

Title	幾何学的錯視におけるサッカードの影響
Author(s)	岩橋, 誠司
Citation	
Issue Date	2001-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/732
Rights	
Description	Supervisor:橋本 敬, 知識科学研究科, 修士

修 士 論 文

幾何学的錯視におけるサッカードの影響

指導教官 橋本 敬 助教授

北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科知識システム基礎学専攻

950007 岩橋 誠司

審査委員： 橋本 敬 助教授（主査）
中森 義輝 教授
梅本 勝博 助教授

2001 年 2 月

目次

第1章 はじめに	1
1.1 本研究の目的.....	1
第2章 眼球運動	3
2.1 眼球運動とは.....	3
2.1.1 眼球運動の必要性.....	3
2.1.2 サッカーダ.....	4
2.1.3 サッカーダ生成に関わる神経回路.....	5
2.1.4 サッカーダと上丘の関係.....	6
2.1.5 サッカーダ抑制.....	8
2.2 注意について.....	8
2.2.1 視覚的注意.....	8
2.2.2 サッカーダと注意の関係.....	9
2.3 サッカーダモデル.....	10
2.3.1 Robinson モデル.....	10
2.3.2 Arai et al.モデル.....	11
第3章 錯覚	12
3.1 錯覚について.....	12
3.2 幾何学的錯視.....	13
3.3 錯視のメカニズムを説明する理論.....	13
第4章 心理実験	16
4.1 実験の目的.....	16
4.2 被験者.....	16
4.3 実験に用いた道具.....	16

4.3.1	道具	16
4.4	方法	18
4.4.1	視覚刺激	18
4.4.2	手続き	18
4.5	結果	20
4.5.1	眼球運動の有無	20
4.5.2	視覚刺激の違い	21
4.6	考察	23
第5章 サッカーモデル		24
5.1	モデルの概要	24
5.2	MODEL DYNAMICS	25
5.3	SUPERIOR COLLICULUS	28
5.3.1	オキュロモーターマップ	28
5.3.2	SCの表現	29
5.4	学習	30
5.5	モデルの特性	31
5.5.1	サッカーの結果	31
5.5.2	SCの反応	35
5.6	ML図形に対する反応	37
5.7	考察	40
第6章 議論		41
6.1	結果の比較	41
6.2	他の説との関連	43
6.3	幾何学的錯視の条件	44
第7章 結論		45
謝辞		46
参考文献		47

付録	49
--------------------------	----

目 次

図 2-1 網膜の各部位における視力[Wertheim,1894]	3
図 2-2 人の顔を見るときにサッカードの様子	4
図 2-3 サッカード生成に関わる神経回路	5
図 2-4 上丘のモーターマップ	6
図 2-5 Robinson のサッカードモデル	10
図 2-6 Arai et al.モデルの概要	11
図 3-1 幾何学的錯視の図形	13
図 4-1 実験に使用したアプリケーション	17
図 4-2 頭を固定するもの	17
図 4-3 実験に使用した図	18
図 4-4 視点を固定したときと振動させたときの誤差	20
図 4-5 主線 200 ドット(視覚 13.5j)における結果	21
図 4-6 主線 300 ドット(視覚 19.8j)における結果	21
図 4-7 主線 400 ドットにおける結果	22
図 5-1 本研究で提示するサッカードモデルの概要	25
図 5-2 オキュロモーターマップ	29
図 5-3 2つのセル間の結合強度	30
図 5-4 学習後の重み	32
図 5-5 サッカードの振幅	33
図 5-6 視点の軌跡	34
図 5-7 SC の反応 :	35
図 5-8 SC におけるセルの反応の時系列	36
図 5-9 主線 13.53 ° の結果	37
図 5-10 主線 19.57 ° の結果	38
図 5-11 主線 25.81 ° の結果 :	39
図 6-1 心理実験とシミュレーションの結果における相関関係	42

表 目 次

表 4-a 実験条件	19
表 5-a パラメータ	31
表 5-b 主線 13.53° の結果	38
表 5-c 主線 19.57° の結果	39
表 5-d 主線 25.81° の結果	40

第 1 章

はじめに

1.1 本研究の目的

本研究では、幾何学的錯視と呼ばれる図形がサックードにどのように影響するのかを心理実験とサックードモデルを用いたシミュレーションにより検討する。

ある種の幾何学図形において長さが同じであるにも関わらず、違うように知覚することがある。これらは、幾何学的錯視と呼ばれ、図形の長さ・大きさ・形を歪ませて知覚するという共通の特徴がある。幾何学的錯視の図形は 1800 年の終わりごろから 1940 年ぐらいの間に、ほとんどのものが発見されている。これらの錯視について、いろいろな説明や理論が研究されてきたが、多くのものはいわゆる現象の説明に過ぎず、「こういう時にこうなる」というだけで、なぜそうなるのかわからないものが多い。またある現象についてはわかったような気になるけれども、他の現象と一緒に説明できないこともよくある。本研究では、幾何学的錯視に対しサックードという眼球運動が重要な役割を果たしているという立場をとり、幾何学的錯視全般を説明できるモデルを提示するために、心理実験によって Müller-Lyer 錯視に対するサックードの影響を調べる。さらに、脳機能の一部をモデル化したサックードの計算論的モデルを用いて、幾何学的錯視とサックードの関係を検討する。

Binsted, Elliott (1999) は、Müller-Lyer 錯視を用いて眼球の角度を調べる実験を行った。その結果、最初のサックード(initial saccade)で視標と実際の視点に誤差が生じることが確認された。この結果は Müller-Lyer 錯視と眼球運動の関係を示唆するが、一般的な錯視の原因やメカニズムは提唱されていない。そこで、本研究ではいくつかの錯視を説明する説の中で眼球運動説を支持し、サックードが視標の周辺にある幾何学的錯視の構成要素を脳内で処理する過程で眼球運動指令に誤差を生じさせ、その誤差が錯視を誘発させるという仮説を立てた。

本研究では、心理実験をおこない Müller-Lyer 錯視の特徴や性質を検証し、眼球運動の有無による錯視の程度の違いを測定した。さらに、眼球運動を生成する脳モデルを作成し、シ

ミュレーションにより錯視の原因やメカニズム検証する。

第2章では、眼球運動および、それに関する脳機能について述べる。第3章では、一般的な錯覚の説明と錯視のメカニズムを説明するいくつかの説を紹介する。第4章では、Müller-Lyer 錯視を用いた心理実験から幾何学的錯視と眼球運動の関係を示す。第5章では、眼球運動モデルによるミュレーションで幾何学的錯視による眼球運動への影響について述べる。第6章では、心理実験とミュレーションの結果を考察し、錯視のメカニズムについて議論する。

第 2 章

眼 球 運 動

2.1 眼球運動とは

2.1.1 眼球運動の必要性¹

視覚情報の正確な取り込みが眼球運動の目的と考えられる。霊長類では網膜の一部で視神経の密度が高く、その部分では特に解像力が良い。人間では、視角の半径 2.6 度以内を中心窩、0.7 度以内を中心小窩という。実測によれば中心視による視力が 1.1 ほどでも、視角 2、5、10 度の位置で、視力はそれぞれ 0.6、0.3、0.1 に下がる(図 2-1)。片腕を伸ばしたくらいの位置(約 57.3)で 1cm が一度をなすので、わずか 2cm で視力が半減に近い。そこで興味ある対象を中心窩にとらえる眼球運動や、網膜像の滑りを抑えるような眼球運動が必要となる。

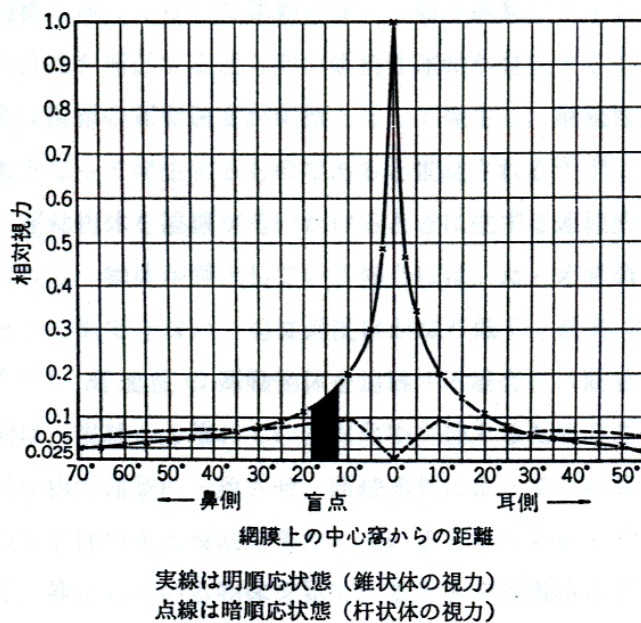


図 2-1 網膜の各部位における視力[Wertheim,1894]²

¹ 参考文献[4]より

² 参考文献「5」より

2.1.2 サッカー³

視覚的に対象を探索するとき、興味ある地点に向けて視線をつぎつぎにジャンプさせるような運動をサッカー(saccade；衝動性眼球運動、跳躍眼球運動)という。この眼球運動は非常に高速の跳躍的運動でその一般的特性は次のとおりである。

1. 立ち上がり時間：1/20~1/100 秒
2. 最高速度：300°/秒以上
3. 発生周期：0.15~0.3 秒
4. 両眼で同時に同方向に生じる。

人の顔を見るときにサッカーの状態を図 2-2 に示す。右の図は、左の図を見ているときのサッカーの様子を表わしている。目や鼻や口のように特徴のある部分に視点が集まっているのがわかる。

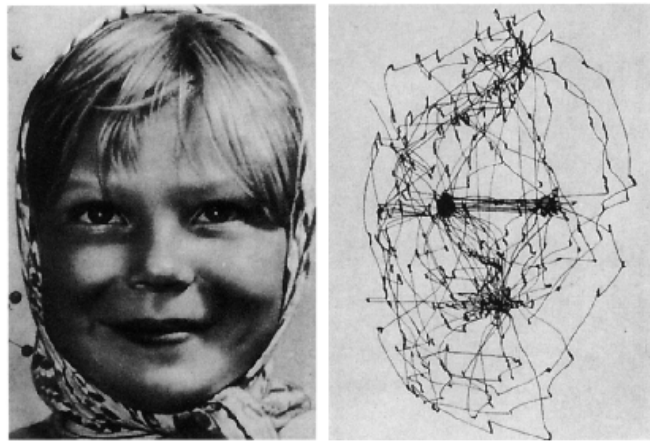


図 2-2 人の顔を見るときにサッカーの様子⁴

³ 参考文献[7]より

⁴ 参考文献[8]より

2.1.3 サッカー生成に関わる神経回路⁵

サッカーの生成に関連する脳の部位は、上丘、大脳基底核、前頭眼野、視床、外側膝状体である。それらの神経回路の概略を図 2-3 に示す。

網膜は外側膝状体を經由して後頭葉の視覚野に情報を送る。さらに、前頭葉には眼球運動系の高次中枢である前頭眼野があり、頭頂連合野などと情報を交換しながら、脳幹のサッカーや滑動性追跡眼球運動に関連する神経組織に指令信号を送っている。脳幹には眼球運動神経があり、サッカーに際して高頻度な発火をするバーストニューロン(burst neuron)と呼ばれる細胞から興奮性、抑制性の信号を受け活動している。バーストニューロンは前頭眼野から直接に、あるいは上丘を介して間接的に指令信号を受けている。上丘は前頭眼野から指令を受ける一方、大脳基底核から恒常的な抑制を受けている。大脳基底核は前頭眼野などから指令を受けているが、とくに記憶した視標位置に向かってサッカーを起こすときに機能することが示されている。

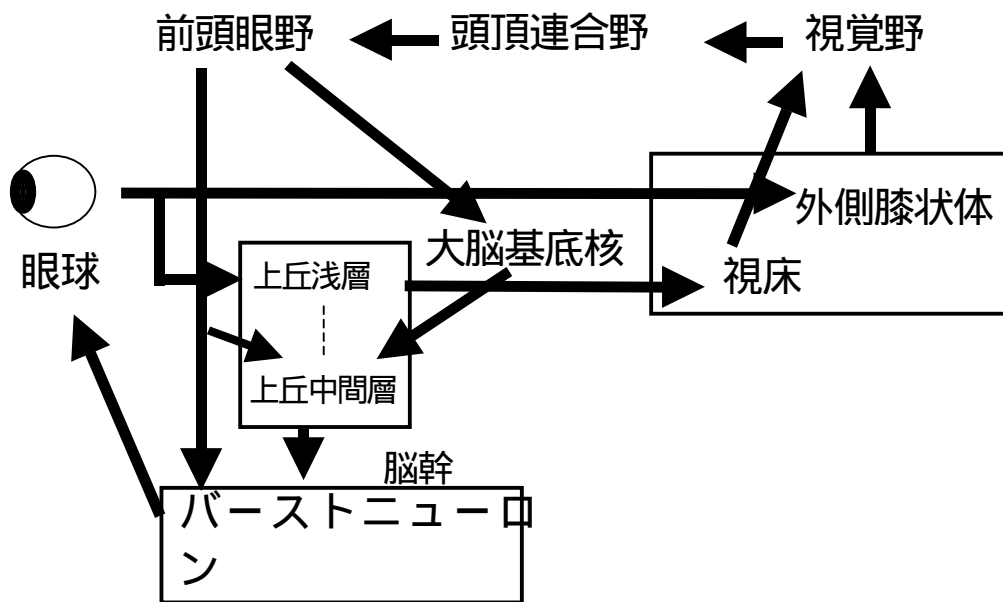


図 2-3 サッカー生成に関わる神経回路

⁵ 参考文献[4]より

2.1.4 サッカーと上丘の関係

上丘はカエルなどの両生類では視蓋と呼ばれており、視蓋前域と合わせて感覚-運動系の高次中枢であり、刺激の方へ向き直る行動を起こしたり、刺激からの退避行動をつかさどっている(定位反応)。哺乳類では網膜からの視交差のあと外側膝状体へ入る前に上丘へ分岐する視覚情報の経路がある。上丘の浅層に入り、視床を経て再び視覚野などへ流入している。上丘浅層の個々のニューロンは左右反対側の視野に受容野を持ち、全体として網膜部位再現性(retinotopy)を持った半視野の写像がある。

上丘の中間層には、サッカー時に高頻度の発火をするニューロンが存在して、脳幹のバーストニューロンへ出力を送っている。微小電極を刺入して中間層を刺激すると、特定の振幅、方位をもつサッカーが生じる。吻側にいくほど振幅が小さく、尾側の刺激ほど大きな振幅のサッカーを生じる。内側(体の中心線に近い側)では上向きに、外側では、下向きに方位が変わる(モーターマップ: 図 2-4 参照)。浅層の2次元視覚マップとこのモーターマップはちょうど重なる。視標が浅層ニューロンの興奮を起こすと、その直下の中間層ニューロンの活動によって、ちょうど視標を捉えるサッカーが生じる位置関係にある。上丘浅層から中間層に直接働きかけている可能性はあるが確かではない。両生類で高次中枢であった視蓋に対して、大脳の発達した動物の上丘では、より高次の視覚処理などを経た大脳皮質運動野の支配が進み、とくに霊長類などではサッカー運動の随意的な支配が確立している。

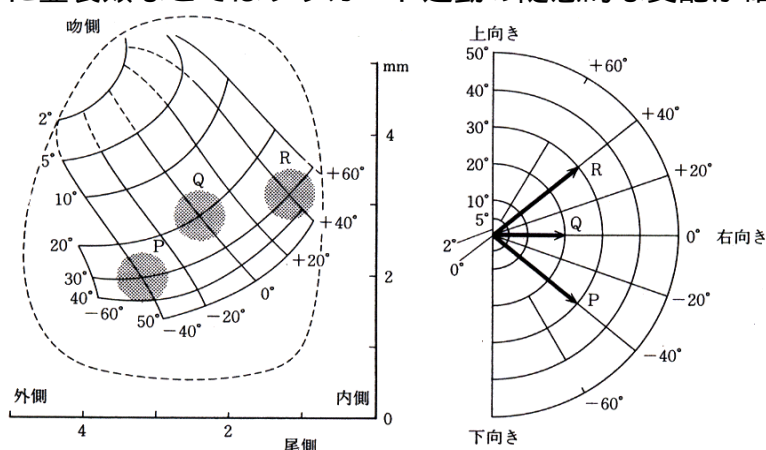


図 2-4 上丘のモーターマップ

左図は上丘を平面で表わしたモーターマップである。上丘の中間層に微小電流を流すと、刺激場所に依じて定まった振幅、方位のサッカーが生じる。吻側にいくほど振幅が小さく、尾側の刺激ほど大きな振幅のサッカーを生じる。内側(体の中心線に近

い側)では上向きに、外側では、下向きに方位が変わる。左図で $2^\circ, 5^\circ, \dots, 50^\circ$ は振幅、 $-60^\circ, -40^\circ, \dots, +60^\circ$ は方位を表す[D.A.Robinson,1972]。右図は、右側の視野をあらわす。P、Q、R は、左右の図の対応例を示す。

2.1.5 サッカー抑制⁶

サッカーによって、ある1点からほかの1点に視線を移すのに要する時間は1/100秒程度であるが、この間網膜像は流れることになる。しかし、われわれは像の流れを全く感じない。これは、この間視覚の反応が抑圧されて物が見えなくなっているからであるということが知られている。すなわち、サッカーが発生する直前から運動が終了する直前までは、視覚の知覚機能が著しく低下するという現象が起こる。この現象はサッカー抑制と呼ばれている。

2.2 注意について⁷

本研究において幾何学的錯視は、注意の点がずれることで長さや形が違って見えると仮説をたてた。そこで、注意について説明する。

2.2.1 視覚的注意

注意とは、不要な情報を捨て去り、有用な情報を獲得する「情報選択」機能である。認知心理学における注意の定義も、このような一般的定義とそれほど隔たりはない。注意は、聴覚や触覚などの感覚に対しても存在することがわかっているが、ここでは視覚情報を対象にした選択機能について考える。

視覚的注意は、注視(または凝視)と混同されやすい。視覚的注意は、注視とは同義語ではなく、認知心理学では明確に区別されている。注視とは、なんらかの視覚対象に視点を向け続けることであるが、われわれは注視していない視覚対象にも注意を向けることが可能である。このような、注視しなくても視覚対象に向ける注意を視覚的注意という。

⁶ 参考文献[10]より

⁷ 参考文献4[10]より

2.2.2 サッカーカードと注意の関係⁸

注意が具現化したものが眼球運動であり、眼球運動が内在化したものが注意であるという考えは広く支持されている。われわれは眼球をすばやく動かして興味ある対象を中心窩でとらえ、つぎの対象に移っていく。注意もそれに伴って、あるいは先行して動いている。

注意を向けた情報は、サッカーカードとサッカーカードの間の固視期間中に固定された視覚像を取り込むことによってデジタル的なサンプリングをされる。サッカーカードによって視野の中の点 A から点 B に視線を移動させるとき、注意の焦点も点 A から点 B に移動していると考えられる。注意は基本的には運動に奉仕するものであるとすれば、サッカーカードがおこる前に注意が移動しなければならない。注意の移動に関する心理物理学的な研究がある。それによると注意の焦点はサッカーカードの開始よりも前に点 A から点 B に向かって移動し始める。しかしその速度は遅く、サッカーカードによって実際に視線が点 B に到達するころに注意も点 B に到達するということである。

⁸ 参考文献[4]より

2.3 サッカーモデル

本研究では、心理実験の結果から仮説をたて、錯視サッカーモデルによるシミュレーションでのメカニズムについて検討する。ここでは、サッカーモデルを構築するために参考にしたサッカーモデルを紹介する。

2.3.1 Robinson モデル

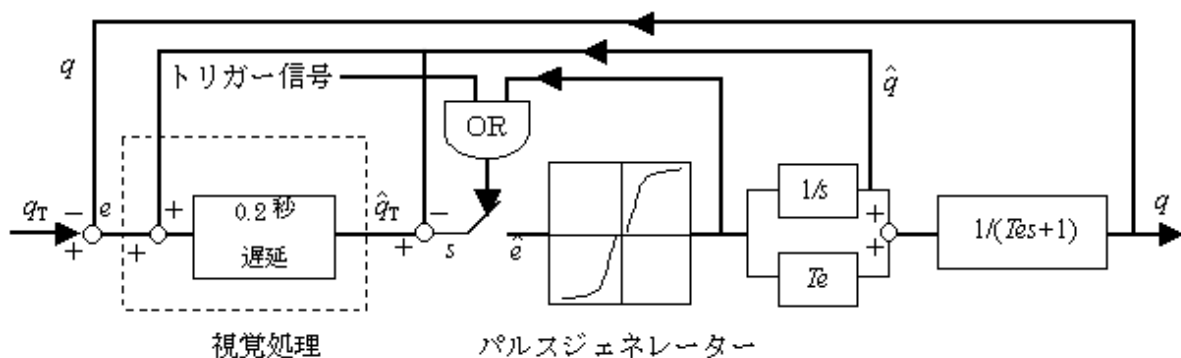


図 2-5 Robinson のサッカーモデル

このモデル図中の q は眼球位置(頭部座標系)、 q_T は視標位置(頭部静止座標系)、 e は網膜誤差、 \hat{q} 印は神経系による推定値であることを示す。トリガー信号で閉じた s はパルスジェネレーター出力が0となって初めて開く[Robinson,1975]。

このモデルで視標位置は、網膜誤差 e (網膜静止座標系)からその時点の推定眼球位置 q (頭部静止座標系)を加算して、頭部に対する推定視標位置 q_T (頭部静止座標系)へ変換されて保存される。サッカードの実行に際しては、その時点でフィードバックされた推定眼球位置 q (頭部静止座標系)との差が運動誤差 e となってサッカードが進行する。このようなロジックを実現するのに必要な眼球位置の推定信号 q は神経積分器から供給される。さらに、バーストニューロンに非線型なゲイン特性を導入して、サッカードの主系列特性を実現している。

2.3.2 Arai et al.モデル

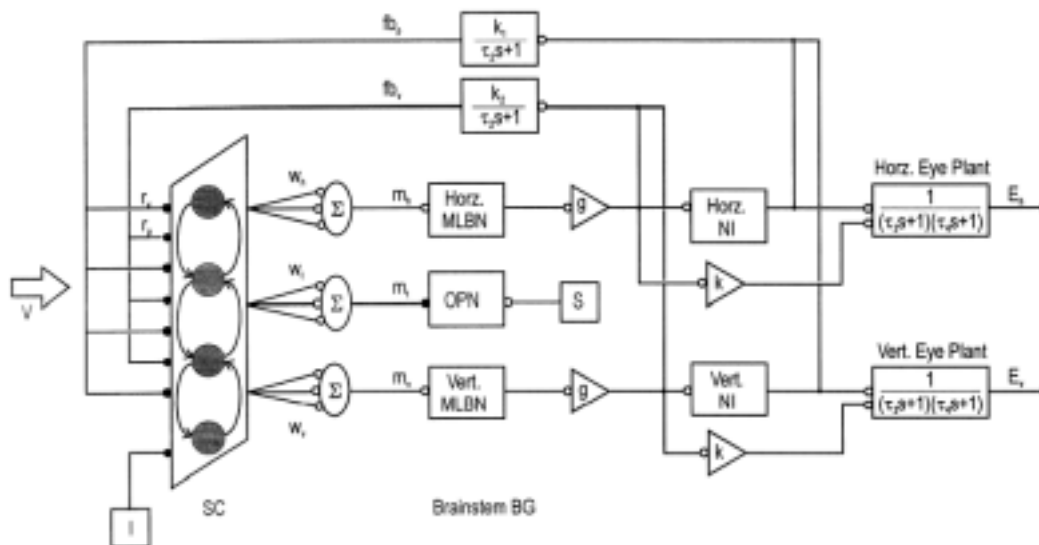


図 2-6 Arai et al.モデルの概要

図中の SC は、上丘をあらわす。SC からの出力は水平成分と垂直成分にわかれ、MLBN からサッカードの速度信号を出力する。速度信号は、積分器で位置信号となり出力する一方、位置・速度のフィードバック信号して SC へ返される[Arai,1999]。

Arai et al. [Arai,1999]によるサッカードモデルを図 2-6 に示す。このモデルは、脳内で処理された視覚刺激 V が上丘の浅層(superior colliculus : 以下 SC)を刺激する。この刺激によって SC 内の細胞は相互作用し合う。そして細胞の反応が閾値を超えるとバーストニューロンは発火し上丘の中間層(medium-lead burst neuron : 以下 MLBN)から出力される。この出力は、サッカード速度の水平・垂直成分をあらわし、積分器(neural integrator of tonic neurons : 以下 NI)によって眼変位となる。このとき、位置情報と速度情報をフィードバック信号(fb_h 、 fb_v)とし、再び SC へ入力される。またオムニポーズニューロン(omnipause neuron : 以下 OPN)が刺激されると SC 内の細胞の反応は、抑制される。図中の I は、大脳皮質からの抑制信号であり視覚刺激の後、一定時間 SC 内の細胞を抑制する信号である。 m_h 、 m_v は各 MLBN へ、 m_i は OPN へ向かう重みを示す。 r_p 、 r_v は SC へのフィードバックの重みである。各重みは、サルを使った計測データをもとに同様の振る舞いを示すように学習されたものである。

第 3 章

錯 覚

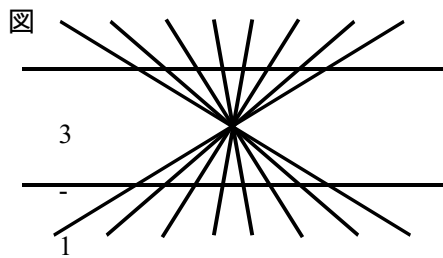
3.1 錯覚について

人間は、目や耳などを使って自分のまわりの状況を知覚している。しかし時には現実の情報を正しく受け入れないことがある。錯覚とは、正常な状態の人が見たり聞いたりした情報が、理性的に間違っていると自分で分かっているにもかかわらず、なおそのように間違っただけで知覚される現象をいう。

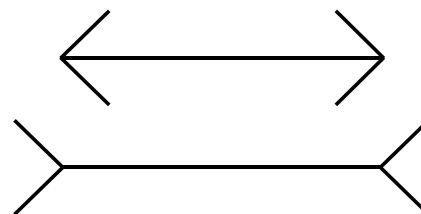
目で見るときに起きる錯覚を錯視という。形や大きさが正しく見えなかったり、明暗、色、運動などが現実と違って見える現象である。聴覚でも、ないはずの音が聞こえたり、音の大きさ、高さ、位置などが現実とちがって聞こえる場合がある。空耳と言うと、何か偶然に起きる科学的でない現象のように思われるが、ここでは聴覚の錯覚を空耳と呼ぶことにする。今見たり、聞いたりしている情報についての錯覚だけでなく、今見たり聞いたりした影響があとに残って、その後の知覚が変わってしまう残効という錯覚もある。また、視覚と聴覚がお互いに影響し合っただけで生じる錯覚もある。普通は錯覚とは呼ばないが、例えば視覚においては大きさの恒常性、色の恒常性などと呼ばれる現象がある。遠くにあっても近くにあっても見た目は同じ大きさに見え、照明の色にかかわらず物の色は一定に見えるということである。さらに、触覚にも錯覚の現象がある。そのほかに、匂いや味にも錯覚がある。

3.2 幾何学的錯視⁹

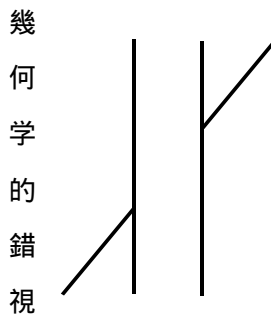
幾何学的錯視とは、平面図形において長さや面積、方向、角度、曲線といった幾何学的関係が、実際とは異なって見える現象をいう。図 3-1 に代表する幾何学的錯視を示す。



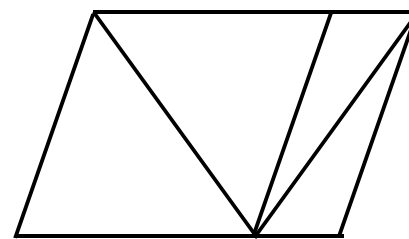
Hering 錯視



Müller-Lyer 錯視



Poggendorf 錯視



Thunder 錯視

図

形

3.3 錯視のメカニズムを説明する理論¹⁰

錯視のメカニズムを説明する理論は、さまざまな説がある。ここでは、代表的なものを簡単に解説する。

・ 網膜説

明暗、色などの残効は網膜の性質が主な原因と考えられる。以前は、幾何学的錯視も網膜に原因があるのではないかと精力的に研究されていたが、現代では主たる原因ではないと考

⁹ 参考文献[15]

¹⁰ 参考文献[9][14][15]

えられている。

・ 眼球運動説

図形を見るときに目の注視点は図形の特徴的なところを次々に移る。この移動の間に、例えば移動の経路がそばの図形の影響を受ける等、いろいろな原因で錯視が起きると考えられている。しかし目が動くよりも短時間で瞬間的に図形を見せるだけでも錯視は起きるので、この説は不完全である。それでも、実際に目を動かさなくても頭の中で注視点が動けばよい、あるいは動かそうとするだけでよいとの反論もある。

・ 視力限界説

画像をぼかすと、お互いに近くにある点や線は、より近寄って見える。例えば矢羽の錯視（Müller-Lyer 錯視）で内向きの矢羽がついた線分の端点は、本当の端点より少し線分に食いこんだところが最も濃度の高い点になる。しかし、くっきり見えている状態では、わずかな度合いしか近寄らない。それでも視野の周辺は常にぼやけているので、あながち否定するわけにもいかない。しかし錯視図形はいつでも図形要素が近寄るものばかりではない。

・ 側抑制説

網膜、大脳の視覚領のいたるところに側抑制という機構があって、一番強い特徴を際立たせる働きをしている。この副作用として図形の位置が少し離れるようにずれてしまう。また線分方向や、縞模様の密度、明暗、色、運動なども変わってしまう。一般に対比と呼ばれ、隣り合った情報との差を強調するように働く機能である。しかし錯視の大きさの方がとても大きく、理論と合わない場合がある。また局所的な角度の変化がなぜ位置の変化になるかなど、角度、長さ、位置などの総合的な変化を矛盾なく説明できない。角度の場合、側抑制の影響のない直角でも錯視は起きることが確認されている。この側抑制説あるいは側抑制を基本に更に発展させた神経生理機構による説は、視覚全般および単純な対比錯視の基本的な説明である。もちろん同化とよばれ対比と反対の現象、すなわち隣り合った情報が互いに似る（例えば図形要素が互いに近付いたり、明暗や運動が同じになるように変化する）錯視もたくさんあるので、この説も万能ではない。

・ 感情移入説

図形の要素になりきって、そのときの感覚、感情でまわりに引っ張られているとか、押さ

れているとか、重たいとか感じると説明する。

- ・ **良い形説**

ゲシュタルト心理において図形のまとまりや線のつながりなどの法則で、距離や長さはこうなるはずだ、という説明である。しかし、これはあくまでも現象の整理であって、現象の背後にあるメカニズムの説明にはなっていない。

- ・ **透視図説**

錯視図の多くのものが遠近感、奥行きを感じさせる。遠く of のものは小さく描いてあっても実際は大きいはずだ、と説明するものであり、暗黙のうちに大きさの恒常性を仮定している。一部の錯視は明確に説明できるが、同じ図の遠近を理性的に反転しても何ら矛盾なく解釈されることが多い。しかしこの説明は次のもう少し手のこんだ説明とともに、錯視の有力な説明として繰り返し主張されているものの一つである。

- ・ **不適切な大きさ恒常性解釈説**

透視図は奥行きを示唆してるが、実際の図形の奥行きは紙面の位置で一定である。両者を矛盾なく解釈し、大きさの恒常性を適用することはできない。これがまわりまわって錯視になるという説明である。このほかにも奥行きと錯視をからめる説明は多数あるがどうみても奥行きの感覚とは無関係な図形だけからなる錯視もたくさんある。

本研究では、主として眼球運動説の立場に立つ。しかし、この説だけで全ての錯視を説明できるわけではない。

第 4 章

心 理 実 験

既に述べたように、我々は錯視の原因として眼球運動が関わっているという立場をとる。特に、Binsted、Elliott[Binsted,Elliott ,1999]の研究で示唆されたようにサッカードと幾何学的錯視に関係していると思われる。本章では、この2つの間にどのような関係があるかを調べるための心理実験を行う。

4.1 実験の目的

この心理実験は、図形の大きさ・形・角度が長さを認識する上で、サッカードがどのように影響を及ぼすのかを調べる。本実験では、幾何学的錯視(Müller-Lyer 錯視：以下 ML)を使い長さの認識の誤差量を調べるための実験である。

4.2 被験者

北陸先端科学技術大学院大学の学生 10 人(平均年齢 27 歳)が本実験に参加した。

4.3 実験に用いた道具

4.3.1 道具

実験に使用した道具を表 4-1 に示す。

表 4.1 道具一覧

ディスプレイ	メルコ製 15 インチ TFT
PC	富士通 FM-V
メトロノーム	SEIKO 製のデジタルメトロノーム
アプリケーション	図 4-1 参照
頭を固定するもの	図 4-2 参照

図 4-1 に示した本実験で用いるアプリケーションには、上から基準線、注視点、ML 図形が表示されている。この線を主線、矢印を構成する斜めの線を斜線と呼ぶことにする。ML 図形の線の長さは、キーボードの矢印キー(←、→)で長さを変えることができる。(被験者は、この図形の長さを、上の基準線に合わせるように求められる。)

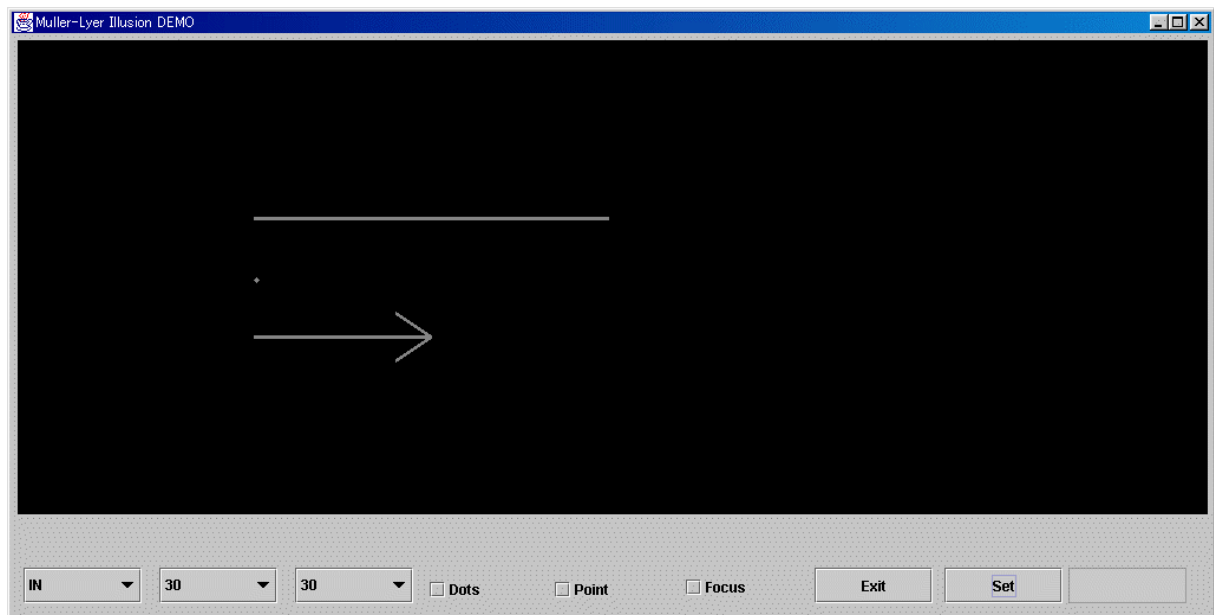


図 4-1 実験に使用したアプリケーション

実験に使用したアプリケーションは、黒い背景に、灰色の線とした。図中の上に示した線は基準線とする。下に示した水平の線を主線、斜めの線を斜線とする。また、上の線と下の線との間の点は、最初の視点である。下にあるボタンなどは、観測者が操作する。

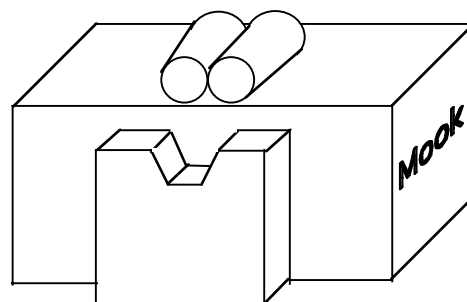


図 4-2 頭を固定するもの

手前の部分に顎を乗せ、固定することで頭が動かないようにする。そして、丸い部分から覗く。

4.4 方法

4.4.1 視覚刺激

実験に用いた7種類の図形を図4-3に示す。これらの図形は、ディスプレイ(1024×768ドット、1ドット=0.3mm)に背景は黒、線は灰色で描かれ呈示された。図形の水平の線を主線、斜めの線を斜線とする。また、主線と斜線の角度を挟角と呼ぶことにする。

図形の主線の長さは、200ドット、300ドット、400ドット(視角は、13.5°、19.8°、25.7°となる)、斜線45ドット、挟角は、30°、45°、60°、120°、135°、150°である。また、それぞれの挟角に図4-3(d)、(e)のような点を添付したもの、さらに図4-3(f)、(g)のような主線と点のみの図形も使用する。

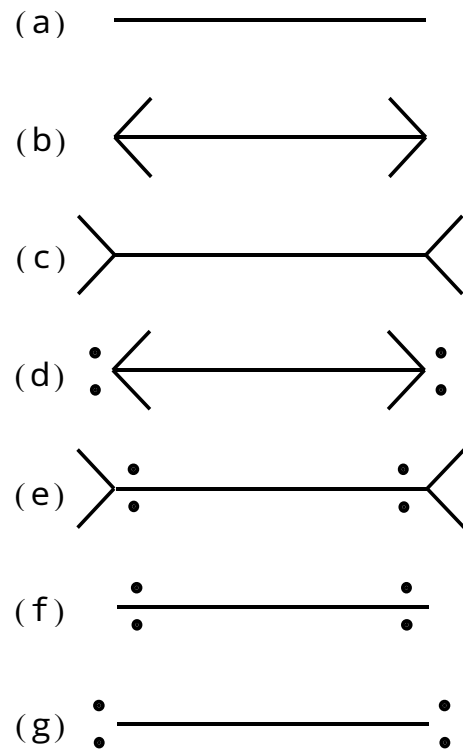


図 4-3 実験に使用した図

4.4.2 手続き

まず初めに、ディスプレイ上に上下に基準線と主線の2本の線を呈示する。被験者は、ディスプレイの画面から25cm離れた位置に、2本の線の間にある点が正面となるように座る。視点を主線の右端に固定し、長さを調整する。そして基準線と主線の長さが同じように感じたら終了する。次に視点を図形の左右に振動させながら、同様に長さを調整し、同じ長さを感じたらところで終了する。振動するタイミングは、毎分90回である。

測定は被験者調整法¹¹を用いられ、それぞれに5回ずつ計測し、2回目以降の4回の測定値の平均を各被験者の各条件の見掛け(上下同じと感じる)の長さとした。

実験は、主線と基準線の長さが等しく見えるように、キーボードの左向きあるいは右向きの矢印キーを押すことによって調整するようにと被験者は告げられた。左向きのキーは長さを短く、右向きのキーはこの逆であった。そして、被験者は長さの調整が終わったら"Enter"

¹¹ 参考文献[17]より

キー押すように告げられた。これにより1回の測定が終わり、主線の長さが記録される。このとき、測定結果は、被験者に分からないようにする。一人の被験者に対して、実験は66条件(330回)の測定を行った。実験条件は次のようなものである。図形(a)は、主線だけなので長さが200、300、400ドットと変え、視点を右端に固定した状態と振動した状態で行った。図形(b)、(c)では、主線200、300、400ドットを挟角45°とし、視点を右端に固定した状態で行った。また、挟角30°、45°、60°とし、振動した状態でもそれぞれ行った。図形(d)、(e)、(f)、(g)は、目を振動させ主線200、300、400ドットを挟角30°、45°、60°でそれぞれ行った。表4-1に、実験条件をまとめて示す。

表 4-a 実験条件

眼球運動	用いた図形	挟角	主線の長さ(ドット)
有	(a)		200,300,400
	(b)、(c)	45°	200,300,400
無	(a)		200,300,400
	(b)~(g)	30°、45°、60°	200,300,400

4.5 結果

図 4-3(a)で測定した長さとの図形との長さの差をここでは「誤差」と呼び、以下でこの誤差がどのような関係にあるのかを示す。

4.5.1 眼球運動の有無

主線300ドット、挟角45°の条件で視点を固定させたときと振動させたときの結果を図4-4に示す。このとき、実験に用いた図形は図4-3(b)、(c)である。

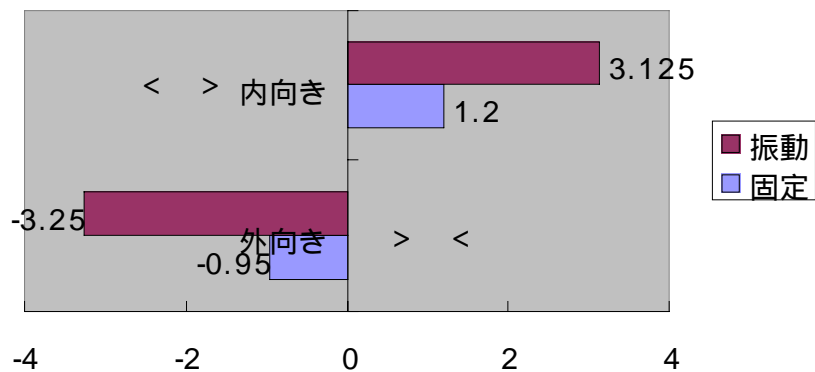


図 4-4 視点を固定したときと振動させたときの誤差

縦軸は条件、横軸は図4-3(a)で測定した長さとの誤差(単位:ドット)を表す。上の図は内向き(図形(b))、下の図は外向き(図形(c))を視覚刺激としたときの結果である。棒グラフの赤は眼球を振動させた状態、青は視点を固定した状態を示す。(この結果は振動させた場合、固定させた場合ともに母平均のt検定は、 $p < 0.01$ である。)

この結果は、眼球を振動させた状態の方が、固定させた状態より明らかに大きな誤差が生じていることを表わしている。

4.5.2 視覚刺激の違い

次に、目を振動させた状態での主線の長さ、斜線の角度、図形の形を変えたときの特性を調べる。図 4-5、図 4-6、図 4-7 は、それぞれ主線の長さを 200 ドット、300 ドット、400 ドットとしたときの図形(b)~(g)、及び挟角 30°、45°、60° の各条件で誤差を比較したものである。

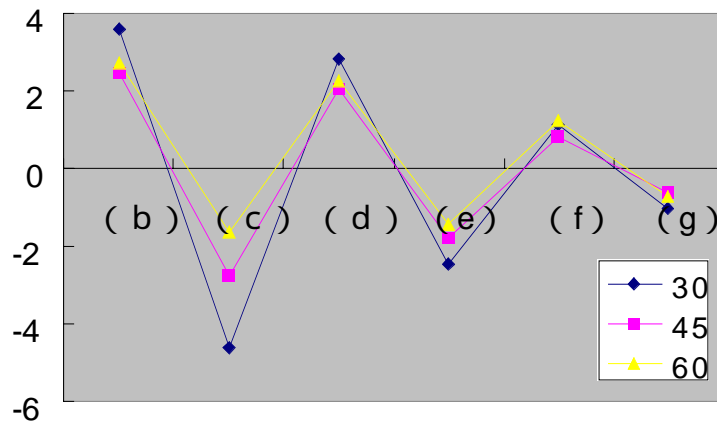


図 4-5 主線 200 ドット(視覚 13.5°)における結果

主線 200 ドット、図形(b)~(g)、挟角 30°、45°、60° における誤差の比較である。横軸は図形の種類、縦軸は誤差(単位：ドット)を表す。

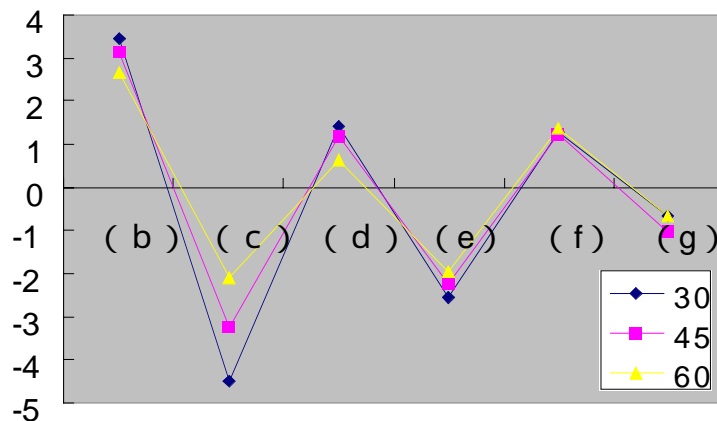


図 4-6 主線 300 ドット(視覚 19.8°)における結果

主線 300 ドット、図形(b)~(g)、挟角 30°、45°、60° における誤差の比較である。横軸は図形の種類、縦軸は誤差(単位：ドット)を表す。

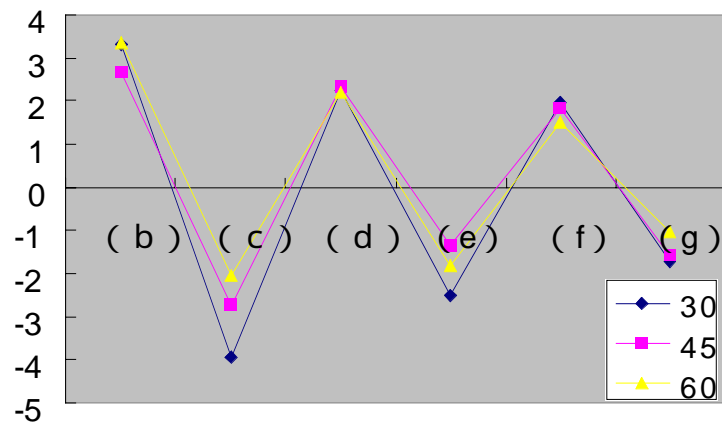


図 4-7 主線 400 ドットにおける結果

主線 400 ドット、図形(b)~(g)、挟角 30°, 45°, 60° における誤差の比較である。横軸は図形の種類、縦軸は誤差(単位: ドット)を表す。

本実験では、主線の長さの違いと誤差の間に明らかな関係は見られなかった。角度に対しては、挟角が小さいほど誤差が大きくなる傾向が見られた。図形の形に関しては、(b)、(d)、(f)と(c)、(e)、(g)で比較すると、図形(b)、(c)のように同方向に視覚刺激がある場合は誤差は大きくなり、(d)、(e)のように同方向の刺激とその逆に弱い刺激を与えると図形(b)、(c)よりも誤差が小さくなるという傾向が見られた。また、(f)、(g)のような点の刺激だけでも誤差を生じることが確認された。

4.6 考察

図 4-3(a)で測定した長さとその他の図形で測定した長さの差は、知覚の誤差を表わしているといえる。なぜなら、主線の長さが短いと感じると被験者は、実際の長さよりも長いところで主線を止めるであろうし、その逆も言えるからである。4.5.1 の結果より、Müller-Lyer 錯視では視点を固定させた状態よりも視点を振動させた(眼球を動かした)状態のほうが知覚の誤差が大きくなることがわかる。

眼球の動きがない状態では、視点を固定させるための視点の位置を確認する情報が脳内で処理されている。眼球の動きがある状態では、視点の位置を確認するための情報に加え視点をターゲットに移動させるための情報も脳へ送られる。その処理過程で長さを知覚させる誤差が大きくなると考えられるが、動きの情報が長さを知覚させる誤差にどのようにかかわってくるのかこの実験からではわからない。

4.5.2 の結果で、図形(b)、(c)に比べて図形(d)、(e)の方が誤差は小さくなっている。図形(b)、(c)では、斜線の影響で視点の位置は、斜線の向いている方向にずれると考えられる。図形(d)、(e)でも同様に、斜線の影響でその方向に視点の位置はずらされるが、ターゲット挟んで反対にある点の影響も受けているので、図形(b)、(c)に比べて誤差は小さくなる。図形(f)、(g)でも誤差が表われているため、点の刺激だけでも誤差は誘発されるといえる。視覚刺激は図形の形、角度でそれぞれ異なるためそれに伴い誤差も異なることがわかった。

このような現象が起きるメカニズムを考えてみると、視点がターゲットに近づきサッカーボール抑制が終わると視点の位置を確認するため情報が目に入る。その際、ターゲットの周りの情報を処理するとき運動指令を形成する部分に影響すると考えられる。

第 5 章

サ ッ カ ー ド モ デ ル

前章で述べた実験により、錯視とサッカードの関係は明らかになった。また、錯視のメカニズムとして運動指令に影響していると考察した。本章では、この考察結果を「サッカードの最中、視点がターゲットに近づきサッカードの速度が遅くなる。そのときの新たな視覚入力が運動指令を生成する上丘を刺激する。この上丘への刺激が錯視を引き起こす。」というのを仮説とし、これを検証するためのサッカードの計算論的モデルを提示し、シミュレーションを行う。

5.1 モデルの概要

本研究で提案するモデルは、Arai et al.[Arai et al.1999]のモデルをベースとして、サッカード中の視覚刺激を扱えるように拡張したものである。数ある眼球運動モデルの中で Arai et al.のモデルを選んだ理由は、運動指令を生成する部分が上丘の浅層(superior colliculus : 以下 SC)や脳幹(burst generator : 以下 BG)のように独立しているため生理学的に明らかになっている機能のみを取り入れやすく、拡張しやすいためである。図 5-1 にモデルの概要を示す。

このモデルは一見 Arai et al.モデルと同じように見えるが SC 部分での反応やフィードバックの信号は、全く違うものである。今までにある眼球運動モデルの多くは視覚刺激を点で扱い、視点の動き方はどれも同じである。しかし、このモデルでは図形なども扱えるようになり、視点の動きもより人間に近いものであるといえる。

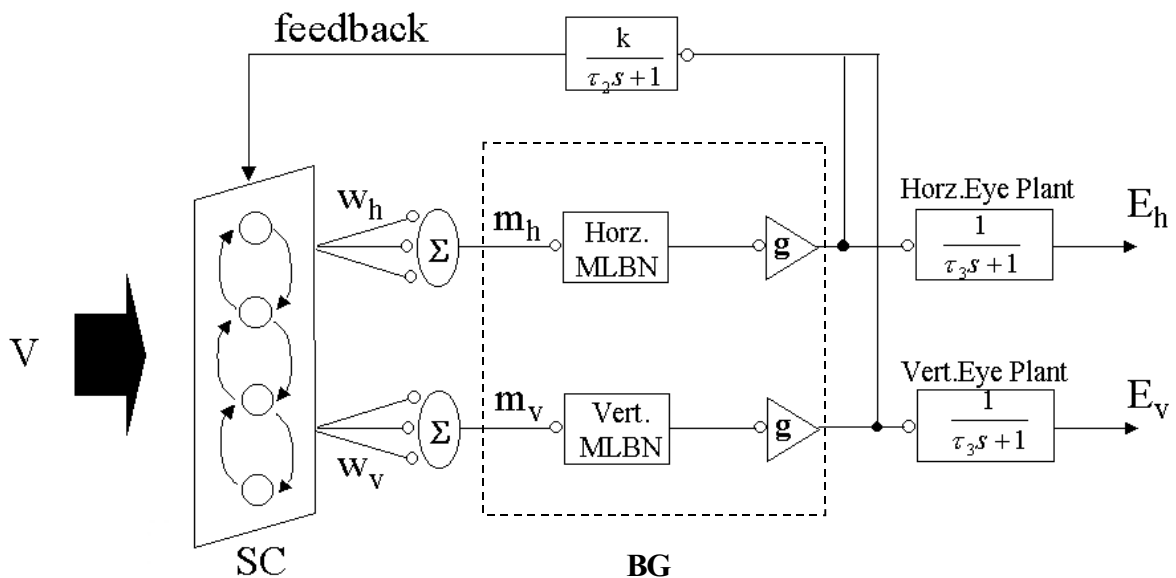


図 5-1 本研究で提示するサッカードモデルの概要

このモデルは、大きく分けて二つの部分で構成される。各細胞が相互作用し合う SC 部分と SC からの出力をサッカードの水平成分、垂直成分へ変換する BG 部分である。SC 部分は、網膜や大脳の情報を処理した視覚刺激 V が入力される。

5.2 Model Dynamics

図 5-1 に示す SC は、第 2 章で説明した上丘の浅層を表わす。この SC は、 160×120 のセルで構成され、それぞれのセルは相互結合している。この結合強度は、各セル間の距離で異なる。このモデルにおいて、サッカードの振幅は SC の反応の大きさに依存するのではなく、反応の位置に依存している。SC のマップは水平方向は指数、垂直方向は線形で表わされる。この 2 次元配列は、実際の上丘で表わされたマップと一致し(第 2 章参照)、移動方向の視標となっている。BG は、バーストニューロンがある部分で MLBN からサッカードの大きさを出力している。バーストニューロンは、SC にあるセルの反応が閾値をこえたときに発火する。

モデルにおける視覚入力 V は、脳内で処理された信号であり 5msec の間 SC を刺激する。この刺激は、ターゲットの位置が SC に対応するセルを中心とするようなガウス曲線を描く。ここで、SC 層におけるセルの反応の大きさを x_i^m 、SC への入力層の視覚刺激の大きさ x_i^v を

とすると、SC におけるセルの反応のダイナミクスは以下の式で表わされる。

$$\tau_1 \frac{dx_i^m}{dt} = -x_i^m + Z_i + V - FB \quad (1)$$

$$Z_i = y_m \left(\sum_j W_{ij} x_j^m \right) \quad (2)$$

$$V = y_v(x_i^v) \quad (3)$$

$y_m(x)$ 、 $y_v(x)$ は、それぞれ非線型な関数¹²、 τ_1 は時定数である。 FB は、視点の位置を修正させるための信号であり、この FB によってセルを活性させたり抑制させたりする。フィードバックの信号 FB は、

$$FB = \tau_2 k f_b \quad (4)$$

f_b は、ターゲットと現在の視点との誤差をあらわす。 k は、スケーリングパラメータである。この f_b は、サッカーボールが起きた後、視点がターゲットに近づきサッカーボールの速度がある値以下になったときに、視点を調整するための信号である。

BG 層へ向かう水平成分 m_h と垂直成分 m_v の入力信号は、

$$m_h = w_h^T x \quad (5)$$

$$m_v = w_v^T x \quad (6)$$

w_h 、 w_v は、水平・垂直成分の重み、 T は転置をあらわす。

各 MLBN からの出力はパルスのような波形を示し、サッカーボールの速度はこの出力信号をゲイン g によって調整している。各 MLBN からの出力 E_h^* 、 E_v^* は、

$$E_h^* = g b_h(m_h) \quad (7)$$

$$E_v^* = g b_v(m_v) \quad (8)$$

ここで、 $b_h(m_h)$ と $b_v(m_v)$ は各 MLBN からの出力が閾値(SC 内におけるセルの反応の大きさが一定値をこえたとき)を超えたときに発火するような非線型な関数¹³である [Van

¹² 関数は、5.5 に示す。

¹³関数は、5.5 に示す。

Gisbergen et al.,1981]。水平、垂直の目の角度を表す E_h と E_v のダイナミクスは、

$$\tau_3 \frac{dE_h}{dt} = -E_h + E_h^* \quad (9)$$

$$\tau_3 \frac{dE_v}{dt} = -E_v + E_v^* \quad (10)$$

τ_3 は、時定数である。このときの E_h 、 E_v とターゲットの差が f_b として SC へ返される。

通常われわれのしている対象の多くは、点ではなく物体である。当然、物体を構成する要素もしている。そこで、図形の場合の入力について考える。図形を入力とする場合、注意はターゲットの位置にあるが第2章でも説明したようにターゲットの周辺情報は、視点をターゲットの近くまで移動させないと入ってこない。逆にいうと、ターゲットの近くに視点を移動することでターゲット周辺の情報が入ってくる。これらの情報が入ってくるタイミングは、サッカーの最中に眼球が動きが遅くなり、視点がターゲットに近づいたときである。

刺激によって活性化される細胞があれば、抑制される細胞もある。実際の上丘においても刺激の強さではなく、刺激の位置がサッカーの振幅と関わっている。サッカー開始直後の全セルの反応の大きさを R_b とし、新たな視覚入力の活性のみ考えた場合、新たな視覚入力直後の全セルの反応の大きさを R_a とすると、新たな視覚入力後のセルは、

$$R_b = \sum_j x_i^m(t) \quad (11)$$

$$R_a = \sum_j x_i^m(t+1) \quad (12)$$

$$x_i^m(t+1) = \frac{x_i^m(t) + x_i^v(\Delta t)}{R_a / R_b} \quad (13)$$

という反応をする。

このようにして、活性と抑制をあらわすことができ、セルの反応 x_i^m を更新した。

5.3 Superior Colliculus

5.3.1 オキュロモーターマップ¹⁴

はじめに両眼運動の2つの成分を定義する。バージョン(同側性同眼運動) (ϑ) は両眼の運動方向と運動量が等しい両眼運動であり、バーゼンス(異側性同眼運動) (μ) は両眼の運動方向が互いに逆で運動量が等しい両眼運動である。 ϑ は、バージョンだけが起こった場合のそれぞれの眼の運動量に等しく、 $\mu/2$ はバーゼンスだけが起こった場合のそれぞれの眼の運動量の絶対値に等しい。ここで、どんな両眼運動も ϑ と μ の和であると仮定すると、すべての両眼運動は次式で表現することができる。

$$\vartheta + \mu/2 = MR \quad \dots \dots (1)$$

$$\vartheta - \mu/2 = ML \quad \dots \dots (2)$$

MRは右眼の運動量を、MLは左眼の運動量を表わす。例えば、 $MR = 15^\circ$ $ML = 5^\circ$ のとき、(1),(2)式から、 $\vartheta = 10^\circ$ 、 $\mu = 10^\circ$ となる。

両眼運動の数学的表現は、両眼視軸の交点の位置の変化として幾何学的にも表現できる。

の幾何学的表現は、両眼の回転中心(回旋点)を通る Vieth-Müller 円の集合である[ここでは、節点(nodal point)と回旋点との差は無視する]。両眼視軸の交点があるひとつの Vieth-Müller 円周上に留まる限り両眼の回転角は等しく、両眼の輻輳角は一定である[この曲線は、等バーゼンス線(Collewijn & Erkelens,1989)、あるいはイソフォールズ isophores(Carpenter,1988)とも呼ばれている]。 μ の幾何学的表現は、Hillebrand の双曲線の集合である。両眼視軸の交点があるひとつの Hillebrand の双曲線上に留まる限り両眼の回転方向は異なり回転角は等しい[この曲線は、等バージョン線、あるいはイソトロプス isotropes と呼ばれている]。これらの曲線は眼球運動の表現にも適用できる。この表現を Carpenter(1988)は、オキュロモーターマップ(oculomotor map)と呼んだ。

¹⁴ 参考文献[16]より

5.3.2 SC の表現

上丘に微小電極を刺入して刺激するとサッカードが起きる。強さ、頻度などを調整した微小電流のパルス列を用いた時、閾値を超える刺激に対して、その大小に依存せずモーターマップに従う振幅のサッカードが現れる。持続して刺激を与え続けると、同じベクトルを持つサッカードが間欠的に生じる。また、2点を同時に刺激すると単一のサッカードが生じる。このとき、各点を単独に刺激したサッカードのベクトルの和とならずに荷重ベクトル和の傾向が現れる。ベクトル和の荷重は刺激の相対的な大小に依存している[Robinson,1972]。これらの特性もつ、オキュロモーターマップを図 5-2 に示す。

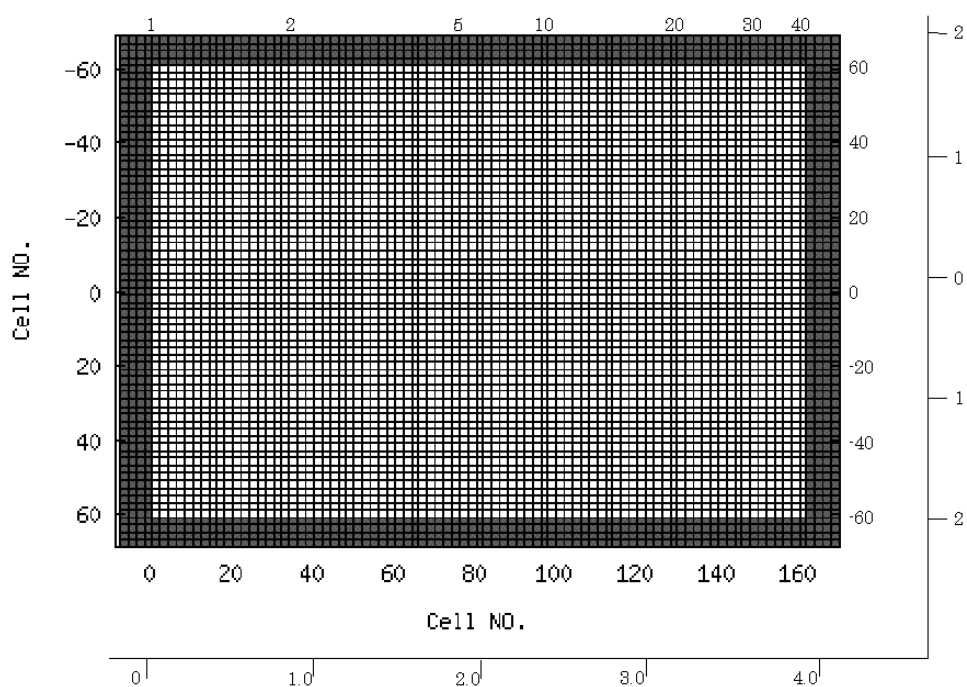


図 5-2 オキュロモーターマップ

モデルの中で SC は 160×120 のセルで構成される。周りの黒い部分は、端のセルが刺激されたときに中心部分と同様の反応をさせるためのものである。

また、SC のセル間の結合強度を図 5-3 のように設定した。これは、5.5.2 で示すように、サルの上丘における生理学的なデータと対応するように決めている。

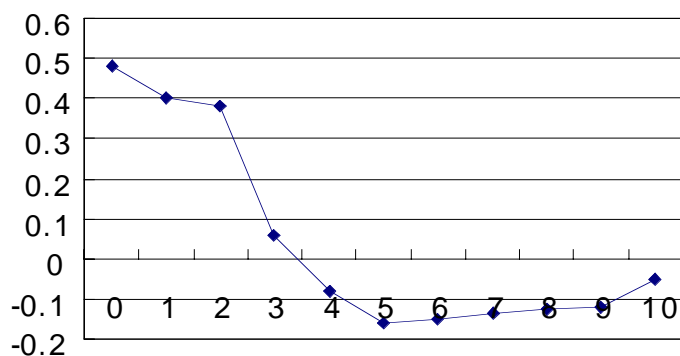


図 5-3 2つのセル間の結合強度

横軸はセル間の距離、縦軸は結合強度である。2つのセル間の結合強度は、2次元平面で見るとメキシカンハットのようなパターンを示す。

5.4 学習

このモデルで正確なサッカードの振幅をさせるために w_h 、 w_v の学習を行った。ターゲットの位置を教師信号 d とし、サッカードの振幅 y とターゲットの位置 d の差を最小にするように W_{ij} を更新する。

重み W_{ij} の更新は、次式でおこなう。

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) + \alpha(d - y)x_{mi}$$

は、学習係数、 x_{mi} は、SC 上の各セルの反応を示す。

5.5 モデルの特性

シミュレーションで用いたパラメータと関数を表 5-1 に示す。

表 5-a パラメータ

時定数 τ_1, τ_2	3msec
時定数 τ_3	0.15s
ゲイン g	1.0
関数 $y_m(x)$	$y_m(x) = \begin{cases} 0 & (x < 0) \\ x & (0 \leq x \leq 1) \\ 1 & (1 < x) \end{cases}$
関数 $y_v(x)$	$y_v(x) = \begin{cases} \frac{2}{1 + \exp(-0.8x)} - 1 & (0 \leq x) \\ 0 & (x < 0) \end{cases}$
関数 $b_h(m_h), b_v(m_v)$	$b(m) = \begin{cases} 0 & (m < m_0) \\ m_0 & (m \geq m_0) \end{cases}$ <p>m_0 は、$x \geq 1$ となるときの $m_0 = \sum_i w_i x_i$</p>

5.5.1 サッカーの結果

生理学的なデータとシミュレーションの結果からモデルの妥当性について考察する。

まず、最初に重みの学習結果を図 5-4 に示す。

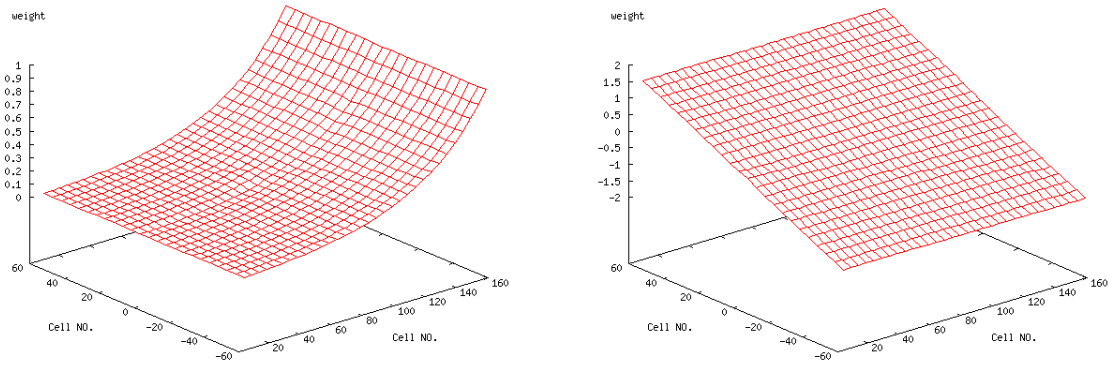


図 5-4 学習後の重み

左の図は水平成分の重み w_h 、右の図は垂直成分の重み w_v を示す。

この重みは、水平方向のセル NO.が大きくなるに従って、指数関数的に増加している。この理由は、セル NO.が大きくなるほど大きなサッカーボールをさせるためである。右の図は、垂直成分の重み w_v を示す。この重みは、垂直方向のセル NO.が 0 を境に正と負に分かれている。負側では下向き、正側は上向きのサッカーボールをさせるためである。

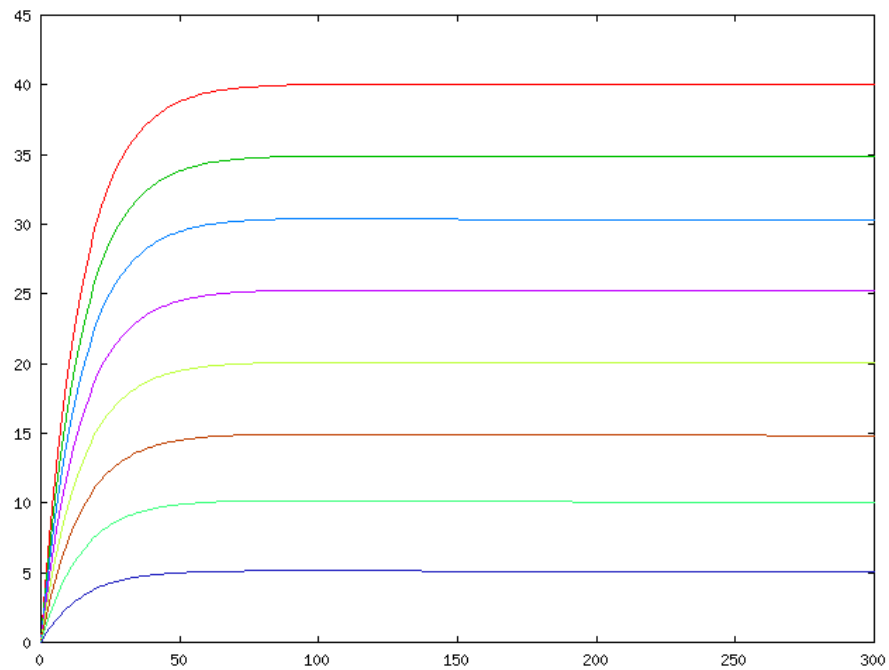


図 5-5 サッカードの振幅

ターゲットを 5° から 40° に設定(刻み幅 5°)したときのサッカードのシミュレーション結果を示す。

ターゲットを 5° から 40° に設定(刻み幅 5°)したときのサッカードの振幅を示す。図 5-5 からわかるように、学習によって正確な振幅を示すことができた。

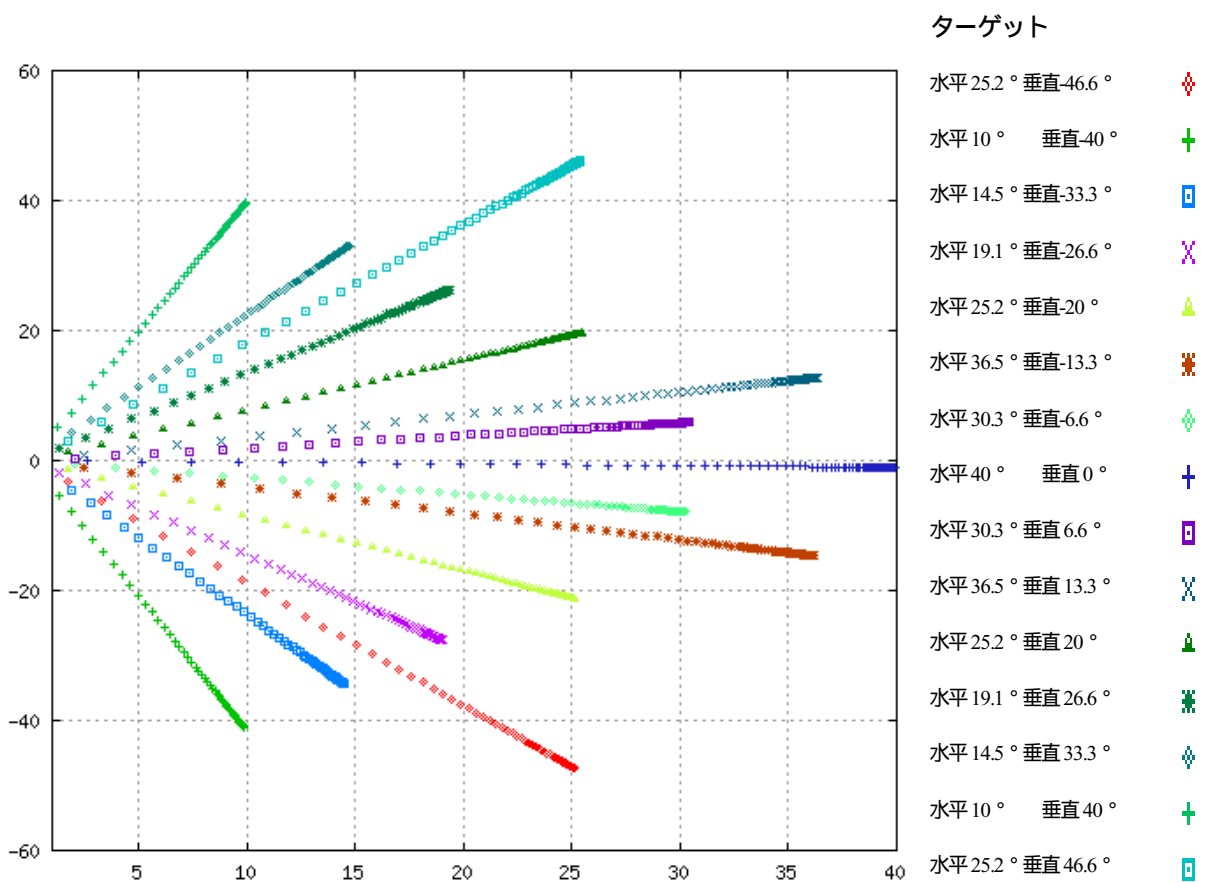


図 5-6 視点の軌跡

視点がターゲットに向かうときの軌跡を示す。図の横軸は水平方向の角度、縦軸は垂直方向の角度を示す。図の右にターゲットの座標を示す。

図 5-6 に示すようにサックードする視点も正確に動くことがわかる。

5.5.2 SC の反応

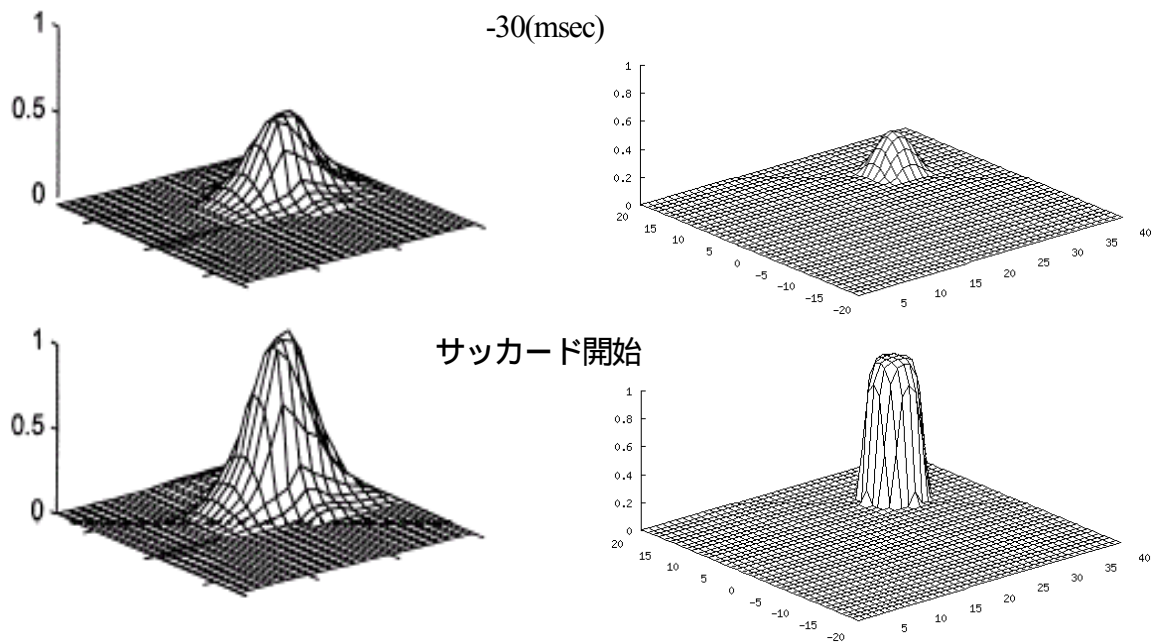


図 5-7 SC の反応：

SC の反応の様子を図 5-7 に示す。左図はサルの上丘の反応である[Arai et al.1999]。右図は、シミュレーションの反応である。

SC の反応の様子を図 5-7 に示した。左図はサルの上丘の反応であり[Arai et al.1999]、右図は、シミュレーションの反応である。両結果を比べてわかるように、ほぼ同様の反応を示すことができた。

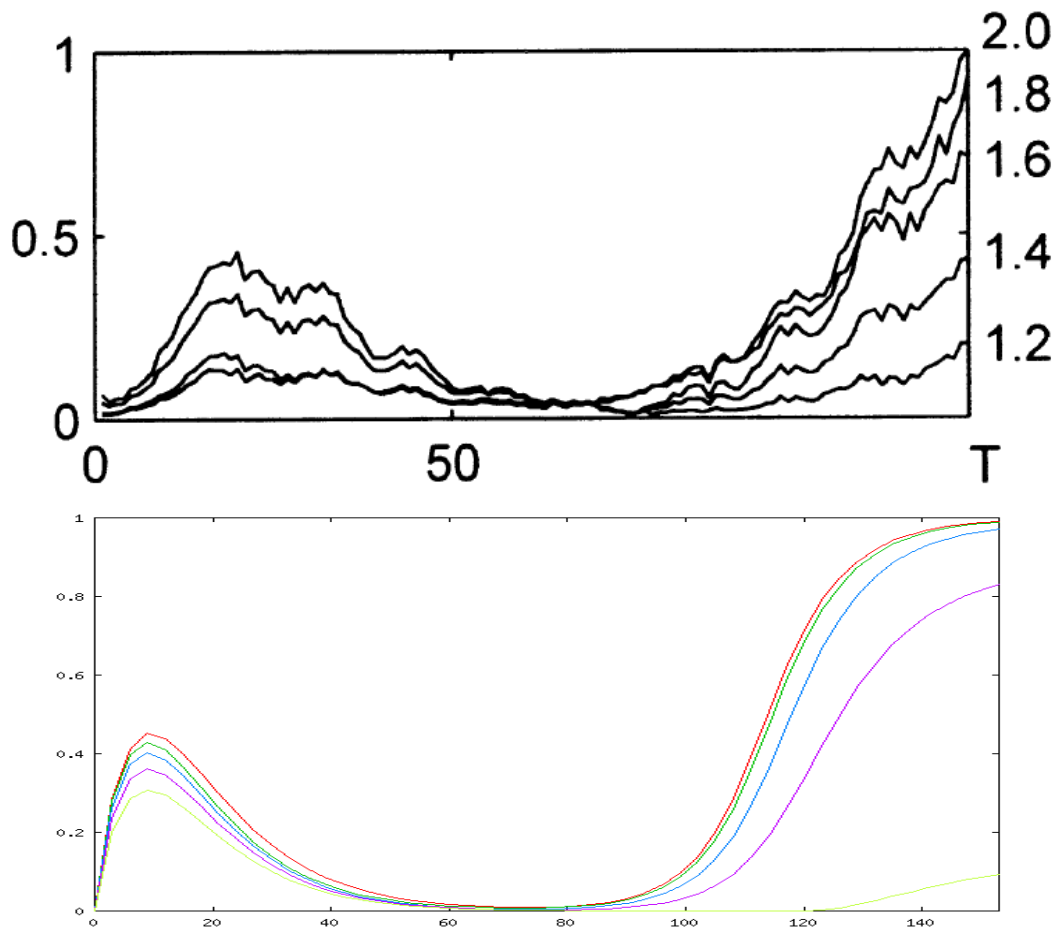


図 5-8 SC におけるセルの反応の時系列

上に示した図は、サルの上丘における反応の時間変化である[Arai et al.1999]。下に示した図は、シミュレーションによる SC における反応の時間変化である。

図 5-8 の上に示した図は、サッカドさせたサルの上丘で、最も強い反応を示す部分とその周辺における細胞の反応の時間変化である[Arai et al.1999]。下に示した図は、シミュレーションによる SC における反応の時間変化である。上下の図から同様の反応の特性モデルで表すことができた。このようにしてモデルは、上丘の部分において生理学的な結果と同様の反応を示した。

5.6 ML 図形に対する反応

このモデルを使いサッカード中に視覚刺激が入ったときのシミュレーションを行った。このシミュレーションは心理実験の条件に対応させる。図 5-9~5-11 に、主線の長さがそれぞれ 13.53° 、 19.57° 、 25.81° のときのサッカードの振幅の時間変化を示す。これらの実験条件は、それぞれ心理実験における 200 ドット、300 ドット、400 ドットに対応している。

主線の長さが 13.53° のときのサッカードの振幅を示す。

(心理実験：主線 200、挟角 45° に対応。)

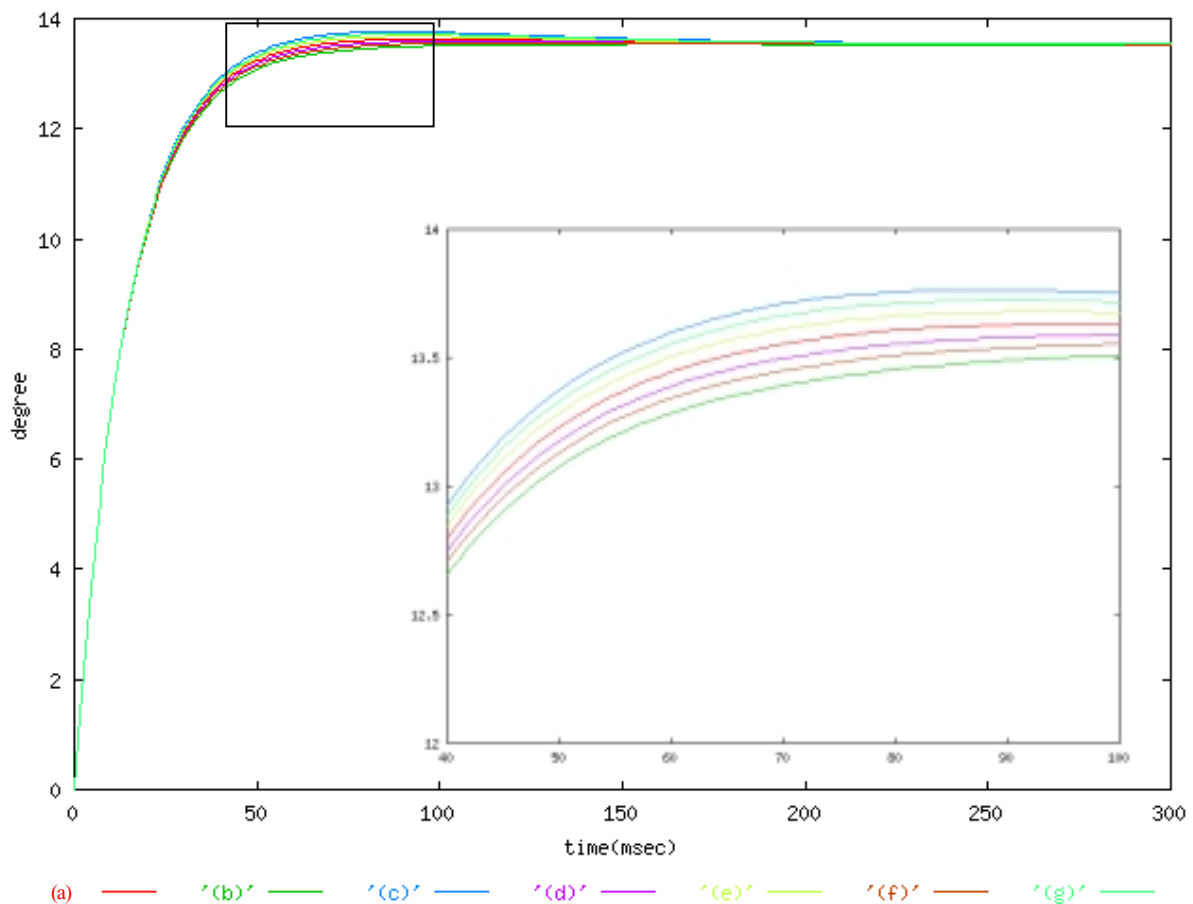


図 5-9 主線 13.53° の結果

主線 13.53° のときの結果を示す。実験には、図形(a)~(g)を用いた。縦軸は角度、横軸は時間を示す。右下のグラフは、大きなグラフの四角内を拡大したものである。この拡大図は、サッカードの終了近くで、運動速度が変化した部分を表わしている。

表 5-b 主線 13.53° の結果

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
13.52813	13.35662	13.68446	13.4717	13.58664	13.42441	13.63881

主線の端が 19.57° のときのサッカードの振幅を示す。

(心理実験：主線 300、挟角 45° に対応。)

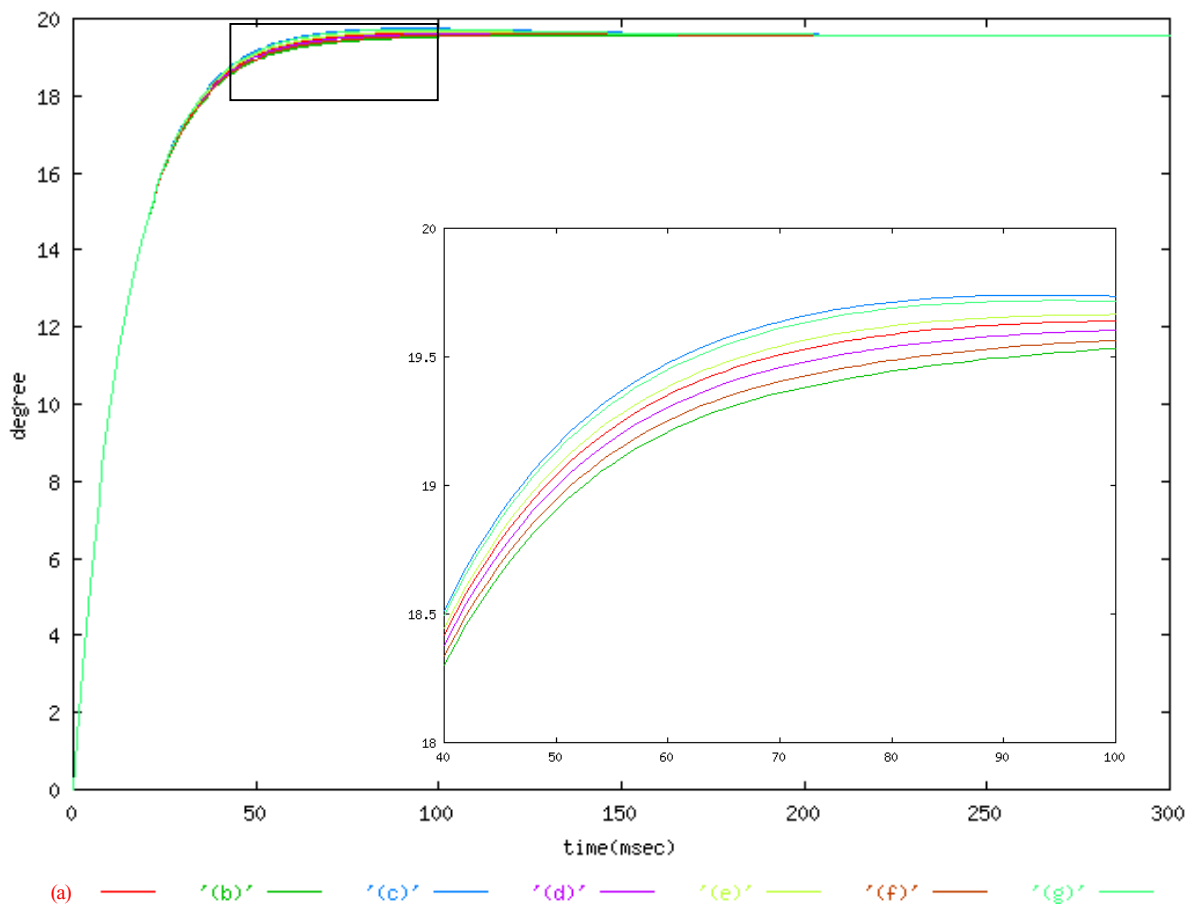


図 5-10 主線 19.57° の結果

主線 19.57° のときの結果を示す。実験には、図形(a)~(g)を用いた。縦軸は角度、横軸は時間を示す。右下のグラフは、大きなグラフの四角内を拡大したものである。この拡大図は、サッカードの終了近くで、運動速度が変化した部分を表わしている。

表 5-c 主線 19.57° の結果

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
19.52821	19.38027	19.66695	19.47875	19.56224	19.42447	19.64082

主線の端が 25.81° のときのサッカードの振幅を示す。

(心理実験：主線 400、挟角 45° に対応。)

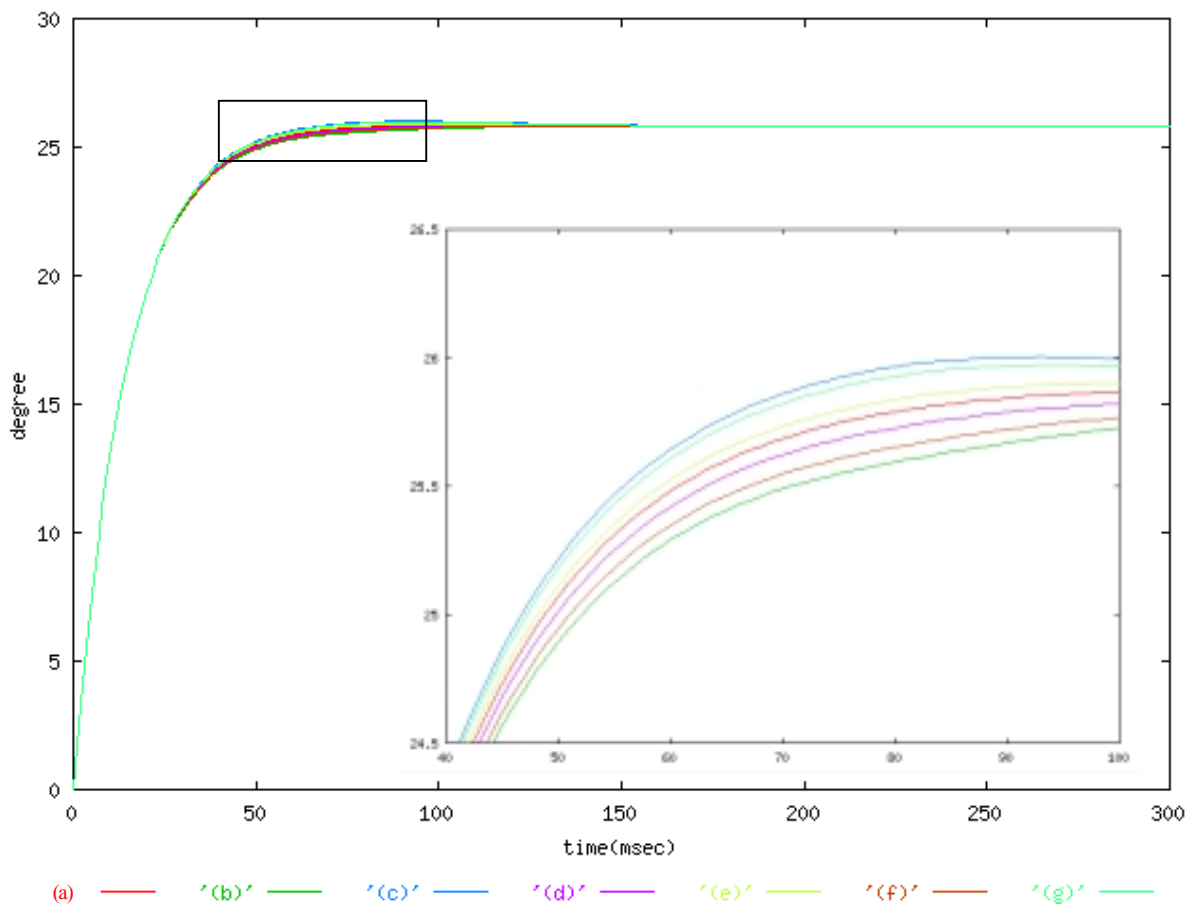


図 5-11 主線 25.81° の結果：

主線 25.81° のときの結果を示す。実験には、図形(a)~(g)を用いた。縦軸は角度、横軸は時間を示す。右下のグラフは、大きなグラフの四角内を拡大したものである。この拡大図は、サッカードの終了近くで、運動速度が変化した部分を表わしている。

表 5-d 主線 25.81° の結果

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
25.75602	25.5594	25.94314	25.69201	25.80532	25.6164	25.90426

図 5-9、図 5-10、図 5-11 において(a)~(g)は、心理実験の図 4-3(a)~(g)に対応している。図 5-9、図 5-10、図 5-11 の右下のグラフはサッカード中の視覚刺激のあと、一時的に運動が変化している部分である。斜線が内向きの図形(b),(d),(f)を入力としたときの振幅は、ターゲットを点で入力したとき(a)よりも、小さくなる。逆に、斜線が外向きの図形(c),(e),(g)を入力としたときの振幅は、大きくなる。

5.7 考察

図 5-9~5-11 から、上丘に視覚刺激が入力されることでサッカードの速度が変化することがわかり、図形に対する速度変化の違いも明確になる。ここで、速度について考える。速度が遅くなる又は、速度変化が小さくなるということは、一時的に視点が止まっていることを表わす。図 5-9~5-11 から、ターゲットの前後で視点がずれていることは、確認できた。

振幅について考察すると、(a)に対する振幅の誤差は(b)、(c)が最も大きく、(d)、(e)が小さい。視覚入力の精度が高ければ、斜線や点がより強調されるためこの結果は(b)、(c)が最も大きく、(f)、(g)が小さくなる。

図 5-9、図 5-10、図 5-11 から、サッカードの最中に視覚刺激が入ると一時的に視点の位置がターゲットとは異なる位置に向かうように速度が変化し、その後、視点の位置を補正し、ターゲットに向かうことがわかる。この変化は、心理実験と似た特性を示しているので、この現象が錯視の原因と考え、第 6 章で心理実験とシミュレーションの結果をもとにサッカードと錯視との関係をさらに考察する。

第 6 章

議 論

6.1 結果の比較

心理実験とシミュレーションの定性的な結果を比較し、錯視のメカニズムについて考察する。

心理実験において、視点を固定しながら主線の長さを調整するよりも、振動させながら主線の長さを調整する方が認識の誤差が大きくなるという結果が得られた。つまり、眼球を動かすことが認識の誤差に大きな影響を与えている。また、挟角の角度や図形の形を変えることで知覚の誤差の特性を見出すことができた。

一方、シミュレーションでは小さい挟角の図形に対して、サッカードの振幅が一時的に小さくなる。大きな挟角の図では逆に、サッカードの振幅が大きくなるという結果が得られた。また、視覚刺激の図形の形の違いは、サッカードの振幅に影響することが示された。

これらの結果は、知覚の誤差と全く同じ特性を示唆している。図 6-1 に心理実験とシミュレーションの結果の相関関係を示す。心理実験とシミュレーションの結果において相関関係を調べたところ、心理実験では斜線の向いている方向に視点がずらされるため、図形(b)、(d)、(f)では主線の長さを長めに調整し、図形(c)、(e)、(g)では主線の長さを短めに調整する。シミュレーションでは、主線の長さ固定されているため、図形(b)、(d)、(f)では視点の位置は内側にずらされ、図形(c)、(e)、(g)では逆に外側へずらされる。このことから心理実験における知覚の誤差とシミュレーションにおける視点の位置の間には、負の強い相関が得られた。これにより、サッカード中に上丘に無意識に視覚刺激が入り、視点の位置がずらされ誤知覚させるという仮説は、支持されサッカードが錯視のメカニズムの1つであるということができる。

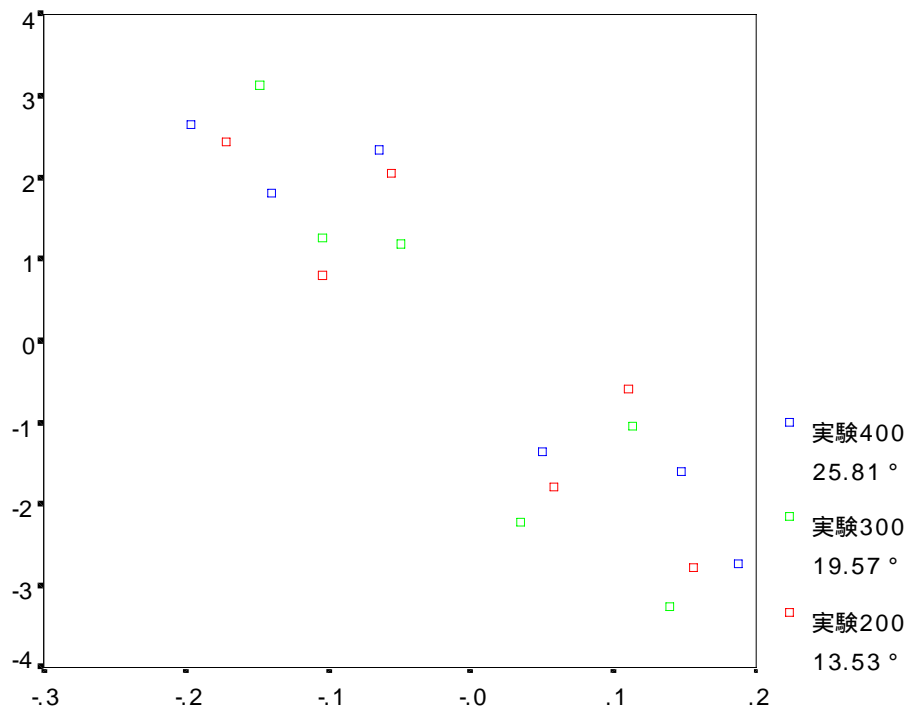


図 6-1 心理実験とシミュレーションの結果における相関関係

縦軸は心理実験で得られた知覚の誤差(単位：ドット)、横軸はシミュレーションにおける振幅の誤差を示す。

心理実験とシミュレーションの結果から、眼球運動によって主線の長さが異なって見えることが確認された。これは、眼球運動によってサッカー抑制が周囲の情報を除去し、注意が向けられた点付近の情報をより強調すると考えられる。その結果、視点の位置がターゲットの位置とは、異なった位置に一時的に止まる。この点が脳内では、ターゲットとして誤って処理されるため長く見えたり、短く見えたりすると考える。これが、錯視を発生させるメカニズムの一つである。

本研究において、シミュレーションはサッカー中の視覚刺激が錯視の原因であるという仮説を検証するために構築したものであるが、この仮説が錯視を起こさせる原因のすべてではない。また、計算論的モデルにおいてサッカーの振幅の誤差は水平・垂直方向ともに最大1°となり細かな精度で表わすことができないため、シミュレーションの結果は定性的なものである。実験に関しても、実験の環境についても問題がないわけではない。実験では、

基本線と図形の2つを呈示し長さを比較するためサッカートの方向が水平だけでなく垂直にも発生している。そのため定量的な結果から検証することはできないが、錯視の特性は示すことができたので、心理実験とシミュレーションの定性的な結果を比較し、錯視について考察する。

6.2 他の説との関連

本論で扱っている眼球運動説とその他の錯視説との関係や、錯視に関連するといわれている運動指令以外の脳機能を計算論的モデルで扱うため考察を行い、幾何学的錯視の図形全般について議論をする。

本論で、眼球運動説についていっているが視覚認識において影響を受けるのは、運動指令系だけでなく、多くの部分で複雑に関係し合っている。錯覚のメカニズムを考えるには、その他の要因についても考えることが必要である。

まず、側抑制説について考える。側抑制¹⁵は、生理学的メカニズムとして感覚領野一般に存在している。一般的に側抑制は感覚信号の空間的精度を上昇させる働きがあるとされていて、その範囲は、きわめて局所的なものが想定されている。

本研究で使ったモデルで、側抑制説を説明するためには第2章で説明した大脳基底核からSCへの抑制を組み込む必要がある。この拡張により運動指令系の側抑制を説明することは可能となるだろう。しかし、この側抑制は錯視を起こす副作用ではなく、むしろ錯視を起こさせるために必要な機能のように思える。また、この抑制がどのようなものでどのくらいの時間続くものなのか分からないため本研究ではモデルに組み込むことはしなかった。すべての側抑制説を説明するためには、物体視や空間視をする視覚連合野や頭頂連合野などの脳機能について調べ、これらの機能を組み込む必要がある。側抑制は、生理学的メカニズムとして表すことは可能であるが、より高次の最終的な知覚の部分でおこる側抑制について表すことは困難である。

次に、透視図説について考える。認知心理学のなかで Müller-Lyer 錯視は、遠近感や奥行きを感じるものであると考えられている。遠近感や奥行きの知覚は、2次元の平面を脳内で、

¹⁵ 参考文献[4][5]

3 次元的に知覚しようとする機能である。網膜で刺激された細胞からの情報は小脳でも処理される。この情報が長さの知覚となっている。また、小脳で処理された情報は、物体視や空間視をする視覚連合野や頭頂連合野などで処理された情報と一緒に、さらに高次なところで遠近感や奥行きを形成する。

これらの機能をモデルに反映させるには、小脳をモデル化する必要がある。現モデルでは、サッカードを生成する部分だけで認識に関わる部分は、組み込まれていない。透視図説や恒常性説では、この認識の部分でのエラーが錯視であるといっている。透視図説を説明するモデルに拡張することで眼球が止まった状態での知覚の誤差について説明できるだろう。これは、今後の課題である。

6.3 幾何学的錯視の条件

われわれはある対象を見るとき、いつもこの実験のような状態でものを見ているわけではない。通常は、注意のあるものに目が行き、その対象をさらに細かく見ている。その際、眼球は常に動いているものである。眼球運動説が錯視を説明するメカニズムとして、全て説明できないにしても眼球運動の影響を否定することはできない。本研究で示した仮説から幾何学的錯視は、「基礎となる図形の頂点の周辺に別の図形を構成する要素がある」という条件であれば錯視は起こりえる。このような要素がサッカードに影響を及ぼすことを本研究では示唆した。

第 7 章

結 論

本研究では、「サッカードが視標の周辺にある幾何学的錯視の構成要素を脳内で処理する過程で眼球運動指令に誤差を生じさせ、その誤差が錯視を誘発させる」という仮説をもとに幾何学的錯視がサッカードに及ぼす影響を心理実験と計算論的モデルを用いて調べた。

心理実験では、仮説における誤差がどのようなものなのか確認するために、Müller-Lyer 錯視の特徴や性質を検証し、眼球運動の有無や対象とする図形による錯視の程度の違いを測定した。その結果、眼球運動により、知覚の誤差が影響を受けるということを確認した。心理実験からでは錯視の特徴はわかっていてもその現象を起こすメカニズムまでは、わからないので、眼球運動が錯視に影響するメカニズムとして「サッカード中に上丘に無意識に視覚刺激が入り、視点の位置がずらされ誤知覚させる」という仮説を立てた。これを調べるためにサッカードの計算論的モデルを提案し、そのシミュレーションを行った。により、幾何学的錯視が運動指令に及ぼす影響を考察した。

このモデルは、Arai et al.[Arai et al.1999]モデルをベースとして、サッカード中の視覚刺激を扱えるようにしたものである。心理実験と同じ幾何学的錯視の図形を用いてサッカードのシミュレーションを行った結果、定性的ではあるが心理実験と全く同じ特性を示すことができた。

本研究の結果及び結果から、サッカードが幾何学的錯視を構成する要素を強調させ、最初の視標の位置を歪ませ、そのため、長さを誤知覚させてしまうことを示唆することができた。

謝 辞

本研究を完成させるために多数の方々の御力添えがあったことを心から感謝いたします。とりわけ主指導教官である橋本敬助教授からは本研究の準備の段階から完成に至るすべての過程において、時にはご指導を受け賜り、時には議論によって新しいアイデアを頂いたり、時には励ましの御言葉をかけて頂くなど、言葉では言い尽くせないほどの御力添えがあったことを深く感謝いたします。中森義輝教授、梅本勝博助教授、林幸雄助教授には中間審査やその他の場において有意義なアドバイスを頂きました。さらに同講座の上田氏、小林氏、佐藤氏、鶴見氏、並川氏、その他の方々にはディスカッションや話し合いを通して日頃からアイデアを頂くだけでなく、何気ない研究生活の中での活力を頂きましたことを深く感謝いたします。最後に温かく見守ってくださった両親、その他ここに書き尽くせなかった多くの方々に厚く感謝いたします。

2001年2月13日

参 考 文 献

- [1] Binsted,G. Elliott,D, The Mller-Lyer illusion as a perturbation to the saccadic system , Human Movement Science,18,pp.103-117,1999
- [2] Arai,K. Keller,E.L. Edelman,J.A. Two-Dimansional Neural Network Model of the Primate Saccadic System , Neural Networks, vo.7, Nos.6/7, pp.1115-1135, 1994
- [3] Arai,K. Das,S. Keller,E.L. Aiyoshi,E. A distributed model of the saccade system: simulations of temporally perturbed saccades using position and velocity feedback Neural Networks,vo.12,pp.1359-1375,1999
- [4] 伊藤正男 『運動』 認知科学 4 , 岩波講座 , 1994
- [5] 福島邦彦 『視覚の生理とバイオニクス』 , 電子通信学会 , 1976
- [6] T.Wertheim, Uber die indeirekte Sehscharf , Psychol physiol Sinnesorg, 7, pp.172~187, 1984
- [7] 乾敏郎 『認知心理学 1 知覚と運動』 東京大学出版会 , 1995
- [8] 伊藤正男 『注意と意識』 認知科学 9 , 岩波講座 , 1994
- [9]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
- [10] 伊藤正男 , 佐伯 『認知し行動する脳 脳科学と認知科学』 東京大学出版会 , 1988

- [11] Robinson,D.A.. Oculomotor control signals. , Basic mechanisms of ocular motility and their clinical implication, pp.337-374 1972
- [13] 淀川英司, 東倉洋一, 中根一成 『視聴覚の認知科学』 電子通信学会, 1998
- [14] 下條信輔 『視覚の冒険 - イリュージョンから認知科学へ - 』 産業図書, 1995
- [15] ジョン・P・フリスビー 『シーイング』 誠信書房, 1982
- [16] 芋坂良二, 中溝幸夫, 古賀一男 『眼球運動の実験心理学』, 名古屋大学出版会, 1993
- [17] 濱口恵治, “ ミューラ-リヤー錯視と角度錯視の関係 ”, 基礎心理学研究, 13 ,pp89-92 , 1995

付 録

表 1 視点を固定したときと振動させたときの誤差

	固定(内向き)	振動(内向き)	固定(外向き)	振動(外向き)
誤差平均	1.2	3.125	-0.95	-3.25
t 検定	**	**	**	**

表 4-1 に視点を固定した条件と振動したときの条件下で主線の長さ誤差(単位：ドット)と主線の誤差の t 検定(** $p < 0.01$)を表す。

第 4 章における実験結果を示す。

表中の**及び*は、t 検定**, $p < .05$,*, $p < .01$ である。

- ・ 図形(b)における結果

表 2 図形(b)における結果

主線	200			300			400		
	30	45	60	30	45	60	30	45	60
誤差平均	3.575	2.45	2.725	3.425	3.125	2.65	3.3	2.65	3.35
T 検定	**	**	**	**	**	**	**	**	**

- ・ 図形(c)における結果

表 3 図形(c)における結果

主線	200			300			400		
	30	45	60	30	45	60	30	45	60
誤差平均	-4.625	-2.775	-1.65	-4.475	-3.25	-2.1	-3.925	-2.725	-2.025
T 検定	**	**	*	**	**	*	**	**	**

- ・ 図形(d)における結果

表 4 図形(d)における結果

主線	200			300			400		
角度	30	45	60	30	45	60	30	45	60
誤差平均	2.8	2.05	2.275	1.4	1.2	0.65	2.25	2.35	2.2
t 検定	**	*	**	*	**	**	*	*	*

・ 図形(e)における結果

表 5 図形(e)における結果

主線	200			300			400		
角度	30	45	60	30	45	60	30	45	60
誤差平均	-2.475	-1.8	-1.425	-2.575	-2.225	-1.95	-2.5	-1.35	-1.825
t 検定	**	*	**	**	**	*	**	*	*

・ 図形(f)における結果

表 6 図形(f)における結果

主線	200			300			400		
角度	30	45	60	30	45	60	30	45	60
誤差平均	1.125	0.8	1.225	1.3	1.25	1.375	1.975	1.825	1.5
c t 検定	**	*	**	*	*	**	**	**	**

・ 図形(g)における結果

表 8 図形(g)における結果

主線	200			300			400		
角度	30	45	60	30	45	60	30	45	60
誤差平均	-1	-0.6	-0.725	-0.675	-1.05	-0.675	-1.7	-1.6	-1.025
t 検定	*	*	**	*	*	*	**	*	*