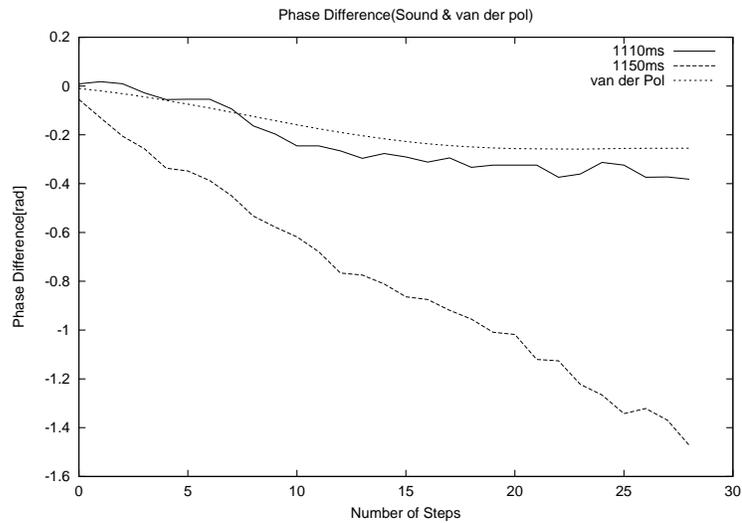


図 F.38 歩行モデルに外力を加えたときの位相差 2

F.9.2 モデル化のまとめ

本章ではまず、比較的解析の容易な van der Pol 方程式を用いて歩行運動のモデル化を行った。モデル化においては実際に計測したデータを用いて方程式のパラメータを決定し、得られたパラメータから歩行をシミュレートした。シミュレーションを見る限り van der Pol 方程式によっても歩行をモデル化することは可能である。

次いで、得られたモデルの中の 1 つの振動子に対し周期的感覚入力を加え、その挙動を観察した。入力を加えることにより、振動子と周期的感覚入力の間引き込みが起き、実際の引き込みのデータと比べて位相を見る限り同様の傾向を示している。しかし、現在の歩行モデルにおいて非線形微分方程式の出力はそのまま運動に直結している。そのため、感覚入力を微分方程式の右辺にそのまま加えると、まさに外力として運動に作用する。これは、耳からの感覚入力によって膝が引っ張られるということの意味し、感覚入力そのまま外力として作用するとは考え難い。また、感覚間の相違や入力パターンによってその影響が異なると考えられ、感覚入力の運動への作用の仕方は、感覚入力を直接、微分方程式へ入力するというだけで説明できるわけではないようである。このように感覚入力の運動系への作用について考えるべき要素はまだ多く存在する。今後は運動モデルを精密化するとともに、感覚入力を加える場合の感覚-運動間の結合の仕方に注目していきたい。

成果一覧

受賞（5件）

1. 2005年 日本視覚学会冬季大会ベストプレゼンテーション賞 受賞。
渡邊 淳司, 栗木 一郎, 舘 すすむ, 西田 眞也, “ 運動知覚によって引き起こされる色分離に関する研究 ”
2. 2004年 Ars Electronica “ NextIdea ” Honorary mentioned.
Junji Watanabe, Maki Sugimoto, “ Visual Resonator ”
3. 2003年 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会ヒューマンコミュニケーション賞 受賞。
渡邊 淳司, 田畑 哲稔, 前田 太郎, 舘 すすむ, “ 眼球運動を利用したディスプレイとパフォーマンスの融合 ”
4. 2002年 日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞 受賞。
渡邊 淳司, “ Augmented Performance with Catalytic Devices -Cell/66b- ”
5. 2001年 日本バーチャルリアリティ学会論文賞 受賞。
渡邊 淳司, 前田 太郎, 舘 すすむ, “ サッケードを利用した新しい情報提示手法の提案 ”

国際原著論文（主著3件）

1. **Junji Watanabe**, hideyuki Ando, Taro Maeda, Susumu Tachi (Submitted) “ Design theory for saccade-triggered display system ”Presence, Teleoperations and Virtual Environments
2. **Junji Watanabe**, Taro Maeda, Susumu Tachi, (Translation of Japanese paper) “ Time course of localization for a repeatedly flashing stimulus presented at perisaccadic timing ”Electronics and Communications in Japan, in press.
3. **Junji Watanabe**, Atsushi Noritake, Taro Maeda, Susumu Tachi, Shin'ya Nishida, “ Perisaccadic Perception of Continuous Flickers ”, Vision Research, Vol. 45, No. 4, pp. 413-430, 2005.

国内原著論文（主著9件，関連3件）

1. 渡邊 淳司, 安藤 英由樹, 朝原 佳昭, 杉本 麻紀, 前田 太郎, “ 靴型インタフェースによる歩行ナビゲーションシステムの研究 ”(投稿中)
2. 渡邊 淳司, Maria Adriana Verdaasdonk, 田畑 哲稔, 安藤 英由樹, 前田 太郎, 舘 すすむ, “ MultiMedia Performance におけるインタラクティブ性と美 ”日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 1, in press, 2005.

3. 渡邊 淳司, 坂本 憲久, 則武 厚, 前田 太郎, 舘 すすむ, “ サッカード残像の視覚的持続時間の研究 ”映像情報メディア学会誌, Vol. 58, No. 12, pp. 1808-1814, 2004.
4. 安藤 英由樹, 渡邊 淳司, 杉本 麻紀, 稲見 昌彦, 前田 太郎, “ Augmented Reality のための爪装着型触覚ディスプレイの研究 ”電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J86-D-II, No. 11, pp. 2025-2033, 2004.
5. 安藤 英由樹, 尾花 和俊, 渡邊 淳司, 杉本 麻樹, 前田 太郎, “ 回転モーメントを利用した機械ブレーキ式力覚提示装置の開発 ”ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 5, No. 2, pp. 29-36, 2004.
6. 渡邊 淳司, 安藤 英由樹, 関口 大陸, 前田 太郎, 舘 すすむ, “ 網膜再帰反射を利用した遠隔サッカード検出手法の研究 ”日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 9, No. 1, pp. 105-113, 2004.
7. 安藤 英由樹, 渡邊 淳司, 杉本 麻樹, 前田 太郎, “ 独立成分分析による爪装着型センサの接触力と屈曲の分離 ”日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 4, pp. 379-387, 2003.
8. 渡邊 淳司, 板垣 貴裕, 野嶋 琢也, 稲見 昌彦, 舘 すすむ, “ Beings - Haptic artwork with SmartTool - ”芸術科学会論文誌 Vol.2, No.4 , pp. 116-122, 2003.
9. 渡邊 淳司, 前田 太郎, 舘 すすむ, “ サッカード前中後に渡って提示される連続点滅光点刺激の知覚と眼球運動との時間関係 ”電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J86-D-II, No.9, pp.1350-1357, 2003. Vol.J86-D-II, No.9, pp.1350-1357, 2003.
10. 渡邊 淳司, Maria Adriana Verdaasdonk, cell/66b (ショートペーパー), “ test-patches ”, 芸術科学会論文誌 Vol.1 No.4 pp. 160-162, 2002.
11. 渡邊 淳司, Maria Adriana Verdaasdonk, 田畑 哲稔, “ Augmented Performance with Catalytic Devices ”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.7 No.4 pp. 459-470, 2002.
12. 渡邊 淳司, 前田 太郎, 舘 すすむ, “ サッカードを利用した新しい情報提示手法の提案 ”日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 6, No. 2, pp. 79-87, 2001.

国内解説論文 (主著 1 件)

1. 渡邊 淳司, “ VR 技術の舞台芸術への応用 ”日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 9, No. 1, pp. 25-27, 2004.

査読付国際学会 (主著 7 件, 関連 7 件)

1. **Junji Watanabe**, Seiichiro Hayashi, Hiroyuki Kajimoto, Susumu Tachi, “ Motion After Effect in Tactile Sensation ”
2005 3/18-20 World Haptics, Pisa, Italy.
2. Masahi Nakatani, **Junji Watanabe**, Hideyuki Ando, Taro Maeda, Susumu Tachi, “ Spatial Localization for Transient and Intransient Tactile Stimulus ”
2005 3/18-20 World Haptics, Pisa, Italy.

3. Hideyuki Ando, Tomohiro Amemiya, **Junji Watanabe**, Masahiko Inami, Taro Maeda, " The Evaluation valuation of Nail of Nail-Mounted Tactile Display Mounted Tactile Display "2005 3/18-20 World Haptics, Pisa, Italy.
4. Shin'ya Nishida, **Junji Watanabe**, Ichiro Kuriki, " Motion-Induced Colour Mixture: Psychophysical tests of Eye Movement Artifacts " 2004 11/15-19 Asian Conference on Vision, Chongqing, China.
5. **Junji Watanabe**, Ichiro Kuriki, Susumu Tachi, Shin'ya Nishida, " Motion-induced Colour Mixture: Objective Evaluation by colour matching "Perception, Vol. 33 supplement (Abstracts of ECVF 2004), pp. 163-164, 2004. 2004 8/22-26 European Conference on Visual Perception Budapest, Hungary.
6. **Junji Watanabe**, Tetsutoshi Tavata, Maria Adriana Verdaasdonk, Hideyuki Ando, Taro Maeda, Susumu Tachi, " Illusory Interactive Performance by Self Eye Movement "Siggraph2004 Conference DVDROM Sketches Session "Intermedia Performance", 2004. 2004 8/8-12 Siggraph2004 Los Angels Convention Center, USA.
7. **Junji Watanabe**, Hideyuki Ando, Taro Maeda, Susumu Tachi, " Gaze-triggered Selective Information Display "Proceedings of ACE 2004, pp. 10-17, 2004. 2004 6/3-5 International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology ACE2004 National University of Singapore, Singapore.
8. **Junji Watanabe**, Atsushi Noritake, Taro Maeda, Susumu Tachi, Shin'ya Nishida, " Space constancy around the time of a saccade for intransient stimuli "Vision ScienceS Society 4th Annual Meeting Proceeding, pp. 92, 2004. 2004 4/30-5/5 Vision ScienceS Society 4th Annual Meeting Sarasota Hyatt Hotel.
9. Shin'ya Nishida, **Junji Watanabe**, Susumu Tachi, Ichiro Kuriki, " Motion-induced color mixture "Vision ScienceS Society 4th Annual Meeting Proceeding, pp. 142, 2004. 2004 4/30-5/5 Vision ScienceS Society 4th Annual Meeting Sarasota Hyatt Hotel.
10. **Junji Watanabe**, Hideyuki Ando, Dairoku Sekiguchi, Taro Maeda, Susumu Tachi, " The study of remote saccade sensing system based on retroreflective feature of the retina "Proceedings of ICAT2003, pp. 77-82, 2003. 2003 12/3-5 The 13th International Conference on Artificial Reality and Telexistence Keio University, Tokyo, Japan.
11. **Junji Watanabe**, Taro Maeda, Susumu Tachi, " The time course of localization errors for repeatedly flashing stimuli through a saccade "Vision ScienceS Society 3rd Annual Meeting Proceeding, pp. 192, 2003. 2003 5/9-14 Vision ScienceS Society 3rd Annual Meeting, Sarasota Hyatt Hotel.
12. Taro Maeda, Hideyuki Ando, Maki Sugimoto, **Junji Watanabe**, Takeshi Miki " Wearable Robotics as a Behavioral Interface -The Study of the Parasitic Humanoid- ", Proc of 6th International Symposium on Wearable Computers, pp.145-151, 2002. 2002 10/7-10 6th IEEE International Symposium on Wearable Computers

13. Taro Maeda, Hideyuki Ando, Maki Sugimoto, **Junji Watanabe**, Takeshi Miki “ Parasitic Humanoid: Human Behavior Measurement by Wearable Technologies ”
2002 8/5-7 SICE Annual Conference 2002, Osaka International Convention Center.
14. Taro Maeda, **Junji Watanabe**, Eimei Ohyama, and Susumu Tachi “ The vertical horopter tilts forward asymmetrically against the geometrical structure of Luneburg’s theory ”
2001 4/29-5/4 The Association for Research in Vision and Ophthalmology(ARVO),Florida, USA.

国内学会大会発表（主著 14 件，関連 5 件）

1. 草地 映介，渡邊 淳司，楠 房子，“ マウスホイールを用いたペイントツールの提案 ”
2005 2/28-3/1 インタラクション 2005，一橋記念講堂.
2. 渡邊 淳司，栗木 一郎，舘 すすむ，西田 眞也，“ 運動知覚によって引き起こされる色分離に関する研究 ”VISION Vol. 17, No. 1, pp. 95, 2005.
2005 1/26-28 2005 年日本視覚学会冬季大会，早稲田大学.
3. 渡邊 淳司，圓道 知博，前田 太郎，舘 すすむ，“ スリット視による奥行き知覚の研究 ”日本バーチャルリアリティ学会第 9 回大会論文集 pp. 487-488, 2004.
2004 9/8-10 日本バーチャルリアリティ学会第 9 回大会，京都大学 百周年時計台記念館.
4. 渡邊 淳司，栗木 一郎，舘 すすむ，西田 眞也，“ 運動知覚によって引き起こされる混色に関する研究 ”VISION Vol. 16, No. 3, pp. 192, 2004.
2004 7/21-23 2004 年日本視覚学会夏季大会，高知共済会館.
5. 渡邊 淳司，坂本憲久，則武 厚，前田 太郎，舘 すすむ“ 移動している観察者に対する Saccade-based Display を利用した情報提示の研究 ”電子情報通信学会技術研究報告 ヒューマン情報処理 HIP2003 15-28 信学技法 Vol.104 No.168, pp. 69-73, 2004.
2004 7/8-10「エンタテインメントとヒューマン情報処理」日本バーチャルリアリティ学会エンタテインメント VR 研究委員会第 6 回研究会，共催：電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会. 沖縄大学.
6. 渡邊 淳司，則武 厚，前田 太郎，舘 すすむ，西田 眞也，“ サッカー中に瞬間提示される光点とサッカーを通して提示される連続点滅光点の定位の違い ”VISION Vol. 16, No. 1, pp. 61, 2004.
2004 1/26-28 2004 年日本視覚学会冬季大会工学院大学.
7. 渡邊 淳司，関口 大陸，安藤 英由樹，前田 太郎，西田 眞也，舘 すすむ“ 頭部運動を許容する遠隔サッカー検出手法の検討 ”日本バーチャルリアリティ学会第 8 回大会論文集 pp. 179-183, 2003.
2003 9/17-19 日本バーチャルリアリティ学会第 8 回大会，ぱ・る・るプラザ岐阜&アクティブG.
8. 杉本 麻樹，渡邊 淳司，安藤 英由樹，前田 太郎，“ 前庭感覚刺激による歩行方向の誘導 -パラサイトヒューマンの研究第 17 報- ”，日本バーチャルリアリティ学会 第 8 回大会論文集，pp.339-342, 2003.

- 2003 9/17-19 日本バーチャルリアリティ学会第 8 回大会, ぱ・る・るプラザ岐阜 & アクティブG.
9. 渡邊 淳司, 前田 太郎, 西田 眞也, 舘 すすむ“ サッカードを通して提示される連続点滅光点の知覚とその定位 ”日本神経回路学会第 13 回全国大会講演論文集 pp. 144-145, 2003.
2003 9/8-10 日本神経回路学会第 13 回全国大会法政大学.
10. 渡邊 淳司, 田畑 哲稔, 前田 太郎, 舘 すすむ“ 眼球運動を利用したディスプレイとパフォーマンスの融合 ”電子情報通信学会技術研究報告 Vol.103, No.165, pp. 19-23, 2003.
2003 7/3-4 「エンタテインメントとヒューマン情報処理」日本バーチャルリアリティ学会エンタテインメント VR 研究委員会第 2 回研究会, 共催: 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会. 琉球大学.
11. 渡邊 淳司, 前田 太郎, 舘 すすむ, “ サッカード中に提示される連続点滅光点の知覚と眼球運動の時間関係 ”VISION Vol. 15, No. 1, pp. 44, 2003.
2003 1/20-22 2003 年日本視覚学会冬季大会, 工学院大学.
12. 渡邊 淳司, “ Augmented Performance with Catalytic Devices -Cell/66b- ”, 日本バーチャルリアリティ学会第 7 回大会論文集 pp.21-22, 2002.
2002 9/18-20 日本バーチャルリアリティ学会第 7 回大会, 東京国際交流館 プラザ平成.
13. 渡邊 淳司, 前田 太郎, 舘 すすむ, “ 光点列群による Saccade-based Display の設計指針 ”日本バーチャルリアリティ学会第 7 回大会論文集 pp. 565-568, 2002.
2002 9/18-20 バーチャルリアリティ学会第 7 回大会, 東京国際交流館 プラザ平成.
14. 前田 太郎, 安藤 英由樹, 杉本 麻樹, 渡邊 淳司, 岩本 貴之, 三木 健, 朝原 佳昭“ 行動インタフェースとしてのウェアラブルロボティクス -パラサイトヒューマンの研究第 11 報- ”日本バーチャルリアリティ学会 第 7 回大会論文集, pp.229-230, 2002.
2002 9/18-20 バーチャルリアリティ学会第 7 回大会東京国際交流館 プラザ平成.
15. 朝原 佳昭, 渡邊 淳司, 杉本 麻紀, 安藤 英由樹, 前田 太郎“ 電気刺激を用いた歩行周期誘導 -パラサイトヒューマンの研究第 15 報- ”日本バーチャルリアリティ学会 第 7 回大会論文集, pp.239-240, 2002.
2002 9/18-20 バーチャルリアリティ学会第 7 回大会東京国際交流館 プラザ平成.
16. 渡邊 淳司, 吉野 治香, 安藤 英由樹, 前田 太郎, “ シューズ型インターフェイスを用いた歩行周期の誘導 -パラサイトヒューマンの研究第 10 報- ”日本バーチャルリアリティ学会第 6 回大会論文集 pp. 47-48, 2001.
2001 9/19-21 バーチャルリアリティ学会第 6 回大会, 長崎ブリックホール.
17. 前田 太郎, 安藤 英由樹, 渡邊 淳司, 野村 宜邦, 三木 健“ 行動モデル化のためのウェアラブルロボティクス -パラサイトヒューマンの研究第 6 報- ”, 日本バーチャルリアリティ学会 第 6 回大会論文集, pp.153-154, 2001.
2001 9/19-21 バーチャルリアリティ学会第 6 回大会長崎ブリックホール.
18. 渡邊 淳司, 安藤 英由樹, 前田 太郎, “ 腕部と脚部の相関に着目した歩行運動の解析 ”第 16 回生体・生理工学シンポジウム論文集 pp. 419-420, 2001.
2001 8/29-31 生体生理シンポジウム, 北里大学.

19. 渡邊 淳司, 前田 太郎, 舘 すすむ, “ サッケードを利用した新しい情報提示手法の提案 -パラサイトヒューマンの研究第4報- ”日本バーチャルリアリティ学会第5回大会論文集 pp. 339-402, 2000.
2000 9/18-20 バーチャルリアリティ学会第5回大会, エポカルつくば.

研究室関係展示 (2 件)

1. 渡邊 淳司, 板垣 貴裕, 野嶋 琢也, 稲見 昌彦, 舘 すすむ, “ Beings ”
2003 5/19-5/23 芸術科学会 DiVA 展, 東京工業大学大岡山キャンパス百人記念館.
2. 渡邊 淳司, 波多野 健介, 野嶋 琢也, 稲見 昌彦, 舘 すすむ, “ re-cognition ”
2003 3/26-3/30 「インフォメーションアートの想像力」展, 東京都写真美術館.

展示 (35 件)

1. 2005 3/9 Performance at Velfarre (cell/66b)
2. 2004 11/25 Patchwork in motion Workshop at white space (cell/66b)
3. 2004 11/6 「REM」 at CHAOS (cell/66b)
4. 2004 9/26 「Words in space exp.I,II」, at 日本科学未来館 (Space Art)
5. 2004 8/8 Indie's Movie Festival Summit2004 Special Art Show, Panasonic Center, Tokyo, Japan. (cell/66b)
6. 2004 2/2-27 3rd Space Art Exhibition 第3回 宇宙と芸術展 「Words in space exp.I,II」宇宙航空研究開発機構内 JAXA-i (Space Art)
7. 2003 10/12,13 Seoul International Dance festival, Hoam Art Hall, Seoul, Korea. (cell/66b)
8. 2003 9/13-25 2nd Space Art Exhibition 第2回 宇宙と芸術展 「Words in space exp.I,II」宇宙開発事業団筑波宇宙センター 宇宙ステーション運用棟 1F ロビー (Space Art)
9. 2003 9/4 Louis Vuitton Roppongi Hills Store Opening Party, Tokyo, Japan. (cell/66b)
10. 2003 5/24 Discover your style Spring 2003, Spiral, Tokyo, Japan. (cell/66b)
11. 2003 5/19-5/23 芸術科学会 DiVA 展, Beings. (Smart Tool)
12. 2003 5/15-16 Test-patches Goethe Institute Tokyo, Tokyo, Japan. (cell/66b)
13. 2003 3/26-3/30 「インフォメーションアートの想像力」展 (Smart Tool)
14. 2003 3/13 Lost-tune Asubest-Kan, Tokyo, Japan. (cell/66b)
15. 2003 2/22 Ekamsat at SECOBAR in the Mirror (Saccade)
16. 2003 2/7,8 Eat03 Kanazawa, Ishikawa, Japan. (cell/66b)
17. 2003 1/12 BEATRITION at SIMOON (Saccade and VJ on Fashion show)

18. 2002 11/29-12/17 Grobal Media 2002. Tokyo Museum of Photography, Tokyo, Japan. (cell/66b)
19. 2002 10/28 ISEA(International Sinposium of Electric Art), Nagoya, Japan. (cell/66b)
20. 2002 10/26 Ekamsat at SECOBAR (Saccade)
21. 2002 10/6-10/14 街頭藝術横浜 2002 at 馬車道通り信濃屋さん Visionary - Window (Saccade)
22. 2002 10/5 Reaneissance at Womb (Saccade)
23. 2002 9/18-9/20 バーチャルリアリティ学会第7回大会 at 東京国際交流館 ブラザ平成 Visionary II (Saccade)
24. 2002 9/18 7th Virtual Reality Society Japan Annual Convention, Tokyo, Japan. (cell/66b)
25. 2002 9/12,13,14 Jugendstiltheater, Vienna, Austria. (cell/66b)
26. 2002 9/7,9 Tabakwerke and Brucknerhaus, Ars Electronica, Linz, Austria. (cell/66b)
27. 2002 8/29,30,31 Culture Center Rex, Belgrade, Yugoslavia. (cell/66b)
28. 2002 8/17 Public run through, Co-exist, Tokyo, Japan. (cell/66b)
29. 2002 7/27 Indies Movie Festival, Yebisu Garden Hall, Tokyo, Japan. (cell/66b)
30. 2002 7/13-8/4 Digital Image 2002 at 東京都写真美術館 (Saccade)
31. 2002 6/24 PeaceTune, Club Womb, Tokyo, Japan. (cell/66b)
32. 2002 6/15-6/16 第1回産学官連携推進会議 展示会 at 国立京都国際会館 (Saccade)
33. 2002 5/3 Next02, Tokyo Museum of Photography, Tokyo, Japan. (cell/66b)
34. 2002 4/29-5/5 Digital Image 2002 at 銀座 Washington Gallery Visionary (Saccade)
35. 2001 12/15 at Milk Yebisu, Japan. (Saccade)

特許 (2 件)

1. 「眼球運動を利用した情報提示装置及び情報提示手法」特開 2003-255861(特願 2002-060461)
2002 年 3 月 6 日 申請
東京大学大学院 情報理工学系研究科 渡邊 淳司
東京大学大学院 情報学環 前田 太郎
東京大学大学院 情報理工学系研究科 館 すすむ
2. 「眼球運動を利用した情報提示装置及び情報提示手法」特開 2002-175025(特願 2001-250265)
2001 年 9 月 8 日 申請
東京大学大学院 情報理工学系研究科 渡邊 淳司
東京大学大学院 情報学環 前田 太郎
東京大学大学院 情報理工学系研究科 館 すすむ