
サッカーカード実行時における
視覚的空間定位

十河 宏行

概要

人間の視野は、ビデオカメラを三脚などに固定せずに手で構えて撮影した画像に似ている。カメラを構えたまま走ると撮影される画像は揺れ動き、振り向くと画像は大きく変化する。また、安静にしているときですら、身体の小さな動揺の影響で画像は絶えず揺れ動いてしまう。このように撮影された画像を後で再生してみると、非常に見づらくて鑑賞に堪えないことが多い。ところが、われわれの視野もまた同じように揺れ動いているにもかかわらず、われわれは視野の動揺に悩まされることはない。具体的な例を挙げると、走っているときに視野に含まれるさまざまな対象の像が跳ねまわっているからといって、それらの対象が跳ね回っているようには知覚されないのである。この事実、視野に含まれる対象の像の運動が、自らの身体運動によるものなのか、対象の運動によるものなのかを、人間の視覚系が区別できることを意味している。本研究では、この問題を「身体運動と対象運動の分離問題」と呼ぶ。

人間の視覚において、身体運動と対象運動の分離問題はどのように解決されているのだろうか。Holst は眼球運動時における身体運動と対象運動の分離問題について、「視覚系は、眼球の運動を特定する情報を用いて、視野に含まれる対象の像の運動成分のうち眼球運動に由来する成分を相殺している」という仮説を提案した。Holst は眼球の運動を特定する情報が外眼筋へ送られる運動指令に由来すると仮定したが、彼の議論は運動を特定する情報源が運動指令でなくても一般に成立する。そこで、本研究では Holst の仮説を一般化して「視覚系は、眼球位置情報を用いることによって、視野に含まれる対象の像の運動成分のうち、眼球運動に由来する成分を相殺している」という仮説を考える。この仮説を「一般化相殺説」と呼ぶ。一般化相殺説は、外眼筋麻酔時や外眼筋刺激時などに起こる知覚現象を定性的に正しく予測するため、現在ひろく受け入れられている。

ところが近年、一般化相殺説の妥当性に疑問を投げかける2つの知覚現象が報告された。第1の現象は、サッカードと呼ばれる随意的に視線方向を変化させる眼球運動を実行する前または後に光点を瞬間提示すると、光点提示とサッカード開始時刻の間隔が短くなるほど、光点の位置は大きく誤って知覚されるというものである。この結果を一般化相殺説にしたがって解釈すると、サッカード実行時には眼球位置情報は「ゆるやかに」変化していることになる。第2の現象は、高速に点滅する光点をまたいでサッカードをおこなうと、サッカードと反対方向に点列が描かれるように知覚されるというものである。この点列は phantom array と呼ばれている。phantom array を一般化相殺説にしたがって解釈すると、サッカード実行時には眼球位置情報が「瞬時に」変化していることになる。どちらも同じ一般化相殺説に基づいた解釈であるにも関わらずこのような矛盾が発生するのは、一般化相殺説そのものか、そのデータへの適用方法に誤りがあるためだと考えられる。本研究では、人間を対象

とした2つの心理実験を通じて、一般化相殺説の問題点を明らかにすることを試みた。

第1実験では、「phantom array がサッカードと同方向に描かれるように知覚されない」ことが、眼球位置情報が「瞬時に」変化するという仮説の根拠になっている点に注目して、サッカードと同方向の phantom array が知覚されない原理を検討した。この目的のため、サッカード実行直前に複数の光点を連続的に瞬間提示し、被験者にその位置関係を判断させた。その結果、各光点が提示される時間間隔 (ISI) が短いときには、光点の位置関係はその網膜上の位置関係に基づいて知覚されることが示された。このような位置の定位方法は「exocentric な定位」と呼ばれている。この実験結果は、phantom array の知覚が、眼球位置情報が「ゆっくり」または「瞬時に」変化するという、眼球位置情報の時間特性で説明されるものではなく、どのようなときに exocentric な定位がおこなわれるのかという観点から議論されるべきものであることを示唆している。

第2実験では、第1実験の結果を受け、exocentric な定位と ISI の関係を検討した。この目的のため、サッカード実行前後に2つの光点をさまざまな ISI で瞬間提示し、被験者に各光点の位置を報告させた。これに加えて、比較のため、第2の光点を提示しない以外はまったく同じという条件で、やはり被験者に光点の位置を報告させた。これらの実験の結果、まず exocentric な定位がおこなわれるには ISI が 120~160 msec 以下である必要があることが示された。さらに、2つの光点が提示される条件において exocentric な定位がおこなわれたときの知覚された光点の位置を、第2の光点を提示しない条件の結果と比較したところ、第2の光点を提示することによって第1の光点の知覚される位置が変化することが示された。これらの実験結果から、連続提示された光点の ISI が百数十 msec 以下ならば、光点の位置関係がそれらの網膜上の位置関係と一致するように、先に提示された光点の知覚された位置が変化することが示された。

以上の2つの実験結果より、一般化相殺説がサッカード実行の前後に瞬間提示された光点の位置の知覚を説明できない理由が明らかになった。それは、この仮説が時間的な要因を全く考慮していないため、およそ百数十 msec の時間にわたってはたらく exocentric な定位の影響を扱うことが不可能なためである。したがって、サッカード実行時に瞬間提示された光点の位置知覚の原理を理解するためには、exocentric な定位がなぜ、そしてどのようにおこなわれるのかを理解する必要がある。

この問題について、光点などの対象が「記号化」された表現段階において exocentric な定位をおこなうという仮説が考えられる。この仮説では、対象の位置が、対象を指し示す記号と「～は…の中にある」といった述語、およびそれらの形式的な操作によって推定される。この仮説は非常に直観的だが、本研究の実験結果を説明しようとする、まず 1) 網膜像の中から位置関係が表現されるべき「対象」がどのように特定されるのか、2) 対象の数が多くなると、対象の位置関係を記述する文の数は爆発的に増加するが、そのような大量の文を

処理することは可能なのか、3) なぜ「網膜上の位置関係」が用いられるのか、百数十 msec という数字には何の意味があるのか、といった問題が生じる。

本研究では、これらの問題を回避しつつ実験結果を説明可能な新しい仮説を提案する。この仮説では、ヒトの視覚系は、網膜像から周囲に存在する対象の構造を復元するときに、「復元された対象の構造」から「与えられた網膜像」が得られるかを検証し、「復元された対象の構造」を必要に応じて修正するという処理を数回にわたって繰り返していると仮定される。このような繰り返しには時間が必要なため、ISI が短い場合は繰り返し計算中に次の光点に関する情報が入力され、先行する光点に対する処理と干渉を起すと考えられる。この仮説によると、exocentric な定位が「網膜上の位置関係」を利用するのは、網膜像に基づいた検証をおこなっているためであり、百数十 msec という数字は繰り返しに要する時間に対応していると説明される。また「対象」がどのように特定されるのか、「対象」数の増加による位置関係の数の爆発にどのように対処するのかといった問題も引き起こさない。今後、この新しい仮説によって、サッカード実行時における対象位置の知覚を扱ったさまざまな実験結果定量的に説明可能かを検討していく必要があると思われる。

目次

第 I 章 身体運動と対象運動の分離	9
I.1 どちらが動いているのか?: 身体運動と対象の運動を分離すること	9
I.2 相殺説	11
I.2.1 Holst の相殺説	11
I.2.2 一般化された相殺説	14
I.3 サッカーボールに伴う誤定位	17
I.3.1 サッカーボール実行時に瞬間提示された刺激の定位	17
I.3.2 Damped-EPS 仮説: 一般化相殺説による解釈	18
I.3.3 phantom array と Discrete-EPS 仮説	23
I.3.4 Damped-EPS か Discrete-EPS か	26
I.4 問題点の整理	27
第 II 章 phantom array の成立条件	29
II.1 眼球位置情報由来か、網膜情報由来か	29
II.2 フリッカーする刺激の知覚	30
II.2.1 方法	30
II.2.2 結果	32
II.2.3 考察	32
II.3 継時的に提示された二点の位置関係の知覚	35
II.3.1 方法	35
II.3.2 結果と考察	36

II.4 考察	37
第 III 章 exocentric な定位と ISI	41
III.1 サッカーと exocentric な定位	41
III.2 継時的に提示された二点の位置の報告	43
III.2.1 方法	43
III.2.2 結果	45
III.3 考察	51
第 IV 章 総合考察	57
IV.1 相殺説再考	57
IV.1.1 見過ごされた論点	57
IV.1.2 一般化相殺説に対する結論	59
IV.2 exocentric な定位を用いること	59
IV.2.1 記号化された表現段階における exocentric な定位	59
IV.2.2 網膜像による検証	63
IV.3 現時点における結論	69
第 V 章 展望	71
V.1 「身体運動と対象運動の分離問題」の計算理論	71
V.2 視線の適応制御	72
付録 A サッカー	75
A.1 眼球運動の種類	75
A.2 サッカーのダイナミクス	76
A.3 サッカーの制御機構	77
A.4 Discrete-EPS 仮説と眼球位置情報の実体	81
付録 B 視覚伝導路の伝達特性	85
B.1 心理物理学的知見	85
B.2 神経科学的知見	87
付録 C 業績表	89
参考文献	91

第 I 章 身体運動と対象運動の分離

I.1 どちらが動いているのか?: 身体運動と対象の運動を分離すること

ヒトのさまざまな行動において、視覚は非常に重要な役割を果たしている。その一例として、身体の周囲に存在する物体の位置や、その運動を知覚することを考えてみよう。視覚以外にも、聴覚や触覚、嗅覚によってもそのような情報を得ることは不可能ではない。しかし視覚の場合は、光の性質と眼球の構造から、光源の位置と網膜上で興奮する視細胞の位置が高い精度で対応するという性質がある(図 I.1)。このため、ヒトが普段活動するような照明が十分な環境下では、視覚は他の感覚に比べて非常に正確に対象の位置を推定することが可能である。また同様の理由で、物体の運動は網膜上の視細胞群の興奮状態の変化から精密に知覚することができる。

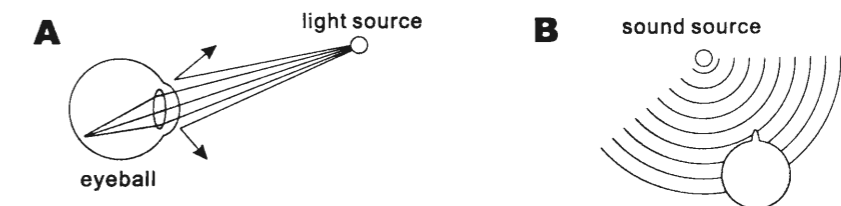


図 I.1: 図 A: 光源から発せられた光のうち、瞳孔を通過した光だけが眼球内に侵入する。眼球の内部に存在するレンズ体によってこれらの光は屈折するため、(レンズ体が正しく調整されていれば) 網膜上の一点で像を結ぶ。図 B: 聴覚においては、瞳孔や水晶体のような仕組みがないため、感覚細胞の興奮と音源の位置の間に視覚のような対応関係は存在しない。

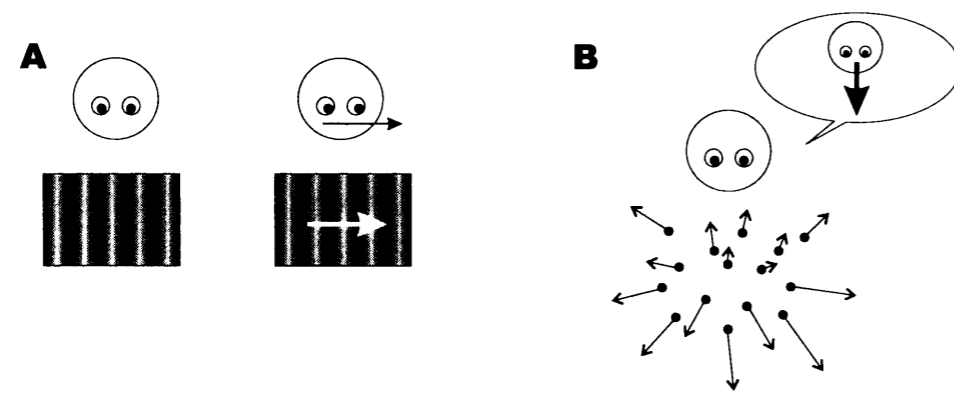


図 I.2: 視覚による姿勢制御の例。図 A: 視機性眼反射。視野の内容が一様に運動すると、それに追従するように眼球運動が起る。図 B: ベクシオン。視野の内容が一点を中心に拡大、縮小したり、一様に並行移動している刺激をしばらく観察すると、自分自身が運動しているように知覚される。

ヒトの行動における視覚の役割について、もうひとつの例を挙げよう。図 I.2A のように、網膜へ投影される光刺激が一様に一定方向へ変化すると、刺激の動きを追うように眼球運動が起る。これは視機性反射と呼ばれる運動で、光刺激のパターンを安定させようとする反射であると考えられている。さらに数十秒～数分以上、図 I.2A のような刺激や図 I.2B のように網膜の広い範囲にわたって一点を中心に拡大、あるいは回転するような刺激を間観察しつづけると、やがて自分の身体が運動している感覚を生じる。このように視覚刺激に誘発された身体運動感覚をベクシオン (vection) という。ベクシオンが起こっているときには、しばしば視機性反射と同様の不随意的な姿勢変化が起る。つまり、例えば観察者から見て、前額面上で顔の正面を中心に時計回り (右回り) に刺激が回転している場合、観察者の身体は次第に右方向へ傾いてくるのである。これらの事実は、姿勢を維持、制御するうえで視覚が重要な役割を果たしていることを示している。この事は、上記のような特殊な刺激を用いなくても確認する方法がある。片足で立った状態で眼を開く、閉じるを繰り返してどちらの方がバランスをとりやすいか試してみればよい。閉眼時の方がバランスをとるのが難しいはずである。

以上の事実は、光刺激の網膜上における位置およびその変化が、知覚される対象の位置や運動、身体運動の制御などと密接に関係していることを示唆している。しかし、網膜への光刺激だけを考えていては、ヒトの視知覚や行動を説明することはできない。対象の位置および運動に関して例を挙げれば、ヒトが眼球位置の変化を伴う身体運動をおこなうと、対象の位置は変わっていないにも関わらず網膜への光刺激は変化する。運動とは本質的に相対的なものであり、例えばヒトが身体の正面で静止している対象に対して 1 m 近づいても、逆に

静止しているヒトに対象が 1 m 近づいてきても、ヒトと対象の間の位置関係の変化は同じである。同様に、どのような身体運動に対しても同様の網膜像の変化をもたらす対象の運動を想定することができる¹⁾。にもかかわらず、ヒトは身体運動をおこなったときに周囲の物体が動き回るようには知覚しない。それはなぜか？ 同様の疑問は、視覚による姿勢制御の問題にもいえる。先に挙げた視機性反射が真に「網膜への光刺激を安定させるために、刺激の変化を打ち消す方向へ眼球を動かす」反射であるならば、なぜ随意的に振り向いたときに、視機性反射によって頭がもとの位置へ振り戻されないのだろう。

このような問題が起こる原因は、網膜への光刺激の変化が「身体運動による成分」と「対象の運動による成分」の合成である一方で、周囲に存在する物体の位置の把握や行動の制御といった目的のためには両者が区別されなければならないという点にある。ヒトが日常生活において身体運動と対象の運動を混同したり、身体運動の直後に反射で振り戻されたりしないことを考えると、ヒトの視知覚および運動制御系においては網膜における光刺激の変化の「二つの成分」が正しく区別されていると考えられる。では、この区別はどのような原理のもとにおこなわれているのだろうか。本研究では、この問題をめぐって心理物理学の実験および理論的考察を展開する。

I.2 相殺説²⁾

I.2.1 Holst の相殺説

議論の切り口として、視機性反射を取り上げよう。視覚刺激に対するこの種の姿勢反射が随意的な身体運動を妨げないようにするためには、随意運動中には反射を抑制するのがもっとも直感的な方法である。Holst は、ハエを被験体に用いて視機性反射と随意運動の関係を調べた (Holst, 1954)。内側に縦縞を描いた回転シリンダを設置し、その中心に回転軸を設置する。軸の先端にハエを固定し、ハエが左右回転運動のみを行える状態にする。この状態でシリンダを回転させると、ハエはシリンダと同方向へ回転する。これはヒトにおける視機性反射に相当すると考えられる。また、シリンダを静止させた状態で、ハエは随意的に左右回転運動を行うことができる。以上のことを確認した上で、Holst はハエの頭部を視軸を中心に 180 度ねじって胴体に固定した状態でシリンダの中へ入れた。随意運動中に反射が抑制されているならば、ハエの随意運動は正常時と比べて特に変化しないと予想される。ところが実際には、頭部を 180 度ねじられたハエは一度随意運動を開始すると、疲れ果てて動けな

¹⁾逆に、任意の光刺激の変化に対してそのような変化をもたらす身体運動が存在するわけではない点に注意。物体が変形したり、表面の色が変化する場合を考えてみよ。

²⁾本節の内容は、十河、葎阪 (印刷中) サッカー前後における対象の位置知覚と視野の安定性 心理学評論 43 を元としている。

くなるまで一定の方向に回りつづけたのである。この実験結果は、随意運動中にハエの「視機性反射」が抑制されていないと考えるとうまく説明することができる。つまり、ハエが随意的に右方向へ回転し始めたとする、頭部が180度ねじられているため複眼に入力される光刺激のパターンは左方向へ回転しているときと同じ、すなわち「ハエの頭部からみて右方向」への回転となる。随意運動中に「視機性反射」が抑制されていないとすると、このような光刺激は「右方向への回転」を誘発する。したがって、頭部を180度ねじられたハエは、右へ回転すればするほど、右へ回転しようとする「視機性反射」を起こして「疲れ果てる」まで止まれなくなってしまうのである。

ハエの「視機性反射」の制御機構が随意運動中も働いているという解釈が正しいならば、なぜ随意運動が反射によって妨げられないのだろうか。Holst は”efference copy” という概念を導入することによって、その説明を試みた。まずいくつかの用語を定義しておこう。末梢神経は、感覚器からの情報を中枢へ伝える「求心性」神経と、効果器への指令を伝達する「遠心性」神経に大別できる。一般に、この求心性神経によって伝達される情報を”afference”、遠心性神経によって伝達される情報を”efference”と呼ぶ。Holst はさらに、afference を外的な要因によって発生する”ex-afference”と、身体運動によって発生する”re-afference”に分類した。この分類は、先に述べた網膜への光刺激の「対象の運動による成分」と「身体運動による成分」に対応している。Holst は、afference と re-afference が常に同時に発生し、さらに afference と re-afference が示す変化量の絶対値が等しく、符号が逆になる点に注目した。そして、ハエが随意的に運動するときには「目標とする運動量」の efference が神経系のどこかで保存されており、re-afference と加算した値がゼロになるようにフィードバック制御をしているという仮説を提案した。Holst は、この「保存されている efference」を efference copy と呼んでいる。この仮説によると、頭部を180度ねじられたハエが止まれなくなるのは、フィードバック信号の符号が逆になるために re-afference と efference copy の和がゼロにならないためである。また、ハエが静止しているときにシリンダを回転すると、シリンダを追従するようにハエが運動し始めるのは、efference copy がゼロのまま afference が変化するため、この afference の変化を打ち消すために運動が起こるためである³⁾。つまり、ハエの「視機性反射」は「網膜像を安定させる反射」ではなく、「目標としている状態 (efference copy) と観測された状態 (afference) を一致させようとする反射」ということになる。

Holst はさらに、彼の仮説がヒトの眼球運動およびそれに伴う視知覚の関係をもうまく説明できることを指摘した (Holst, 1954)。まず、網膜上の光刺激が一様に一定方向へ運動したときに眼球の視機性反射が起こること、随意的な眼球運動をおこなったときに視機性反

³⁾つまり、ハエは ex-afference と re-afference を区別していない。恐らくハエは随意的に運動するとき以外は「何かに対して姿勢を安定させる」という方略で動作しているのであり、この目的のためには ex-afference と re-afference を区別する必要はない。

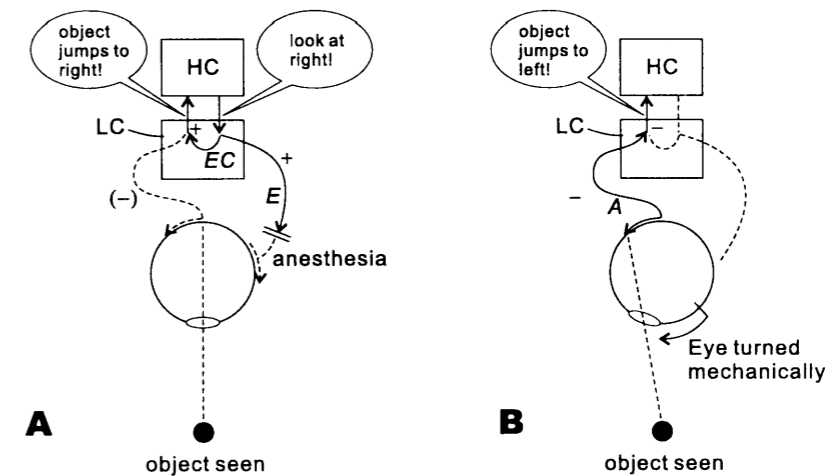


図 I.3: Holst の相殺説。図 A: 外眼筋麻酔などによって正常な眼球運動が不可能なときに眼球を動かそうとすると、網膜像が変化しないにもかかわらず efference copy (EC) が送られてくるため、対象が動いて知覚される。図 B: 他動的に眼球運動を起こされると、efference copy (EC) がないにも関わらず光刺激 (A) が変化するため、対象が動いて知覚される。図中の記号は、A (afference): 光刺激の変化。E (efference): 運動指令。EC (efference copy): 運動指令のコピー。HC (higher center): 運動指令を発したり対象の位置を判断する高次中枢。LC (lower center): 求心性、遠心性情報の比較をおこなう低次中枢。

射によって引き戻されないことの2点は、上述のハエの場合と同様に説明できる。ヒトが re-afference と efference copy を足し合わせた結果に残った運動量を「物体の運動」として知覚していると考えれば、静止した物体が眼前にある状態で眼球運動をおこなった結果、網膜への光刺激が変化しても物体が運動したように感じないことも説明できる。この efference copy と re-afference が物体の運動知覚に関連している証拠として、Holst は外眼筋麻酔と視知覚の関係、および眼球を他動的に回転させたときの視知覚を挙げている。外眼筋とは、各眼球に3対6本ずつ備わる眼球を回転させる筋である。外眼筋に麻酔を施すと、一時的に被験者の眼球の運動速度が正常時に比べて著しく遅くなる。麻酔によって眼球運動速度が低下した状態で、被験者が随意的に眼球運動をおこなうと、周囲の物体が動き回るように知覚される (Stevens et al., 1976)。Holst の説によると、これは efference copy が変化するにも関わらず re-afference が変化しないため、その差が周囲の物体の動きとして知覚されると考えられる (図 I.3A)。また、眼球にコンタクトを吸着させ牽引するなどの方法で眼球を他動的に運動させると、やはり周囲の物体が動くように知覚される (Gauthier, Nommay, & Vercher, 1990)。これは、efference copy の変化を伴わずに re-afference の変化が起こるためだと説明できる (図 I.3B)。

以上の議論をまとめると、「身体運動と対象運動の分離」問題に対する Holst の仮説は次のように要約できる。

1. afference は re-afference と ex-afference の成分に分割できる。
2. re-afference と efference は「逆」の関係にある。
3. したがって、efference を保存しておき (efference copy)、afference と加えると、re-afference と efference copy は相殺しあって ex-afference を取り出すことができる。

この仮説群において efference copy による「相殺」という仮説が中心的な役割を果たしている。そこで、本研究では Holst の仮説を「Holst の相殺説」と呼ぶことにする。

I.2.2 一般化された相殺説

Holst の相殺説では efference copy の重要性が強調されている。しかし、彼の仮説の本質は「眼球運動の情報を用いて網膜への光刺激の変化を相殺する」という点にあり、どのような眼球運動が起こっているのかを知ることができれば、情報源は efference copy である必要はない。実際、外眼筋の固有受容感覚の重要性を示唆する結果がいくつか報告されている。Roll らは、皮膚に1~100 Hz の振動刺激を与えると、皮下に存在する筋の筋紡錘が刺激されて筋が収縮しているような感覚を生じることを示した (Roll, Gilhodes, Roll, & Harlay, 1996)。

彼らがこの技術を用いて、被験者が暗室で静止した光点を固視しているときに頸部の筋や外眼筋に振動刺激を与えたところ、刺激を与えた筋に対応した方向へ光点が運動するように知覚された (Roll, Velay, & Roll, 1991)。これは、外眼筋や頸部の筋群の固有受容感覚が眼球運動の情報として用いられていることを示唆している。Steinbach and Smith (1981) は斜視の外科的治療法である後転法、短縮法⁴⁾の手術を受け、眼帯を外した直後の患者の空間定位能力を検討した。その結果、筋の短縮によって眼球位置が変化していると考えられるにもかかわらず、空間定位の誤差は手術による眼球位置の変化量から予想される誤差の約25%に過ぎなかった。さらに、繰り返しこの手術を受けた患者は大きな誤定位を示すようになることも明らかとなった (Steinbach & Smith, 1981)。これらの結果もまた、外眼筋の固有受容感覚が眼球運動の情報として用いられていることを示唆している⁵⁾。これらの知見を包括できるように、Holst の相殺説を一般化しよう。

そのためにまず、議論内容に以下の制限を課しておく。

1. 「網膜上の像の位置」を議論するにあたって問題を生じない対象のみを扱う。したがって、視野の大半を占めるような巨大な、あるいは眼と至近距離にある対象、調節があつておらず網膜上に明瞭な像を結んでいない対象などは扱わない。また、輝度やテクスチャにおいて周囲の物質と類似性が高く、明瞭な輪郭を持たない対象なども除外する。
2. 両眼視の問題は扱わない。両眼融像した視空間における対象の位置について議論する。
3. 「対象の位置」というとき、観察者から見た「対象が存在する方向」のみを扱う。すなわち、奥行き知覚の問題はここでは扱わない。

また、表現の簡略化のために、以下のように用語を定義する。

x の位置 観察者から見た x が存在する方向。ここでは観察者の頭部を原点として、その正面を基準方向 (0 度) とする。

x の網膜位置 x の網膜上における像の位置。視軸と網膜像のなす角度で表現する。

⁴⁾後転法 (recession) は、外眼筋を付着部で眼球から切断し、後方の強膜に逢着する方法であり、筋の張力を弱める効果がある。短縮法 (resection) は、外眼筋を短縮して付着部に逢着する方法で、筋の張力を強める効果がある。斜視角が大きい場合はこれらの方法を同時に用いることがあり、これを後転-短縮法 (recession-resection) という (丸尾, 1993)。

⁵⁾ここで注意する必要があるのは、「外眼筋の固有受容感覚が眼球運動情報として用いられるという知見は、オリジナルの Holst 説 (efference copy 説) と矛盾する」という点である。外眼筋からの re-afference を用いても、網膜からの afference における re-afference の成分を相殺することが可能なので、外眼筋からの re-afference を利用できるならば efference copy を用いる必要はない。efference copy と外眼筋からの re-afference の使用については未だに不明な点が多く、今後の研究が待たれる。Bridgeman, Heijden, and Velichkovski (1994) 参照。

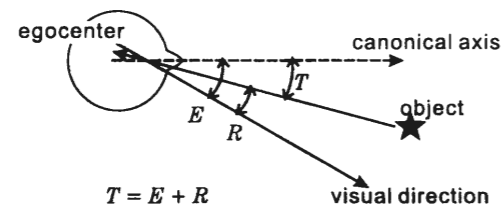


図 I.4: 記号の定義。被験者の正面を基準方向として、対象の方向を T 、視方向を E とする。ただし、角度は左回転を正の値、右回転を負の値で定義する。このとき T 、 E と対象の網膜上における像の位置 R の間には、 $T = E + R$ が常に成立する。

眼球位置 眼窩における眼球の位置。基準方向と視軸のなす角度で表現する。

これらの制限を課すことによって、対象の位置、眼球位置、対象の網膜位置の関係を図 I.4 のように簡略化することができる。図 I.4 に従って、眼球位置を E 、対象の位置を T と定義する。対象の網膜位置を R とする。

このとき R 、 E 、 T の間には次の関係が成立する。

$$T = R + E \quad (\text{I.1})$$

すなわち、対象が動かない限り (T =一定)、 E が x 度変化すると R は $-x$ 度変化する。ここで視覚システムにおける網膜像の位置の表現を R^* 、視線方向の表現を E^* 、対象の位置の表現を T^* とする。これらはそれぞれ R 、 E 、 T に対応している。 R^* と E^* から T^* を推定する直感的な方法は、式 (I.1) に基づいて、以下のように R^* と E^* の和をとることである。

$$T^* = R^* + E^* \quad (\text{I.2})$$

この式の両辺を時間 (t) で微分すると

$$dT^*/dt = dR^*/dt + dE^*/dt \quad (\text{I.3})$$

を得る。ここで

$$\begin{aligned} dT^*/dt &\rightarrow \text{知覚される対象の運動} \\ dR^*/dt &\rightarrow \text{網膜像の位置変化の表現} \\ dE^*/dt &\rightarrow \text{眼球の運動情報} \end{aligned}$$

に対応していると考え、式 (I.3) は Holst の相殺説に対応していることがわかる。すなわち、式 (I.2) は、Holst の相殺説を「 E^* が efference copy のみから推定される」という特

殊な場合として含む、より一般的な仮説となっている。そこで、本研究では、対象の知覚される位置が式 (I.2) に従って定まるという立場を「一般化相殺説」と呼ぶことにする。この理論は、「身体運動と対象運動の分離」問題について議論するうえで欠くことのできない重要な位置を占めている (Bridgeman et al., 1994)。

I.3 サッカーに伴う誤定位⁶⁾

I.3.1 サッカー実行時に瞬間提示された刺激の定位

一般化相殺説に従えば、我々が自分自身の眼球運動と対象の運動を分離できるのは「視覚的なものに由来しない」眼球運動情報を用いて網膜像の変化を相殺できるからということになる。このような計算原理に基づいて眼球運動と対象の運動を分離するには、眼球位置や対象の網膜位置が非常に正確に「測定」されなければならない。さもなければ、「測定」の誤差が対象の運動として知覚されてしまうからである。

しかし、サッカーと呼ばれる眼球運動⁷⁾を実行する前後数十～百数十 msec の間には、この「測定」が特徴的な誤差を含む可能性を示唆する実験結果が相次いで報告された。それらの報告によると、この期間に瞬間提示された刺激は、実際の位置とは全く異なる位置に提示されたように知覚される。さらに、その誤定位の大きさは刺激提示とサッカー開始時刻の差に依存して変化するという (Cai, Pouget, Schlag-Rey, & Schlag, 1997; Dassonville, Schlag, & Schlag-Rey, 1995; Honda, 1989, 1990, 1991, 1993, 1999; Mateeff, 1978; Matin, Matin, & Pearce, 1969; Matin, Matin, & Pola, 1970; Miller, 1996; O'Regan, 1984; Schlag & Schlag-Rey, 1995)。相殺が完全に正しく行なわれていれば、このような誤定位は発生しないと考えられるので、この現象はサッカー実行前後に何らかの問題が生じていることを示唆している。

もう少し詳しく実験手続と結果を解説しよう。図 I.5 は、Honda (1990) を参考にこれらの実験における手続の概要をまとめたものである。実験は一般に暗室で行ない、被験者の頭部が動かないようにバイトバーなどを用いて固定する。刺激提示デバイスを、図 I.5A のように被験者の正面に配置する。実験の手続上、提示時間が数 msec の瞬間提示が必要となるので、刺激提示には、発光ダイオード (Light Emitting Diode: LED) を用いることが多い。

実験試行が開始すると、まず図 I.5A の F が点灯する。これは試行の開始時に被験者が固視する点である。しばらくすると F が消灯し、それと同時に図 I.5A の T が点灯する。被

⁶⁾本節の内容は、十河, 学阪 (印刷中) サッカー前後における対象の位置知覚と視野の安定性 心理学評論 43 を元にしての。

⁷⁾サッカーについては付録 A を参照のこと。

験者は、T が点灯するとともにできるだけ早く T の位置へ向かってサックードをおこなう。T の提示時間はサックードの潜時より短くなるように設定されており、実際に被験者がサックードを開始したときには F も T も提示されていないようになっている。これらの刺激に加えて、被験者のサックード開始前後百数十 msec 以内に入るように S を瞬間提示する。図 I.5 では S はひとつしか描かれていないが、実際には S は複数個準備されており、一試行にいずれかひとつの S が無作為に点灯する。このようなタイミングで光刺激を提示するとサックード抑制が働くが⁸⁾、刺激の輝度が十分に高ければ刺激を検出することは可能である。被験者の課題は、S が提示された位置を報告することである。位置の報告には、ポインタを用いてその位置を指し示す (Honda, 1990, 1991; Miller, 1996; O'Regan, 1984)、その位置を固視する (Dassonville et al., 1995; Schlag & Schlag-Rey, 1995) といった方法の他、ルーラの上に刺激を提示して、ルーラの目盛を用いて報告する方法 (Mateeff, 1978)、副尺課題を用いる方法 (Cai et al., 1997; Matin et al., 1969, 1970) などが用いられる。被験者が報告した S の位置と、実際の S の位置の差が誤定位の大きさとなる。

S の提示タイミングを変化させながら試行を繰り返し、集めたデータから「誤定位の大きさ」を「S の提示とサックード開始の時間差」に対して表示すると、図 I.6 のようなグラフを得る (Honda, 1990, 1991; Mateeff, 1978)。一般に、S がサックード前に提示されたときには、S はサックードと同じ方向に誤定位される。逆に S がサックード終了後に提示された場合は、サックードと逆方向に誤定位される。いずれの場合も、サックード開始 (終了) 時刻付近で誤定位の絶対値が最大になる。図 I.5 の例では水平方向のサックードを行なっているが、垂直方向のサックードを行なっても同様に、サックードの進行方向とその逆方向への誤定位が起こる (Honda, 1991)。誤定位が現れはじめる時間差や、誤定位の最大値などは被験者ごとに個人差が見られる。また、サックード振幅が大きくなるにつれて誤定位も大きくなる傾向にあるが、必ずしも両者は線型の関係にはない (Sogo, 1998)。

これらの実験結果を、われわれはどのように解釈すべきであろうか。次節では、一般化相殺説の枠組みの中でこの現象の説明を試みよう。

I.3.2 Damped-EPs 仮説：一般化相殺説による解釈

一般化相殺説の枠組みから図 I.6 のデータを説明する手がかりは、Holst が外眼筋麻酔時や眼球の他動的運動時における知覚現象の説明に用いた議論にある (図 I.3)。すなわち、刺激が誤った位置に知覚されるのは、式 (I.2) における R^* や E^* が実際の R や E を正しく表現していないためであると考えられるのである。

⁸⁾ サックード実行前後数十 msec 以内の時間範囲では、固視時と比較して光点が暗く知覚されたり、動きの検出閾が上昇するという現象が起こる。これをサックード抑制という。

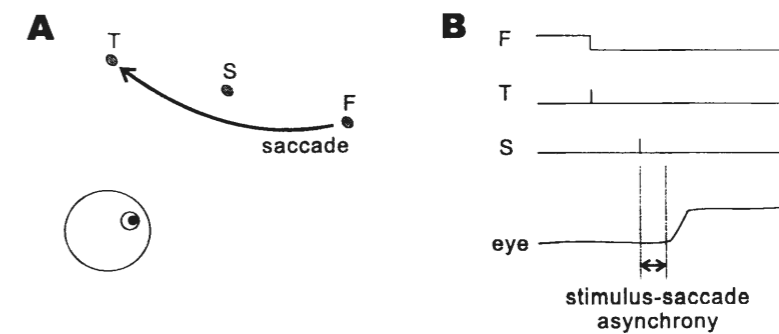


図 I.5: 実験刺激 (A) とその提示シーケンス (B)。被験者は F を固視し、T が点灯したらただちに T の位置へ向かってサックードを行なう。そのとき、S をサックード開始前後百数十 msec 以内に入るように数 msec 提示する。T の提示時間は一般的なサックード潜時 (100 msec 以上) より短くなるように設定されており、S が提示される時にはすでに T は消灯されている。



図 I.6: 図 A: S の提示とサックード開始の時間差を横軸に、被験者が報告した S の位置と実際の S の位置の差 (誤定位) を縦軸にとると、一回の試行のデータはひとつの点として表示できる。図 B: S の提示時刻を変更しながら試行を繰り返し、それらのデータを集めると図 B のようなグラフが得られる。

では、具体的に R^* や E^* に含まれる誤差を計算してみよう。まず式 (I.2) から式 (I.1) を減算する。

$$T^* - T = (R^* - R) + (E^* - E) \quad (I.4)$$

ここで T 、 R 、 E はいずれも測定可能な変数である。 T^* は被験者が報告した位置に相当するので、これも測定可能である。したがって、 R^* と E^* が未知変数として残る。

さらに計算を進めるためには、 R^* と E^* について何らかの仮定が必要である。そこで、「 R^* は網膜上のどの位置の視細胞が興奮しているかによって表現される」という仮定を置いてみよう。I.1 節で述べたように、視覚の特徴として、刺激が存在する方向とその網膜像の位置が非常によくに対応するので (図 I.1)、この仮定は自然だと言える。この仮定の下では、 R^* がサッカードの実行前後百数十 msec の間のみ規則的に誤差を生じると考える理由はないので、 $R^* = R$ が成立すると期待できる。これを式 (I.4) に代入し、 E^* について解くと

$$E^* = (T^* - T) + E \quad (I.5)$$

を得る (図 I.7)。つまり、一般化相殺説と $R^* = R$ という仮定の下では「視覚系において表現されている眼球位置 (E^*) は、物理的な眼球位置 (E) と誤定位の大きさ ($T^* - T$) の和に等しい」のである (Honda, 1990; Mateeff, 1978)。

サッカード前後のさまざまなタイミングにおける E と ($T^* - T$) は、図 I.6B の関係になるというデータが得られている。したがって、個々の試行のデータに式 (I.5) を適用していくと、サッカード時における E^* の時間特性が図示できる。図 I.8 は、このような方法で推定した E^* の例を示している。この図から、 E^* の時間特性について以下の2つの特徴が見てとれる。

1. E^* と R^* は時間的に正しく同期していない。 E^* が変化し始めるタイミングが、 E の変化 (静止した刺激に対する R の変化に等しい) に対して早すぎる。
2. E^* は E より「ゆるやか」に変化する。

では、なぜ E^* はこのような特徴を持っているのだろうか？ 式 (I.2)、(I.5) を導くために用いた仮定の妥当性を検証するという意味でも、 E^* がこれらの特徴を持つ理由が説明されるべきである。

まず、眼球位置情報 E^* が変化するタイミングが早いという点について考えよう。もっとも単純な説明は、 E^* と網膜情報 R^* が中枢へ伝えられるのに要する時間が違うのであろうというものである (Mateeff, Yakimoff, & Dimitrov, 1981; Schlag & Schlag-Rey, 1995)。 R^* については、網膜から視神経を通じて中枢神経系に伝達されることは明らかである。それに対

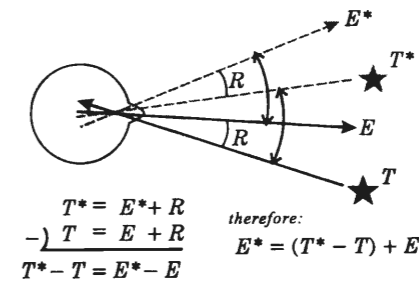


図 I.7: 一般化相殺説に基いた眼球位置情報の推定。知覚された対象の位置 T^* が式 (I.2) のように眼球位置の表現 E^* と網膜像の位置の表現 R^* の和によって決定され、なおかつ $R^* = R$ が成立するならば、これと式 (I.1) を用いてこれらの式から R^* 、 R を消去して E^* を E 、 T 、 T^* の式で表すことができる (式 (I.4))。

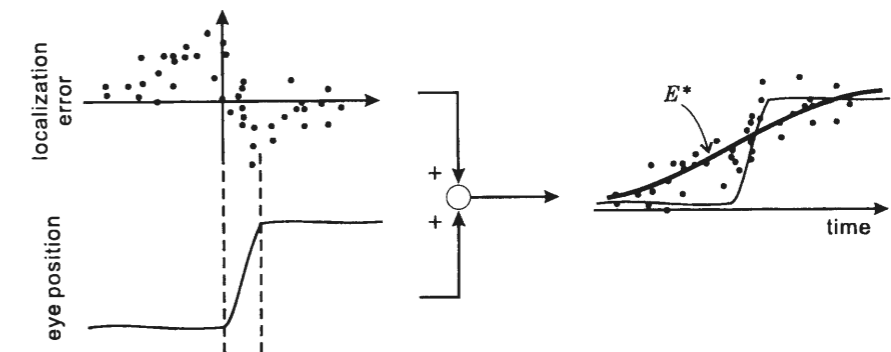


図 I.8: サッカード実行時に瞬間提示された刺激の誤定位からの眼球位置情報の推定。式 (I.4) を図 I.6 のデータに適用して、 E^* の時間特性を推定している。

して E^* は、それがもし外眼筋の固有受容感覚に由来するならば、三叉神経を介して脳幹の神経核から中枢神経系へ伝達される。efference copy に由来するものならば、その実体は中脳から脳幹にかけて存在する眼球運動制御系⁹⁾から中枢へフィードバックされる情報であろう。このように R^* と E^* は中枢神経系への伝達経路が異なっているため、中枢神経系へ伝達されるのに要する時間が異なるという可能性は十分に考えられる。ここで「 E^* が中枢神経系に到達するのに要する時間が、 R^* の到達に要する時間よりも短い」と仮定すると、結果的に「 E^* が変化しはじめるタイミングが早すぎる」という現象が説明できる¹⁰⁾。

続いて図 I.8 が示している第 2 の点、眼球位置情報 E^* が物理的な眼球位置 E よりもゆるやかに変化するという問題はどうか。これは、 E^* の伝達経路がサッカードによる急速な眼球位置変化に追従できないためと考えるのが自然であろう (Dassonville, Schlag, & Schlag-Rey, 1992; Mateeff et al., 1981; Schlag & Schlag-Rey, 1995)。この説明を支持する知見として、スムーズパシュートと呼ばれる眼球運動中に提示された光点の運動知覚が挙げられる。Pola and Wyatt (1989) は、被験者が左右に繰り返しスムーズパシュートを行なっているときに、光点をその網膜位置が変化しないように眼球運動に合わせて動かしながら提示した。このような刺激を提示したとき、眼球運動が速くなるにつれて、光点運動の実際の振幅に対する主観的な振幅の比 (ゲイン) が小さくなった。この実験結果は「 E^* が E に線型ローパスフィルタを適用して得られる」ことを示唆していると彼らは結論している (Pola & Wyatt, 1989)¹¹⁾。

E^* の時間特性に関するこれらの議論をブロック線図で表現すると、図 I.9 のようになる。 D_R 、 D_E は時間遅れ、 F_R 、 F_E はそれぞれ R から R^* 、 E から E^* への伝達関数を示している。 $D_E < D_R$ であれば E^* が変化するタイミングは早くなり、 F_E がローパスであれば E^* がゆるやかに変化する。

以上が、サッカード実行時に瞬間提示された光点の定位に関する図 I.6 のデータの、一般化相殺説による解釈である。図 I.8 のように眼球位置情報がゆるやかに変化するという仮説を Damped-EPS 仮説と呼ぶことにしよう。

⁹⁾ 眼球運動制御系については付録 A を参照のこと。

¹⁰⁾ 乾, 朝倉, 本田 (1996) は、運動指令から眼球位置の変化を予測するという形で、実際に眼球が動き出す前から E^* が変化しはじめるという説明を試みている。しかし、こういった水準の議論は E^* の神経科学的実体は何かという問題に深く関連しており、現在の心理物理学的な実験で検証できる範疇を超えているので、ここでは議論しない。

¹¹⁾ サッカードとパシュートは脳幹の運動神経核に近い段階で初めて合流するので、運動神経核に近い段階から E^* を得ている可能性も示唆している。付録 A.4 節参照。

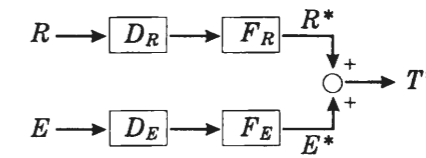


図 I.9: 図 I.8 で得られた E^* の時間特性を説明するためのシステム。 D_R 、 D_E は伝達の時間遅れ、 F_R 、 F_E は伝達関数。 $D_E < D_R$ 、 $F_R = 1$ かつ F_E が low-pass であれば、図 I.6 のような誤定位が得られる。

I.3.3 phantom array と Discrete-EPS 仮説

サッカード時の誤定位に関する研究論文の多くは、Damped-EPS 仮説の立場から議論を展開している (Cai et al., 1997; Dassonville et al., 1995; Honda, 1990, 1991, 1993, 1997, 1999; Mateeff, 1978; Matin, 1972; Schlag & Schlag-Rey, 1995)。それに対して、Hershberger は、彼自身が「phantom array」と名づけた現象を元に Damped-EPS 仮説に疑問を投げかけた (Hershberger, 1987; Hershberger & Jordan, 1992; Jordan & Hershberger, 1994)。

phantom array というのは、高頻度で点滅を繰り返す光点をまたいでサッカードを行なったときに知覚される現象である。Hershberger らは、暗室で被験者の正面に 200 Hz (1 msec-ON, 4 msec-OFF) で点滅する光点を提示し、被験者に光点をまたいで左右に繰り返しサッカードを行わせた。その後、この間に光点がどのように知覚されたかについて、被験者に以下のような質問をした。各質問の最後の数字は被験者の 1 回目の回答の割合を示している。なお、日本語訳は質問文を省略して書かれているので正確な訳ではない。

- Q1. サッカードを行なうたびに、光点は見えましたか。(はい: 99%)
- Q2. その光点はひとつでしたか、それとも複数見えましたか。(複数見えた: 97%)
- Q3. それらの光点は一ヶ所に見えましたか、それとも空間的に散らばっていましたか。(散らばっていた: 96%)
- Q4. それらの光点はバラバラに散らばった点のかたまりでしたか、それとも直線的な点列のような規則的なパターンでしたか。(点列だった: 96%)
- Q5. 点列は垂直でしたか、それとも水平でしたか。(水平だった: 96%)
- Q6. それらの光点は同時に現れたように見えましたか、それとも順番に現れたように見えましたか。(順番に現れたように見えた: 64%)

- Q7. 光点が現れる順番はバラバラでしたか、それとも右から左、左から右といったような規則的なものでしたか。(規則的だった: 93%)
- Q8. 光点が現れる順番はサッカードの方向と同じでしたか、それとも逆でしたか。(逆だった: 78%)
- Q9. 個々の光点は位置が変化するように見えましたか、それともそれぞれの位置に固定されているように見えましたか。(固定されていた: 38%)
- Q9-a. (この間に「変化するように見えた」と答えた被験者に対して) 光点はサッカードと同じ方向に動くように見えましたか、それとも逆方向でしたか。というのは、個々の点の位置と、光点の列によって引き起こされた ϕ 運動を勘違いされているかも知れないからです。(89%: 逆方向だった)
- Q10. 右方向へサッカードするとき、光点の列は(実際の)光点の両側に見えましたか、それともどちらか片側のみに見えましたか。(78%: 片側に見えた)
- Q11. (片側に見えたという被験者に対して) 右方向へサッカードするとき、光点の列は右側に見えましたか、それとも左側に見えましたか。(78%: 右側に見えた)

これらの質問の途中で被験者を選別したり新たな教示を加えることなどが行なわれているが、それらの詳細については Hershberger and Jordan (1992) を参照されたい。これらの質問への回答から、Hershberger らは以下のように結論した。

1. 高速に点滅する光点をまたいでサッカードを行なうと、光点の列が描かれる様に知覚される。
2. 点列は、サッカードと逆方向に順番に描かれるように知覚される。同方向へ描かれるようには知覚されない。
3. 点列は実際の光点の位置よりサッカード進行方向側から描かれ始め、実際の位置で止まるように知覚される。

これらの結論を図でまとめると、図 I.10 のようになる。Hershberger らは、この「サッカード実行に伴って知覚される点列」を phantom array と名付けた。

Damped-EPS 仮説の立場からは、この刺激はどのように知覚されると予想されるだろうか。Damped-EPS 仮説の基本的な考え方は、ひとこと言えば「サッカード実行前後に眼球位置情報と実際の眼球位置の間にズレがあって、刺激提示瞬間の両者のズレが誤定位の大きさと一致している」というものであった。したがって、光点がいくつ提示されようとも、

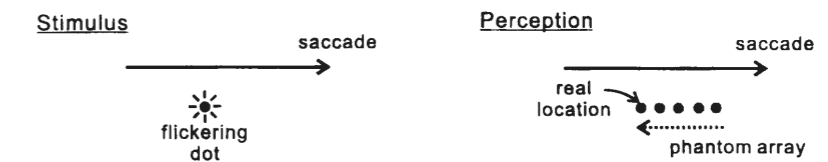


図 I.10: phantom array. 被験者は高頻度で点滅する光点をまたいでサッカードを行なう。すると、サッカード実行の瞬間に光点がサッカード進行方向へ跳躍し、そこから実際の刺激の位置へ向かって瞬時に点列が描かれるように知覚される。Hershberger はこの点列を phantom array と呼んだ (Hershberger, 1987; Hershberger & Jordan, 1992)。

個々の点は単独で提示されたときと同じように定位されるはずである。結果として、図 I.6 に示したような誤定位の時間特性のグラフに対応して「まずサッカードの進行方向へ点列が描かれ、その後折り返して反対方向へ描かれ、その後再び進行方向へ描かれ、光点の実際の位置で停止する」点列が知覚されると予想される。この予想は、明らかに上記の実験結果と一致しない。「サッカード終了時の、サッカードと逆方向の誤定位」は被験者によって非常に小さいか、全く見られないことがあるので(未発表の観察、Mateeff (1978) も参照のこと)、phantom array の「最後の折り返し」が知覚されないことは個人差の問題である可能性も存在する。しかし、最初にサッカードと同方向へ描かれる phantom array が知覚されないことは、どうしても説明不能である。

では、Hershberger は phantom array の知覚をどのように説明するのだろうか。図 I.11 は、Hershberger の仮説の概要を示している。Hershberger は、式 (I.2)、式 (I.5) といった一般化相殺説の基本的な仮定は正しいと考えた。そのうえで、眼球位置情報 E^* は図 I.8 のように「ゆるやかに」変化しているのではなく、むしろサッカード実行直前に「離散的に」サッカード終了後の値に跳躍していると考えたのである。この仮説を採用するならば、 E^* は離散的に変化するのだから、サッカードと同方向へ描かれる phantom array が知覚されないことは自然に説明できる。また、サッカードと同方向の「最後の折り返し」が知覚されないことも自明である。しかし、この仮説に従うと、今度はサッカード実行時に単独で瞬間提示された刺激が図 I.6 に示したように誤った位置に定位される理由が説明できない。この点について、Jordan and Hershberger (1994) は「 E^* が変化するタイミングが毎試行ごとに異なっていれば、誤定位の平均値はゆるやかに変化する」という説明をしている。つまり、「刺激が提示された瞬間に、すでに E^* が変化している確率」が、刺激提示タイミングが遅くなるにつれて次第に高くなると仮定すれば、 E^* の期待値は図 I.11 のようにゆるやかに変化すると考えられるのである。

以上が、Hershberger らの議論の概要である。本研究では、「眼球位置情報が離散的に変

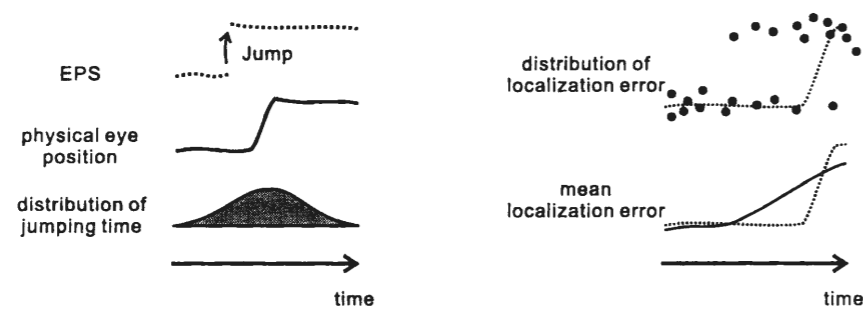


図 I.11: Hershberger による phantom array の説明。EPS は、サッカード実行によって眼球が動き出す前後のある瞬間に、離散的にサッカード後の眼球位置を示すように跳躍する。眼球が動き出す前に EPS が跳躍すれば、サッカードと反対方向へ描かれる phantom array が知覚されることになる。EPS 跳躍の瞬間が各試行毎に異なっており、眼球が動き出す前後に分布していれば、サッカード開始直前に刺激が単独提示されたときの誤定位は図のように離散的に分布するはずであり、結果として単位時間毎の誤定位の平均は緩やかに変化すると予想される。

化する」という Hershberger の仮説を Discrete-EPS 仮説と呼ぶことにしよう¹²⁾。

I.3.4 Damped-EPS か Discrete-EPS か

Discrete-EPS 仮説は、論理的に Damped-EPS 仮説とは両立しない。したがって、Discrete-EPS 仮説は Damped-EPS 仮説の支持者にとって無視できないものである。しかし、Discrete-EPS 仮説の発表以降も、サッカード時の誤定位に関する研究論文の多くは Discrete-EPS 仮説に言及せず、Damped-EPS 仮説の立場から議論を展開している (Cai et al., 1997; Dassonville et al., 1995; Honda, 1990, 1991, 1993, 1997, 1999; Schlag & Schlag-Rey, 1995)。なぜ Discrete-EPS 仮説は「黙殺」されているのだろうか。筆者は 2 つの理由があると考えている。

第一の理由は、図 I.6 に示した単独提示された刺激の誤定位の説明に対する疑問である。誤定位の平均値に注目する限り、Discrete-EPS 仮説の予想は Damped-EPS 仮説の予想と、ひいては実験データと一致する。しかし、誤定位データの分布に注目すると、明らかにこれらの仮説は異なっている。すなわち、Damped-EPS 仮説に従えば、個々の試行の誤定位デー

¹²⁾Hershberger and Jordan (1992) は彼の仮説の神経科学的、制御論的背景を議論しているが、その内容は I.3.2 節の Damped-EPS 説に関する議論より高度に専門的なものである。この点については本文で紙面を割いて議論が不明瞭になるのを避けるため、付録 A.4 節で議論した。なお Hershberger は彼の仮説の中心となる眼球位置情報を *afference copy* と呼んでいるが、この名称は不適切だと筆者は考えるので、ここでは用いなかった。不適切だと考える理由についても付録 A.4 節で議論している。

タは平均値の周りに分布し、平均値の変動に伴って分布そのものも「ゆるやかに」変動していくと予想される。一方、Discrete-EPS 仮説に従えば、データの分布は図 I.11 に示したように離散的に変化するはずである。1987 年に Hershberger が Discrete-EPS 仮説を提案したときには、誤定位の分布を具体的に示したデータが発表されていなかったが、1990 年代に入って、具体的な分布データが発表され始めた (Dassonville et al., 1995; Miller, 1996)。これらのデータから判断する限り、Damped-EPS 仮説の予想のほうが実験のデータに即している。

第二の理由として、Hershberger らの実験でサッカードと同方向の phantom array が知覚されないことは、眼球位置情報の時間特性以外の観点から説明できる可能性があることが挙げられる。例えば、暗室で点滅していない光点をまたいでサッカードを行うと、サッカードの進行方向と逆向きに線が描かれるように知覚される。これが phantom array に対応する知覚現象であることは明らかであろう。Matin, Clymer, and Matin (1972) は、サッカード開始にあわせて光点を点灯し、光点を消去するタイミングをサッカード終了直後から数秒にわたって変化させた。その結果、知覚される「線」の長さはサッカード終了直後に光点が消去されたときに最も長く、光点の提示時間が長くなるにつれて「線」の長さは短く知覚された。この Matin et al. (1972) の結果はマスキングの一種と考えられている。サッカードと同方向の phantom array が知覚されない理由も、このようなマスキングの影響である可能性が十分に考えられる。

これらの点を考慮すると、Discrete-EPS 仮説を支持する積極的な理由はないように思われる。しかし、仮に Discrete-EPS 仮説が誤りであったとしても、もはや Discrete-EPS 仮説が提起した問題を見過ごすことは許されない。Damped-EPS 仮説を支持するならば、サッカードと同方向の phantom array が知覚されない理由を「～と考えられる」という推測ではなく、具体的に示す必要があるだろう。

I.4 問題点の整理

ここまでの議論をまとめよう。まず、視覚による空間知覚を考えるにあたって、身体運動と対象の運動をいかに分離するかという問題が重要であることを述べた (I.1 節)。この問題の解決方法のひとつとして、眼球位置情報を用いて網膜への光入力の変化を相殺するという「一般化相殺説」を紹介した。一般化相殺説は非常に単純でありながら、外眼筋麻酔時や他動的な眼球運動時などの幅広い知覚現象をうまく説明できる (I.2 節)。しかし、サッカード実行時に提示された光点や点滅する光点の知覚をめぐる、同じ一般化相殺説に基づいているにもかかわらず、Damped-EPS 仮説と Discrete-EPS 仮説という相反する仮説が提案されている (I.3 節)。

同じ一般化相殺説という前提から矛盾する仮説が導かれるというのは奇妙な話である。明らかに、何かの条件が見落とされているか、さもなくば前提自体が誤っている。本研究では、Damped-EPS 仮説と Discrete-EPS 仮説の矛盾を足がかりに、一般化相殺説の問題点を検討する。まず第II章、III章では、サッカード実行時に提示された複数の光点の位置知覚を心理実験によって検討する。第IV章では、これらの結果を受けて、一般化相殺説の限界と、身体運動と対象運動の分離問題の解決について議論する。最後に第V章で、本研究の今後の展開について述べる。

第II章 phantom arrayの成立条件¹⁾

II.1 眼球位置情報由来か、網膜情報由来か

点滅する光点をまたいでサッカードを実行しても、サッカード進行方向へ描かれる phantom array を知覚することはない (Hershberger & Jordan, 1992)。Hershberger らは、この事実を「眼球位置情報が離散的に変化している」ことを示唆していると考えた。一方、Damped-EPS 仮説の立場からは、この事実をサッカード抑制のような抑制機構によって phantom array の知覚が抑制されると解釈される。言いかえれば、Discrete-EPS 仮説は、サッカード進行方向への phantom array が知覚されない理由を眼球位置情報の時間特性に求めている。それに対して、Damped-EPS 仮説は、網膜情報の時間特性に原因があると解釈していることになる。第II章では、サッカード進行方向への phantom array が知覚されない理由が眼球位置情報の特性によるものか、網膜情報の特性によるものかを実験的に検討する。

まずII.2節では、サッカード実行前後に提示されている刺激が、サッカード進行方向への phantom array の知覚を抑制している可能性について議論する。Damped-EPS 仮説を素直に解釈すれば、Hershberger and Jordan (1992) の実験条件 (I.3.3 節) ではまずサッカード進行方向へ向かって phantom array が描かれ、その直後にぴったり重なるようにサッカードと逆方向への phantom array が描かれることになる。したがって、Hershberger らの実験条件では進行方向への phantom array が逆方向への phantom array によって「上書き」されて知覚されない可能性が考えられる (図II.1)。この解釈が正しければ、点滅する光点 (フリッカー) をサッカード開始直前のみ提示すればサッカード進行方向への phantom array が知

¹⁾本章の内容は、Sogo and Osaka (2001) Perception of relation of stimuli locations successively flashed before saccade. *Vision Research*, 41, 935-942 を元に加筆したものである。

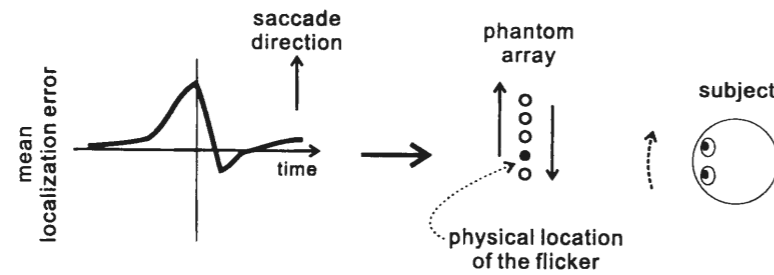


図 II.1: Damped-EPS 仮説を素直に解釈すれば、Hershberger and Jordan (1992) の実験条件ではサッカド進行方向への phantom array は直ちに逆方向への phantom array に上書きされてしまう。

覚されると期待できる。

II.2 フリッカーする刺激の知覚

実験は二つのテストで構成されている。「方向判断テスト」では、サッカド開始直前に数十 msec 提示されたフリッカーがどのように知覚されるかを検討した。「定位テスト」では、今回の被験者が従来報告されてきたサッカドに伴う誤定位を起すこと、および誤定位の分布が Damped-EPS、Discrete-EPS 仮説のどちらの予測に従うかを確認した。

II.2.1 方法

HS、MM の二名の男性が被験者として実験に参加した。どちらの被験者も眼鏡によって正常な視力に矯正した。

実験は完全な暗室中でおこなった。被験者を椅子に座らせ、デンタルバイトボードによって頭部の運動を制限した。被験者の正面、57cm の距離に、被験者の眼の高さに合わせて赤色の発光ダイオード (LED: 直径視角 0.2 度、20cd/m²) を設置した。この発光ダイオードの左右、視角で 5 度離れた位置に緑色の LED を設置した (図 II.2)。緑 LED の直径は視角 0.2 度、輝度は主観的に赤 LED と等しくなるように調整した。被験者の反応を測定するために、ポインタとキーボックスを被験者の前に配置した。ポインタは先端に黄色の LED を固定したレバー状のもので、被験者が水平方向に自由に動かせるようになっていた。キーボックスには水平に三つのボタンを設けた。これらの機器を、Interface 社製のデジタル I/O ボードおよびタイマボードを搭載した PC/AT 互換機を用いて制御した。また、Permobil Meditech 社製の眼球運動測定システムである Ober2 を用いて、被験者の左眼の水平方向の眼球運動を測定した。

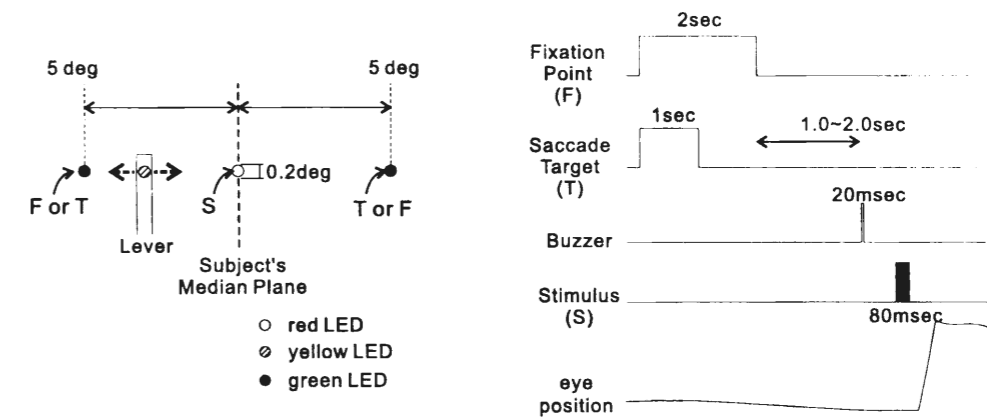


図 II.2: 実験に用いた刺激。左図: 刺激の配置。右図: 刺激定時のシーケンス。

実験を始める前に、Hershberger (1987), Hershberger and Jordan (1992) にならって赤 LED を 200Hz で点滅させ、被験者にこの刺激をまたいでサッカドを数回繰り返しおこなわせた。この条件下で被験者が実際に phantom array を知覚することを確認してから、以下に述べる実験をおこなった。

方向判断テスト 各試行の最初に、ブザー (2000 Hz、20 msec) とともに二つの緑 LED を点灯した。1 sec 後、これらの LED のうち一方を消灯した。消えた方の LED は、この試行におけるサッカドの目標点 (T) となる。もう一方の LED は固視点 (F) である。どちらの LED が T (あるいは F) となるかは、試行毎に無作為に決定した。T の消灯から 1 sec 後に F も消灯し、さらに 1.0~2.0 sec 後にブザーを鳴らした。被験者はまず F を固視し、F の消灯後もその位置を固視しつづけ、ブザーが鳴ると可能な限り早く T が提示された位置へサッカドをおこなった。この被験者のサッカドに合わせて、赤 LED を 200Hz (1 msec-ON/4 msec-OFF) で 80 msec 間フリッカーさせた。この刺激を S とする。S の提示開始時刻は、被験者のサッカド潜時に合わせて、サッカド直前かサッカド中に S が提示されるように調整した。被験者の課題は、S が水平な点列として知覚されたか否かを回答することである。この目的のために、点列が左へ向かって描かれるように知覚された場合はキーボックスの左のボタンを、右へ向かって描かれるように知覚された場合は右のボタンを押すように被験者に指示した。S が 1 点として知覚された場合、あるいは複数の点として知覚されたが一方向へ向かって描かれる水平な点列として知覚されなかった場合は、中央のボタンを押すように指示した。被験者がいずれかのボタンを押した時点で 1 試行が終了し、次の試行開始まで 2 秒間の休憩を挿入した。36 試行を 1 セッションとし、HS は 4 セッション、MM は 5 セッションの実験をおこなった。

定位テスト 各試行の最初に、ブザーとともに二つの緑LEDのうち一方を1.25~2.0 sec間点灯した。この刺激をFとする。Fの消灯と同時に、ブザーを鳴らすとともにもう一方の緑LEDを20 msec点灯した。この刺激をTとする。被験者はまずFを固視し、Tが点灯すると可能な限り早くTの位置へサッカードをおこなった。Tの点灯時間は一般的なサッカード潜時より十分短いので、サッカード開始時にはTはすでに消灯されている。この被験者のサッカード前後に合わせて、赤LEDをを2 msec間点灯した。この刺激をSとする。最後にF消灯から3 sec後、ポインタ先端の黄LEDを点灯した。被験者の課題は、ポインタを左右に動かし、Sの知覚された位置にポインタ先端の黄LEDを合わせてキーボックスのボタンを押すことである。ひとつのセッションとして24試行を連続しておこなった。

以上に加えて、統制条件として刺激は全く同一だが、被験者にサッカードせずにFの位置を固視しつづけさせる条件を設定した。

II.2.2 結果

分析の前に、Ober2の出力に遮断周波数100 Hzのローパスフィルタを適用して高周波ノイズを取り除いた。そのうえで眼球の水平運動の角速度が40度/sec以上になる時刻を探し、その時刻をサッカード開始時刻とした。

図II.3は、定位テストの結果を示している。誤定位の分布は、サッカード開始と刺激提示の時間差が変化するに従ってゆるやかに変化しており、Discrete-EPS仮説が予想するようにゼロとサッカード振幅に等しい値のふたつの分布に分離していない。

表II.1は方向判断テストの結果である。「サッカード前」は、Sがサッカード開始50~0 msec前に消灯された試行の結果を示している。「サッカード中」は、Sがサッカード中に提示されていた試行の結果である。表II.1より、Sがサッカード前にのみ提示された場合でも、サッカードと同方向のphantom arrayは知覚されなかったことがわかる。HSは、Sがサッカード前に提示された試行の約1割において、サッカードと反対方向のphantom arrayを知覚したと回答しているが、これらの回答はSがサッカード開始10~0 msec前まで点灯されていた試行に限られており、サッカード開始時刻の定義によるアーティファクトであると考えられる。

II.2.3 考察

Discrete-EPS仮説によると、サッカード前に誤定位の平均値が徐々に増加し始めるのは「単に離散的なEPSの変化の起こる確率が増加していくから」である(Jordan & Hershberger, 1994)。この説明が正しければ、定位テストにおける誤定位のデータは「ゼロ付近」と「サッ

表 II.1: 方向判断テストにおいて知覚された phantom array の方向。

サッカード	被験者	サッカード前		サッカード中	
		左	右	左	右
左サッカード	HS	0.00	0.10	0.00	0.95
	MM	0.00	0.00	0.00	0.67
右サッカード	HS	0.09	0.00	0.68	0.00
	MM	0.00	0.00	0.75	0.00

表中の数字は、有効な試行すべてにおいて「右」「左」と回答した試行の割合である。被験者の回答には「どちらでもない」というものもあるので、「右」「左」を足しても1にはならない点に注意。

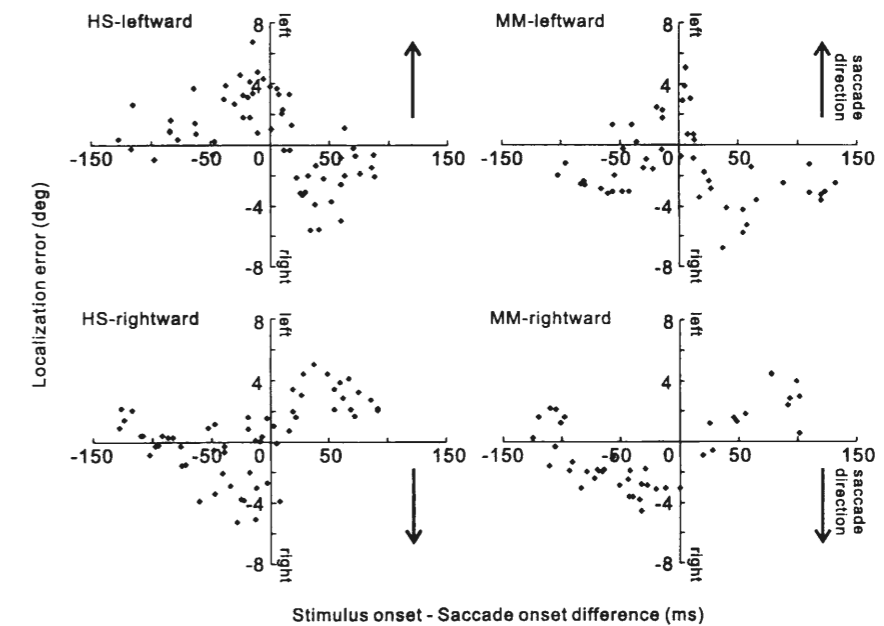


図 II.3: 定位テストの結果。右の列はHS、左の列はMMの結果をそれぞれ示している。上下向きの矢印はサッカードの方向を示している。どちらの被験者においても、サッカード開始直前数十 msecはサッカード進行方向へ、開始直後数十 msecにはサッカードと反対方向へ誤って定位していることがわかる。

カード振幅付近」の二つの値の周辺に分布するはずである。しかし、実験結果はこの予測が正しくないことを示している(図II.3)。サッカードの振幅、刺激などが異なる条件下でも図II.3と同様の結果が得られていることから(Dassonville et al., 1995; Miller, 1996; Schlag & Schlag-Rey, 1995)、この結果は再現性、一般性が高く、信頼に足りると考えられる。結論として「サッカード実行時に瞬間提示された光点の誤定位や phantom array の知覚が起こる原因は眼球位置情報の時間特性に原因がある」という Discrete-EPS 仮説の主張は心理実験のデータと一致しない。

一方、サッカード実行直前のみフリッカーを提示しても、やはり phantom array が知覚されることはない(表II.1)。したがって、サッカード進行方向への phantom array が知覚されない原因は、単に「前後に提示された刺激による抑制される」からではない。ではなぜ定位テストにおいてサッカード直前に誤定位は徐々に大きくなったにもかかわらず、方向判断テストにおいて phantom array が知覚されなかったのだろうか。

ひとつの仮説として、ヒトの視覚系が「網膜上の一点に持続的に提示されている刺激に対しては、サッカード直前に EPS が変化しても位置の表現を更新しない」という可能性が考えられる。この仮説はサッカード直前に瞬間提示された刺激が誤定位されるにも関わらず、日常的な事態で視野が安定していることも自然に説明できる。一般に、網膜上の1点で点滅する光点が「点滅している」と知覚できる上限は数十 Hz であり、その上限を超えると持続的に提示されている光点と区別することはできなくなる²⁾。今回の実験や Hershberger (1987), Hershberger and Jordan (1992) の実験で用いた 200Hz という刺激はこの上限を大幅に上回っており、視覚系にとっては 80 msec の持続的な光点が提示されていたに等しい。したがって、持続的に提示されている刺激に対して位置の表現が更新されないならば、サッカード直前に提示されたフリッカーは phantom array として知覚されないと予想される。

もうひとつの可能性として、「刺激の提示間隔 (interstimulus interval: ISI) が短い場合は、刺激の位置関係がその網膜上の位置関係に基づいて知覚される」という仮説も考えられる。この仮説によると、サッカード直前に提示されたフリッカーが phantom array として知覚されないのは、単に ISI が短いためであると説明される。先の仮説との違いは「網膜上の一点に光点が提示される」という条件、そして「持続的に提示されている刺激に対しては位置の表現が更新されない」という仮定が phantom array の抑制に必要な条件か否かという点にある。この点について検証するために、複数の刺激が網膜の異なる位置に短い ISI で連続提示された場合を想定してみよう。先の仮説のように網膜上の一点が刺激されることが重要ならば、各刺激は単独瞬間提示された刺激に対する誤定位に従って定位されると予想

²⁾この点滅する光点を「点滅している」と知覚できる上限の周波数を Critical Fusional Frequency (CFF) という。CFF 以上の周波数で点滅する光点は、持続的な光点として知覚される。詳しくは IV.2.2 節および付録 B を参照。

される。それに対して ISI の長さが鍵であるならば、各刺激の知覚される位置関係は網膜上の位置関係に等しくなるであろう。

この問題について、Matin et al. (1970) はサッカード直前に 300~350 msec の ISI で2つの光点を網膜上の異なる位置に連続提示し、両者の位置関係を判断させた。その結果、両者の位置関係は単独瞬間提示された刺激の誤定位から予想されるとおりに誤って知覚された。したがって、ISI が 300~350 msec あれば網膜上の異なる位置に提示された刺激の位置関係が、網膜上の位置関係のみに基づいて判断されることはいえる。しかし、phantom array の研究では 300 msec よりはるかに短い ISI が用いられており、Matin らの結果をそのまま phantom array の問題に適用できるかどうかは疑問である。そこで、より短い ISI で連続提示された刺激の位置関係がどのように知覚されるかを検討する実験をおこなった。

II.3 継時的に提示された二点の位置関係の知覚

II.3.1 方法

HK、HS、MM、TN の4名の男性が実験に参加した。いずれの被験者も眼鏡によって正常な視力に矯正した。実験に入る前に、HK と TN が図II.3のような誤定位を示すことを、予備実験で確かめた。

実験装置の基本構成は II.2 節のものと同様だが、LED の配置が変更された。この実験では、1個の赤 LED、2個の緑 LED、6個の黄 LED を、被験者から 57 cm の距離に図II.4のように配置した。右の緑 LED は試行開始時の固視点 (F)、左の緑 LED はサッカードの目標点 (T) である。赤 LED を S1、黄 LED を S2 とする。被験者の課題は、S2 が S1 の左右どちら側に提示されたかを判断することである。実験は「Long-ISI 条件」「Short-ISI 条件」の2条件で構成されている。

Short-ISI 条件 各試行の最初にブザー (20 Hz, 20 msec) を鳴らし、同時に F と T を点灯した。1秒後に T を消灯し、さらに 500~1250 msec 後に F を消灯して再びブザーを鳴らした。被験者は F を固視しつつ T の位置を記憶し、F の消灯後できるだけ早く T の位置へサッカードを行った。この被験者のサッカードにあわせて S1 を 2 msec 点灯し、さらに 78 msec の間隔において S2 を 2 msec 点灯した。被験者の課題は、S1 に対して S2 が左側に見えたか、右側に見えたかを、キーボックスのそれぞれ左右のボタンを押して報告することである。被験者がどちらかのボタンを押したところでその試行は終了とし、次の試行開始まで2秒間の休憩を挿入した。1セッションにつき48試行を連続しておこなった。

S2 提示時刻とサッカード開始時刻の差の効果を調べるため、S2 がサッカード開始 120 ~ 30 msec 前に提示された試行と、30 ~ 0 msec 前に提示された試行を選別した。すべての S2

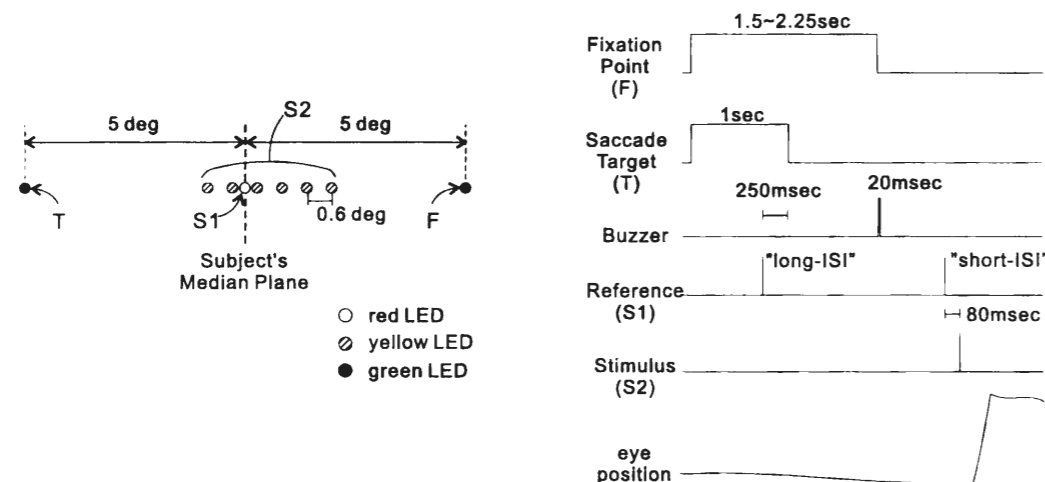


図 II.4: 実験に用いた刺激。左図: 刺激の配置。右図: 刺激定時のシーケンス。

提示位置について、それぞれのタイミング毎に最低 10 試行のデータが集まるまで実験を繰り返した。実験の最後に、統制条件として、刺激はまったく同一だが被験者がサッカードをおこなわずに F の位置を固視し続けるという条件を設定した。

Long-ISI 条件 Long-ISI 条件の目的は、S1 と S2 の ISI が長いときは Matin et al. (1970) の結果と一致するか否かを確認することである。実験手続は、S1 が T の消灯の 250 msec 前に点灯される点を除いて Short-ISI 条件と同一である。

II.3.2 結果と考察

各条件、S2 提示タイミングごとに、Probit 解析を用いて S2 が S1 の右 (左) と回答する確率が 50% となる S2 の位置 (主観的等価点:PSE) を計算した。図 II.5 は全被験者の PSE の平均を示している。二元配置の分散分析を用いて ISI の効果と S2 提示タイミングの効果を検定したところ、ISI の主効果 ($F(1, 18) = 8.79, p < 0.01$) と交互作用 ($F(2, 18) = 5.18, p < 0.05$) が有意であった。下位検定をおこなった結果、long-ISI 条件で S2 が 30 ~ 0 msec 前に提示されたときの PSE が、他のすべての条件における PSE と有意に異なっていた ($p < 0.05$)。それ以外のすべての組み合わせの差は有意ではなかった。

図 II.3 に示したような、刺激が単独で瞬間提示された場合の誤定位の結果に基づいて考えれば、S2 がサッカード開始 30 ~ 0 msec 前に提示されたときには、S2 の知覚される位置は左 (サッカード進行方向) に偏位するはずである。したがって、PSE は右へ偏位すると期待される。Long-ISI 条件の結果はこの期待と一致しているが、Short-ISI 条件では PSE がほと

んど偏位していない。「78 msec の ISI が短すぎて、その間に誤定位の大きさがあまり変化しなかったのではないか」という可能性は、Long-ISI 条件で S2 が 120 ~ 30 msec 前に提示された試行と 30 ~ 0 msec 前に提示された試行で PSE が有意に異なるという結果から否定できる。

以上の結果から、S1 と S2 の位置関係の判断は S1 と S2 の ISI に依存することが明らかとなった。ISI が 78 msec のときには、S1 と S2 の位置関係はほぼ網膜上の位置関係に従って判断され、眼球運動の影響は見られなかった。phantom array が知覚されないためには網膜上の同じ位置が刺激されることが不可欠な条件ではなく、刺激提示の ISI が重要な役割を果たしていると考えられる。

II.4 考察

II.3 節の実験より、サッカード実行時に複数の光点を連続的に瞬間提示したとき、各光点の ISI が短ければ、各光点の位置関係は網膜上のそれに基づいて知覚されることが示唆された。したがって、サッカード進行方向への phantom array が知覚されない理由は、眼球位置情報の時間特性によるものではなく、網膜への光刺激の時間特性によると考えられる。phantom array の知覚それ自体は、Discrete-EPS 仮説を支持するものでも、Damped-EPS 仮説の反証となるものでもない。

phantom array の知覚について理解を深めるためには、どのような条件のときに網膜上の刺激の位置関係に基づいた知覚が成立するのかを議論する必要がある。そこで、記述を簡潔にするために新しい用語を導入しよう。通常、一般化相殺説のように、観察者を基準として物体の位置を定位することを "egocentric" な定位という。これに対して、網膜上の像の位置関係を用いて物体の位置を定位することを "exocentric" な定位という (Dassonville et al., 1995)。眼球位置情報などに誤りがない場合は、理論的にこれらの定位方法は同じ結果を与える。この用語を用いると、我々の議論は「どのような条件のときに exocentric な定位が成立するのか」ということになる。サッカード実行前に瞬間提示された光点の exocentric な定位については、本研究以前にも Honda や Dassonville らが検討している (Dassonville et al., 1995; Honda, 1993, 1999)。Honda は、日本地図 (Honda, 1993) や枠 (Honda, 1999) のような背景刺激が試行中ずっと知覚できる実験状態で、サッカード実行前後に光点を単独で瞬間提示したときの誤定位を測定し、暗室下で得られた誤定位と比較した。その結果、このような背景刺激がある条件では誤定位が小さくなった (Honda, 1993, 1999)。また、Dassonville et al. (1995) は、試行開始から光点を瞬間提示するまでサッカードの目標点を提示しつづけた条件、II.2 節の定位テストのように目標点を直ちに消灯した条件、サッカード目標点や固視点を提示しない条件における誤定位の大きさを比較した。実験結果は、サッカード目標点

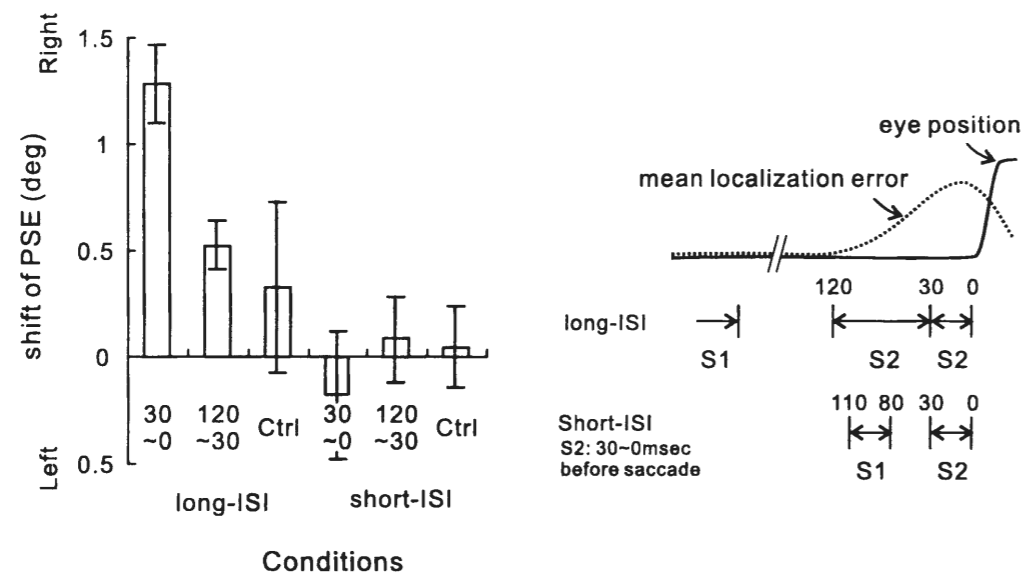


図 II.5: 各条件における主観的等価点 (PSE)。30 ~ 0: S2 がサッカード開始 30 ~ 0 msec 前に提示された試行の結果。120 ~ 30: S2 がサッカード開始 120 ~ 30 msec 前に提示された試行の結果。Ctrl: 統制条件。エラーバーは標準誤差を示している。

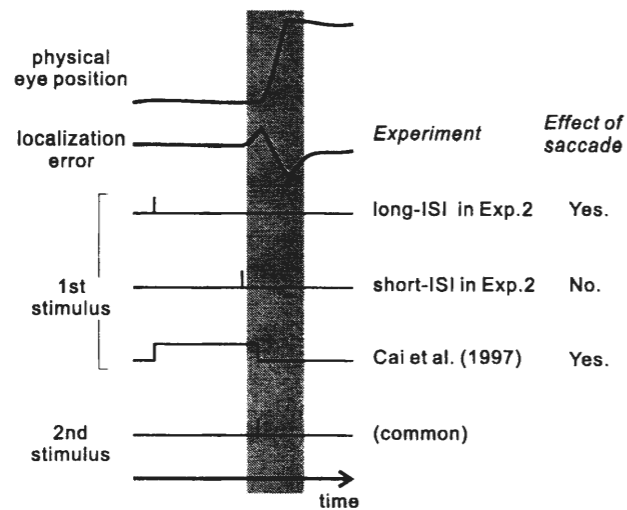


図 II.6: II.3 節の long-ISI 条件、short-ISI 条件と Cai et al. (1997) の実験における刺激の比較。灰色の領域は、サッカード実行時に光点を単独提示した場合、誤った位置に定位される時間帯を示している。"Effect of Saccade" は、サッカード実行に伴う誤定位から予測される PSE の変化が見られたか否かを示している。

などを提示しないよりは提示されている方が、さらにサッカード目標点が長く提示されている方が誤定位は小さいというものであった。これらの結果は、いずれも exocentric な定位が可能になることによって誤定位の大きさが小さくなることを示唆している。だが、ここで注意する必要があるのは、これらの実験ではいずれも exocentric な定位の手がかりを与えた刺激 (日本地図、枠やサッカード目標点) と、瞬間提示された光点の ISI がゼロであるという点である。II.3 節で考察したように、ISI の短さが exocentric な定位をおこなう十分条件であるならば、Honda や Dassonville らの条件では誤定位はなくならなければならない。したがって、ISI の短さは exocentric な定位を促す条件のひとつにすぎず、十分条件ではないことになる。

では、ISI 以外にどのような要因が exocentric な定位の使用に関与しているのだろうか。この問題を考える上で、Cai et al. (1997) が興味深い実験結果を報告している。彼らは II.3 節の実験と同様に、基準となる刺激に対して、サッカード直前に瞬間提示された刺激が左右どちら側に提示されたかを被験者に判断させた。彼らの実験と II.3 節の実験の違いは、II.3 節の実験で S1 にあたる刺激が、S2 にあたる刺激を消灯するまで提示され続けていた点 (すなわち S1 と S2 の ISI はゼロ) である。Cai らの実験結果は、S2 にあたる刺激がサッカード開始 0~100 msec 前に提示されたとき、PSE は単独瞬間提示された光点の誤定位から予測される方向へ偏位するというものであった。この結果はやはり、ISI が短ければ光点は exocentric に定位されるという II.3 節の考察と矛盾する。

さいわい Cai らの実験で用いられた刺激や課題は II.3 節の実験とある程度共通しているので³⁾、両者を比較することが出来る。long-ISI 条件、short-ISI 条件および Cai らの実験刺激の違いをまとめたものを図 II.6 に示す。図が示すように、long-ISI 条件、short-ISI 条件と Cai らの実験刺激の違いは第 1 刺激にある。"Effect of Saccade" という欄は、それぞれの第 1 刺激が用いられたときに、PSE がサッカード実行の影響を受けて変化したか否かを示している。このように比較すると、第 1、第 2 刺激間の SOA (stimulus onset asynchrony) が短いことも exocentric な定位を促す条件であることがわかる。直感的に、第 1 刺激の提示時間が関与している可能性が考えられるだろうが、short-ISI 条件と Cai らの実験の結果が定性的に等しいので、この比較では提示時間の関与の有無は検証できない。刺激の提示時間の関与の有無を確認するためには、刺激の提示時間、刺激間の ISI、SOA を統制して、これらのパラメータが瞬間提示された刺激の誤定位に及ぼす影響を定量的に検証する必要があるだろう。

³⁾ 主な相違点は、1) 被験者が要求されたサッカードの振幅が 4 度であること、2) S1 に相当する刺激が F から 6 度離れた位置にあることの 2 点である。F を固視している状態では、S1 が T より視野周辺側にくることになる。

第III章 exocentricな定位とISI¹⁾

III.1 サッカーと exocentric な定位

第II章の実験で、サッカー実行直前に複数の光点が短いISIおよびSOAで瞬間提示された場合、各光点はexocentricに定位されることが示された。ところが、サッカーの運動特性を考えると、exocentricな定位は以下のような疑問を引き起こす。

1. 各光点のISIの間にサッカーが実行されると、光点の位置はどのように知覚されるのか。II.3節で用いられた78 msecというISIは、10度近い振幅のサッカーを実行するのに十分な長さである。
2. 「短いISI」とは具体的に何 msec 程度なのか。

第1の疑問は「サッカー前後の網膜像の情報がどのように統合されるか」という問題の特別な場合である。各光点のISIにサッカーがおこなわれると、光点の物理的な位置関係と網膜像の位置関係が矛盾してしまうため、exocentricな定位を用いると混乱の原因となる。このような混乱を避けるために、視覚系はISI中にサッカーがおこなわれるとexocentricな定位を使用しない機構を持っているのだろうか。それとも、サッカー実行にもかかわらずexocentricな定位を用いてしまい、結果として何らかの錯視を起こすのだろうか。これに関連して第2の疑問、すなわち「短いISI」が具体的に何 msec 程度なのかという点が非常に重要である。このISIがサッカーの持続時間とほぼ同じ程度の長さしかないならば、サッ

¹⁾本章の内容は、Sogo, H., Osaka, N. (submitted) Effects of interstimulus interval on egocentric and exocentric localization of perisaccadic flashes. を元に加筆したものである。

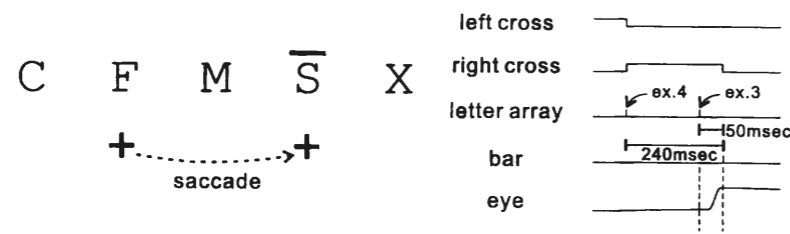


図 III.1: Irwin et al. (1988) の実験。被験者は左の十字から右の十字の位置へ向かってサッカードをおこなう。実験 3 ではサッカード開始の約 10 msec 前に、実験 4 では右の十字の提示と同時にアルファベット 5 文字の列を 10 msec 提示する。被験者のサッカード開始 40 msec 後に、いずれかのアルファベットの上に横線を 50 msec 提示する。被験者は、横線がどの文字の上に提示されたかを報告する。

カードをまたいで exocentric な定位の使用を禁止する機構がなくても、実質的に問題となることはないのかも知れない。

Irwin et al. (1988) は、これらの疑問にある程度の回答を与えている。この研究で彼らはサッカードと視覚的マスキングの関係を検討するためにいくつかの実験を行なったのだが、その実験 3 と実験 4 において、サッカード開始前後に刺激を連続的に提示したときに知覚される刺激の位置関係を扱っている。これらの実験の概要を図 III.1 に示す。いずれの実験でも、被験者は左の十字を固視し、右の十字が提示されたらその位置へ向かってただちにサッカードを行なう。実験 3 ではサッカード開始およそ 10 msec 前、実験 4 では右の十字の提示と同時にアルファベット 5 文字を横一列に 10 msec 提示する。そしてサッカード終了 40 msec 後に、いずれかの文字の上に横線を 50 msec 提示する。サッカードの潜時はおよそ 200 msec であったので (Irwin et al., 1988)、文字列と横線の ISI は実験 3 でおよそ 50 msec 弱、実験 4 で 240 msec 弱であったことになる。以上のような刺激を提示して、被験者に「横線がどの文字の上に提示されたか」を報告させた結果、実験 3 では横線は実際の位置より 2 文字分左にずれた位置に知覚されることが明らかになった。これは、文字列と横線の位置関係が exocentric に定位されたことを意味している (サッカードは右向きで 2 文字分の振幅であることを注意)。一方、実験 4 では横線と文字列の位置関係は正しく知覚された。これらの結果から、我々の第 1 の疑問については、刺激提示の ISI の間にサッカードが起こっても各刺激は exocentric に定位されることがわかる。第 2 の疑問については、約 240 msec の ISI があれば exocentric な定位は用いられないことがわかる。

Irwin らの実験は非常に興味深いものだが、いくつかの問題がある。まず、「5 つの文字のうちいずれの上に横線が提示されたか」という報告方法は、横線がある文字の真上からわずかにずれているように見えるといった微妙な現象を捉えることができない。したがって、

この方法では横線がはっきりと報告された文字の真上に知覚されていたのかどうか疑問が残る。実際、Irwin et al. (1988) のデータによると、実験 3 において被験者は 20~50% 近い試行で網膜上で横線とずれた位置に提示された文字を報告している。また、時間的な精度の面でも問題がある。サッカード前に提示される文字列がサッカード開始の「合図」(右の十字の提示) に対して決定されるのに対して、サッカード後の横線の提示は「サッカード終了」に対して決定されている。ところがサッカードの潜時は毎回変わるので、結果として文字列と横線の ISI も試行ごとに異なることになる。そのため「約 240 msec の ISI」という曖昧な表現しかできない。加えて ISI が約 50 msec と約 240 msec の 2 通りしかない点も不満が残る。最後に決定的な問題として、実際に被験者は文字列と横線が「どこ」に提示されたように知覚しているのかという疑問が挙げられる。サッカード実行前後に提示された刺激が exocentric に定位されるならば、当然刺激の物理的な位置関係と知覚された位置関係は矛盾しているはずである。すなわち、サッカード実行前の刺激と後の刺激の、少なくともいずれか一方は、大きく誤った位置に定位されていなければならない。単独で刺激を提示した場合と比較して、サッカード実行前後のどちらの刺激が、どちらの方向へどれだけずれて定位されているのだろうか。これは非常に重要な問題であるにもかかわらず、Irwin らの方法ではまったく分析することができない。したがって、我々はさきほどに挙げた疑問のリストに第 3 の疑問を書き加えなければならない。

3. 光点の物理的な位置関係と網膜上の位置関係が矛盾し、なおかつ ISI が短い場合、個々の光点はどの位置に定位されるのか。

第 III 章では、サッカード実行前後に一定の ISI で 2 つの刺激を提示し、その位置を直接報告させるという方法でこれらの疑問を実験的に検証する。この方法は、Irwin らの方法に比べて ISI を厳密に統制可能であり、刺激同士の位置関係の微妙なずれに対して敏感である。また、これらの刺激が実際にどの位置に定位されているのかという点も直接検討することが出来る。

III.2 継時的に提示された二点の位置の報告

III.2.1 方法

HS、MM、TN の 3 名の男性が実験に参加した。いずれの被験者も眼鏡によって正常な視力に矯正した。

実験装置の基本構成は、II.2 節で用いたものと同様だが、刺激の配置が変更された。図 III.2 は、この実験に用いた刺激の配置を示している。S1 は常に上下の対になっている 2 個

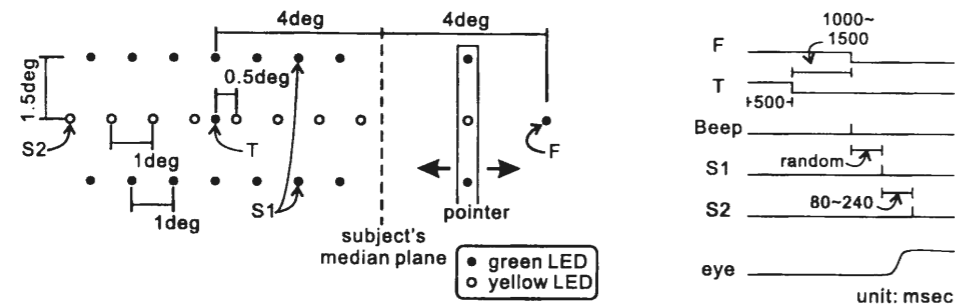


図 III.2: 実験に用いた刺激。左図: 刺激の配置。右図: 刺激定時のシーケンス。

の緑 LED が組で提示されるため、提示位置は 1、2、3、4、5、6、7 度の 7 通りである。また、ポインタには緑 LED 2 個と黄 LED 1 個が取り付けられている。

Double-flash 条件 実験は暗室でおこなった。各セッションの最初に、被験者はポインタを被験者の正面を 0 度として右へ 15 度以上動かしてから、キーボックスのボタンを押した。これは、ポインタが被験者正面にあると、刺激提示中にポインタに遮られて刺激が見えなくなるという問題を避けるためである。各試行の最初に、ブザー (2000 Hz、20 msec) とともに F と T を点灯した。F と T の点灯から 500 msec 後に T を消灯し、さらに T の消灯から 1000 ~ 1500 msec 後に F を消灯してブザーを鳴らした。被験者は F が消灯されるまで F の位置を固視し、F の消灯後ただちに T の位置へ向かってサッカードを行なった。これらの刺激に加えて、S1 と S2 をそれぞれ 2 msec づつ提示した。S1 と S2 の場所は各試行毎に無作為に変更し、S1 と S2 の ISI は各セッション毎に 80、120、160、200、240 msec のいずれかに固定した。S1 と S2 の点灯時刻は、S1 か S2 のいずれかが被験者のサッカード開始前後付近になるように調節した。被験者の課題は、S1 と S2 の位置を覚えておき、ポインタを用いてその位置を報告することである。試行開始から 3 sec 後、まずポインタ先端の緑か黄の LED のどちらかが点灯し、被験者はポインタの LED と同じ色の刺激、すなわち緑が点灯した場合は S1、黄が点灯した場合は S2 の位置へポインタを移動させてキーボックスのボタンを押した。続いて点灯しているポインタの LED がもう一方の色に切り替わり、被験者はその色に対応する刺激の位置へポインタを移動させてボタンを押した。S1 と S2 の位置を指示し終えた後、ポインタの LED はすべて消灯した。以上の手続きが 1 試行である。この後、被験者がポインタを右へ 15 度以上移動させると、自動的に次の試行が開始した。40 試行を連続して実施し、ひとつのセッションとした。被験者の疲労を防ぐため、1 日の実験は被験者一人あたり 6 セッション以下とした。いずれの被験者も、実験第 1 日めの試行は練習試行として分析には用いなかった。実験は、すべての ISI 条件について十分なデータが集まるま

で繰り返した。データが集まるまで、各被験者について約 2 週間を要した。

Single-flash 条件 刺激、手続きとも基本的に Double-flash 条件と同一である。ただし、Single-flash 条件では、ひとつの試行では S1 か S2 のいずれか一方しか点灯せず、ポインタの LED も提示された刺激に対応するもののみが点灯した。S1 と S2 のいずれの刺激が点灯するかは、試行毎に無作為に変更した。

III.2.2 結果

サッカード開始時刻の決定方法は、II.2 節と同様である。サッカードの潜時が 350 msec 以上の試行、被験者が右方向へサッカードを行なった試行、S2 の提示前に 2 回以上サッカードを行なった試行、および S1、S2 のいずれかを見落とした試行は分析から除外した。表 III.1 は、これらの基準をクリアして分析の対象となったサッカードの振幅、持続時間及び潜時を示している。各条件ごとに平均振幅が最大で約 3 度異なっているが、これは以後の分析において望ましいものではない。というのも、サッカードの振幅と誤定位の大きさにはある程度関連があることが知られているからである²⁾。約 3 度の振幅差が誤定位の大きさに影響を与えた可能性は否定できないが、後述のとおり、結果的に exocentric な定位の使用と ISI の関係を示す有効なデータが得られた。

図 III.3 は、single flash 条件における誤定位の時間特性を示している。従来の報告と同様の誤定位が起こっていることがわかる (Honda, 1990, 1991; Mateeff, 1978)。刺激として S1 が提示されたときと S2 が提示されたときの誤定位の分布に違いがないことを確認するため、刺激提示タイミングと刺激の種類を 2 元配置の分散分析で検定した。結果は表 III.2 に示したように、刺激提示タイミングの効果のみが有意で、刺激の種類効果および両者の交互作用は有意ではなかった。

これら single-flash 条件の結果をもとに、double-flash 条件の結果を分析する。まずデータの傾向を把握するために、図 III.4 に被験者 HS、ISI = 120 msec のときの S1、S2 の誤定位の時間特性を示す。上下のグラフの実線はそれぞれ S1、S2 に対する誤定位の大きさを示しており、破線は single-flash 条件における誤定位の大きさを示している。この図より、刺激とサッカード開始時刻の差がおよそ -40 ~ 120 msec のときには、single-flash 条件と比較して、S1 はより左、S2 は右へ定位されていることがわかる。この節における分析の目的は、これらの条件間の差が exocentric な定位の使用によるものであるか、統計的に有意なものであるかを検討することである。図 III.4 のようなデータ表示は、実際に被験者が S1、S2 をど

²⁾Sogo (1998) は 5 度、10 度、15 度のサッカードの実行前後に光点を単独で瞬間提示したときの誤定位の大きさを比較している。その結果、振幅が大きくなるにつれて誤定位も大きくなる傾向が見られたものの、両者の関係は I.3.2 節で述べたような単純な線形モデルで予想できるものではなかった。

表 III.1: 分析の対象となったサッカードの振幅、持続時間および潜時。

condition (ISI)		HS	MM	TN
80	A	9.7 (3.6)	7.0 (1.5)	7.9 (3.1)
	D	47.4 (12.5)	37.3 (6.8)	40.0 (12.0)
	L	214.6 (25.5)	181.4 (23.8)	199.2 (21.0)
120	A	7.8 (2.0)	7.2 (1.2)	8.5 (2.3)
	D	43.2 (9.5)	37.0 (6.7)	41.9 (10.0)
	L	221.4 (27.5)	171.7 (17.6)	188.1 (20.3)
160	A	8.8 (3.3)	7.2 (1.2)	7.5 (2.2)
	D	47.7 (15.2)	36.4 (6.8)	39.1 (9.7)
	L	209.2 (23.3)	190.0 (33.0)	209.8 (35.3)
200	A	9.1 (2.0)	6.1 (1.9)	9.2 (2.6)
	D	46.1 (9.6)	34.1 (7.5)	43.0 (10.0)
	L	234.7 (27.5)	172.3 (22.6)	181.8 (29.5)
240	A	7.8 (2.5)	7.21 (1.5)	7.2 (1.6)
	D	45.1 (9.8)	38.9 (7.8)	39.7 (8.2)
	L	232.3 (28.5)	191.0 (24.7)	210.0 (34.0)
single flash	A	8.0 (4.5)	7.4 (1.4)	10.7 (3.1)
	D	51.5 (9.9)	36.5 (5.9)	51.7 (11.8)
	L	224.7 (42.6)	191.5 (38.1)	187.7 (27.9)

A=振幅 (deg)、D=持続時間 (msec)、L=潜時 (msec)。括弧内は標準偏差。

表 III.2: single flash 条件における誤定位の大きさに対する刺激の種類および提示タイミングの効果

subject	timing	stimulus	timing × stimulus
HS	$F(14, 260) = 24.06^*$	$F(1, 260) = 0.10$	$F(14, 260) = 1.43$
MM	$F(12, 236) = 20.63^*$	$F(1, 236) = 1.69$	$F(12, 236) = 0.56$
TN	$F(13, 235) = 22.81^*$	$F(1, 235) = 0.02$	$F(13, 235) = 0.62$

timing: 刺激提示とサッカード開始の時間差の効果。

stimulus: 刺激の種類 (S1/S2) の効果。

time × stimulus: timing と stimulus の交互作用。

*: $p < 0.01$

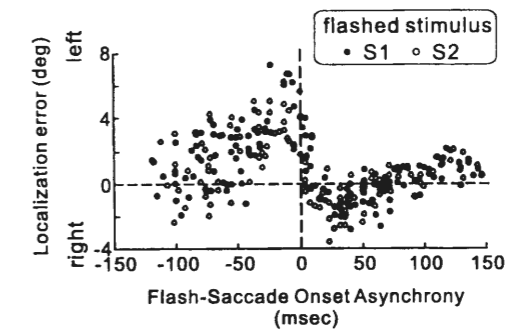


図 III.3: single flash 条件の結果。横軸はサッカード開始と S1(黒円) または S2(白円) 提示時刻の差。負の値は刺激がサッカード開始前に提示されたことを示している。縦軸は誤定位の大きさ。黒円と白円の分布がほぼ重なっていることから、以下の分析では刺激の違いによって被験者の反応に偏りはないものとする。表 III.2 も参照のこと。

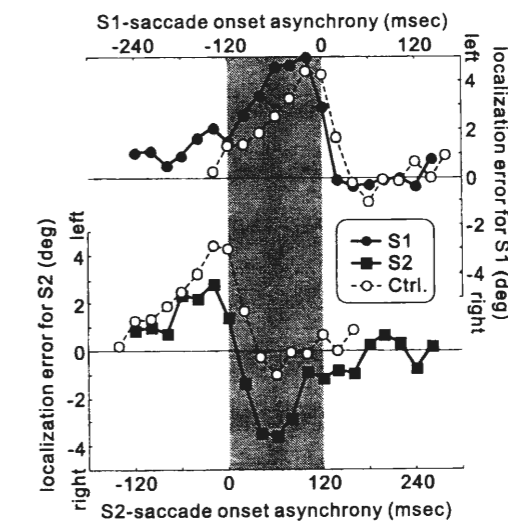


図 III.4: S1、S2 の誤定位の時間特性の例。被験者は HS、ISI は 120 msec。上のグラフの実線は S1、下のグラフの実線は S2 に対する誤定位の時間特性を示している。上下のグラフとも、破線は single-flash 条件の結果を示している。各グラフの横軸を、同一試行における S1、S2 とサッカード開始との時間差が縦に並ぶように 120 msec ずらして表示していることに注意。灰色の領域は、S1 がサッカード開始前、S2 がサッカード開始後に提示された時間帯を示している。

ここに定位したかを直感的に理解するには適しているが、分析の目的には適していない。例えば、サッカード実行前に S1、実行後に S2 が提示されたときに、exocentric な定位が用いられていれば、S1 と S2 に対する誤定位の和はサッカードの振幅に等しくなると予想される。この予想がデータに当てはまるかどうか、図 III.4 から読み取るのは困難である。

そこで、double-flash 条件において egocentric な定位と exocentric な定位がどのように用いられていたかを調べるため、 D 、 M という 2 つの指標を用いる。 D は被験者が報告した S1、S2 間の距離と実際の距離の差である。 M は被験者が報告した S1、S2 の中点と実際の中点の差である。具体的には、以下の式によって定義される。

$$D = (S_1^* - S_2^*) - (S_1 - S_2) \quad (\text{III.1})$$

$$M = \frac{S_1^* + S_2^*}{2} - \frac{S_1 + S_2}{2} \quad (\text{III.2})$$

ここで S_1 、 S_2 は S1、S2 が実際に提示された位置、 S_1^* 、 S_2^* は被験者が報告した S1、S2 の位置を示している。

D の時間特性は、理論的に予測可能である。まず、S1 と S2 が egocentric に定位される場合は、 D は single-flash 条件の結果から直接予想できる。すなわち、single-flash 条件において、サッカード開始時を基準として t msec 離れた時刻に刺激が提示されたときの誤定位の大きさを $\epsilon(t)$ と定義すると、 D は以下のように表現できる。

$$D = \epsilon(t_1) - \epsilon(t_2) \quad (\text{III.3})$$

ここで t_1 、 t_2 はそれぞれサッカード開始と S1、S2 の提示時刻の差を示している。図 III.5 の曲線 (A) は式 (III.3) の一例である。続いて、S1 と S2 の位置関係が exocentric に知覚される場合を考えよう。S1、S2 の両方がサッカード開始前、もしくはサッカード終了後に提示された場合は、S1、S2 の実際の位置関係と網膜上の位置関係は一致している。つまり、この場合は $D = 0$ となるはずである。一方、S1 の提示と S2 の提示の間にサッカードが行われた場合、両刺激の網膜上の位置関係は実際の位置関係とサッカード振幅の大きさだけ異なっている。したがって、 D の時間特性は台形状の曲線となると予想される。そして、この台形の幅は S1 と S2 の ISI に対応して変化すると考えられる。S1、S2 の網膜における像の位置を R_1 、 R_2 と定義すると、この曲線は以下のように表現できる。

$$D = (R_1 - R_2) - (S_1 - S_2) \quad (\text{III.4})$$

図 III.5 の曲線 (B) は式 (III.4) の一例を示している。

M の時間特性については、S1 と S2 の位置が egocentric に知覚される場合は以下の式で予想可能である。

$$M = \frac{\epsilon(t_1) + \epsilon(t_2)}{2} \quad (\text{III.5})$$

図 III.6A はこの曲線の一例を示している。一方、S1 と S2 の位置関係が exocentric に知覚される場合は、 M の時間特性を一意に予想することは出来ない。S1 と S2 の位置を知覚するプロセスについて何らかの仮定を付加する必要がある。ここでは 2 つの可能性について述べておこう。まず、S1 が single-flash 条件と同様に定位され、S2 が S1 に対して定位されると仮定する。計算を省略して³⁾結果のみ述べると

$$M = \frac{1}{2} \left((2(\epsilon(t_1) + E_1) + R_1 + R_2) - (S_1 + S_2) \right) \quad (\text{III.6})$$

となると予想出来る。ここで E_1 は S1 が提示されたときの実際の眼球位置を表している。図 III.6B はこの曲線の一例である。F が egocentric に定位され、S1、S2 共に F に対して定位される場合は、同様に結果のみ述べると

$$M = \frac{1}{2} \left((2E_F + R_1 + R_2) - (S_1 - S_2) \right) \quad (\text{III.7})$$

となる。ここで E_F は F を固視中の実際の眼球位置である。図 III.6C がこの式に対応する曲線である。

図 III.7 は double-flash 条件のデータを D について分析した結果を示している。太線は実験結果から計算した D の時間特性を 20 msec 区間で平均したものを示している。破線は S1、S2 が egocentric に定位されたときに予想される時間特性を示している。この曲線は single-flash 条件の結果から計算した。細線は S1 と S2 の位置関係が exocentric に知覚されたときに予想される時間特性を示しており、表 III.1 に示したサッカード振幅および持続時間から計算したものである。したがって、太線が破線と一致しているならば、S1 と S2 の位置は egocentric に定位されたと考えられる。細線と一致しているならば、S1 と S2 の位置知覚に exocentric な定位が用いられていたと考えられる。太線と破線の一致度を評価するために、両者の対応する時点の値の差を誤差の伝播法則⁴⁾と t 分布を用いて検討した。 t 分布の有効自由度の推定

³⁾S1 が egocentric に定位されると、 $S_1^* = E_1 + R_1$ である。S2 が S1 に対して exocentric に定位されるというのは、S1 の位置と両刺激の網膜における位置の差 ($R_2 - R_1$) を用いて定位するということである。したがって $S_2^* = E_1 + R_1 + (R_2 - R_1) = E_1 + R_2$ である。これらを式 (III.2) に代入すると M の時間特性が得られる。一般に、exocentric な定位によって知覚された刺激の位置は「exocentric な定位の基準となる刺激が提示されたときの眼球位置」+「刺激の網膜位置」となる。

⁴⁾調べたい量 $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ が直接測定不可能だが、 $\mathbf{Y} = f(\mathbf{X})$ の関係にある量 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ が測定可能であるとき、 \mathbf{X} の測定の信頼区間から \mathbf{Y} の信頼区間を推定する方法。なお、このような測定方法を間接測定という。

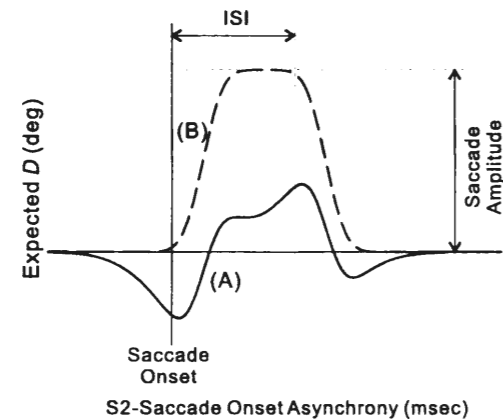


図 III.5: 予想される D の時間特性。横軸はサッカード開始と S2 提示時刻の差。S1、S2 ともに single flash 条件とまったく同様に定位された場合は、 D は式 (III.3) に従う (曲線 (A))。それに対して、S1 と S2 の位置関係が網膜上の位置関係に基づいて判断されると式 (III.4) に従う (曲線 (B))。

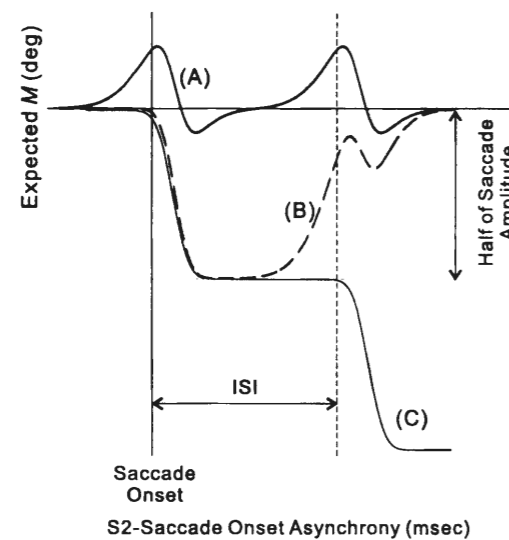


図 III.6: 予想される M の時間特性。S1、S2 ともに single flash 条件とまったく同様に定位された場合は、 M は式 (III.5) に従う (曲線 (A))。S2 が S1 に対して定位された場合は式 (III.6) に、F が egocentric に定位され、S1、S2 とも F に対して定位された場合には、式 (III.7) に従う (曲線 (B)、(C))。一般に、サッカード後に提示された刺激がサッカード前に提示された刺激に対して定位された場合は、 M はサッカードと反対方向 (すなわち 0 以下) へ偏位する。

には Welch-Satterthwaite の式を用いた (Taylor & Kuyatt, 1994)。太線上の大きな白円は、対応する時刻において 5%水準で太線と破線の値が有意に異なることを示している。この図より、ISI が 80 msec、120 msec のときには exocentric な定位が用いられていると考えられる。そして ISI が長くなるにつれて実験結果は egocentric な定位が用いられたときの予想に近くなり、ISI が 240 msec の時点ではほぼ egocentric な定位が用いられたときの予想と等しくなっていることがわかる。

続いて M について分析しよう。図 III.8 は、double-flash 条件のデータを M について分析した結果を示している。図 III.7 と同様に、太線は実験結果を、破線は S1 と S2 が egocentric に定位されたときに予想される時間特性を示している。細線は、S1 が egocentric に定位され S2 が S1 に対して定位されたときに予想される時間特性を示しており、図 III.6 の曲線 (B) に対応している。太線上の大きな白円は、対応する時刻において 5%水準で太線と破線の値が有意に異なることを示している。この図を見ると、今回検討したすべての ISI において、S1 と S2 が egocentric に定位されていたときに予想される曲線と実験結果はよく一致しているといえる。被験者 HS、ISI = 80 msec のときの結果はそれほどよく一致していないが、変動のパターンはやはり類似している。これらの結果は、すべての ISI において S1 と S2 は egocentric に定位されていたことを示唆しており、 D に関する分析と一致しないように見える。だが、ここで図 III.4 に示した S1 と S2 それぞれの誤定位の時間特性を思い出す必要がある。図 III.4 によると、single-flash 条件と比較して S1 は左、S2 は右へずれて定位されたのであった。S1 の定位された位置が single-flash 条件からずれた量と、S2 がずれた量が等しかったと仮定すると、 M を計算するときこれらのずれは相殺され、結果として M の時間特性は S1、S2 がともに egocentric に定位されたときに予想される時間特性と一致する⁵⁾。結論として、本実験の刺激は、図 III.6 の曲線 (B) (C) を求めたときに仮定したように、F や S1 などの先行する刺激が egocentric に定位され、他の刺激はそれを基準に exocentric に定位されていたのではない。先に提示された刺激 (S1) の知覚される位置が、それに続く刺激 (S2) が提示されることによって変化したのである。

III.3 考察

exocentric な定位とサッカードの関係について、この章の最初に以下の 3 つの疑問をかけた。

1. 各光点の ISI の間にサッカードが実行されると、光点の位置はどのように知覚される

⁵⁾厳密には、S1 と S2 の single-flash 条件からの「ずれ」が常に等しければ、 D は式 (III.4) と一致しない。したがって、S1 と S2 の「ずれ」の大きさもまたサッカード開始と S1、S2 の提示タイミングにしたがって変化していると考えられる。この点については、今後の検討の課題である。

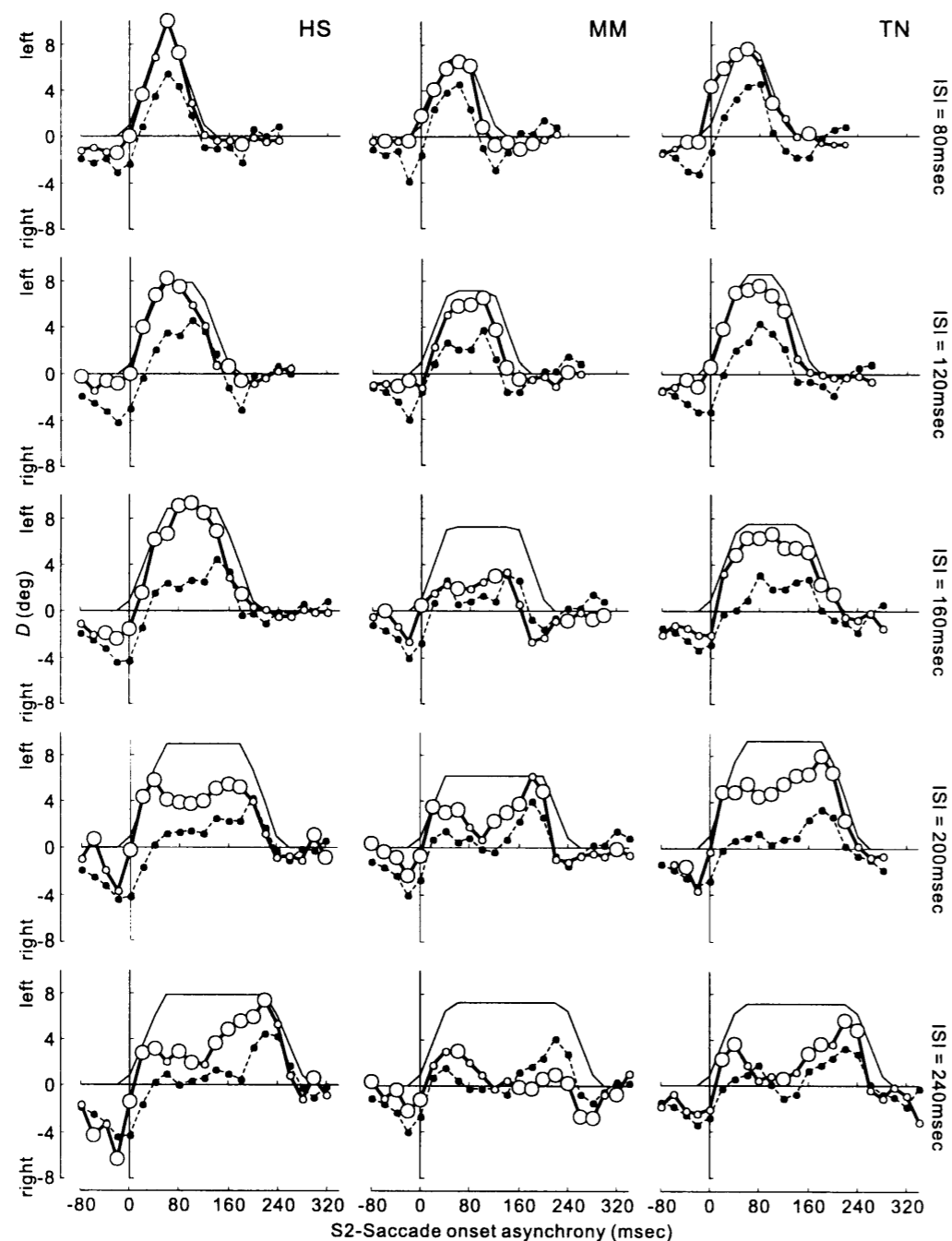


図 III.7: 実験で得られた D の時間特性。破線は S1、S2 が single-flash 条件と同様に定位されたときに予想される時間特性 (式 (III.3))。細線は S1 と S2 の位置関係が網膜上の位置関係に基づいて判断されたときに予想される時間特性 (式 (III.4))。太線は実験データから計算した D の時間特性。大きな白円は、対応する時刻において太線と破線の差が有意であったことを示している (t -test, $p < .05$)。

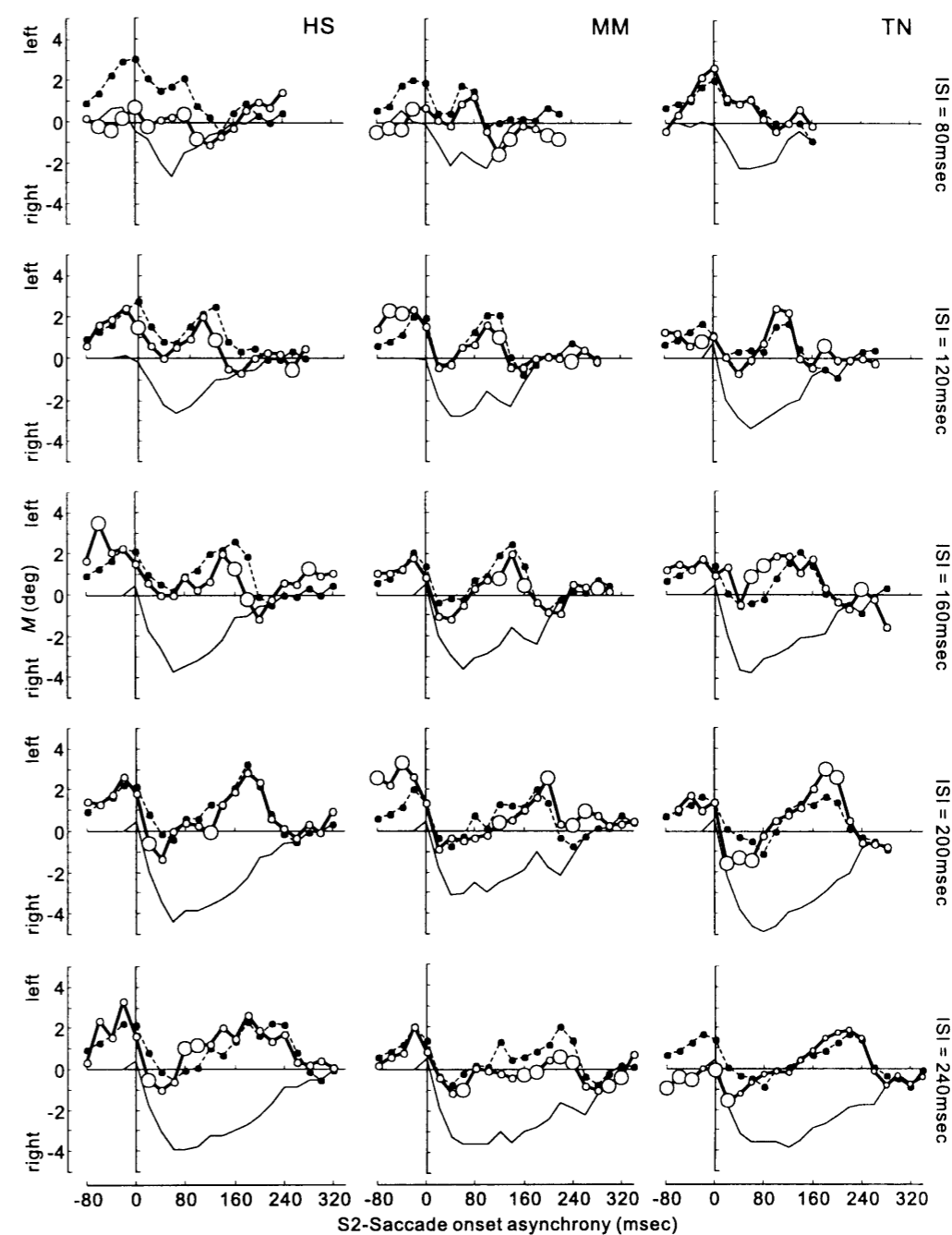


図 III.8: 実験で得られた M の時間特性。破線は S1、S2 が single-flash 条件と同様に定位されたときに予想される時間特性 (式 (III.5))。細線は S2 の位置が S1 を基準に両者の網膜上の位置関係によって判断されたときに予想される時間特性 (式 (III.6))。太線は実験データから計算した M の時間特性。大きな白円は、対応する時刻において太線と破線の差が有意であったことを示している (t -test, $p < .05$)。

のか。

2. 「ISI が短ければ exocentric な定位がおこなわれる」というとき、短い ISI とは具体的に何 msec 程度なのか。
3. 光点の物理的な位置関係と網膜上の位置関係が矛盾し、なおかつ ISI が短い場合、個々の光点はどの位置に定位されるのか。

この章の実験によって、まず第 1、第 2 の疑問については、基本的に Irwin et al. (1988) の結果を追認する結果を得た。すなわち、光点の ISI の間にサッカードが実行された場合、各光点の位置関係は exocentric に知覚された。そして、ISI が 240 msec あれば、ほぼ exocentric な定位はおこなわれなかった。これに加えて今回の実験では、ISI を細かく統制し、被験者に S1 と S2 が知覚された位置を直接報告させたことによって、さらに以下のことが明らかになった。まず、ISI が 120 msec 以下ならば、S1、S2 間の距離判断の誤差 (D) がサッカードの振幅や持続時間とかなり正確に対応している。そして ISI が 120 msec より長くなると、exocentric な定位から次第に egocentric な定位に次第に移行していく。このような egocentric と exocentric な定位の中間的な結果が得られるという事実は、視覚系によるこれらの定位方法の使用は排他的なものではないことを示唆している (Dassonville et al., 1995)。恐らく、egocentric な定位と exocentric な定位の、ISI をパラメータとした重み付け平均によって、知覚される位置が決定されているのであろう。

今回の実験で特に重要な結果は、第 3 の疑問に関する点である。exocentric な定位は、複数の光点の位置関係を推定する上で非常に有効だが、それらの光点と被験者自身の位置関係については何の情報ももたらさない。光点が被験者自身から見てどちらに存在したかを知覚するためには、egocentric な定位がどうしても必要である。したがって、例えば S1 と S2 の ISI が短くて両者の位置関係が exocentric な定位から予想されるときでも、egocentric な定位が使用されているはずである。では、exocentric な定位が用いられるほどに ISI が短いときに、exocentric な定位と egocentric な定位はどのように統合されるのであろうか？ 素朴に考えれば、暗室で最初に提示された光点は exocentric な定位が使えないので egocentric に定位されるであろう。そして、それ以後に出現した光点は、前に提示された光点に対して exocentric に定位されるはずだ。ところが実験結果によると、S1 の定位される位置が、その後 S2 を提示することによって変化するというのである。このような時間的に逆引きの作用が起こる原因として、2 つの仮説が考えられる。

1. 視覚系が瞬間提示された光点の位置を推定するには一定の時間が必要で、ISI が短いときには S1 の位置を推定し終える前に S2 が提示される。そのため S2 の提示によって S1 の知覚される位置が変化する。

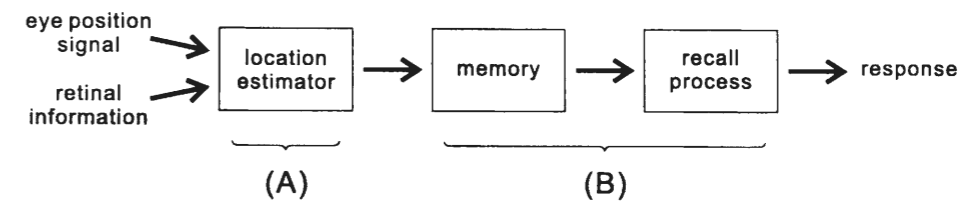


図 III.9: 瞬間提示された光点の位置を後で報告するためには、位置を推定してそれを保持しておかなければならない。S2 の提示が S1 の知覚される位置に影響を与えるのは、S1 の位置を推定する段階 (A) か、S1 の位置を保持し、報告する段階 (B) に S2 の情報が影響を与えるためだと考えられる。

2. S1 の位置は瞬時に推定されるが、それを保持、報告する段階で、S2 の提示による干渉を受ける。

図 III.9 は、両者の違いを図示したものである。本章のような実験では、図 III.9 の「記憶」や「報告」の過程が問題とされることは少ないのだが、すでに消灯された刺激の位置を報告するためには刺激の位置が記憶される必要がある。そして、原理的には、被験者が報告し終えるまでに得られた情報のすべてが被験者の報告に影響を与える。

これらの仮説のどちらが妥当であるのかを本章の実験結果から判断するのは困難だが、両者の違いは Damped-EPS および Discrete-EPS 仮説の背後にある議論の妥当性を考える上で非常に重要な意味を持っており、どうしてもここで議論しておく必要がある。第 I 章では敢えて明示的に述べなかったのだが、Damped-EPS、Discrete-EPS の両仮説は、重要な仮説を共有している。それは「任意の瞬間に式 (I.5)、 $E^* = (T^* - T) + E$ が成立する」というものである⁶⁾。ところが、第 II 章、および本章で示されたように、時間的に近接した視覚刺激の存在によって、瞬間提示された光点の知覚される位置は変化する。この事実は、瞬間提示された光点の前後に視覚刺激が存在する実験条件では、その光点に対する誤定位から眼球位置情報の誤差を推定することは不可能であることを意味している。この指摘に対して、「では、視覚刺激は瞬間提示する光点ひとつだけにして、試行開始時の固視点やサッカードの目標点も提示しなければ、純粋に眼球位置情報の誤差だけを取り出せるのではないか？」という反論があるかもしれない⁷⁾。この反論に返答するにあたって、図 III.9A と B に示した仮説のどちらを採用するかが決定的な意味を持つのである。仮に図 III.9B のように保持や

⁶⁾ 文で書き下せば、「瞬間提示された光点に対する誤定位から、その刺激が提示された瞬間の眼球位置情報の誤差を推定できる」と表現できる。

⁷⁾ このような立場から Miller (1996) は試行開始時の固視点などをすべて聴覚刺激で提示するという方法で実験をおこなっている。

報告の段階で干渉が起こるのであれば、刺激の位置を推定する過程自体は瞬間的に終了し、したがって式 (I.5) を用いて眼球位置情報の誤差を推定できる可能性は残されている。しかし、図 III.9A のように刺激の位置を推定する過程自体がある程度の時間を要し、その間に入力された情報が干渉しあうならば、式 (I.5) から刺激を提示した瞬間の眼球位置情報を推定できるという保証はない。早急に、実験的および理論的研究によって、図 III.9A と B のどちらの段階で干渉が起きているのかが明らかにされる必要があるだろう。

第 IV 章 総合考察

IV.1 相殺説再考

本論文では、まず第 I 章において、身体運動と対象運動の分離問題を導入し、その解決法として一般化相殺説を紹介した。続いて、一般化相殺説から Damped-EPS 仮説と Discrete-EPS 仮説という相反する 2 つの仮説が導かれることを述べた。この矛盾点をめぐって、第 II 章、III 章にてサッカード実行時に瞬間提示された複数の光点の定位を実験的に検討し、「exocentric な定位」というキーワードに到達した。IV.1 節では、なぜ一般化相殺説から Damped-EPS 仮説と Discrete-EPS 仮説という矛盾した仮説が導かれたのか、一般化相殺説の限界はどこにあるかという点を議論する。

IV.1.1 見過ごされた論点

一般化相殺説から Damped-EPS 仮説と Discrete-EPS 仮説という矛盾する仮説が導かれるという事実は、一般化相殺説それ自体が矛盾を含んでいるか、さもなくば一般化相殺説の適用を制限する条件が存在するはずである。その条件とはどのようなものだろうか？ 解答はすでに III.3 節で示唆されているのだが、本節ではさらに詳しく検討してみよう。

まず、眼球位置を E 、対象の位置を T 、対象の網膜位置を R とすると、これらの間には $T = R + E$ が成立するのであった (図 I.4、式 (I.1))。そして、一般化相殺説とは、視覚系における E 、 T 、 R の表現がそれぞれ E^* 、 T^* 、 R^* であるとき、 $T^* = R^* + E^*$ が成立するという主張であった (式 (I.2))。ここまでの議論には、何の問題もないように思える。しかし、この時点ですでに、一般化相殺説の是非を議論するうえで非常に重要な点が見過ごされてい

る。その事実は、以下の疑問に対して、一般化相殺説の立場からはどのように回答されるのかを考えてみれば明らかである。

1. 眼球位置情報 E^* 、網膜情報 R^* とは、具体的にどのようなものか。視覚系において、それらはどのように測定され、表現されるのだろうか。ここで「具体的に」というのは「眼球位置情報が外眼筋の Golgi 腱受容器¹⁾に由来する」などという物理的な実現の話ではなく、眼球位置情報にはどの程度の信頼性があるのか（ノイズを含むのか）といった性質についてである。
2. 式 (I.2) はどのように実現されるのか。実現にあたって原理的な困難は存在するのか。その場合、近似的にしか実現されないのか。そして、この計算は一撃計算²⁾可能なのか、何らかの繰り返し計算が必要なのか。

これらの疑問は、Damped-EPS、Discrete-EPS 仮説を導く途中で用いた式変形、すなわち

$$\left. \begin{array}{l} T = R + E \quad (\text{式 (I.1)}) \\ T^* = R^* + E^* \quad (\text{式 (I.2)}) \\ R^* = R \end{array} \right\} E^* \text{について解く} \rightarrow E^* = (T^* - T) + E \quad (\text{式 (I.5)})$$

という計算をすることが無条件に許されるのか、それとも特定の条件下でのみ許されるのかということを議論する上で本質的な問題である。それにもかかわらず、一般化相殺説はこれらの疑問に対して何の回答も与えない。したがって「 E^* 、 T^* 、 R^* を、無制限にこれらの式変形が可能な性質を持つものとして定義する」という考え方を、ひとつの立場として許容することになる。そして、この立場こそ、Damped-EPS および Discrete-EPS 仮説の前提となっているものなのである。

結局のところ、Damped-EPS、Discrete-EPS 仮説に共通するのは「 E^* 、 T^* 、 R^* について無制限な式変形が可能であるという立場を採用した上で、 E^* 、 T^* 、 R^* のその他の性質については実験データをして語らしめよう」という研究方法であると言える。このような方法は実験的研究で広く採用されているものであり、それ自体は特に問題はない。しかし、Damped-EPS 仮説と Discrete-EPS 仮説の対立のように、実験データによって矛盾した結論が導かれる場合は、やはり無制限な式変形を許したことに疑問を抱くべきである。一般化相殺説の式、 $T^* = R^* + E^*$ は果たしてどのような条件下で成立するのか、第I章ではまったく見過ごされていたこの論点に、われわれは立ち帰る必要があるだろう。

¹⁾筋線維が腱に移行する部分に存在する、筋の張力受容器。

²⁾解を得るにあたって、繰り返し計算を必要としないこと。

IV.1.2 一般化相殺説に対する結論

一般化相殺説の式 $T^* = R^* + E^*$ が適用可能な条件、そして、この式から得られた、誤定位から眼球位置情報を推定する式 $E^* = (T^* - T) + E$ が成立する条件とはどのようなものであろうか。その答えは、第II章、III章の実験結果から明らかである。光点が数十 msec 以上にわたって持続的に提示されているような条件、瞬間提示された光点の前後百数十 msec 以内に別の光刺激が存在するような条件において、誤定位から眼球位置情報を推定することには意味がない。このような条件では、眼球位置情報と網膜位置情報以外の要因が、光点の知覚される位置に影響を与えるからである。したがって、日常的な、すなわちサッカード実行前後にさまざまな対象が持続的に存在する状況において、「身体運動と対象運動が分離されていること」の説明として一般化相殺説は不十分であると結論せざるを得ない。

この結論は、もちろん眼球位置情報や網膜位置の情報が、対象の位置を知覚するとき用いられていることを否定するものではない。Holst の相殺説の説明 (I.2 節) で紹介したように、外眼筋の固有受容感覚や、efference copy から眼球位置情報を得て、それらを対象の位置の知覚に用いていることは確かだと考えられる。しかし、われわれはもはや「静止した光点を固視しているときに外眼筋に x 秒間の振動刺激を与えた結果、光点が y 度運動したように知覚された」という結果を得たとしても、その原因が「振動刺激によって眼球位置情報が y 度変化したためである」とは結論することは許されない。

IV.2 exocentric な定位を用いること

一般化相殺説に対して「判決」を下した今、サッカード実行前後に瞬間提示された複数の光点の位置がどのように知覚されているのか、そして「身体運動と対象運動の分離問題」がどのように解決されるのかを議論する必要がある。これらの問題のうち、特にサッカード実行前後に提示された光点の位置知覚について、われわれは第II章、III章を通じて「exocentric な定位」が重要な役割を果たすことを知った。IV.2 節では、exocentric な定位の使用、すなわち複数の対象の位置を知覚するにあたって、それらの位置関係を手がかりとして用いて対象の位置を記述する 2 つの方法について議論する。

IV.2.1 記号化された表現段階における exocentric な定位

「複数の対象の位置を、それらの位置関係に基づいて記述する」には、どのような方法があるだろうか。そして、「位置関係を手がかりに、対象の位置を推定する」方法についてはどうだろうか。自然に思いつくのは、「カップは机の上にある」「A 氏は B 氏の右に座っている」「黒い靴は下駄箱の中にある」といった表現であろう。このような表現を組み合わせ

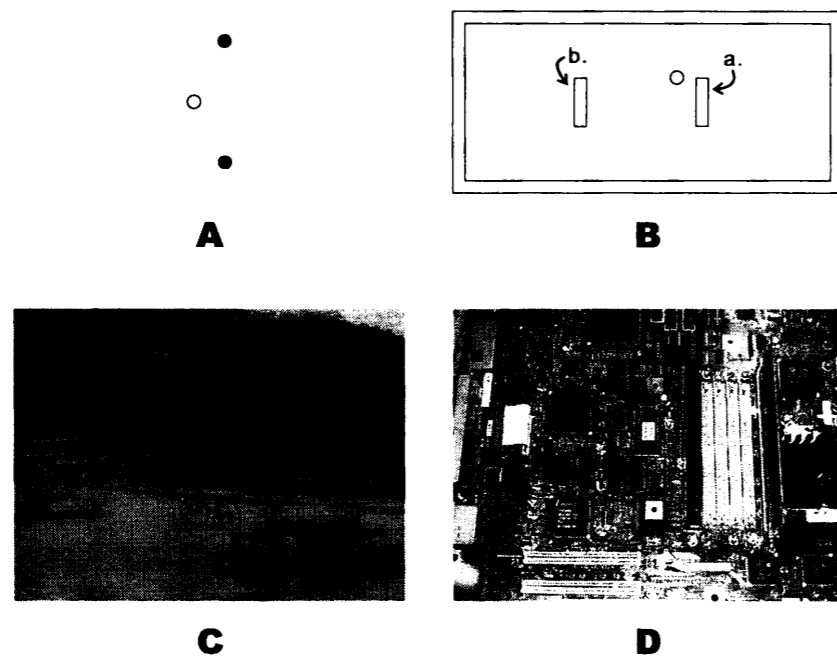


図 IV.1: 図 A: 第 II 章、III 章で用いてきた刺激。図 B: Honda (1999) の実験に用いられた刺激を一部改変したもの。図 C: 日常生活で目にする風景 (雪が積もった公園)、図 D: 複雑な対象 (パーソナルコンピュータの基盤)。

れば、「牛乳は冷蔵庫の中にある」と「冷蔵庫は台所の中にある」から「牛乳は台所の中にある」という推定をすることも可能である。この節では、これらのように「A 氏」「黒い靴」といった対象を指し示す記号と、「上にある」「中にある」といった、対象間の位置関係を示す述語、そしてこれらの記号と述語に対する形式的な操作³⁾によって対象の位置を表現、推定する方法について考察する。

記号化された表現において exocentric な定位をおこなうことの利点は、なんといっても直感的であること、すなわちわれわれの日常的な表現や推論に近いことである。第 II 章、III 章においても、「S2 が S1 に対して exocentric に定位されると…」という形で、暗黙のうちこの種の表現を用いてきた。では、第 II 章、III 章の実験結果は、ヒトの視覚系が記号化された表現において exocentric な定位をおこなっているために起こるのだろうか。図 IV.1 に示した 4 つの図を用いながら、その可能性を検討してみよう。

まず、図 IV.1A は、第 II 章、III 章で用いた光点刺激を示している。暗の中にこれだけしか

³⁾ 「形式的な操作」とは、「A は B の中にある」「B は C の中にある」といった文があるときに、A、B、C が指し示すものが何であるかということにかかわらず「A は C の中にある」という文を導くことを指している。

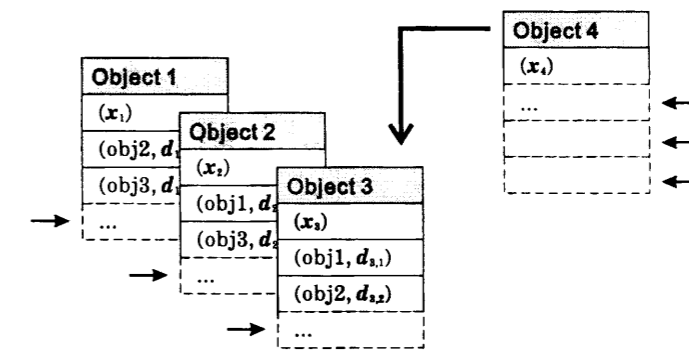


図 IV.2: exocentric な定位を使用するための仮想的なモデル。対象の位置は、その位置ベクトル (x_n) と、その他の対象との距離ベクトル ($d_{m,n}$) のリストによって表現される。新たに対象が追加されると (Object4)、各対象に付随している距離ベクトルのリストに項目が追加される (矢印)。(ObjN, $d_{m,n}$) は、N 番目のオブジェクトが自分を基準として $d_{m,n}$ の位置にあるという述語に対応している。

光点が存在しない場合、「対象」「対象間の位置関係」という語が何を指しているのかは特に問題にならないだろう。では、図 IV.1B の場合はどうだろう。これは、Honda (1999) が用いた実験刺激で、実験の課題は瞬間提示された白円の位置を答えるというものであった。この場合、周囲に存在している白い「枠」や「長方形 a.」「長方形 b.」が exocentric な定位に利用されることは容易に理解できるが、白円の位置が「何に対して」表現されるべきなのかははっきりしない。例えば、白円の位置は「長方形 a. の左上の角の左上」とも言えるし、「長方形 a. の左上」とも言える⁴⁾。さらには「長方形 a. と b. の上底を結ぶ線上」とも「外側を囲う大きな長方形の内側の中央やや右上付近」とも言える。この種の問題は、図 IV.1C のような日常的な光景においてはさらに複雑になる。結論として、記号化された表現の段階において exocentric な定位がおこなわれているかという点を議論するためには、「対象」はどのような性質を持たねばならないのか、線分の端点や交点なのか、明瞭な輪郭に囲まれた領域でなければならないのかといった疑問に答えなければならない。しかし、現在の知見からこれらの疑問に答えることは困難である。

「何の位置が表現されるのか」「何と何の位置関係が表現されるのか」という疑問については、今後の研究によって解決可能かもしれない。しかし、記号化された表現の段階において exocentric な定位を用いることには、原理的な問題がある。その点について議論するために、仮想的な「exocentric な定位を実現するための対象の位置の表現方法」を考えよう (図

⁴⁾ 強調部の違いに注意。前者は局所的な輝度の不連続で定義される特徴だが、後者はそのような輝度の不連続によって囲まれた領域の形状に言及している。

IV.2)。この表現方法では、対象はその位置ベクトル(x_n)と、その他の対象との距離ベクトル($d_{m,n}$)のリストによって表現される。図IV.2のように、新しい対象が追加されるときは、位置関係を表す項目がリストに追加される⁵⁾。このような方法は、図IV.1Aのように、位置が表現されるべき対象の数が少ない場合にはうまく機能する。しかし、図IV.1Dのように、非常に複雑な光景の場合は、表現されるべき対象の位置関係の数が問題を引き起こす。位置が表現される対象の数が n 個とすると、それらの間の「位置関係」は、2つの対象間の関係のみに限っても $n!/(2(n-2)!)$ 個になる⁶⁾。この式は階乗を含むため、 n の増加にしたがって関係の数は爆発的に増加してしまうことになる。ただし、ヒトの脳が並列計算に有利な構造を持っていることを考慮すると、大規模な並列計算によって計算時間の問題を緩和できるかもしれない。しかしその場合は、図IV.2のような位置関係リストを保存する汎用のレジスタを、大きな計算負荷がかかる事態に備えて大量に用意する必要がある。これは大変な資源の浪費となるし、どのように並列計算をスケジューリングするのかという問題も生じる。以上の理由から、図IV.1Dのように複雑な光景に含まれる対象の位置、およびそれらの位置関係を同時に扱うことは困難であろう。

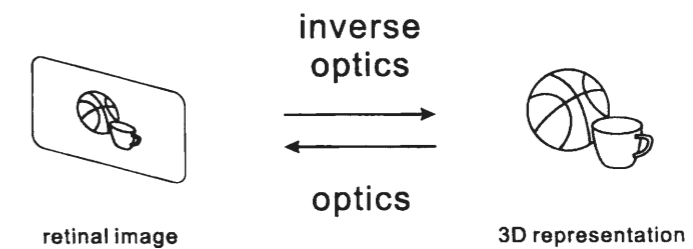
図IV.2のようなモデルは、第III章の実験結果を説明する場合にも問題を生じる。第III章の結果のひとつに、瞬間提示される光点のISIが120 msec以下のとき、先行して提示された光点の知覚される位置が、続いて提示された光点の影響を受けるといったものがあった。この事実は、新たな対象がリストに追加されるときには、単に追加されるだけでは済まないことを意味している。すなわち、位置関係のリストをチェックして、矛盾がある場合はそれを解決するように、すでに登録済みの対象の位置も修正するという計算が必要である。さらに、登録されている対象の位置が変更されると、その対象と他の対象の位置関係は全て修正されなければならない。それによって新たな位置関係の矛盾が生じる可能性があるため、位置関係の矛盾をチェックして位置を修正するという計算を何度か繰り返す必要があると考えられる。この計算はせいぜい数百 msecの間に終了しなければならないが⁷⁾、果たしてそれは可能なのだろうか。

以上の問題に加えて、図IV.2のモデルに対する不満がもうひとつ挙げられる。それは、こ

⁵⁾この方法は「Aに対するBの位置」「Bに対するAの位置」が2重に登録されるため効率は良くない。どちらか一方のリストにしか位置関係の項目を追加しないという方法や、一部の対象間の位置関係の項目のみを追加するという方法も考えられるが、その場合は「どちらのリストに項目を追加するのか」「どの位置関係をリストに追加するのか」を一意に定めるアルゴリズムも与える必要がある。

⁶⁾2つ以上の対象間の関係としては、例えば「AはBとCの真ん中にある」といったものが挙げられる。なお、図IV.2のように「Aに対するBの位置」「Bに対するAの位置」が2重に登録される形式では、扱わなければならない関係の数は本文の計算よりさらに増加する。

⁷⁾第III章と同様の実験手続で「最初にTに向かってサッカーボールを投じた後、続けてS2が見えた位置にサッカーボールを投じてください」と教示すると、最初のサッカーボール終了後数百 msec程度でS2の位置へ向かう第2のサッカーボールがおこなわれる(未発表の予備実験)。



図IV.3: 視覚の目的は、網膜像から対象の構造を復元することである。これは通常の光学と逆向きの計算に相当するため、逆光学と呼ばれる。逆光学の計算が正しければ、復元した対象の構造に対して光学を適用すれば元の網膜像が得られるはずである。この原理を用いて、「復元した対象の構造から与えられた網膜像が得られるか」という観点から対象の構造復元の妥当性を検証することができる。

の種のモデルが「なぜ exocentric な定位の使用が約 120 msec 以内の ISI であるときに制限されるのか」という疑問に何の回答も与えないことである。本節の最初に挙げた「A氏はB氏の右に座っている」といった例を考えると、A氏とB氏が広い部屋の両端に座っていて、同時に、あるいは約 120 msec の ISI で視野に収めることが不可能でも、両者の位置関係を理解できる。では、なぜ第III章の実験条件ではISIの効果がみられたのだろうか？それは恐らく第III章の実験が「網膜上における位置関係を利用すること」に関する問題であって、A氏、B氏の例は網膜像による表現段階ではなくすでに対象として記号化された表現段階における議論であることに由来すると考えられる。しかし、図IV.2のモデルでは、このような違いを扱うことはできない。

結論として、記号化された表現の段階において exocentric な定位をおこなうという方法は、第II、III章の実験のような短いISIで瞬間提示された光点の位置関係の知覚を説明できるものではないと考えられる。

IV.2.2 網膜像による検証

この節では、IV.2.1節とはまったく異なった観点から exocentric な定位をおこなう方法について検討する。図IV.3は、その元となるアイデアを示したものである。視覚の目的は、網膜へ投射される光から周囲の対象の構造を把握することである。ところが、これは逆光学と呼ばれる問題であり、一般的にこの問題を解くことは非常に困難である⁸⁾。この原理的な

⁸⁾この困難は、復元すべき対象の構造が3次元であるのに対して、網膜像が2次元の情報しか持たないことに起因している。

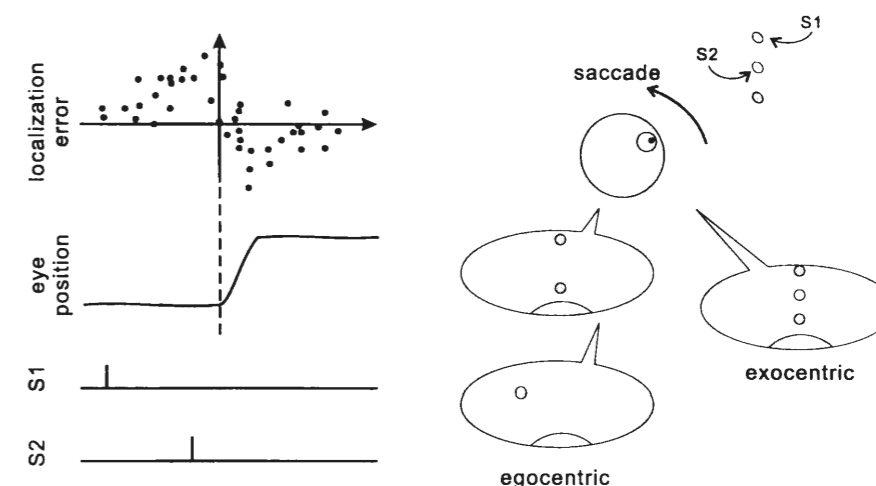
問題をどのように克服して妥当な対象の構造復元をおこなうかが、視覚情報処理の中心的な課題であるといえる。妥当な対象の構造復元の方法については多くの研究が蓄積されているが、そのひとつに「与えられた網膜像が得られるように対象の構造を復元する」という方法がある。これは

1. 復元した対象の構造が妥当なものであるならば、その対象の構造からどのような網膜像が得られるかを推定した場合、それは実際に与えられた網膜像とほぼ一致しなければならない。
2. 対象の構造が与えられた場合、そこから網膜への投影像を計算することは、その逆と比べて一般に容易である。

という事実を利用したものといえる。復元した対象の構造から予想される網膜像と、与えられた網膜像の差を計算し、それを用いて復元した対象の構造を修正し、ふたたびそこから網膜像を予想して与えられた網膜像との差を計算する、という処理を数回繰り返すことによって、陰影からの面の形状復元などの問題が正確かつ高速に解決可能であることが示されている(川人, 1996)。

この「網膜像による対象の構造復元の妥当性の検証」と言うべきアイデアを、第III章の実験条件に当てはめてみると、興味深いことが明らかになる。図IV.4のように、S1はサッカード開始前の誤定位が起こらないタイミングで、S2はサッカード進行方向に大きく誤定位されるタイミングで提示されたとする。さらに、S1とS2の実際の提示位置は同一垂直線上であったとしよう。このとき、まずS1とS2の位置はegocentricな定位によって推定され、恐らくは単独瞬間提示のときと同様にS2がサッカード進行方向に誤定位されると考えられる。ところが、このように推定されたS1、S2の位置を網膜像に基づいて検証すると、網膜像は「S1とS2は垂直に並んでいた」ことを示唆している。ここで網膜像にしたがってS1とS2の位置を修正すると、S1とS2の知覚された位置関係は、それらの網膜位置の関係に近づくことになる。つまり、明示的にexocentricな定位をしようとしたわけではないのだが、結果的にexocentricな定位をしたことに「なってしまう」。このようなexocentricな定位方法を「網膜像による検証」と呼ぶことにしよう。

IV.2.1節で論じた記号化された表現の段階における方法と比較すると、網膜像による検証は、記号化された表現段階における方法が直面した困難を回避できることがわかる。第1に、網膜像による検証では、位置が表現される「対象」を規定する要因は何かということが問題にならない。第2に、「対象」の数の増加によって計算量の爆発を起こすことがない。これらの性質は、「対象」を画像から切り出す前の段階の表現を扱っていることから自然に導かれる。計算量について補足しておく、もちろん復元された対象の構造から網膜像を推定



図IV.4: S1とS2が垂直に並んでいて、S1がサッカード開始前の誤定位が起こらないタイミング、S2がサッカード進行方向に誤定位されるタイミングで提示されたとする。まずS1、S2の位置をegocentricな定位で推定し、推定結果を網膜像に基づいて検証しようとする、網膜像はS1とS2が垂直に並んでいたことを示唆している。

するには相当量の計算が必要である。しかし、大脳皮質視覚野の構造は視野の全域にわたって並列計算をおこなうことを可能としており、網膜像を推定する計算は十分高速に実行可能であると考えられる(川人, 1996)。第3に、IV.2.1節の最後に「A氏、B氏の位置関係」の例で論じた問題、すなわち一般的な位置関係ではなく、網膜上の位置関係でなければならない理由も自然に説明できる。最後にもうひとつ、IV.2.1節で挙げた問題が残っている。すなわち、exocentricな定位の使用がISIに依存するという現象である。筆者の考えでは、この現象は、第1に網膜情報を大脳皮質視覚野へ伝達する視覚伝導路の時間応答特性、第2に網膜像による検証に要する時間という観点から説明可能である。この点について、以下で詳しく議論する。

まず、視覚伝導路の時間応答特性について考えよう。II.2節の実験の考察でも触れたように、ある程度以上の周波数で点滅する光点は、点滅していない光点として知覚される。この事実は、網膜の光受容器から中枢へ至る視覚伝導路が光入力の急速な変化に追従出来ないことを示唆している(図IV.5)。第II、III章で用いたような小さな刺激の場合、点滅を知覚できる限界は10~30Hz程度なので⁹⁾、2 msecしか提示されていなかった光点に対する応答は「なまって」数十 msecにわたっていたと考えられる。したがって、第III章の実験において、ISIが短いときにはS1、S2に対する応答が図IV.6A左のように時間的に重なって

⁹⁾一般に、刺激の輝度が高く面積が大きいほど、この限界周波数は高くなる。詳細は付録Bを参照のこと。

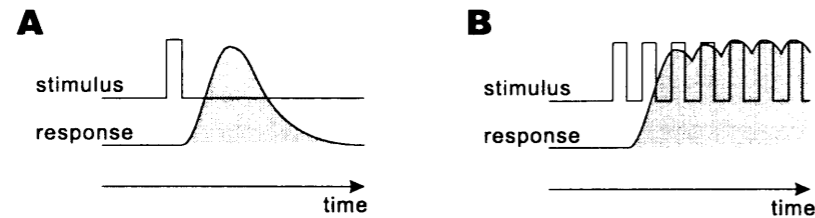


図 IV.5: ある周波数以上のフリッカーが定常な輝度の光点に見えるという事実は、光入力に対する視覚伝導路のパルス応答が A のような遅れ (ローパス) を持っていることを示唆している。点滅の周期が応答の減衰時間に対して十分短くなると、B のように光入力の ON/OFF に追従できなくなる。

た可能性が考えられる。さらに、S1、S2 がサッカード実行前に提示されたにもかかわらず、S1、S2 に対する応答が続いている最中に眼球位置が変化した場合、網膜像を眼球位置情報とオンタイムで足し合わせて egocentric な位置表現へ変換すると、S1、S2 に対する応答が指し示す位置は図 IV.6A 右のように誤って「引き伸ばされて」しまう。これらの点を考慮すると、サッカード実行前後に連続的に提示された 2 つの光点に対する応答が時間的に重なっている場合、これらの応答と、各光点が提示された瞬間の眼球位置を正しく結びつけて egocentric に定位することは非常に困難である。それに対して、網膜上の 2 点で光点を検出したという事実ははるかに信頼できる。したがって ISI が短い場合、可能な限り高い信頼性で S1、S2 の位置を復元しようとするならば、egocentric な定位の結果よりも網膜像による検証に基づくべきなのである。一方、図 IV.6B のように、S1、S2 に対する応答が時間的に十分分離されるときには、網膜像による検証はおこなえない。それに加えて、ISI が長くなればなるほど、ISI の間に身体や対象の運動が起こる可能性は高くなるので、egocentric な定位によって推定された位置の方が信頼できると考えられる。ヒトの視覚系が、このような論理にしたがって、ISI が短いときには網膜像による検証によって exocentric な定位をおこなっており、ISI が長いときには egocentric な定位をおこなっている可能性は十分あり得るだろう。

視覚伝導路の時間応答特性に基づいた exocentric な定位の ISI への依存性の説明に対する疑問点を挙げるとすれば、exocentric な定位がおこなわれる ISI の長さである。第 III 章の結果によると、120~160 msec という長い ISI を置いてもなお exocentric な定位がおこなわれる。この ISI を視覚伝導路の時間応答の遅れで説明しようとする、例えば 160 msec の ISI で異なる位置に 2 msec 提示されたふたつの光点が、ほぼ同時に提示されたように知覚されることになってしまう。100 msec 以下の提示時間で、80~150 msec の SOA でふたつの光点を提示すると、明瞭な仮現運動が知覚されることを考えると (大山, 今井, 和気, 1994)、これ

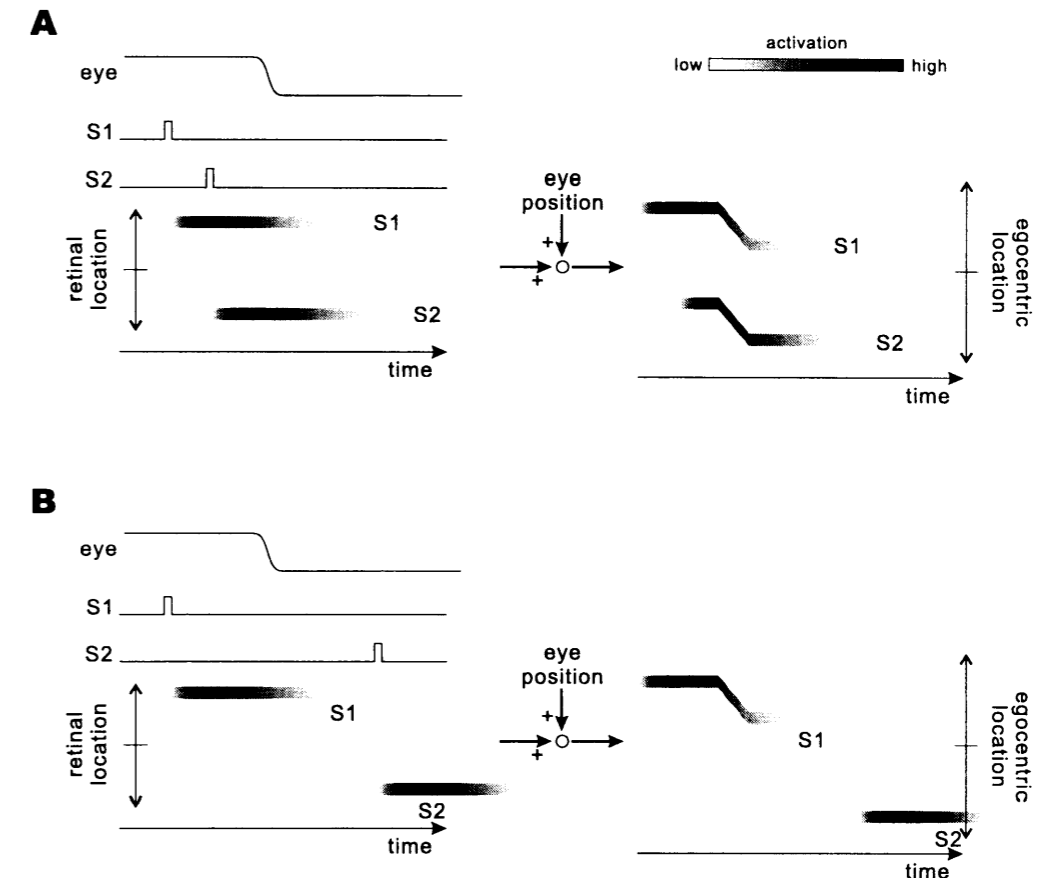


図 IV.6: 第 III 章の実験における、S1、S2 に対する応答の予想される時間特性。図 A: ISI が短い場合。図 B: ISI が長い場合。図 A、図 B とも左図は上から順に眼球位置、S1、S2 提示の時間経過、そして S1、S2 に対する応答。右図は S1、S2 に対する応答を眼球位置で変調して、egocentric な空間における表現に変換したもの。なお、刺激パターンを 1 次元に投影して描いているので、S1 がひとつの点として描かれていることに注意。

は奇妙な話である。では、なぜ 120 msec 以上の ISI にわたって exocentric な定位がおこなわれるのだろうか。この疑問に対する現時点での筆者の回答は、網膜像から三次元構造を復元し、それを網膜像によって検証するという繰り返し計算に時間を要するためであろうというものである。1回の繰り返しで 30 msec 程度の時間を要すると仮定すると¹⁰⁾、120 msec の ISI の場合、4回程度の繰り返し計算をおこなった時点で次の光点に対する応答が入力されることになる。もし次の光点に対する応答が入力された時点で、繰り返し計算がまだ終わっていないならば、視覚伝導路の時間応答特性による説明と同様の論理で、exocentric な定位がおこなわれることになる。この議論の争点は2つある。まず第1に、果たして実際に百数十 msec にわたって繰り返し計算がおこなわれているのだろうか。これについては、Hayakawa, Nishida, Wada, and Kawato (1994) による陰影からの形状復元のシミュレーションによると、陰影からの形状復元を「網膜による検証」の方法で解くには約 20 回以下の繰り返し計算が必要である。その他の対象の構造復元問題も、複雑な制約条件が利用されるものならば同程度の繰り返し計算が必要だと考えられる。一方、第III章の実験条件で S1、S2 の位置を計算することは、陰影からの形状復元のように複雑な計算を要するものではない。しかし、だからといって第III章の実験条件のように「単純な」光景のときと、日常的な光景で計算処理を切り替えるということはあるだろうか。単純な光景の場合、繰り返し計算が速く収束するということはあり得るだろうが、繰り返し計算そのものがおこなわれぬとは考えにくい。第2の争点は、復元された対象の構造を百数十 msec も後の網膜像に基づいて検証することは、百数十 msec の間に網膜像が変化した場合に混乱の原因とならないのだろうかという点である。この点については、まずヒトの正常なサッカードでは、サッカード実行前後には数百 msec 以上にわたって眼球運動が起こらない。そして、日常的な光景において意味がある対象、すなわち床や壁、机、人間といったものの網膜像が百数十 msec の間に急速かつ不規則に変化することは稀である。そのため、日常的な光景においては、百数十 msec にわたって繰り返し計算をおこなうことは致命的な混乱を招くことはないと考えられる。逆に考えれば、このようなサッカードの実行頻度や日常的な光景の性質を利用して正常な知覚を保っているからこそ、第II章、III章のような実験条件では誤定位が起きるといえる。

以上のように、網膜像による検証という仮説は、第II章、III章の実験結果を自然に説明できる可能性を秘めている。視覚伝導路の時間応答特性による説明と、繰り返し計算に要する時間による説明は、本節の議論の範囲では両立するものと考えられる。しかし、本節の議論の多くは仮定と推定の上に成立しており、議論の妥当性の実験的、理論的検証が必要である。

¹⁰⁾繰り返し計算に要する時間については、川人 (1996) の議論が参考になる。

IV.3 現時点における結論

本研究では、サッカード実行時における「身体運動と対象運動の分離問題」の解決について、心理実験によって検討した。従来この問題は、対象の位置がその網膜位置と眼球位置情報の和によって決定されるという「一般化相殺説」の枠組みの中で議論されてきた。しかし、本研究の実験は、サッカード実行時における複数の対象の位置知覚が、それらの網膜像の位置関係という手がかりに強く依存していることを明らかにした。この事実は、身体運動と対象運動の分離問題が、一般化相殺説の枠組みでは扱えないことを意味している。

理論的には、対象の位置知覚に網膜像の位置関係を用いるという方法をサッカード実行時に用いると、誤定位の原因となる。そこで、本研究の実験結果は以下のふたつの疑問をわれわれに投げかける。

1. なぜ、ヒトの視覚系はサッカード実行時に位置関係の手がかりを用いるのか。
2. なぜ、本研究の実験条件では位置関係の手がかりを用いることによる誤定位が起こるにもかかわらず、日常生活においてサッカードを実行する毎に誤定位を起こさないのか。

これらの疑問に対する現時点での筆者の回答は、以下のとおりである。まず、ヒトの視覚伝導路の時間伝達特性の問題などの生理的な要因により、任意の瞬間の対象の網膜位置の情報と眼球位置情報を結びつけて位置を知覚する方法には、原理的な困難がある。そこでヒトの視覚系は「サッカードの実行前後には通常数百 msec 以上にわたって大きな眼球運動は生じない」、「ヒトが生活する環境も、ダイナミックなホワイトノイズのように短時間に無秩序に変化することはない」といった眼球運動や周囲の環境の性質を利用して、対象の網膜上の位置関係の情報を利用しつつも、それに起因する誤定位を最小限に押さえていると考えられる。

第V章 展望

V.1 「身体運動と対象運動の分離問題」の計算理論

本研究で議論してきた「身体運動と対象運動の分離問題」の難しさは、どこにあるのだろうか。非常に逆説的だが、筆者の考えでは、それはこの問題の解決が簡単だという点にある。一般化相殺説が主張するように、眼球がどのように運動したかという情報さえあれば、単純な計算によって、網膜像の運動から眼球運動に由来する成分を分離することが出来る。ところが、この見かけの単純さに反して、実際にこの計算をおこなうことはヒトの視覚系にとって難問なのである。かつてMarrはその著書“Vision”において「われわれ人間は視覚によって認識することが非常に得意なので、その難しさをほとんど誰も認識していなかった」と述べた(Marr, 1982)。さらにMarrは、視覚研究が視覚のどのような側面を明らかにしようと

表 V.1: Marr の 3 つの水準 (Marr, 1982)。

水準	目的
計算理論	計算の目的は何か。なぜ、その計算をすることが適切なのか。そして、その計算を実行可能とする方法の背後にある論理は何か。
表現とアルゴリズム	その計算理論はどのように実行されるのか。特に、入力と出力のための表現はどのようなもので、変換のためのアルゴリズムはどのようなものか。
ハードウェアによる実装	これらの表現とアルゴリズムは、物理的にどのように実装されるのか。

するのかという観点から「計算理論」「表現とアルゴリズム」「ハードウェアによる実装」という3つの水準に分類し(表V.1)、視覚における情報処理を理解する上で、計算理論の研究が重要であることを指摘した。このMarrの指摘と同じことが、身体運動と対象運動の分離問題の研究についても言える。従来の研究では、これらの水準の議論が混在していて、問題の背後にある計算理論が明らかにされていなかったのである。

第IV章の総合考察を通じて、われわれはヒトの視覚系において身体運動と対象の運動を分離することの原理的な困難を知った。そして、その困難を回避するために眼球運動や周囲の環境の性質を利用するという仮説に到達した。これらの議論は、身体運動と対象運動の分離問題の計算理論に迫る重要な足がかりとなる可能性を秘めている。そのためには、第IV章の議論をさらに詳細に詰めていかなければならない。特に「検証」「信頼性」「時間的に十分分離している」といった概念は、IV.2.2節の議論で中心的な役割を果たしているにもかかわらず、その計算が具体的にどのようなものであり、いかにして実行可能なのかという点が明確ではない。今後議論を深めていくためには、これらの概念を明確にすることが必要不可欠である。また、II.4節で指摘した問題、すなわちサッカード実行前に持続的に刺激が提示されていたときに、瞬間提示された光点の位置がegocentricな定位とexocentricな定位の中間に知覚されるという点も、IV.2.2節の議論の枠組みから検討しなおす必要があるだろう。

V.2 視線の適応制御

本研究では、サッカード実行時に瞬間提示された光点の位置がどのように知覚されるのかという問題をめぐって、実験的および理論的検討をおこなってきた。この「対象の位置を知覚すること」は、視覚の重要な役割である。しかし、視覚の役割はそれだけではない。歩き、走り、手を伸ばすといった運動を制御するうえでも、視覚は重要な役割を担っている。特に「視線の適応制御」の問題は視覚と密接に関連している。適応制御とは、発達や加齢、病変、受傷などによって筋力や寸法、重量が変化しても、その変化に適応して制御をおこなうことである。視線制御の場合、例えばサルに外眼筋の部分的切除を施すと、処置の直後は眼球運動の振幅が不足するが、次第に処置前と同様な視線制御が可能になるといったことが起こる(Optican & Robinson, 1980)。

適応制御には、運動を適応的に調整するための誤差信号が必要だが、視線の適応制御の場合、それは視覚的に与えられる。すなわち、視野が動揺したり、視野の中心に捉えようとした対象が捕らえられなかった場合は、運動を修正する必要がある。しかし、視線の制御信号に問題がある場合にも、視野がこのような望ましくない状態になる可能性がある。それは、外界の対象そのものが動揺したり、動き回っている場合である。ここには、本研究の議論とは微妙に姿を変えた「身体運動と対象運動の分離問題」が存在する。視線制御の適応制御に

における「身体運動と対象運動の分離」は、本研究で扱った光点の位置知覚におけるそれとどのような関係にあるのだろうか。この問題を考える上で、非常に興味深い現象が知られている。サッカード実行中にサッカード目標点を小さく一定方向に動かすということを100試行程度繰り返すと、次第にサッカードは最初から移動後の目標点の位置へ向かうようになる。このとき、サッカードは適応的に変化しているにもかかわらず、被験者はしばしば目標点の位置が変化したことを知覚しないという(Deubel, 1987)。この現象は、サッカードを適応的に制御するための誤差信号が得られている一方で、目標点の小さな位置変化は無視されていることを示している。このような性質は、ロボット制御などの分野において、小規模な損傷による制御対象の変化を補償しながら動作しつづける自動制御ロボットにとって非常に望ましいものである。視覚による位置の知覚と視線の適応制御における「身体運動と対象運動の分離問題」の研究は、純粋に心理学的に興味深いのみならず、工学的な応用を開く可能性をも秘めているだろう。

付録A サッカー

サッカー (saccade) とは、随意的に視線方向を変える時に起こる急速な眼球運動である。本研究では、このサッカーが議論において重要な位置を占めている。そのため、サッカーが具体的にどのような性質を持つのかという予備知識があれば、本研究で用いられている実験パラメータや議論の理解の助けになると思われる。そこで、付録Aでは、サッカーの運動特性およびその制御機構の概略を解説しておく。なお、特に断らない限り、この記述は Becker (1991) に基づいている。

A.1 眼球運動の種類

小松崎, 篠田, 丸尾 (1985) に従うと、ヒトの眼球運動はまず「共同性 (conjugate)」と「非共同性 (disconjugate)」に区別できる。「共同性」運動とは両眼が同方向に回転する運動を指し、version、versional eye movement と呼ばれる。視線方向を変化させる眼球運動は共同性である。これに対して「非共同性」運動とは奥行き方向に視点を変化させる運動を指し、輻輳性眼球運動 (vergence) と呼ばれる。共同性眼球運動は、さらに以下のように分類できる。

A. 不随意運動

前庭動眼反射 前庭器官 (半規管、球形嚢、卵形嚢) を刺激すると、頭部の運動を打ち消す方向へ眼球を回転させる反射的な眼球運動が生じる。これを前庭動眼反射 (vestibulo-ocular reflex: VOR) という。さらに持続的に頭部を回転し続けると、ある時点で前庭動眼反射は逆方向への急速な眼球運動によって中断され、眼球は正面に戻る。頭部運

動を補償するゆっくりとした運動を「緩徐相 (slow phase)」、眼球を正面へ戻す急速な運動を「急速相 (quick phase)」という。

視機性眼振 視野の内容が一様にひとつの方向へ運動すると、それを追従するように反射的な眼球運動が起こる。これを視機性眼球運動 (optokinetic eye movement) という。前庭動眼反射と同様に、視機性眼球運動にも緩徐相と急速相が存在する。緩徐相と急速相を繰り返す様子は、「眼球が震えている」ように見えることから、視機性眼振 (optokinetic nystagmus: OKN) と呼ばれる。

B. 随意運動

サッカー 随意的に固視点を変える時にみられる急速な眼球運動を、サッカー (saccade) という。その最大速度はサッカー振幅に依存し、大振幅のサッカーでは約 700 度/sec に達する。

スムーズパシュート ゆっくりと移動する対象を眼で追従しているときに起こる随意的な眼球運動を、スムーズパシュート (smooth pursuit) という。対象の速度が速くなると、スムーズパシュートだけでは対象の運動を追従できず、パシュート中にサッカーが割り込むようになる。

A.2 サッカーのダイナミクス

主系列特性 図 A.1A は、典型的なサッカー実行時の眼球位置と速度を示している。釣鐘状の速度プロフィールを描いて一気に新しい眼球位置へ至るのがサッカーの特徴で、その最大速度は 500 deg/sec を超えることもある。このような特徴から、サッカー実行時の眼球運動は振幅 (amplitude)、持続時間 (duration)、最大速度 (peak velocity) の 3 つのパラメータでほぼ記述できる¹⁾。図 A.1B は、サッカー振幅と、持続時間、最高速度、平均速度を示したものである。この図から明らかなように、これらのパラメータは独立ではなく、互いに密接に関連している。サッカー振幅に対する最高速度などのパラメータの関係を、サッカーの主系列特性 (main sequence) という。

潜時 本研究のように、合図が与えられたら可能な限り早くその位置に向かってサッカーをおこなう課題の場合、合図が与えられてから実際に眼球運動が始まるまでにはある程度の時間を要する。これをサッカーの潜時 (latency) という。平均的なサッカー²⁾の潜時は

¹⁾最大速度ではなく、平均速度 (mean velocity) を用いることもある。さらに詳細に記述する場合は、最大加速度 (peak acceleration) や歪度 (skewness) などを用いる。

²⁾サッカーの目標点がどちらの方向に出現するか予測不可能で、振幅が 10 度程度の条件。

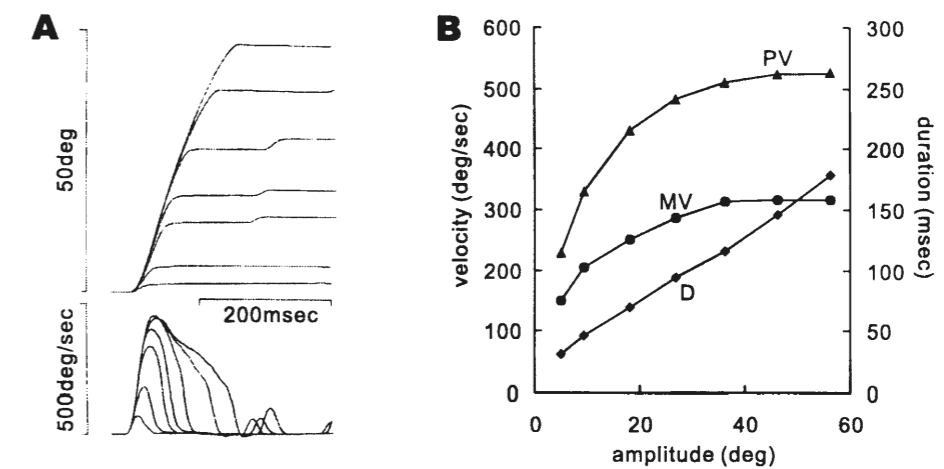


図 A.1: サッカーの主系列特性。図 A: サッカー実行時の眼球位置と速度を示したものの。振幅が大きくなると共に、最大速度、持続時間が増加する。図 B: 振幅と持続時間 (D)、平均速度 (MV)、最大速度 (PV) の関係を示したものの。

およそ 200 msec で、潜時が長い方に裾野が広がった分布をしている。

一般に潜時の分布形は平均を中心とした単峰性であるが、試行開始時の固視点を消去してサッカーの目標点を提示するときに、固視点の消去と目標点の提示の間に数十～数百 msec の空白 (gap) をとると、100 msec 前後の短い潜時のサッカーが頻発し多峰性の潜時分布が得られることが知られている³⁾。この短潜時のサッカーはエクスプレスサッカー (express saccade) と呼ばれており、眼球運動の制御の研究において注目されている。この他にも、目標点の刺激の輝度が高くなると潜時が短くなる、目標点の他に妨害刺激が提示されると潜時が長くなるなどの現象が知られている。

A.3 サッカーの制御機構

制御系 眼球には外眼筋と呼ばれる 3 対 6 本の筋が付着しており、これらの筋が眼球を回転させる (図 A.2A)。これは、いわばバネで眼球を両側から「引っ張って」いるようなものであり、両側のバネの張力が釣り合うところで眼球は静止する。また、眼窩の内容物はある程度の粘性を持っているが、これは車のサスペンションに付いているダンパのように「バネ」が急激に伸びたり振動しつづけることを妨げている。この構造を模式的に表すと、図 A.2B のようになる。サッカーのように眼球を高速に回転させるには、この粘性に抗して瞬時的

³⁾潜時はサッカー目標点の提示から計算する。目標点は試行毎に異なる位置に提示され、目標点が提示されるまではどの方向へサッカーをおこなうかわからないように設定されている。

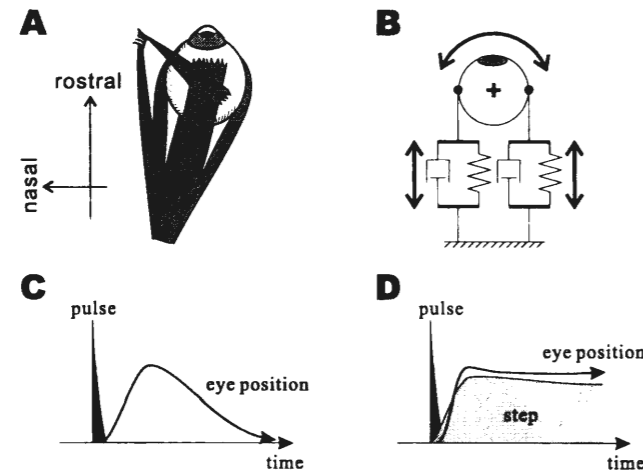


図 A.2: 眼球の力学モデル。図 A: 右眼の外眼筋の模式図。図の上が吻側、左が鼻側。図 B: 単純化した眼球の力学モデル。図 C: パルス成分を与えると眼球位置は急速に変化し、その後次第に元の眼球位置へ戻る。図 D: パルス成分とステップ成分を適切なタイミングで与えると、サッカーを実現できる。

に筋を強く収縮させなければならない。そのため、サッカーの制御には「瞬間的に筋を収縮させる運動指令」が必要である。この運動指令を pulse (パルス成分) という。パルス成分が与えられれば眼球は回転するが、筋には弾性があるため、引き続き筋を収縮させつづければ、図 A.2C のように速やかに眼球はもとの位置へ戻ってしまう。したがって、回転した後の眼球位置を維持するために、筋の弾性に抗して「筋を収縮した状態を保つ運動指令」が必要となる。この運動指令を step (ステップ成分) という⁴⁾。パルス成分とステップ成分が正確に同期することによって、図 A.2D のようなサッカーが実現されている。

では、正しく同期したパルス成分とステップ成分はどのような機構によって生成されているのだろうか。まず、ステップ成分は、パルス成分を「積分」することで得られると考えられている。つまり、筋を長時間、強く収縮させるほど、それに対応した大きなステップ成分が得られるということである。筋を長時間、強く収縮させるほど、眼球位置はサッカー開始前の外眼筋の張力の平衡点から大きく離れ、その眼球位置を維持するためにステップ成分が大きく変化する必要があることを考えると、この機構は合理的である。この「積分」をおこなう神経機構を「神経積分器」という。一方、パルス成分そのものは「ステップ成分を監視し、新たな眼球位置を維持するために必要十分なステップ成分が得られるようにパルス成分を調節する」という方法で生成されていると考えられている。

⁴⁾外眼筋の運動ニューロンが持続的に発火しつづけることから、tonic と呼ぶこともある。

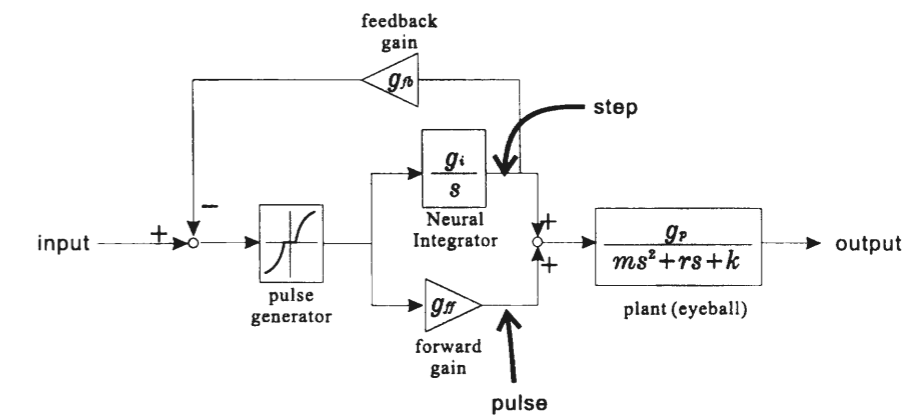


図 A.3: サッカーの内部フィードバック制御モデル。入力目標とする眼球位置を維持するために必要なステップ成分、出力は眼球位置である。眼球の力学系を2次遅れの伝達関数で近似している。

以上のシステムをブロック線図を用いて示すと、図 A.3 のようになる。システムの入力は「目標とする眼球位置 (またはそれを維持するために必要なステップ成分)」であり、出力は眼球位置となっている。これは一種のフィードバック制御といえるが、最終的な制御対象である眼球位置をフィードバックするのではなく、神経積分器の出力をフィードバックするという点で、通常の意味でのフィードバック制御と異なる。神経積分器の出力は、眼球位置の一種の内部モデルと考えられるので、図 A.3 のシステムをサッカーの内部フィードバックと呼ぶこともある。

サッカーの制御系に関する研究は非常に多く、ここまでで紹介したシステムの基本的な構成についてさえ、今なお論争が続いている。例えばシステムの入力について、図 A.3 のように「目標とする眼球位置」ではなく「目標とする眼球位置と現在の眼球位置の差」とする考え方がある。また、神経積分器についても、図 A.3 に含まれる「眼球位置を維持するための神経積分器」に加えて、第2の「サッカー開始前の眼球位置と現在の眼球位置の差を保持する神経積分器」が存在するが存在するという仮説が提案されている。しかし、本文および付録 A.4 節の議論の予備知識としてはここまでの解説で十分である。

神経機構 この分野は研究が非常に活発であり、日々新しい実験結果が報告されている。それらをすべてここで紹介することは不可能なので、ここでも付録 A.4 節の議論に必要な基礎事項を説明するにとどめる。なお、特に断らない限り、この記述は Keller (1991), Guitton (1991), 小松崎ほか (1985) の総説に基づいている。

まず、外眼筋を直接支配する運動神経は、動眼神経 (第 III 脳神経)、滑車神経 (第 IV 脳神

経)、外転神経(第VI脳神経)の3対の脳神経⁵⁾である。これらの神経核の運動ニューロンの活動は、サッカーの振幅が大きくなるほど強くなり、長く持続する。この事実は、サッカーの最大速度や持続時間がサッカー振幅に依存していることに対応している(図A.1)。

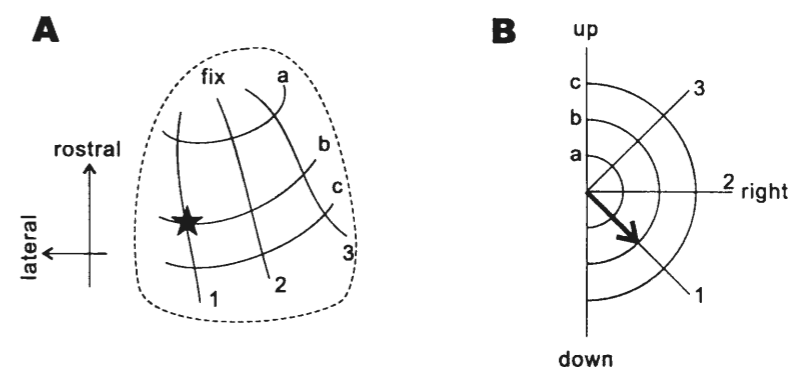
これらの運動神経を支配する神経細胞群は、延髄から橋、小脳、中脳にわたって広く分布している。先述の制御系のモデルで述べた神経積分器の神経科学実体も、延髄と中脳に存在する⁶⁾。ヒトの眼球運動にはさまざまな種類があることをA.1節で述べたが、これらの眼球運動はそれぞれ別の神経回路によって制御されている。サッカーの制御については、中脳背側部の左右に一对存在する上丘(superior colliculus: SC)という組織が重要な役割を果たしていることが知られている。上丘の著しい特徴は、上丘の活動部位と、実行されるサッカーの振幅および方向が、トポグラフィックに対応していることである。図A.4は、この対応を図示したものである。左上丘が右方向、右上丘が左方向といったように、それぞれの上丘は対側方向へのサッカーに対応しており、外側へ行くほど下方向、内側へ行くほど上方向のサッカーに対応する。また、吻側⁷⁾は小さな振幅のサッカー、尾側は大振幅のサッカーに対応している。上丘に電極を刺入して電気刺激をおこなうと、刺入した位置に対応する振幅のサッカーが繰り返し誘発される。逆に電極を刺入して細胞活動を記録すると、刺入した位置に対応するサッカーを随意的におこなったときに、バースト状の活動が記録出来る。また、吻側端には fixation cell と呼ばれる神経細胞群が存在し、随意的な固視中には fixation cell が持続的に活動している。fixation cell の部位を刺激することで、実行中のサッカーを強制的に停止させることも可能である(Munoz & Wurtz, 1993a, 1993b)。

ここまで中脳以下の神経機構について述べてきたが、大脳や大脳基底核にもサッカーを制御する領域が存在する。特に前頭眼野と呼ばれる領域は、上丘および脳幹部のサッカー制御関連神経核に直接投射を持っており、上丘が破壊されても前頭眼野が無傷であればサッカーを実行することが出来る。皮質で見つかるサッカー関連細胞活動は、基本的に上丘と同じようにサッカーの振幅と方向に対応しており、細胞活動と実際の眼球運動の同期性は、脳幹や上丘と比較して低い。

⁵⁾ 脊髄を介さず直接脳から出る12対(ヒトの場合)の神経群を脳神経という。

⁶⁾ 脳幹では垂直方向と水平方向の眼球運動を制御する回路が分離しており、神経積分器も2つに分かれている。中脳のCajal間質核が垂直方向、延髄の舌下神経前位核が水平方向の神経積分器であると考えられている。

⁷⁾ 吻側(rostral)とは口がある方向、この場合は前側のこと。対義語は尾側(caudal)。



図A.4: 上丘のモーターマップ。図A: 左上丘を背側から見た模式図。図の上が吻側、左が外側。図B: 左上丘がコードしているサッカー振幅。図AとBの1、2、3およびa、b、cがそれぞれ対応している。例えば、図Aの1-bの位置(星印)の神経細胞は、右下へのサッカーをコードしている(図B矢印)。上丘の吻側端には、固視時に持続的に活動する細胞群が存在する(図の"fix"の領域)。

A.4 Discrete-EPS 仮説と眼球位置情報の実体

Discrete-EPS 仮説の提唱者である Hershberger は、彼自身の仮説で中心的な役割を果たす眼球位置情報を efference copy と呼んでいる。筆者は Hershberger の命名および議論に同意しないのだが、彼の議論は「眼球位置情報の実体は何か」という問題を考える上で示唆に富んでおり、ここで紹介する価値があると思われるので簡単に解説する。

A.3 節においてサッカーの制御系について概観したが、図A.3のシステムだけでは、入力の変化に対して直ちに眼球運動が発生してしまう。したがって、サッカーをプログラミングするときには、プログラミング中には図A.3のシステムの入力が変化しないようにしなければならない。そこで、プログラミング中に図A.3への入力を遮断する機構が必要である。図A.5は、点線で囲んだ図A.3のシステムに、情報を遮断するラッチを組み合わせたものである。サッカーのプログラミング時にラッチをOFFにしておけば、誤って眼球が動き出すことはない⁸⁾。Hershberger が着目したのは、このようなラッチを持つシステムでは、ラッチのONにともなってラッチの直後では情報が離散的に変化するということである。このアイデアを元に、Hershberger は脳内で表現されている眼球位置(E^*)もまた離散的に変化し、 E^* の離散的な変化をトリガーにサッカーが駆動されると考えた。Hershberger は、この離散的に変化する E^* を efference copy と区別して efference copy と呼んでいる(Hershberger & Jordan, 1992)。

⁸⁾ A.3 節の fixation cell などが、ラッチの神経科学実体であると考えられる。

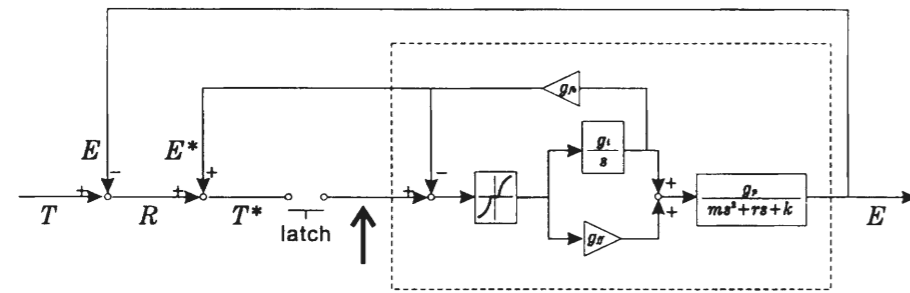


図 A.5: 図 A.3 のモデル (点線の枠内) を実装するためには、例えばこの図のように、サッカーの実行/抑制をコントロールするラッチが必要である。このようなラッチの直後では、サッカー開始時、すなわちラッチが ON となると同時に離散的に信号が変化することになる。図中の記号はそれぞれ E : 眼球位置、 T : 対象の位置、 R : 対象の網膜位置。* はその内部表現を表している (本文 I.2.2 節と同じ)。

筆者としては、Hershberger の議論の 2 点において、彼に同意しかねる。第 1 に、脳内で表現されている眼球位置を efference copy と呼ぶのは混乱を招きかねない。Holst が efference copy という言葉を用いたとき、本来眼球へ送られる efference の「コピー」が中枢へ返される、ということ強調していたと考えられる。ところが、Hershberger の efference copy は、efference の「コピー」でも何でもない。efference copy の離散的な変化をトリガーに眼球運動が起こるのだから、これはむしろ efference と呼ぶべきであり、その情報を眼球位置情報として用いるのは efference copy の定義そのものである。したがって、Hershberger の仮説は efference copy 仮説のひとつのバリエーションであり、efference copy という用語は使われるべきではないというのが筆者の意見である。第 2 の問題は、眼球位置情報が離散的に変化すると考えるとサッカー実行時のヒトの知覚現象が説明できないことである。その理由は本文の第 I 章や II 章で詳しく述べているので、そちらを参照されたい。

以上の理由で、Hershberger の議論そのものに筆者は同意しないが、Hershberger の議論は眼球位置情報の実体や性質を考える上で注意すべき点をわれわれに教えてくれる。それは、efference copy について議論するとき、眼球運動の制御系の各段階において efference はさまざまな表現や時間特性を示しており、どの段階の efference から「コピー」を取ってくるかによって、そこから眼球の状態について何を予想可能であるかが異なるという点である。具体例を 2 つ挙げよう。まず第 1 に、さまざまな眼球運動の制御系は脳幹の段階ですでに分離しているため (A.3 節)、大脳の前頭眼野などの段階における efference を用いて眼球位置を予測しているならば、サッカーと重ねて前庭動眼反射が起こると予測は失敗すると考えられる。このような反射的な眼球運動もすべて含めて efference copy から眼球位置を予測す

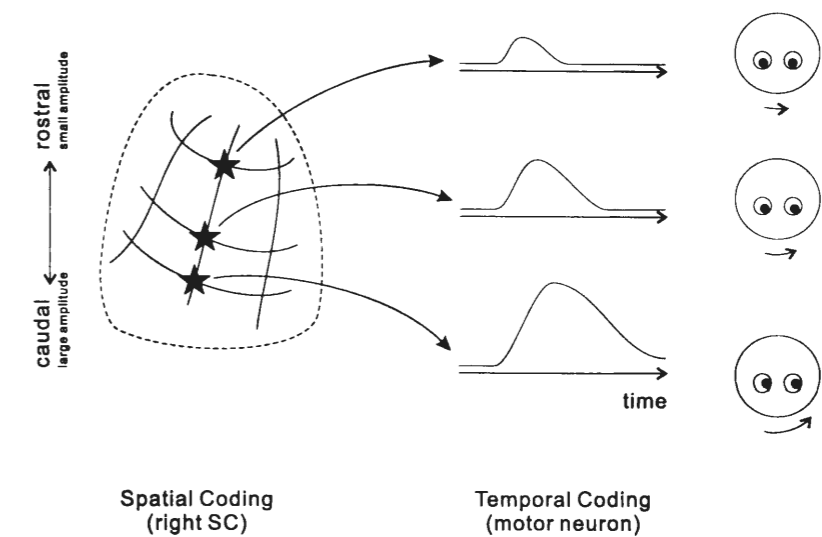


図 A.6: 空間-時間変換。上丘の段階では、サッカーの振幅と方向は活動部位 (その位置に存在する神経細胞) によって表現されている。それに対して運動神経の段階では、振幅が大きいほど活動が強く長く続く。上丘から運動神経に至るまでの間に空間による表現から時間による表現への変換がおこなわれなければならない。

るためには、外眼筋の運動神経に近い段階から efference copy を得るか、外眼筋の efference に頼る必要がある。第 2 に、上丘の段階では、サッカーの振幅と方向は上丘における活動位置で表現されているが (図 A.4)、運動神経では活動の大きさと持続時間によって表現されている。したがって、サッカー実行時には、上丘における「空間 (位置) による表現」から運動神経における「時間による表現」へ変換されなければならない (図 A.6)。このことを逆に考えれば、運動神経に近い段階から efference を得る場合は「時間による表現」から「空間による表現」への変換経路が脳内に存在していなければならないと考えられる。

このような神経科学的知見を利用すれば、従来無反省に用いられてきた「眼球位置情報」というものがどのような性質を持つべきものなのかについて、重要な示唆が得られると期待される。

付録B 視覚伝導路の伝達特性

視覚伝導路の時間特性については、IV.2.2節で簡単に触れた(図IV.5)。この性質はIV.2.2節の議論の妥当性を検証していく上で重要な意味を持つので、ここでもう少し詳しく解説しておく。なお、特に断らないかぎり、ここの記述はVan De Grind, Grüsser, and Lunkenheimer (1973)に基づいている。

B.1 心理物理学的知見

CFFとTalbot-Plateauの法則 輝度が時間的に正弦波状、矩形波状などに変化する面を観察すると、その面は点滅するように知覚される。ここで輝度変化の時間周波数を上げていき、ある程度以上の周波数に到達すると、それはもはや点滅するように知覚されず、一定の輝度を持つ面として知覚される。輝度が時間方向に周期的に変化する面が、輝度が増えるように知覚される上限の周波数をCritical Flicker Frequency (CFF)という。CFFを超える周波数で輝度変化を繰り返す面の主観的な輝度は、輝度の時間平均が等しい面のそれとほぼ一致する。すなわち、輝度が周期関数 $I(t)$ にしたがって変化する場合、この刺激と主観的に輝度が等しい刺激の輝度を I_m とすると、両者の間には以下の関係が成立する。

$$I_m = \frac{1}{T} \int_t^T I(t) dt \quad (\text{B.1})$$

これをTalbot-Plateauの法則という(図B.1)。この事実は、速い輝度変化に対して知覚される輝度の変化が追従できないことを意味している。言いかえれば、網膜から主観的な輝度の知覚の成立にいたる視覚伝導路の伝達特性が、ローパスフィルタの特性を持っているという

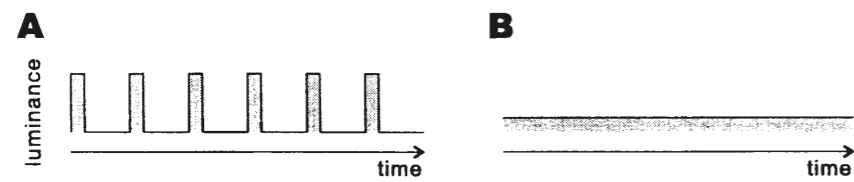


図 B.1: Talbot-Plateau の法則。CFF 以上の周波数でフリッカーする光点 (A) は、輝度の時間平均が等しい定常な輝度の光点 (B) とほぼ同じ明るさに知覚される。

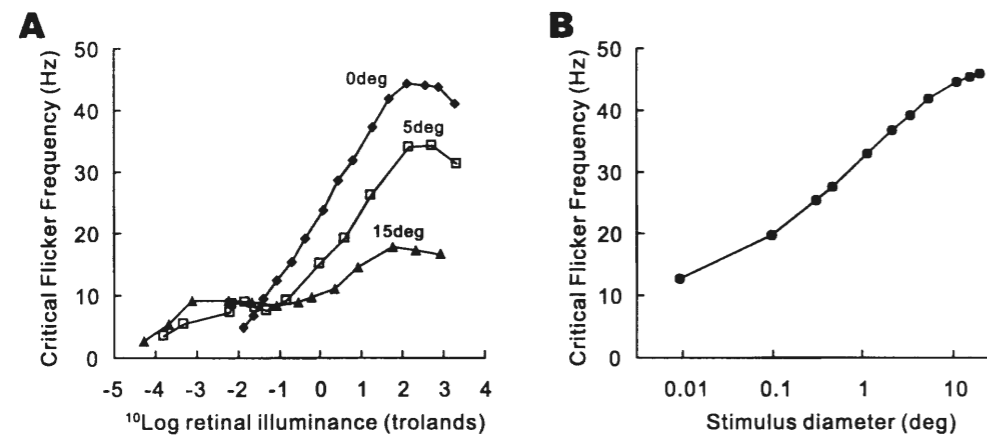


図 B.2: CFF と刺激の輝度、面積の関係。図 A: 刺激の輝度と CFF の関係。3つのグラフはそれぞれ刺激を中心窩の上 0 deg、5 deg、15 deg の位置に提示したときの結果。図 B: 刺激の面積と CFF の関係。

ことである。

刺激の物理的特性と CFF CFF の値は刺激の輝度などの物理的な性質に依存し、複数の刺激が同時に提示された場合は刺激間の相互作用もみられる。すべてをここで取り上げることは不可能なので、いくつかの例を挙げながら CFF の具体的な値を紹介するにとどめる。

まず図 B.2A は、暗順応した状態で直径 2 度の刺激を矩形波状に輝度変化させたときの CFF を示している。横軸は、刺激が ON になったときの輝度である¹⁾。この図より、刺激の輝度が高いほど CFF は高くなること、そして輝度上昇による CFF の変化には上限があることがわかる。また、この図は刺激の提示位置が網膜周辺になるほど CFF は低くなることも示している。続いて図 B.2B は、刺激の直径を変化させたときの CFF の変化を示したも

¹⁾正確には、グラフの横軸は刺激の輝度ではない。troland は明るさの単位で、1 mm² の瞳孔面積で 1cd/m² の面を観察しているときの網膜の照度を 1 troland という。

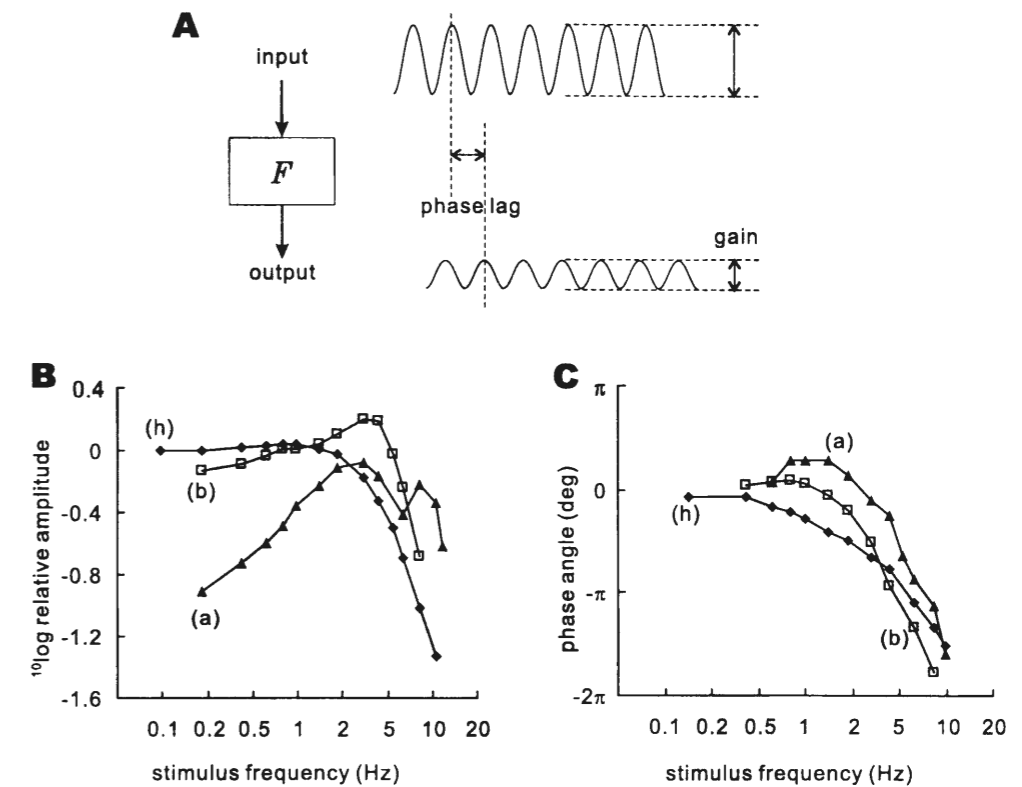


図 B.3: 網膜のアマクリン細胞 (a)、双極細胞 (b)、水平細胞 (h) の膜電位の応答特性。図 A: 線型システムに正弦波を入力すると、出力は同じ周期を持つ正弦波になる。したがって、位相遅れとゲインでシステムの周波数応答特性を記述することが出来る。図 B: ゲイン。図 C: 位相遅れ。

のである。やはり、刺激の直径に依存して CFF が上昇することがわかる。

本研究との関連で重要な点は、本研究で用いたような直径 0.2 度、20cd/m² という刺激に対する CFF はせいぜい 20~30 Hz 程度であるということである。この事実より、2 msec 瞬間提示された光点を眼球位置情報と正確に同期させたり、短い ISI で連続提示された光点を時間的に分離することに限界があることがうかがえる。

B.2 神経科学的知見

この節では、付録 B.1 節で直感的に「視覚伝導路はローパスフィルタの特性を持っている」「CFF を超えた刺激は定常な輝度を持つ刺激と等しく知覚される」と述べた点を、神経科学的知見から補足しておく。

図 B.3 は、網膜のアマクリン細胞、双極細胞、水平細胞の膜電位の応答特性を示したもの

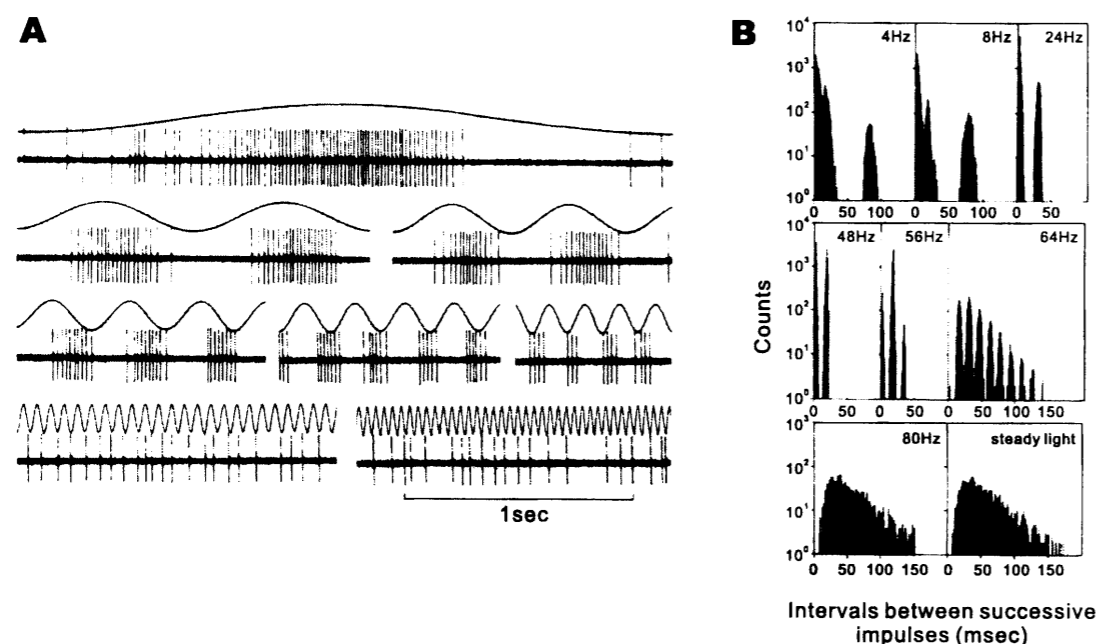


図 B.4: 網膜の OFF 中心型神経節細胞から記録した活動電位。図 A: さまざまな周波数の輝度変化に対する応答。輝度プロファイルは、下が高輝度になるようにプロットされている。図 B: 各スパイクの間隔の分布。

である。図 B.3A に示すように、線型なシステムでは正弦波を入力すると出力は同じ周波数の正弦波になるので、ゲイン (増幅率) と位相遅れの 2 つのパラメータでシステムの応答特性を記述することが出来る。図 B.3B、C はそれぞれ各細胞のゲインと位相遅れを示している。これらの図より、特に双極細胞と水平細胞において、入力の周波数が高くなるにつれてゲインは減少し、位相が遅れることがわかる。これは、典型的なローパスフィルタの特性である。

続いて、図 B.4A は網膜の OFF 中心型神経節細胞から記録した活動電位を示している。刺激輝度が低くなるのに応じて活動電位が発生しているが (応答には位相遅れがあることに注意)、周波数が高くなると、図の右下のトレースのように個々の OFF に対して活動電位が発生しなくなる。図 B.4B は、活動電位の各スパイク間の時間間隔のヒストグラムである。刺激の周波数が低いときにはスパイク間隔が規則的に分布しているが、80 Hz に到達した時点で定常な輝度を持つ刺激への応答と区別がつかない。したがって、このような高周波数の輝度変化をする刺激は、中枢神経系にとっては定常な輝度を持つ刺激と実質的に同一であると考えられる。

付録C 業績表

学術論文

1. Sogo, H., Osaka, N. (2001) Perception of relation of stimuli locations successively flashed before saccade. *Vision Research*, 41, 935-942
2. Sogo, H., Osaka, N. (submitted) Effects of interstimulus interval on egocentric and exocentric localization of perisaccadic flashes.
3. 十河 宏行, 苧阪 直行 (印刷中) サッカー前後における対象の位置知覚と視野の安定性 心理学評論 43

翻訳

1. Logothetis, N. K., Leopold, D. A. and Sheinberg, D. L. (1997) Neural Mechanisms of Perceptual Organization. 認知科学, 4, 99-110 (十河宏行・苧阪直行 (訳) 知覚的体制化の神経機構 意識の認知科学 苧阪直行 (編著) pp.132-148 共立出版)

学会発表

1. 十河 宏行, 乾 敏郎 (1997) 網膜情報と眼球運動指令の時間的・空間的統合過程 第 61 回日本心理学会発表論文集 p.546
2. Sogo, H. (1998) Mislocalization of stimuli flashed near the time of a saccade of different amplitude. *Perception*, 27, supplement 142

3. 十河 宏行, 乾 敏郎, 三村 治 (1998) サッケード時の定位誤差に対するサッケード振幅の影響の検討 神経眼科 第15巻増補 p.124
4. 十河 宏行, 苧阪 直行 (1999) サッカー直前に提示された点滅する光点の知覚について *Vision: The Journal of the Vision Society of Japan*, 11, 144
5. 十河 宏行, 苧阪 直行 (1999) サッカー時に連続提示された光点の定位 日本心理学会第63回大会発表論文集 p.396
6. 十河 宏行 (1999) 定位誤差と眼球位置情報 日本心理学会第63回大会ワークショップ
7. Sogo, H., Osaka, N. (1999) Perception of sequentially flashed dots immediately before saccades. In 10th European Conference on Eye Movement (ECEM10), Utrecht, the Netherlands.
8. 十河 宏行, 苧阪 直行 (2000) サッカー時に連続提示された二つの刺激の定位 *Vision: The Journal of the Vision Society of Japan*, 12, 160
9. 十河 宏行, 苧阪 直行 (2000) サッカー時における網膜位置情報の時間的統合 第64回日本心理学会発表論文集 p.416

参考文献

- Becker, W. (1991). Saccades. In R. H. S. Carpenter (Ed.), *Eye movements* (Vol. 8, p. 95-137). London: The Macmillan Press Ltd.
- Bridgeman, B., Heijden, A. H. C. Van der, & Velichkovski, B. M. (1994). A theory of visual stability across saccadic eye movements. *Behavioral and Brain Sciences*, 17, 247-292.
- Cai, R. H., Pouget, A., Schlag-Rey, M., & Schlag, J. (1997). Perceived geometrical relationships affected by eye-movement signals. *Nature*, 386, 601-604.
- Dassonville, P., Schlag, J., & Schlag-Rey, M. (1992). Oculomotor localization relies on a damped representation of saccadic eye displacement in human and nonhuman primates. *Visual Neuroscience*, 9, 261-269.
- Dassonville, P., Schlag, J., & Schlag-Rey, M. (1995). The use of egocentric and exocentric location cues in saccadic programming. *Vision Research*, 35, 2191-2199.
- Deubel, H. (1987). Adaptivity of gain and direction in oblique saccades. In J. K. O'Regan & A. Levy-Schoen (Eds.), *Eye movements from physiology to cognition* (p. 181-190). Elsevier.
- Gauthier, G. M., Nommay, D., & Vercher, J. L. (1990). The role of ocular muscle proprioception in visual localization of targets. *Science*, 249, 58-61.

- Guitton, D. (1991). Control of saccadic eye and gaze movements by the superior colliculus and basal ganglia. In R. H. S. Carpenter (Ed.), *Eye movements* (Vol. 8, p. 244-276). London: The Macmillan Press Ltd.
- Hayakawa, H., Nishida, S., Wada, T., & Kawato, M. (1994). A computational model for shape estimation by integration of shading and edge information. *Neural Networks*, 7, 1193-1209.
- Hershberger, W. (1987). Saccadic eye movements and the perception of visual direction. *Perception & Psychophysics*, 41, 35-44.
- Hershberger, W. A., & Jordan, J. S. (1992). Visual direction constancy: Perceiving the visual direction of perisaccadic flashes. In E. Chekaluk & K. R. Llewellyn (Eds.), *The role of eye movements in perceptual processes* (p. 1-43). Elsevier Science Publishers B.V.
- Holst, E. von. (1954). Relations between the central nervous system and the peripheral organs. *The British Journal of Animal Behavior*, 2, 89-94.
- Honda, H. (1989). Perceptual localization of visual stimuli flashed during saccades. *Perception & Psychophysics*, 45, 162-174.
- Honda, H. (1990). Eye movements to a visual stimulus flashed before, during, or after a saccade. In M. Jeannerod (Ed.), *Attention and performance XIII: Motor representation and control* (p. 567-582). Hillsdale, N. J.: Erlbaum.
- Honda, H. (1991). The time courses of visual mislocalization and of extraretinal eye position signals at the time of vertical saccades. *Vision Research*, 31, 1915-1921.
- Honda, H. (1993). Saccade-contingent displacement of the apparent position of visual stimuli flashed on a dimly illuminated structured background. *Vision Research*, 33, 709-716.
- Honda, H. (1997). Interaction of extraretinal eye position signals in a double-step saccade task: psychophysical estimation. *Experimental Brain Research*, 113, 327-336.
- Honda, H. (1999). Modification of saccade-contingent visual mislocalization by the presence of visual frame of reference. *Vision Research*, 39, 51-57.
- 乾 敏郎, 朝倉 暢彦, 本田 仁視. (1996). 視覚情報と眼球運動情報の統合過程. 日本心理学会第60回発表論文集.

- Irwin, D. E., Brown, J. S., & Sun, J. S. (1988). Visual masking and visual integration across saccadic eye movements. *Journal of Experimental Psychology: General*, 117, 276-287.
- Jordan, J. S., & Hershberger, W. A. (1994). Timing the shift in retinal local signs that accompanies a saccadic eye movement. *Perception & Psychophysics*, 55, 657-666.
- 川人 光男. (1996). 脳の計算理論. 産業図書.
- Keller, E. L. (1991). The brainstem. In R. H. S. Carpenter (Ed.), *Eye movements* (Vol. 8, p. 200-223). London: The Macmillan Press Ltd.
- 小松崎 篤, 篠田 義一, 丸尾 敏夫. (1985). 眼球運動の神経学. 医学書院.
- Marr, D. (1982). *Vision: a computational investigation into the human representation and processing of visual information*. New York: W. H. Freeman and Company.
- 丸尾 敏夫 (編). (1993). 斜視診療の実際. 文光堂.
- Mateeff, S. (1978). Saccadic eye movements and localization of visual stimuli. *Perception & Psychophysics*, 24, 215-224.
- Mateeff, S., Yakimoff, N., & Dimitrov, G. (1981). Localization of brief visual stimuli during pursuit eye movements. *Acta Psychologica*, 48, 133-140.
- Matin, E., Clymer, A. B., & Matin, L. (1972). Metacontrast and saccadic suppression. *Science*, 178, 179-181.
- Matin, L. (1972). Eye movements and perceived visual direction. In D. Jameson & L. Hurvitch (Eds.), *Handbook of sensory physiology*. (Vol. 7, p. 331-380). New York: Springer-Verlag.
- Matin, L., Matin, E., & Pearce, D. G. (1969). 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.
- Matin, L., Matin, E., & Pola, J. (1970). 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 & Psychophysics*, 8, 9-14.

- Miller, J. M. (1996). Egocentric localization of a perisaccadic flash by manual pointing. *Vision Research*, 36, 837-851.
- Munoz, D. P., & Wurtz, R. H. (1993a). Fixation cells in monkey superior colliculus. I. characteristics of cell discharge. *Journal of Neurophysiology*, 70, 559-575.
- Munoz, D. P., & Wurtz, R. H. (1993b). Fixation cells in monkey superior colliculus. II. reversible activation and deactivation. *Journal of Neurophysiology*, 70, 576-589.
- Optican, L. M., & Robinson, D. A. (1980). Cerebellar-dependent adaptive control of the primate saccadic system. *Journal of Neurophysiology*, 44, 1058-1076.
- O'Regan, J. K. (1984). Retinal versus extraretinal influences in flash localization during saccadic eye movements in the presence of a visible background. *Perception & Psychophysics*, 36, 1-14.
- 大山 正, 今井 省吾, 和気 典二 (編). (1994). 新編 感覚・知覚ハンドブック. 誠信書房.
- Pola, J., & Wyatt, H. J. (1989). The perception of target motion during smooth pursuit eye movements in the open-loop condition: Characteristics of retinal and extraretinal signals. *Vision Research*, 29, 471-483.
- Roll, J. P., Gilhodes, J. C., Roll, R., & Harlay, F. (1996). Are proprioceptive sensory inputs combined into a "gestalt"? In T. Inui & J. L. McClelland (Eds.), *Attention and performance XVI: Information integration in perception and communication* (p. 291-314). MIT Press.
- Roll, R., Velay, J. L., & Roll, J. P. (1991). Eye and neck proprioceptive messages contribute to the spatial coding of retinal input in visually oriented activities. *Experimental Brain Research*, 85, 423-431.
- Schlag, J., & Schlag-Rey, M. (1995). Illusory localization of stimuli flashed in the dark before saccades. *Vision Research*, 35, 2347-2357.
- Sogo, H. (1998). Mislocalization of stimuli flashed near the time of saccade of different amplitude. *Perception*, 27 supplement, 142.
- Steinbach, M. J., & Smith, D. R. (1981). Spatial localization after strabismus surgery: Evidence for inflow. *Science*, 213(18), 1407-1408.

- Stevens, J. K., Emerson, R. C., Gersten, G. L., Kallos, T., Neufeld, G. R., Nichols, C. W., & Rosenquist, A. C. (1976). Paralysis of the awake human: Visual perceptions. *Vision Research*, 16, 93-98.
- Taylor, B. N., & Kuyatt, C. E. (1994). *Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results* (Tech. Rep. No. 1297). National Institute of Standards and Technology.
- Van De Grind, A. M., Grüsser, O. J., & Lunkenheimer, H. U. (1973). Temporal transfer properties of the afferent visual system. In R. Jung (Ed.), *Handbook of sensory physiology* (Vol. 7, p. 431-573). Springer-Verlag.

謝辞

本研究を指導していただいた京都大学大学院文学研究科の苧阪直行教授、藤田和生教授、櫻井芳雄教授に深く感謝申し上げます。京都大学大学院情報学研究科の乾敏郎教授には、本研究の基礎となる錯視現象を教えてくださいました。また、京都大学大学院文学研究科の森下正修さんには、本論文の草稿を査読していただき有益なコメントを頂きました。京都大学文学研究科心理学教室のスタッフの皆様、そして先輩、後輩の大学院生の皆様には、研究活動をさまざまな側面から支えていただきました。深く感謝申し上げます。

2001年 京都にて

十河 宏行