

博士論文（要約）

論文題目

身体運動を伴う手がかりからの奥行き知覚の研究

氏名 細川 研知

目次

第一章 奥行き手がかりと身体運動情報	1
1.1 奥行き手がかりとはなにか	1
1.2 運動視差とは何か	4
1.3 両眼視差とは何か	5
1.3.1 運動視差と運動視差の検出原理	7
1.3.2 心理物理学的な類似性	10
1.3.3 運動視差と両眼視差の生理学的基盤の相違	11
1.4 奥行き統合モデル	12
1.4.1 奥行きの空間的相互作用	15
1.5 運動視差と両眼視差の時間特性	18
1.6 運動からの構造復元について	19
1.7 本論文の内容	20
第二章 運動視差と両眼視差の比較	22
2.1 実験 1A	26
2.1.1 方法	26
2.1.2 結果	31
2.1.3 考察	37
2.2 実験 1B	38
2.2.1 方法	39
2.2.2 結果	39
2.2.3 考察	43
2.3 本章の考察	44

2.3.1 運動視差と両眼視差の相互作用	4 4
2.3.2 運動視差と両眼視差の統合	4 5
2.3.3 両眼視差の優位性	4 6
第三章 運動視差の時間特性	4 8
3.1 実験 2A	5 1
3.1.1 方法	5 1
3.1.2 結果と考察	5 6
3.2 実験 2B	6 0
3.2.1 方法	6 0
3.2.2 結果と考察	6 1
3.3 本章の考察	6 6
第四章 総合考察	6 8
4.1 本研究の結果のまとめ	6 8
4.1.1 運動視差と両眼視差の閾上での相互作用	6 8
4.1.2 運動視差の時間特性	6 8
4.2 運動視差と両眼視差の統合	6 9
4.3 運動視差の検出アルゴリズム	7 5
4.4 二段階モデル	7 8
引用文献	

第一章 奥行き手がかりと身体運動情報

1.1 奥行き手がかりとはなにか

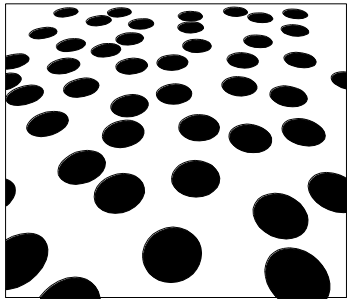
私たちは、日常的に奥行きを知覚している。奥行き知覚は、三次元の構造が投影された二次元の網膜像に基づいて成立する。奥行き知覚は、この二次元の網膜像から元の三次元構造を復元することで成り立っていると考えられる。従って、視覚系は、網膜像に含まれる何らかの情報に基づいて、三次元構造を復元しているはずである。この際、奥行き知覚の情報源となる視覚特徴のことを奥行き手がかりと呼ぶ。奥行き手がかりには様々な種類があり、線遠近法、大気遠近法、テクスチャ勾配、遮蔽、既知の物体の大きさ、運動視差、両眼視差、輻輳、調節、相対運動、陰影など多くのものを数え上げることができ(図 1-1)、様々な観点から分類されている。例えば絵画的手がかり・生理的手がかり、両眼手がかり・単眼手がかり、静的手がかり・動的手がかりといった分類が知られている。

なぜこのように多くの種類の奥行き手がかりが存在するのだろうか。その理由として考えられるのが、奥行き手がかりの不良設定性である。私たちは目で外界を見ているが、目に映る像、すなわち網膜像は二次元であり、本質的に奥行き情報は欠落している。従って網膜像の情報のみからでは奥行きを完全に復元することはできない。例えば、絵画的手がかりの一種である大きさの手がかりでは、小さな網膜像を形成する対象物は遠くにあり、大きな網膜像を形成する対象物は近くにあるという基本原理、初等物理学的な性質に基づいて対象までの距離を知覚する、もしくは計算すると考えられるが、もし対象物の大きさが異なっていたならば、この計算は成立しない。網膜像は、対象物までの距

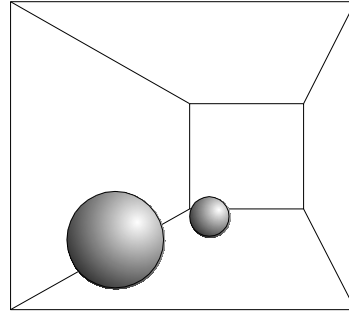
離と同時に、対象物の大きさにも依存するわけであるから、解は不定になる。これが、ここでいう不良設定性である。この場合、対象物の大きさに関する何らかの仮定を置ければ対象物間の相対距離を一意に定めることができる。例えば、二人の人物、二個のリンゴというようなものであれば、大きさはほぼ等しいわけであるから、網膜像の大きさは二つの対象物までの距離とほぼ反比例の関係にある。つまり、この場合、人物の大きさ、もしくはリンゴの大きさはほぼ等しいという仮定があつて、はじめて、大きさ手がかりに基づいた奥行き知覚が成立する。この仮定は制約条件 (constraint, Marr, 1982) と呼ばれる。ただし、制約条件を導入したとしても、外界の情報を完全に再現するための情報があるわけではないため、Hollow face 錯視(Gregory, 1970; Hill & Bruce, 1994)などのように制約条件と現実の不一致による錯視が生じることもある。

個々の手がかりは、その手がかり特有の不良設定性を持つ。このことが、奥行き知覚に多くの手がかりが存在する一つの理由であると考えられる。つまり、個々の手がかりは網膜像から奥行きを不完全にしか復元できないので、複数の手がかりを組み合わせれば確度を高めることができるだろうという考えである。こうした観点に立つと、奥行き手がかりの統合が奥行き知覚のシステム全体にとって必須の処理過程であることが明確になってくる。そして、この考えが、本研究で奥行き手がかりの統合を考える基本的な動機となっている。これまで、様々な奥行き手がかりの組み合わせ、例えば、両眼視差とテクスチャ(Johnston, Cumming, & Parker, 1993)、両眼視差と運動からの構造復元(Fang & He, 2004; Nawrot & Blake, 1989, 1991)、運動視差と両眼視差(Bradshaw & Rogers, 1996)、両眼視差と陰影(Bülthoff & Mallot, 1988)などいくつかの手がかり間での統合のされ方が検討されている。本研究では、原理的に類縁関係にあることが想

(A)



(B)



(C)

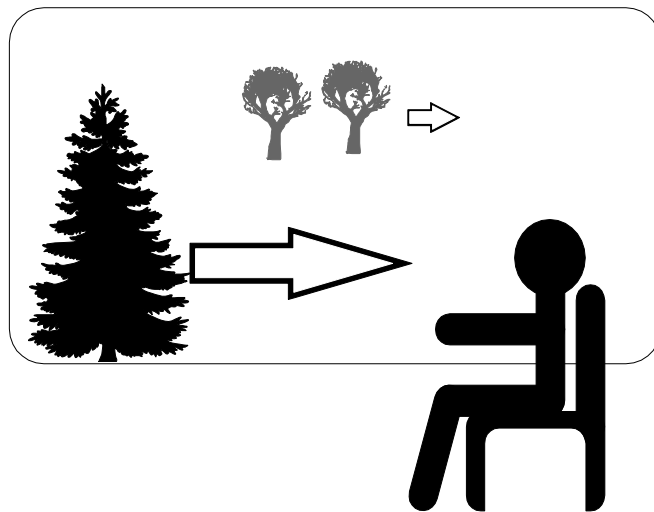


図 1-1 奥行き手がかりの例 (A)テクスチャ勾配 (B)線遠近法, 陰影, 既知の物体の大きさ (C)運動視差。電車に乗って車窓を見たときに, 近くのは速く動いて見え, 遠くのは遅く動いて見える。

定される運動視差と両眼視差の統合を中心に、そこにおける奥行き手がかり統合のあり方を検討する。

1.2 運動視差とは何か

走行中の電車から風景を見ているときなど、観察者が視線方向を固定しつつ移動しながら外界を観察すると、近くの対象は速く動いて見え、遠くの対象は遅く動いて見える（図 1-2C）。このように、観察者と複数の観察対象の位置関係が変化すると、網膜上に観察者と対象の間の奥行き距離に応じた対象の位置変化が生じる（図 1-2A）。この相対的位置変化は、網膜上での相対的運動となる。こうした相対位置の変化、もしくは相対速度差を手がかりとして奥行きを逆算することができる。このような奥行き手がかりを運動視差 (motion parallax) と呼ぶ。

ただし、網膜上に相対的な位置変化、運動があったからといって、それが運動視差によるものであるとは限らない。外界で実際に対象の位置変化が生じている場合と、外界の対象は動かず観察者が動いて運動視差が生じている場合、どちらでも網膜上には相対的な位置変化、運動が投影されるからである。従って、網膜上の情報だけでは、網膜上の位置変化や運動がそのどちらによるものであるかを決定することはできず、曖昧である。そこで、これを一意に決定するためには制約条件が必要となる。その一つは、通常、物体は簡単には変形せず、かつ静止しているものだとする仮定（剛体性の仮定、静止性の仮定）である (Ullman, 1979b, 1984; Wexler, Panerai, Lamouret, & Droulez, 2001)。これらの仮定のほかに、身体運動情報も曖昧さの解決に用いられる。身体運動と整合性のある網膜上の相対運動は対象の奥行きの違いにより生じているものと解釈され、そうでないものは、対象自体の運動によるものと解釈される (Ono & Steinbach,

1990; Rogers & Graham, 1979; Wexler & van Boxtel, 2005)。このことは、こうした事態では観察者が剛体性・静止性の仮定を持ちがちであることを示唆する。また、Ullman (1979a)が示したランダムドットで描かれた回転する円筒の例 (Ullman Cylinder) のような場合には、対象物の運動のみ、対象物内部に含まれる相対運動のみから対象物の立体構造を復元、知覚することができる。こうした知覚は運動からの構造復元 (Structure from Motion, SfM) と呼ばれる。しかし、この運動からの構造復元は、解を一意に定めることはできない。Ullman Cylinder ではドットの運動方向が異なる二つの面が形成されるが、それらの面のうちどちらが手前であると知覚されるかという奥行き極性には曖昧さがあり、長く観察しているとどちらの面が手前に見えるかが反転する。その知覚の反転に伴い、円筒の回転方向、右回りか左回りかも反転する。しかし、身体運動がある場合には、観察者の動きと逆方向に動くものが手前、同じ方向に動くものが奥であると決定でき、そうした曖昧性が解決される (Mitsudo & Ono, 2007; Naji & Freeman, 2004; Nawrot, 2012)。身体運動情報は定量的な情報であり、観察者の運動速度に依存する網膜上の運動速度変化を身体運動の速度情報によって標準化することで、視差量をより詳細に計算することもできる (Ono & Ujike, 2005)。

1.3 両眼視差とは何か

運動視差以外の代表的な奥行き手がかりの一つに、両眼視差がある。両眼視差は、右目と左目という約 6~6.5 cm 離れた二つの観察点から得られる網膜像、つまり右眼と左目の網膜像の間の差のことである。例えば、注視しているものより遠くにあるものは右目像では右側に、左目像では左側に寄って見え、近くにあるものはその逆の方向に寄って見える (図 1-2B)。両眼視差には両眼を結

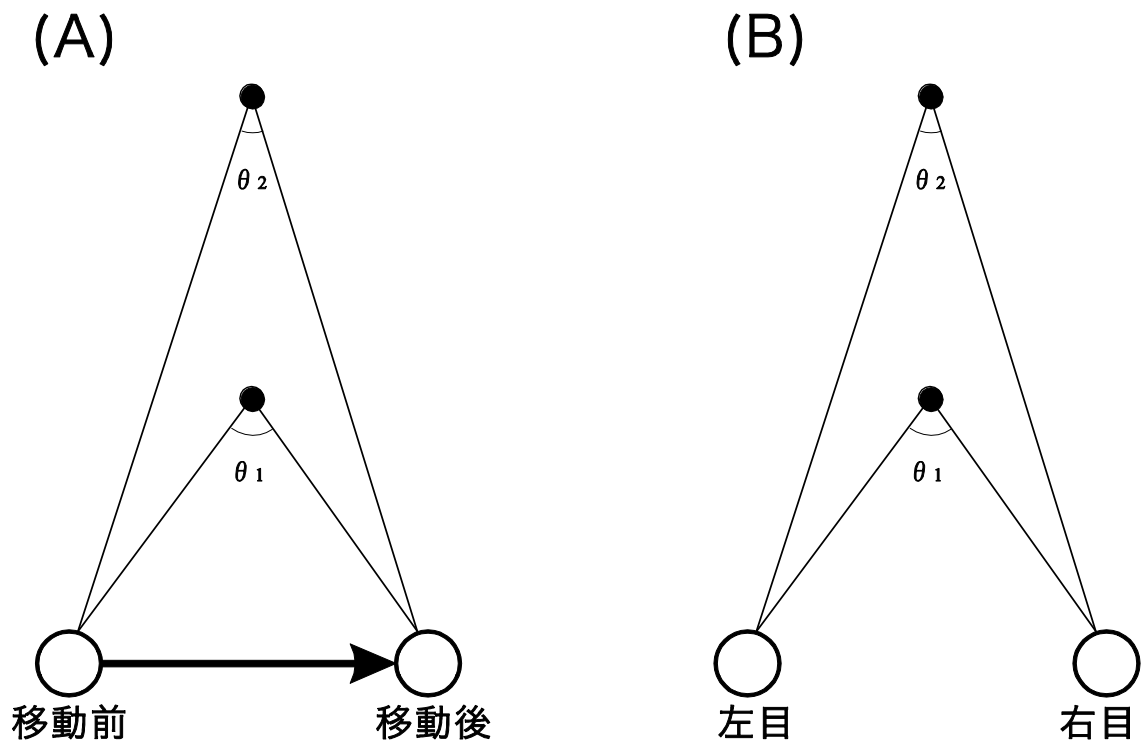


図 1-2 運動視差と両眼視差の原理の模式図。複数の対象を観察した場合に、奥行きに応じて観察点ごとに見た目の位置にずれが生じる。(A)運動視差の場合。(B)両眼視差の場合。 θ_1 と θ_2 の差に起因する網膜上の位置ずれが視差となる。

ぶ軸上での両眼像のずれ（水平視差）とそれに直交する軸上の両眼像のずれ（垂直視差）があるが、水平視差のほうが大きいので、多くの研究では水平視差を対象として両眼視差の実験を行っている。観察点の違いによる網膜像のずれは視野内の全ての点で生じうるが、視野内のそれぞれの点ごとの視差の違いはそれぞれの場所の相対的な距離の違いを表しており、絶対的な距離を計算するには、輻輳など絶対距離の手がかりを基準として相対視差量を解釈する必要がある。この両眼視差と運動視差は、その名の通り共通した原理に基づいた奥行き手がかりであり、多くの類似点を持つ。

1.3.1 運動視差と両眼視差の検出原理

両眼視差はある時点における両眼間の観察位置の違い、つまり両眼間の距離に基づく両眼の網膜像の差から求められる視差であり、また運動視差は観察者の継時的な位置変化に基づく同一眼の網膜像の差から求められる視差である。どちらも網膜像の差から計算される視差であり、アルゴリズムとしての共通性があることが想定される。さらに、空間周波数特性に高い類似性が見られるなど、知覚的にも視差からの計算であることに由来すると考えられる共通性があることが知られている(Graham & Rogers, 1982; Ono & Ujike, 2005; Ono & Wade, 2005; Rogers & Graham, 1982; Tyler, 1991)。

しかし、両眼視差と異なり、運動視差の検出には時間軸上での網膜像の比較が必要となる。このとき、対象の時空間的变化を連続的に捉えた運動の計算ではなく、異なる時間において観察した二つの網膜像を比較する離散的な計算が行われているならば、先に観察した網膜像を保存し後に観察した網膜像と照合を行うような記憶的なプロセスが必要となる。加えて、運動視差からの奥行きに含まれる曖昧性を除去するためには身体運動情報と統合する必要がある。そ

のため、運動視差の検出、そこからの奥行き知覚のプロセスには、比較的高次の過程が関与している可能性がある。一方、両眼視差の計算は瞬間的な両眼間の網膜像間の差から計算することも可能であり、初期視覚野に生理学的な計算の基盤があることも知られている (Barlow, Blakemore, & Pettigrew, 1967; Ohzawa, DeAngelis, & Freeman, 1990)。運動視差が連続的な頭部の運動、つまり連続的な観察点の移動に基づくことを考えれば、瞬間的な差分、つまり網膜像の時空間微分に基づく視差の検出というアルゴリズムも想定されるが、その場合、情報の蓄積がない分、得られる視差の信頼性は低くなる。両眼視差では、眼球間隔は固定されており、必然的に離散的な視差の計算が必要となるが、離散的なゆえに誤対応の問題が生じてくる。離散的な運動視差の計算でも同様な問題が生じる。

両眼視差、運動視差にかかわらず、最終的に奥行きを得るためには視差から奥行きを計算する過程が必要となる。この過程は、両者、ほぼ共通のアルゴリズムで対処可能であり、この部分を二つの奥行き知覚メカニズムが共有している可能性はある。このように考えると、両眼視差、運動視差間の統合には二つの可能性があることになる。第一の可能性は、奥行きとしてスケーリングされる以前の視差段階の統合であり (図 1-3A)、第二の可能性は、それぞれが奥行きを計算した後の奥行きレベルでの統合である (図 1-3B)。奥行き計算以前に視差レベルで統合されるとすると、奥行き計算の過程の少なくとも一部を共有することも可能となり、もしそうであるならば計算資源の節約にもなる。一方、それぞれ独立に奥行き計算を行い、その出力レベル、つまり奥行き情報を統合するというモデルにも合理性があり、これまでの多くの手がかかり統合のモデルはこの路線をとっている (Brenner, van den Berg, & van Damme, 1996; Jacobs, 2002; Landy, Maloney, Johnston, & Young, 1995; Maloney & Landy, 1989)。しかし、この

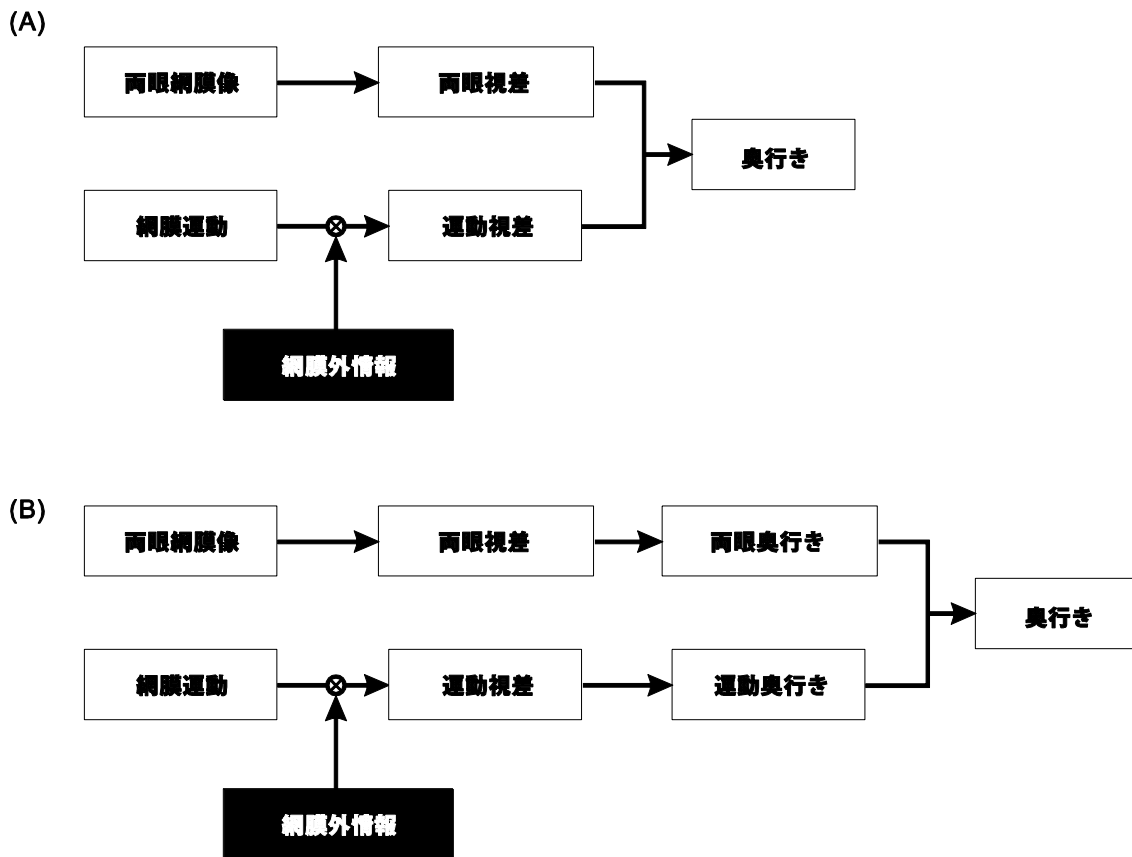


図 1-3 運動視差と両眼視差の統合のされ方の模式図。(A)視差段階で統合されているモデル (B)視差段階では統合されず、後の段階で統合されるモデル

二つの可能性、運動視差と両眼視差の相互作用が視差の段階で起きるか、奥行き情報の段階で統合されるかについて本格的に検討した研究はほとんど見当たらない。Bradshaw and Rogers (1996)は、順応および閾下加算の手続きを用いて両眼視差と運動視差の統合を検討し、運動視差に対する順応が両眼視差からの奥行き検出の閾値を上昇させること、その逆でも閾値上昇がみられることを報告し、両手がかりの等価性を論じている。また、それぞれ単独では奥行き検出閾をわずかに下回る運動視差と両眼視差を同時に提示すると奥行きが知覚されることも示したが、このような閾下加算は、少なくとも知覚閾よりも小さな奥行き情報が手がかり間で加算されていることを示しており、背後に手がかり間で共有されている何らかのプロセスがあることを示唆するものである。

1.3.2 心理物理学的な類似性

運動視差と両眼視差は心理物理学的な特性に関しても様々な類似性が認められる。例えば、どちらも視差量が大きすぎるときには奥行きを計算できなくなる。両眼視差の場合、視差量が10分を超えると両眼融像が維持できなくなり、二重像を知覚するようになる。視差が10分から1000分の間までは二重像を知覚しつつも奥行きを知覚できるが、1000分以上では奥行きは知覚できなくなる (Tyler, 1991)。運動視差の場合、視差量が両眼視差換算で10分未満の場合は網膜上に運動があっても奥行きしか知覚せず運動を知覚しないが、10分を超えると運動を知覚し始める。10分から100分までは奥行きと同時に運動を知覚し、100分以上では奥行きを知覚できず運動しか知覚できない (Ono & Ujike, 2005; Ono & Wade, 2005)。さらに、運動視差と両眼視差、二つの手がかり間で残効の転移を測定した実験では、どちらを順応刺激とした組み合わせでも、順応刺激の40%

から 60%の視差量で奥行きを定義した刺激を提示することで残効による奥行き知覚を打ち消すことができると報告されている(Graham & Rogers, 1982)。

1.3.3 運動視差と両眼視差の生理学的基盤の相違

運動視差と両眼視差は視差から奥行きを計算する原理は同じだが、視差を検出するための生理学的基盤は大きく異なる。両眼視差検出の生理学的な基盤は、初期視覚野の両眼性の細胞から始まっている(Barlow et al., 1967)。これらの細胞は、初期的な運動検出メカニズム(Adelson & Bergen, 1985)とよく似た特性を持ち、位置の時間差分の代わりに位置の両眼差分を取る細胞で説明できることが報告されている(Ohzawa et al., 1990)。また Barlow et al. (1967)は、同じくネコの 18 野で、両眼視差に選択性を持つ細胞が見いだされることを報告している。両眼視差を検出する細胞が初期視覚野で見ついていることは、両眼視差の計算が視覚処理の初期段階で行われていることを示唆する。

一方、運動視差では、初期視覚野で専門にそれを検出するような細胞は見つかっていない。このため、まず運動を検出したのち、運動情報の差分を取り相対運動を計算、さらに相対運動を運動視差として解釈する、という順序で処理されていると考えられている(Andersen & Bladley, 1998; Maunsell & van Essen, 1983)。初期の運動検出モデルと同様の特性を示す細胞は初期視覚野にある(Adelson & Bergen, 1985; De Valois, Cottaris, Mahon, Elfar, & Wilson, 2000; McLean & Palmer, 1989; Watson & Ahumada, 1985)こと、両眼視差検出と初期運動検出のメカニズムが類似していることに注目すると、運動視差の検出は両眼視差の検出に比べより高次の処理段階で行われていると考えることもできる。さらに、運動視差は、定義上身体運動情報がなければ計算することはできない。運動視差から奥行き量を計算するまでには、運動検出、相対速度検出、身体運動情報

との統合といった、両眼視差より多くの処理が必要であることも、運動視差の処理がより高次の段階で行われていることを支持する。これらの生理学的証拠の相違点に鑑みれば、心理物理学的な性質の類似は、運動視差と両眼視差が手がかりとして等価であることを示しているとは限らない。

ただし、初期視覚野における両眼視差の計算についても、ある一つの特徴点の両眼間の位置差である *absolute disparity* のみが計算されており、視野全体で奥行きをマッピングするのに必要な *relative disparity* の計算は行われていないとする報告もあり (Cumming & Parker, 1999)、初期の視差検出の相違だけで全てを説明できるわけではない。以上のように、運動視差と両眼視差の関係についての決定的な証拠はまだ得られていない。

1.4 奥行きの統合モデル

本論文の第一の目的は、運動視差と両眼視差の二つの手がかり系の間の統合について検討することである。この両者の統合に関して考える上で基盤となる、一般的な奥行き手がかりの統合モデルについて、まず考えてみたい。最も単純なモデルは、さまざまな奥行き手がかりからの奥行きの出力を平均するというものである。しかし単なる平均では多くの問題がある。例えば、奥行き手がかりとなる情報が常に網膜上にあるとは限らず、模様のない無地の表面では両眼視差や運動視差、テクスチャ手がかりを計算することができない。情報が欠如して奥行き情報を計算できない手がかりも加味してしまうと最終的な奥行きの評価が適切でなくなる可能性がある。

この問題を回避するモデルに、単純平均ではなく手がかりごとに任意の重みをつけて線形加算するものがある (Regan & Beverley, 1979)。また、手がかりの有無、確実性、得意な距離、質といった要素を評価し、それに応じた重みを付け

て平均をとるといふ、より精緻化したモデルも提案されている(Brenner et al., 1996; Jacobs, 2002; Landy et al., 1995; Maloney & Landy, 1989)。例えば Johnston et al. (1993)は、両眼視差とテクスチャによる奥行き統合を調べたところ、観察距離が遠くなるほど両眼視差の重みが低下しテクスチャの重みが増すという結果を得た。また、テクスチャと陰影の間では、面の曲率が上がるほどテクスチャが重視されるという傾向が報告されている(Curran & Johnston, 1994)。Landy et al. (1995)の“Modified weak fusion model”では、各手がかりが一致していた場合には単純な平均を取るが、各手がかりが矛盾した奥行き量を示していた場合に単純な平均とならないことを考慮して、手がかりとなる特徴が存在するか否か、その手がかりがどの程度信頼できるか(reliability)を別途検出した上で、信頼度を重みとして平均するストラテジーを提案している(図 1-4)。つまり、上記の諸研究の結果を反映したものとなっている。また Jacobs (2002)はカルマンフィルタの考えを導入し、曖昧な手がかりは信頼性も低いものとして、奥行き統合時の重みを低くするモデルを立てている。現時点では、上記、Landy らの“Modified weak fusion model”が奥行き手がかり統合に関して、標準的なモデルとして広く受け入れられている。また、このモデルはオブジェクト検出などの他の視覚属性(Kersten, Mamassian, & Yuille, 2004; Kersten & Yuille, 2003)や視覚と触覚の統合(Ernst, Banks, & Bühlhoff, 2000; Hillis, Ernst, Banks, & Landy, 2002)にも援用され、その有効性が確認されている。このことから、本論文ではこのモデルを下敷きとして運動視差と両眼視差の統合関係を考察していくこととしたい。繰り返しになるが、彼らのモデルの基本的な特徴は、結果が、つまり算出される奥行きがほぼ一致している場合には、重み付けを行うことなく、単純に平均するが、手がかり間にコンフリクトがあり、結果が一致しない場合には、各手がかり系の信頼度などを考慮した重み付けを行った後に平均化するという点にある。

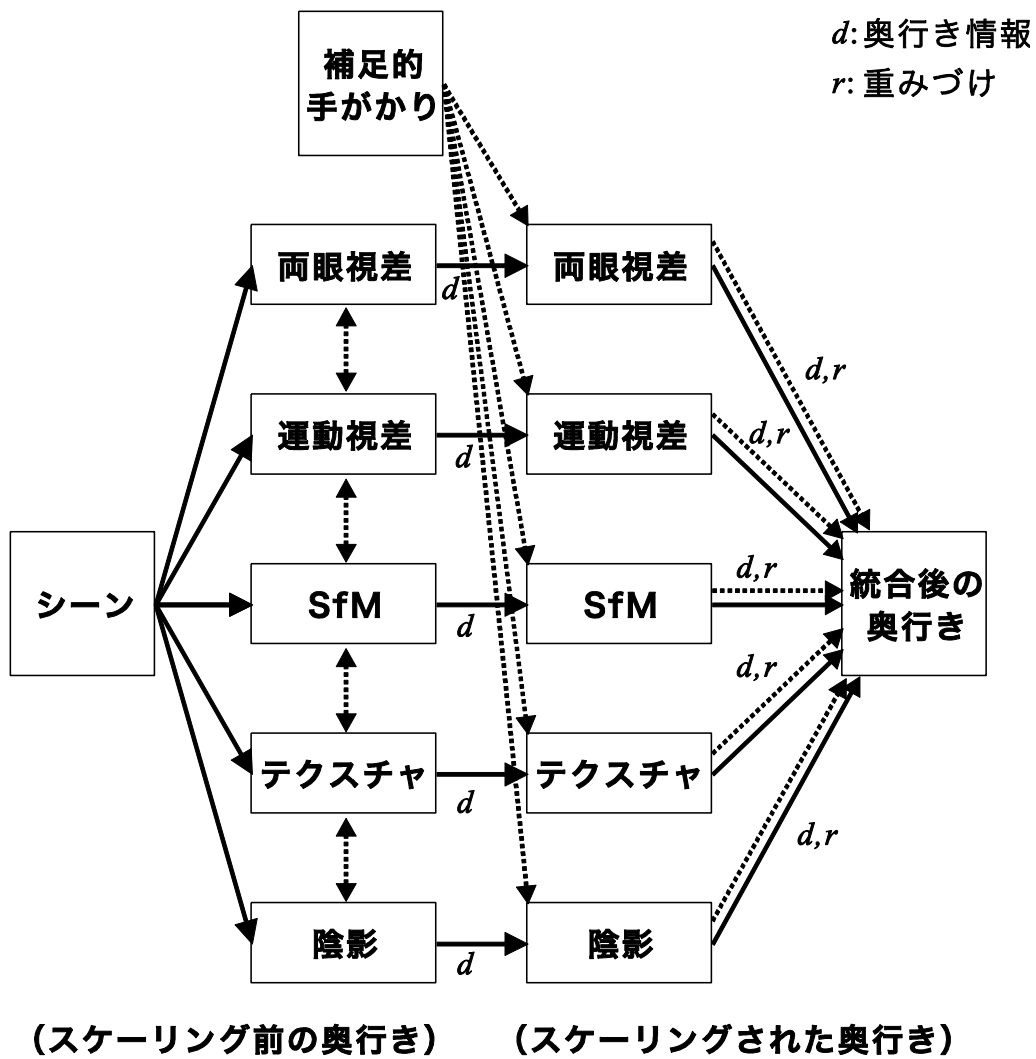


図 1-4 Modified weak fusion model の模式図(Landy et al., 1995 より改変)。「補足的 手がかり」は手がかりの有無，確実性，得意な距離，「質」といった要素の評価である。「スケーリング」は奥行き距離の単位を手がかり間で共通化し，各手がかりから計算した奥行き量を加算可能な形にすることを指す。

1.4.1 奥行き空間的相互作用

前にも述べたように、Bradshaw and Rogers (1996)は順応、閾下加算の手続きを用いて運動視差と両眼視差の統合関係を検討した。その結果から、彼らは両者の間に相互作用があり、閾下加算が可能な関係が存在すると論じている。しかし、閾下加算では極性が一致している場合の加算関係しか検討できず、両手がかりの極性が不一致の場合、つまり手がかりのコンフリクトが存在している場合についてはこの手法では、検討することが難しい。

本研究では、Gillam, Blackburn, and Brooks (2007)によって検討された奥行き空間的な相互作用を用いて、両手がかりの統合関係を検討することとした。以下、簡単に、この現象の説明をする。この現象は、Werner (1937, 1938)によって、はじめて報告されている。彼は、奥行き方向の傾き(slant)をつけた実物の板を刺激として、それを複数近接して提示した場合、ある刺激の見た目の傾きが近接する刺激の傾きに影響を受けることを報告した。この効果は、多くの場合近接する刺激の傾きの差が強調され、近接する刺激と反対側に傾いているような錯覚を起こすため、傾きの対比効果と呼ばれている。このような効果は、両眼視差のみで奥行き傾きを提示した場合(van Ee & Erkelens, 1996; Gillam, Flagg, & Finlay, 1984; Graham & Rogers, 1982; Sato & Howard, 2001)や、運動視差のみで傾きを提示した場合(Graham & Rogers, 1982)に生じることが確かめられている。

Gillam et al. (2007)は、図 1-5 に示すような刺激を用い、面の slant の違いに基づく傾きの対比と、slant によって生じた奥行きの違いそのものによる対比の両方が加算されることを報告している。彼女らは、奥行き傾き対比実験の典型的な刺激配置を三つに分類した。彼女らの実験では、両眼視差手がかりで定義した奥行き傾きを持った面の刺激（以後これを「パッチ」と呼ぶ）を三つ並べて提示した。一つ目の三つのパッチが傾きの回転軸線上に並ぶ「ねじれ(twist)

配置」では、傾きの対比とパッチ間に生じる奥行きの違いそのものによる対比は同じ方向となる。これに対して、三つのパッチが傾きの回転軸線上に垂直に並ぶ「折れ(hinge)配置」では、パッチ間の奥行き段差がないよう配置した条件では奥行きの違いそのものによる対比は生じなかった。平均奥行きが等しくなるよう配置し段差が生じた場合には、段差による局所的な奥行き対比により、傾きの対比と逆の方向に対比効果が生じた。これらの刺激で生じる対比効果の量は、奥行き傾き対比と奥行きの違いそのものによる対比の合計であった。この Gillam et al. (2007)の実験は、両眼視差のみを用いたものであるが、Rogers and Graham (1982)は、類似した実験を運動視差のみを用いて行い、ほぼ同様の結果を得ている。

このように、Gillam et al. (2007)、Graham and Rogers (1982)では、両眼視差どうし、運動視差どうしの間での相互作用のみを検討しており、手がかり間の相互作用は検討していない。そこで、本研究では、そのような相互作用が運動視差定義の刺激と両眼視差定義の刺激の間でも生じるかどうかについて検討する。この手法を用いれば、Bradshaw and Rogers (1996)が用いた閾下加算とは異なり、両手がかりの極性が同じ場合と共に、異なる場合も検討することができる。ただし Bradshaw and Rogers (1996)の場合は、網膜上で両手がかりが重なる刺激を用いているが、この実験では空間的に離れた領域の間での相互作用を見ることになり、Bradshaw and Rogers (1996)の結果と単純な比較を行うことは難しい。しかしながら、両手がかり間の相互作用の有無、また加算関係の有無を確認することはでき、その結果に基づいて、コンフリクトがある場合と、無い場合の運動視差、両眼視差の間での相互作用を測定し、Landy et al. (1995)の Modified weak fusion model との整合性を検討することは可能である。また、本実験にはもう一つ別の

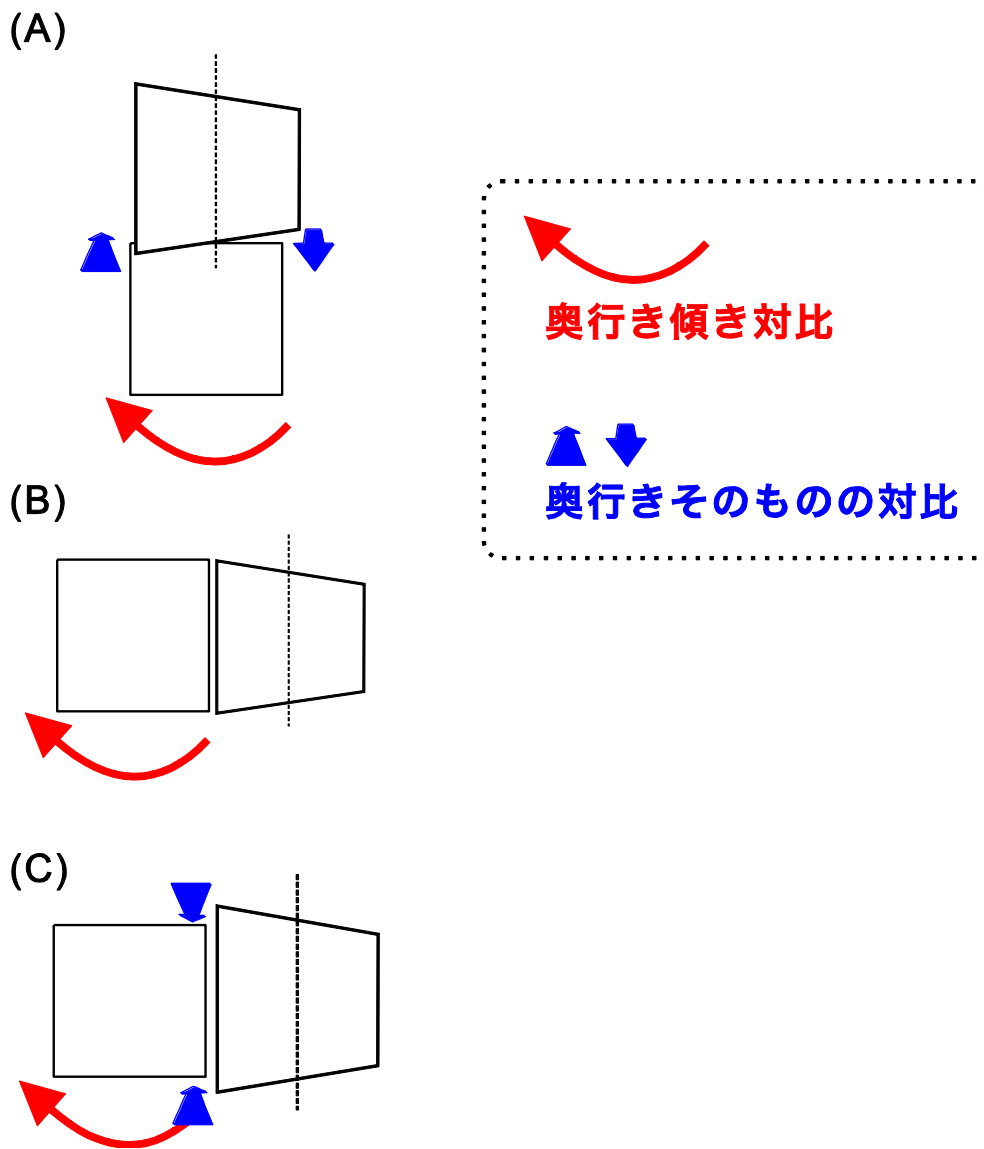


図 1-5 Gillam et al.(2007)による実験の解釈の模式図。(A)ねじれ(twist)配置では傾き対比と同じ方向に奥行きそのものの対比が生じ加算された。(B)折れ(hinge)配置でパッチ間に段差がない場合は傾き対比のみが生じた。(C)折れ配置でパッチ間の段差があった場合は傾き対比と奥行きそのものの対比が逆方向に生じ、両者が加算された結果、負の傾きの対比効果がみられた。

意義もある。Bradshaw and Rogers (1996)の実験は閾近傍の特性を確認する実験であった。本論文で行う相互作用に関する実験は、奥行きが明瞭に知覚される視差量を持つ刺激を用いたものであり、閾付近の特性が閾上の特性とどの程度一致するのかを確認することも本実験の意義と考えることができる。

1.5 運動視差と両眼視差の時間特性

両眼視差、さらにそれに基づく奥行き表象は、比較的低次の段階で処理され、要する時間も比較的短い。心理物理学の実験によれば、奥行き変化が検出できる限界の周波数は 6 Hz (Norcia & Tyler, 1984)、奥行き知覚の時間加重の上限は 160 ms 余りである(Tyler, 1991)。Norcia and Tyler (1984)の 6 Hz という結果は、約 160ms の期間に生起する二回の奥行き変化が検出可能であることを示しており、したがって、両眼立体視の処理時間は 80 ms 以下であることを示している。このふたつの研究の結果から、両眼立体視情報の処理は 100 ms 程度の時間を要する仮定であると推察される。一方で、運動視差に基づく奥行き表象は、剛体性の仮定や静止性の仮定に関する曖昧性の解決などの付加的な処理が必要なため、より高次の過程の関与が必要となり、要する時間が長い可能性が考えられる。運動視差と同様に網膜上の相対運動から奥行きを計算する SfM では、知覚される奥行き量が安定するには 1 秒程度の観察時間を必要とすることが明らかにされている(Burr & Santoro, 2001; Caudek, Domini, & Di Luca 2002; Domini, Vuong, & Caudek, 2002; Eby, 1992; Treue, Husain, & Andersen, 1991)。これらの時間特性の差異は、統合関係に一定の示唆を与えるものと考えられる。しかし、運動視差に基づく立体視の時間特性に関する検討は、これまでのところ行われていない。そこで、本論文第三章で、運動視差からの奥行き知覚の時間特性を測定し、こ

れまでに知られている両眼立体視の時間特性と比較し、両者の処理レベルの差異、および両者の統合に関する考察を試みる。

1.6 運動からの構造復元について

本論文では、特に第三章の時間特性に関する議論において、運動視差、両眼視差によって定義される奥行き知覚に加えて、1.2節で述べた SfM を含めた議論を行う。そのため、ここでその概要を記述しておくこととする。運動視差による奥行き知覚と SfM の違いは、身体運動を伴うか伴わないかという点にあり、どちらも網膜像の運動、継時的な変化に基づく奥行き知覚であるという類似性を持つ。原理的な制約条件として、運動視差の場合は対象物の剛体性と共に、対象物は静止している（静止性）という仮定を想定するが、SfM では剛体性の仮定のみで、対象物に対して静止性の仮定は置かず対象物は動いているものとする点が運動視差とは異なっている。しかし、運動視差の場合とは逆に、観察者は静止しているものと仮定する。

SfM は身体運動情報を用いない分、本質的に曖昧性を包含する。例えば、前述した Ullman Cylinder (Ullman, 1979a) の場合、奥行きおよび回転方向が曖昧となる。この曖昧性は身体、もしくは頭部の運動情報と統合することによって除去することが可能である (Mitsudo & Ono, 2007; Naji & Freeman, 2004; Nawrot, 2012)。

また、SfM における奥行き計算は、運動視差に比べ多量の視覚情報と複雑な計算を必要とする。運動視差の場合には、身体運動の情報との統合により最低限必要となる計算量がある程度少なくなり、最低で二つの物体を二か所から観察すれば視差が計算できる (Ono & Steinbach, 1990; Ono & Ujike, 2005)。一方で SfM の場合、一定時間、様々な角度から対象を見たときの相対運動情報を蓄積

して、対象の構造を絞り込むことが計算論的に指摘されており(Ullman, 1979b, 1984; Hildreth, Grzywacz, Adelson, & Inada, 1990), 四つの対象を三か所以上から観察するか(Ullman, 1979a), 七つの対象を二か所以上から観察する必要がある(Tsai & Huang, 1984)。このように、身体運動情報がない SfM では、計算のために不足した情報量が運動視差に比べ大きく、より長い時間多くの情報の蓄積を必要とする。心理物理学的にも、奥行き知覚が安定するまでに 1 秒程度の観察が必要であることが報告されている(Burr & Santoro, 2001; Caudek et al, 2002; Domini et al., 2002; Eby, 1992; Treue et al., 1991)。

1.7 本論文の内容

本論文では運動視差と両眼視差の統合のあり方について、二つの側面から考察する。

第二章では、両眼視差と運動視差の間に起こる閾上での相互作用（対比・同化）を調べ、両手がかりの統合関係について検討する。

第三章では、運動視差の時間特性を調べ、これまでの研究ですでに比較している両眼視差や、同じ網膜上相対運動を手がかりする SfM との時間特性と比較する。運動視差と両眼視差は、ともに視差を情報源としている。運動視差では、網膜像の運動から相対運動速度を計算し、身体運動情報を参照し二種の感覚情報を合成して視差情報を計算する。一方で、両眼視差は両眼で同時に得られた網膜像の差分を初期視覚野で計算することにより視差情報を求める。同じ視差情報でも、両者の計算方法は全く異なり、時間特性が違う可能性があるが、一方で二つの手がかりが等価であれば、その時間特性は一致するはずである。これにより、運動視差が視差という共通性をもとに運動視差との類似性が高いの

か、それとも視覚的運動を情報源とするという共通性をもとに SfM との類似性が高いのか、その関係を明らかにすることができる。

第四章では、本研究の実験を総括し、運動視差からの奥行き情報が我々の奥行き計算の中でどのように統合されているか、総合的な考察を行う。

第二章 両眼視差と運動視差の比較

本章では、奥行き対比効果を切り口として、運動視差と両眼視差の統合のあり方を検討する。

本章の内容はこれから刊行する予定であり、「『博士論文の内容を要約したもの』の公表に関するガイドライン」に基づき、刊行されるまでの期間はインターネット公表からは削除する。

第三章 運動視差の時間特性

前章では、奥行き対比に関する実験により、運動視差と両眼視差の知覚特性に関する類似性を示すと共に、両者の統合が、現在奥行き統合のモデルとして広く受け入れられている Modified Weak Fusion モデル (Brenner et al., 1996; Jacobs, 2002; Landy et al., 1995; Maloney & Landy, 1989)で提案されているものとは異なることを示すことができた。先行研究のモデルでは、各手がかりの検出過程ごとに独立に奥行きが計算され、手がかりにコンフリクトがない場合にはその出力が対等にまとめ上げられるという仮定に基づいている。しかし、前章の実験結果は、少なくとも奥行き対比現象に関しては、明らかに両眼視差が優位となる形で運動視差と両眼視差の統合が行われることを示している。両者の知覚特性としての類似性からすると、この両眼視差の優位性は予想外の結果であるということもできるだろう。

第一章でも述べたように、両眼視差の検出、それに基づく奥行きの計算は比較的低次の過程で実現されているという考えが広く受け入れられている (e.g. Barlow et al., 1967)。心理物理学的にも両眼立体視の処理時間が 100 ms 余りと短いことも (Norcia & Tyler, 1984; Tyler, 1991)こうした考えを支持する事実とみなすことができるだろう。一方、運動視差からの奥行き計算では、運動視差と身体運動に関する情報の統合が必要になり、両眼視差からの奥行き計算よりも高次の過程が関与している可能性がある。しかし、運動視差に基づく立体視の時間特性に関する検討は、これまでのところ行われていない。そこで、本章では、運動視差からの奥行き知覚の時間特性を測定し、これまでに知られている両眼立体視の時間特性と比較し、両者の処理レベルに関する考察を試みる。

前章で見いだされた両眼視差の優位性は、両眼視差とそれに基づく奥行き表象が比較的低次のプロセスで処理される一方で、運動視差に基づく奥行き表象は付加的な処理のためより高次の過程の関与が必要となる可能性を示唆するものと見ることもできる。もしそうであるならば、処理過程の差異が処理時間に反映されている可能性もある。

さらに、処理時間に関する情報は、運動視差そのものの処理アルゴリズムについても示唆を与える可能性がある。第一章でも述べたように、運動視差からの奥行きは離散的な二枚の網膜像の差異から計算することもできるし、微分的な運動情報に基づいて計算することもできる。離散的な処理であるならば、一定の時間遅れの後の処理は両眼視差の計算とほぼ同じアルゴリズムで可能となるはずであり、立体視成立までの時間は、比較するべき二つの網膜像を得るための、時間差、もしくは、視差量を反映するものになる。また、運動そのものの処理に基づくものであれば、運動情報の精度を確保するために、一定の蓄積時間が必要となるはずである。また、そこで必要になる蓄積時間は、運動そのものから奥行き表象を形成する SfM とほぼ同様のものとなると考えられる。本論文は、身体運動の結果生じる観察位置の変化に基づく運動視差を主な対象としている。これに対し SfM は、対象の運動に由来する網膜像の変化に基づく奥行き知覚である。SfM が成立するために必要な時間は、第一章で述べたように比較的長いものであることが知られている(Burr & Santoro, 2001; Caudek et al., 2002; Eby, 1992; Treue et al., 1991)。つまり、現在のところ未知である運動視差からの奥行き知覚の時間特性が SfM の時間特性に比べて明らかに短いものであるとすると、運動視差の検出は離散的に、かつ比較的短い時間的、空間的な隔たり（基線長）に基づく視差を用いて行われていると考えられ、また、SfM とほぼ同様の時間特性が得られたならば、それは運動視差の検出が SfM と同様に運

動情報に基づいて行われていること、もしくは離散的に長い基線長を用いて行われていることを示唆することになる。

運動視差と SfM は双方とも網膜上の相対運動から奥行きを計算しており、一次運動(Cavanagh & Mather, 1989)からのみ奥行きが知覚できるなどの共通点がある(Ichikawa, Nishida, & Ono, 2004)。しかし、運動視差や SfM など運動から奥行きを検出するメカニズムでは身体運動を伴うかどうかで三次元構造の復元に要する情報が異なる。観察者自身が運動した場合に生じる運動視差からの奥行き知覚では、観察者の位置変化を筋肉や前庭系といった網膜外の情報源から得ることができ、奥行きの極性についての曖昧さも解決される(Ono & Steinbach, 1990; Ono & Ujike, 2005)。一方、身体運動を伴わない SfM の場合、身体運動情報がない分、奥行き推定の精度を向上させるために運動視差の場合より多くの視覚的情報の蓄積を必要とする可能性がある。SfM における時間蓄積の必要性は様々な研究から示されており、一定時間刺激を観察して情報を経時的に蓄積し、時間次元を三次元目の情報として奥行きを復元する計算モデルが示されている(Hildreth et al., 1990; Ullman, 1979b, 1984)。心理物理学的研究においても SfM から奥行きを知覚するには最低でも 100 から 300 ms の観察が必要で、奥行き量が安定するには 1 秒程度の時間がかかることが明らかにされている(Burr & Santoro, 2001; Caudek et al. 2002; Eby, 1992; Treue et al., 1991)。

本章では運動視差に基づく奥行き知覚の時間特性を測定し、それを両眼視差、SfM に基づく奥行き知覚の時間特性と比較する。それにより、運動視差と両眼視差の統合の様態を検討すると共に運動視差の検出メカニズムに関する一定の示唆を得ようというものである。

3.1 実験 2A

3.1.1 方法

観察者

4 名が観察者として実験に参加した。観察者は矯正ないし裸眼で正常な視力を有した。観察者のうち 1 名は実験者であった。それ以外の 3 名は実験の目的を知らされておらず、うち 2 名は一切の心理学実験の経験がなかった。

装置

刺激はパーソナルコンピュータ (Power Macintosh G3, Apple 社製) を用いて作成および制御を行い、CRT 画面 (FlexScanE76D, NANA O; 1024×768 画素; 各画素 256 階調; 垂直走査周波数 75 Hz) 上に提示した。観察用顎台は実験 2 と同じ装置を用い、CRT 画面の正面に画面と平行に頭部が往復運動するよう設置した。顎台可動範囲の中央と CRT 画面中央までの距離を 76 cm とした。顎台は可動であり、水平方向に敷かれたレール上を CRT 画面の正面位置を中心として画面に平行に幅 20 cm だけ往復運動できるようにした。

コンピュータによる提示画像の切り替えは、顎台に取り付けた可変抵抗器からの入力信号に同期させた。この外部信号は、コンピュータに装着した A/D 変換ボード (DAQ Card1200, National Instruments 社) によって、1000 シグナル/秒でサンプリングした。観察者が頭部往復運動を一定の周期で行えるようにするため、メトロノーム (DM31, SEIKO) を用いて、1 秒周期で常にビーブ音を発した。

観察者は可動式の顎台の上に頭部を乗せ、メトロノームの音に合わせて頭部を水平左右方向に往復運動しながら刺激を単眼で観察した。すなわち、観察者

は顎台の可動範囲 20 cm の区間を周期 0.5 Hz で 1 往復した。この時の頭部運動速度は平均で 20 cm/sec であった。Ujike and Ono (2001) および Ono and Ujike (2005) によると、頭部運動速度が約 13.0 cm/sec 以下になると運動視差からの知覚奥行き量が過小評価されるようになる。本実験では平均頭部運動速度がそれよりも十分に大きくなるよう設定した。1 試行あたりの頭部運動の往復回数の上限は指定しなかったが、最低 3 往復以上行うよう教示した。

刺激

ランダムドットで構成されたパターンを観察者の頭部運動に同期して運動させることで運動視差刺激を提示した (図 3-1A)。パターンは二つのパッチに分かれており、一つのパッチの大きさは視角 5.0 deg (縦) × 3.5 deg (横) であった。パターンを構成する各ドットの大きさは視角 0.09 deg (縦) × 0.04 deg (横) であった。この大きさは使用した機材で時間周波数を保って表示できる限界であった。各ドットにアンチエイリアシングを行うことにより 1 画素より小さい移動も表現した (Mitsudo & Ono, 2007)。ドットの密度は 20 % であった。

視差勾配は運動方向に垂直な正弦波とし、空間周波数は 0.4 c/d であった。視差勾配の振幅は 3 段階であり、頭部の移動 1 cm につき視差のピーク間で 0.14 cm, 0.20 cm, 0.27 cm の相対運動が生じた。この視差量は、等価視差で視角 40, 60, 80 分に相当するものである。刺激の運動は頭部運動に同期したため、各ドットの速度は頭部運動速度に比例し、一定ではなかった。

実験では、パッチを二つ水平に並べて提示した。二つのパッチのうち一方は通常の運動視差刺激であり、一試行内では一定の運動視差を表現するよう、観察者の頭部運動に常に同期して運動した。この実験では、こちらのパッチを比較刺激とした。もう一方は、周期的に視差量が増減する刺激であった。観察者

の頭部が可動範囲の一定範囲内にあるときにのみ頭部運動に同期して運動し、特定の運動視差量を表現した。それ以外の範囲では運動せず静止し運動視差量がゼロとなった。前者を比較刺激、後者をテスト刺激とした。両刺激の中心間の間隔は 7 deg であった。

手続き

実験は暗室中で個別に行われた。本実験では、テスト刺激と比較刺激からの知覚奥行き量が等しくなる等価刺激点 (PSE) を測定した。観察者はテスト刺激と比較刺激の知覚奥行き量を比較し、PSE となる点を報告した。すなわち、観察者はテスト刺激と比較刺激の知覚奥行き量を比較し、左右二つの刺激の奥行きについて、右のほうが大きいか、左のほうが大きいか、または同程度であるかの三つの選択肢より回答した。一回の試行は観察者がボタンを押すまで継続し、一試行あたりの時間は制限しなかった。等価刺激点の測定は極限法を用い、比較刺激の相対運動速度を十分に大きい初期値から PSE へと変化させる系列（下降系列とする）と、十分に小さい初期値から PSE へと変化させる系列（上昇系列とする）を行った。比較刺激の変化は、上昇系列では観察者がテスト刺激のほうが奥行きが大きいと回答した場合には次の試行で視差量を 0.025% 上昇させ、同程度と回答した場合には 0.0125% 上昇させた。また、テスト刺激のほうが、奥行きが小さいと回答した時点で系列を終了した。下降系列ではその逆であった。

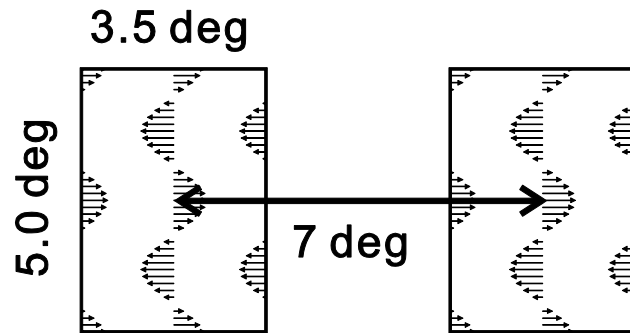
テスト刺激の運動が頭部運動と同期する範囲について、頭部往復運動の中央位置から左右それぞれ 1.67 cm, 3.33 cm, 5.00 cm, 6.67 cm, 8.33 cm を境界とし、その内側（頭部運動の中央部）でのみ各ドットを運動させた。すなわち、これらの刺激は頭部運動の全区間のうち、1/6, 2/6, 3/6, 4/6, 5/6 の間だけ同期して運

動した（図 3-1B）。この、刺激の運動が頭部運動に同期している割合を同期割合とする。また、同期していない場合についても、刺激の各ドットはその場で停止するだけで提示され続けていた。

テスト刺激の運動時の視差量は三条件設定され、等価視差で 40, 60, 80 分であった。テスト刺激が運動しない範囲では相対運動速度がゼロとなるため、テスト刺激の頭部往復運動 1 周期分の平均相対運動速度は、それぞれ同期運動時の速度と同期割合の積となる。また、注視点は設けず、観察者は自由に視線を動かして刺激を観察した。

実験は 3（テスト刺激の運動時の視差量）×5（同期割合）×2（上昇・下降系列）の 30 条件をランダムな順番で 1 系列ずつ行うことを 1 ブロックとし、観察者一名について 4 ブロック行った。したがって、各条件につき 4 試行（上昇・下降系列を合算して 8 試行）を行った。また、比較刺激とテスト刺激のどちらが左に位置するかは、ブロックごとにランダムに設定された。

(A)



(B)

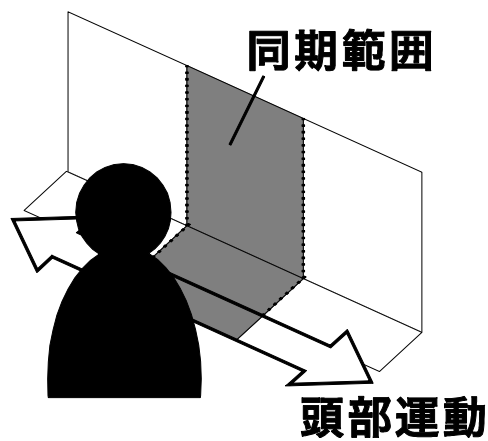


図 3-1 (A)刺激の模式図。ランダムドット刺激の各ドットの運動速度は正弦波状に変調された。(B)観察者は頭部を往復運動させ、往復区間の中央一部範囲（同期範囲; concomitant interval）に頭部があるときのみ刺激が運動した。

3.1.2 結果と考察

奥行き の PSE を全ての観察者で平均し、同期割合に対してプロットしたものを図 3-2 に示す。テスト刺激に対する比較刺激の知覚奥行き量の PSE は、テスト刺激の頭部運動への同期割合に比例した。特に、同期範囲内での視差量と同期割合の積によく比例した。テスト刺激の運動時の視差量、同期割合の 2 要因の分散分析を行ったところ、テスト刺激の視差量の主効果($F(2, 39) = 197.50, p < .01$)、同期割合の主効果($F(4, 78) = 322.37, p < .01$)が認められ、両者の交互作用も認められた($F(8, 312) = 12.19, p < .01$)。

知覚された奥行き量は提示した視差量の頭部運動時間内、つまり今回の実験では 1 秒間の平均にほぼ等しかった。加えて、実験後に観察者に内観報告を求めたところ、観察者は奥行き の急激な変化を知覚していないと回答した。内観報告を信じれば、刺激には急激な視差の変化が含まれていたにもかかわらず、それは奥行き の突然な変化として知覚されていなかった。こうした結果は、今回の実験事態においては、運動視差からの奥行き知覚は、推定された視差量が 1 秒程度の時間にわたって平均化されることを示すものと解釈できるだろう。

今回の実験では注視点を設けず観察者は自由に視線を動かすことができた。しかし、過去のいくつかの研究では、眼球運動が運動視差からの奥行き知覚に影響を与えることを示している(Freeman & Fowler, 2000; Mitsudo & Ono, 2007; Naji & Freeman, 2004; Nawrot, 2003; Nawrot & Joyce, 2006)。この点について検討するために、注視点を追加した条件での追加実験も行った。この実験では、テスト刺激と比較刺激が同一の視野に収まるよう両者の間隔を視角 1 deg とし、その中央に縦横 0.5 deg の注視点を提示した。観察者には注視点を凝視するよう教示した。この実験では、等価視差 80 分の条件のみ行った。また、新しい観察者 3 名で実験を行ったため、注視点を設けた条件と注視点を設けない条件の両方を

行った。その結果を図 3-3 に示す。注視点を設けた条件においても、PSE が同期割合に比例する傾向に変わりはなかった。また、実験後に内観報告を求めたところ、いずれの観察者も奥行き之急激な変化を知覚しないと報告した。

本実験では運動視差からの奥行き復元の時間特性は悪いことが分かった。さらには、奥行き之急激の変化そのものは知覚していないようである。ただし、奥行き変化を知覚しなかったとする報告は、セッション終了後に尋ねて確認した事後報告にすぎない。視差量の変化した観察を続けた場合、いつかは奥行きの変化を検出するであろうと考えられる。そこで、運動視差からの奥行きの変化検出にどの程度の時間がかかるかについて調べるため、次の実験では、頭部運動中に運動視差の視差量を 1 回だけ突然変化させ、その変化を検出するまでの反応時間と正答率を計測した。また、変化の検出が過渡的(transient)であるか否かを区別するため、運動速度が最速である頭部運動の中央位置で視差量を変化させた場合と、運動速度がゼロである両端で視差量を変化させた場合の比較も行った。

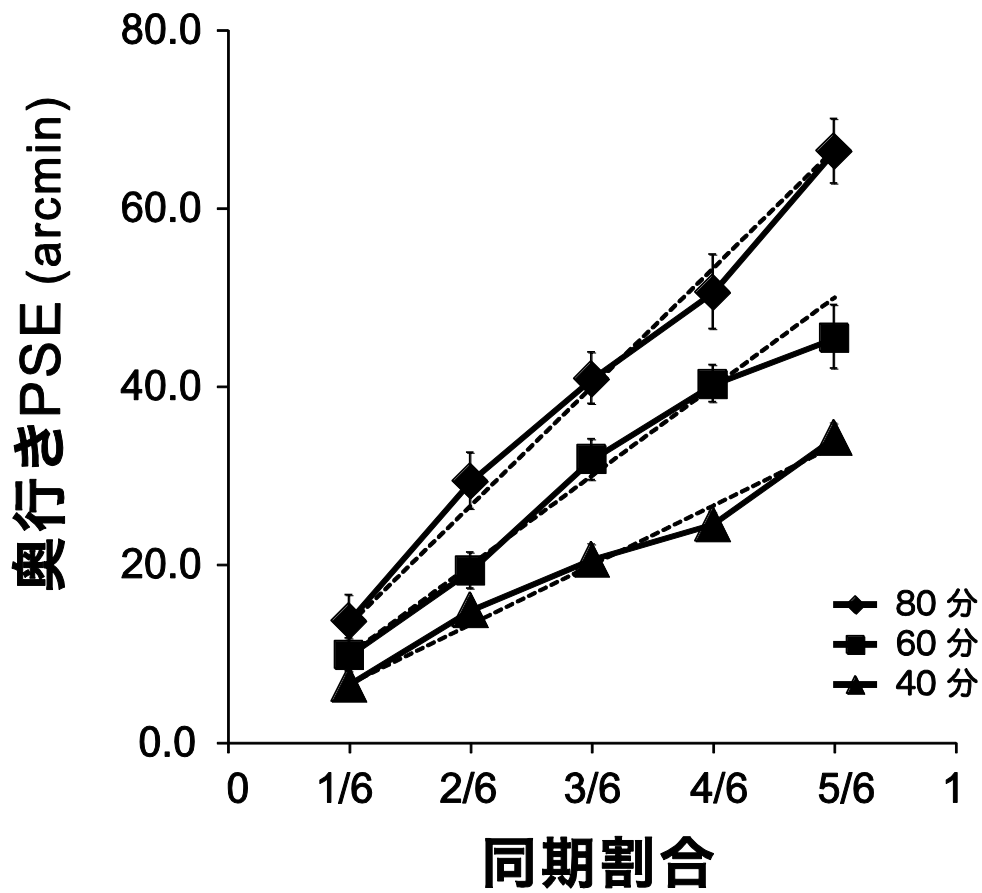


図 3-2 実験 2A の結果($N=4$)。横軸は同期割合，縦軸はテスト刺激と比較刺激の奥行き PSE を，等価視差を単位として示した。点線は，それぞれの同期中の視差量と同期割合の積である。エラーバーは観察者間の標準偏差を示す。

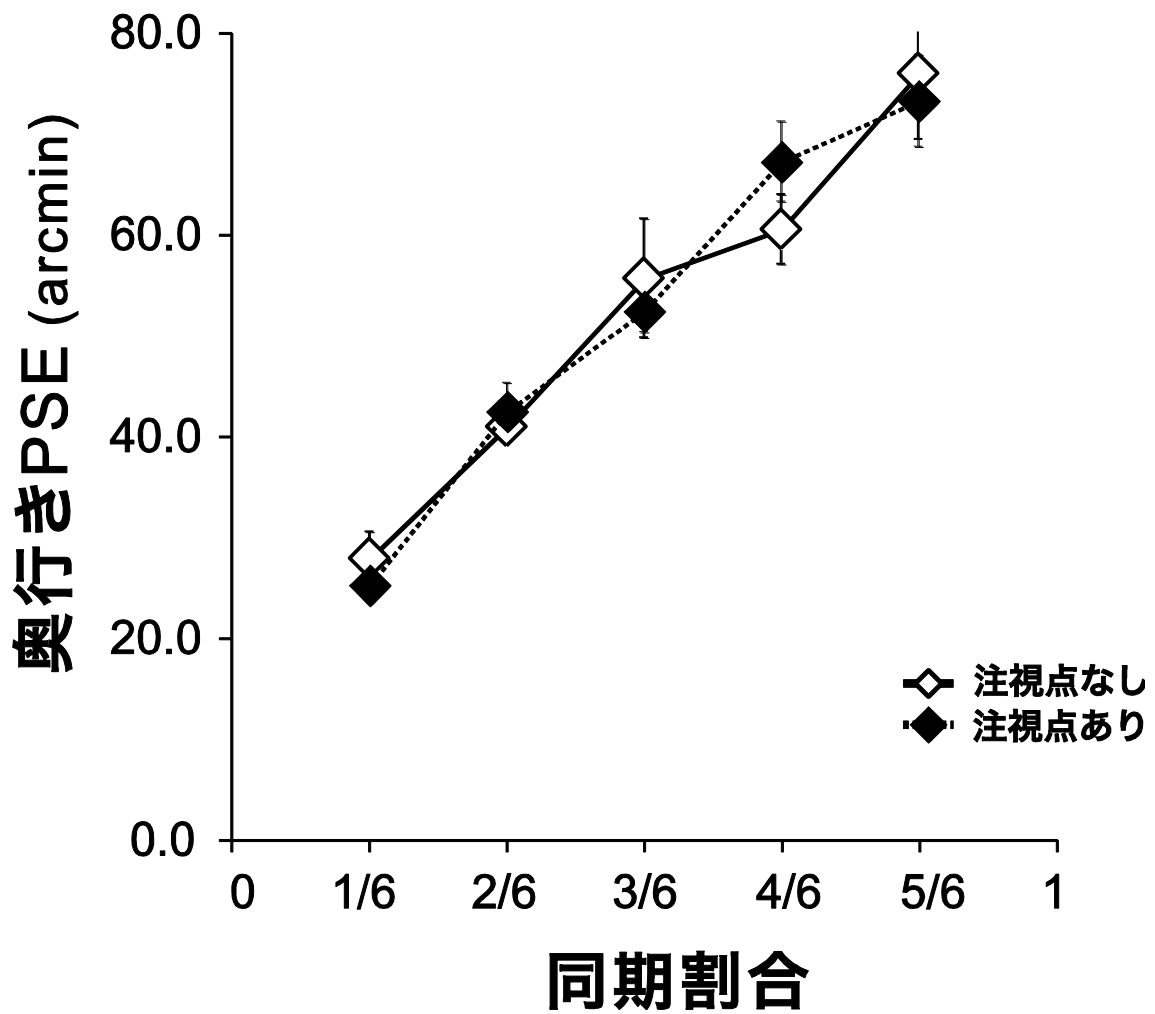


図 3-3 注視点を導入した条件と自由に観察させた条件の結果(N=3)。縦軸と横軸は図 3-2 と同じである。エラーバーは観察者間の標準偏差を示す。

3.2 実験 2B

頭部運動の中央と両端の二つの条件を設け、突然の視差量の変化の検出能力を、反応時間と正答率の両面から計測した。

3.2.1 方法

観察者

成人 4 名が観察者として実験に参加した。観察者は矯正ないし裸眼で正常な視力を有した。観察者のうち 1 名は実験者であった。それ以外の 3 名は実験の目的を知らされておらず、また実験 2A には未参加であった。

刺激と手続き

実験装置と実験刺激は基本的に実験 2A と同様であった。この実験では、パッチは画面中央に一つだけ提示された。各試行の開始時における視差量は等価視差で視角 60 分とした。

観察者は常に頭部を往復運動させており、刺激は頭部が左右どちらかの端に達して停止した時点から提示された。頭部往復回数が後述する条件に達した後、運動視差が突然変化した。速度変化割合は変化前の速度に対し -100%, -80%, -60%, -40%, -20%, +20%, +40%, +60%, +80%, +100% の 10 条件にキャッチトライアルとして視差量変化のない条件を加えた 11 段階であった。これに加え、各試行では視差量の変化タイミングを操作した。具体的には、頭部往復運動が試行開始から 2, 4, 6, または 2.25, 4.25, 6.25 周期行われた時点で運動視差量を変化させた。この 6 条件のうち、頭部運動の 2, 4, 6 周期目で視差量を変化させた条件では、頭部が顎台のあるレールの両端に位置し停止している状態で視差量に変化しており、視覚刺激としては相対運動速度の突然の変化を全く含

んでいなかった。この条件を両端変化条件とする。一方、頭部運動の整数+¼周期目で視差量を変化させた条件では、頭部の運動中に視差量が増加しており、視覚刺激としての相対運動速度の突然の変化が含まれていた。これらの条件を中央変化条件とする。観察者には、刺激提示中に知覚奥行き量が増加した場合に、奥行きが増えたか減ったかを変化後できるだけ早くボタンを押して報告するよう求め、その反応時間を記録した。また、試行開始から10秒経過するまでに回答がなかった場合には、その時点で試行を終了し、無回答として記録した。

以上、速度変化割合11条件、視差量変化が起きる時点を6条件について無作為な順序で試行を行うことを1セッションとし、これを各観察者は4セッション行った。このうち視差量の変化が起きる時点6条件は両端変化条件および中央変化条件の2条件として集計し、1条件につき合計48試行が行われた。また、この実験においては注視点は設けず観察者は自由に眼球を動かすことができた。

3.2.2 結果と考察

奥行きの変化を正しく報告した場合を正答、正しくない回答と無回答の合計値を正答でないとした場合の正答率を図3-4に、奥行きの変化を報告した反応時間を、正しく回答した場合について平均したものを図3-5に示す。横軸は視差変化割合、縦軸はそれぞれ正答率と反応時間である。また視差変化割合条件については、視差量が増えたり減ったりしないキャッチトライアルを集計および解析から除外し、残りの10条件について解析を行った。

正答率について逆正弦変換を施して2要因分散分析を行ったところ、視差変化割合の要因が有意であったが ($F(9, 27) = 17.59, p < .01$)、変化タイミングの要因は有意ではなく ($F(1, 3) = 0.33, n.s.$)、交互作用も認められなかった ($F(9, 27) = 0.52, n.s.$)。反応時間については、正答の試行についてのみ、各水準が繰り返す

数の等しくない場合の2要因分散分析(Overall & Spiegel, 1969; Overall, Spiegel, & Cohen, 1975)を行った。その結果、視差の変化割合の違い($F(9, 558) = 10.16, p < .01$)、変化タイミングの要因($F(1, 558) = 11.12, p < .01$)の双方が有意であったが、交互作用は認められなかった($F(9, 558) = 0.83, n.s.$)。

視差量変化が $\pm 20\%$ 以下の場合を除いて正答率は高く、また中央変化条件と両端変化条件の間に差はなかった。視差量変化の過渡的な変化情報が利用されているのであれば、その情報が利用できる中央変化条件では正答率が高く、両端変化条件では正答率が低くなるはずであるが、今回の実験結果はそうではない。すなわち、今回の実験結果は、過渡的な変化情報に基づいて観察者が回答したわけではないことを意味する。実験後に内観報告を求めたところ、急激な奥行き変化に気がついたと報告した観察者はいなかった。その代わりに、ほとんどの観察者は奥行きが変わったことに後から気がついたと報告した。この報告から、観察者はある程度定常的な奥行きに基づいて判断しており、過渡的な情報、変化情報に基づいて判断しているわけではないと推定される。

反応時間は、視差の変化割合に反比例して増加する傾向があり、視差量の変化割合が $\pm 100\%$ のとき最も短く、 $\pm 20\%$ のとき最大であった。また、視差量の変化割合が $\pm 20\%$ のときは正答率も低く、変化を十分に検出できなかったと考えられる。

中央変化条件・両端変化条件のいずれでも、最も短いときでも反応時間は1秒以上であった。これは運動速度変化への反応時間である200から300msに比べ700から800ms程度長い(Dzhafarov, Sekuler, & Allik, 1993; Mateeff, Dimitrov & Hohsbein, 1995)。運動速度変化に対する反応時間と、今回得られた運動視差からの奥行き変化に対する反応時間の差分を運動視差からの奥行き知覚の成立に要する時間とみなすというのは、単純化しすぎた議論かもしれないが、おおよ

その推定値としてはそれほど的外れな値ではないだろう。実験 1A の結果と合わせ考えると、運動視差情報の処理には 1 秒弱の時間が必要であると考えられる。この 1 秒弱の間にどのような処理がなされているかこの実験から言及することは難しいが、運動視差の検出に必要な奥行き検出や奥行き統合、あるいは身体運動の制御や身体運動情報との統合など、いずれも運動視差の計算に不可欠な要素が 1 秒弱の時間を費やして遂行されていると考えられる。

今回の実験結果、つまり、視差の変化検出には相対的に長い時間が必要であるという点と、中央変化条件・両端変化条件の間に正答率の違いがないという点から、運動視差からの奥行き知覚では、眼球に入力された情報から即時に奥行きを計算して知覚するのではなく、一定時間、おそらくは 1 秒弱程度の期間、運動およびそこから得られる運動視差情報を統合し、奥行きを知覚しているのだと考えられる。今回の実験における奥行き変化の検出に即して語れば、この実験では、観察者は眼球に入力された情報から即時に過渡的变化を検出しているのではなく、定常的な奥行き情報を継時的に比較することで視差量の変化を検出していたものと考えられる。これが、実験 2A において奥行き変化を知覚しないと報告した理由であると考えられる。

一方で、反応時間については、中央変化条件・両端変化条件の間に差があり、特に視差の変化割合が大きい場合に中央変化条件のほうが反応時間が短い傾向がみられる。ただし、これは何らかのメカニズムを反映したものではなく、実験デザインによる見かけ上のものだと考えられる。両端変化条件では、運動速度の急激な変化が起きないが、このために視差が変化した情報も観察者の頭部が両端で停止している状態では検出できない。観察者の頭部運動が十分な速度

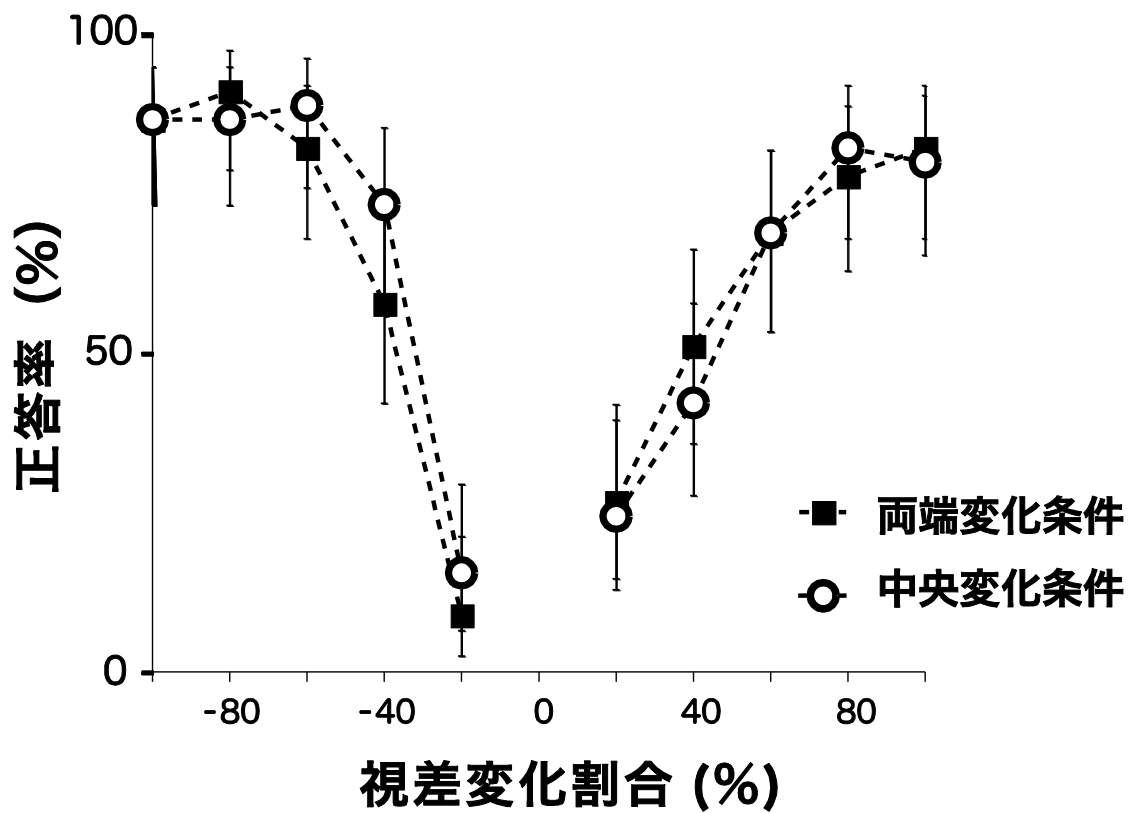


図 3-4 実験 2B の結果($N=4$)。横軸は視差変化割合を、縦軸は奥行きの変化を正しく報告した場合を正答、正しくない回答および無回答を正答でないとした場合の正答率を示す。回答が二項分布に従うと仮定した場合の母正答率の 95%信頼区間をエラーバーとして示す。無回答の場合があるためチャンスレベルは定義できない。

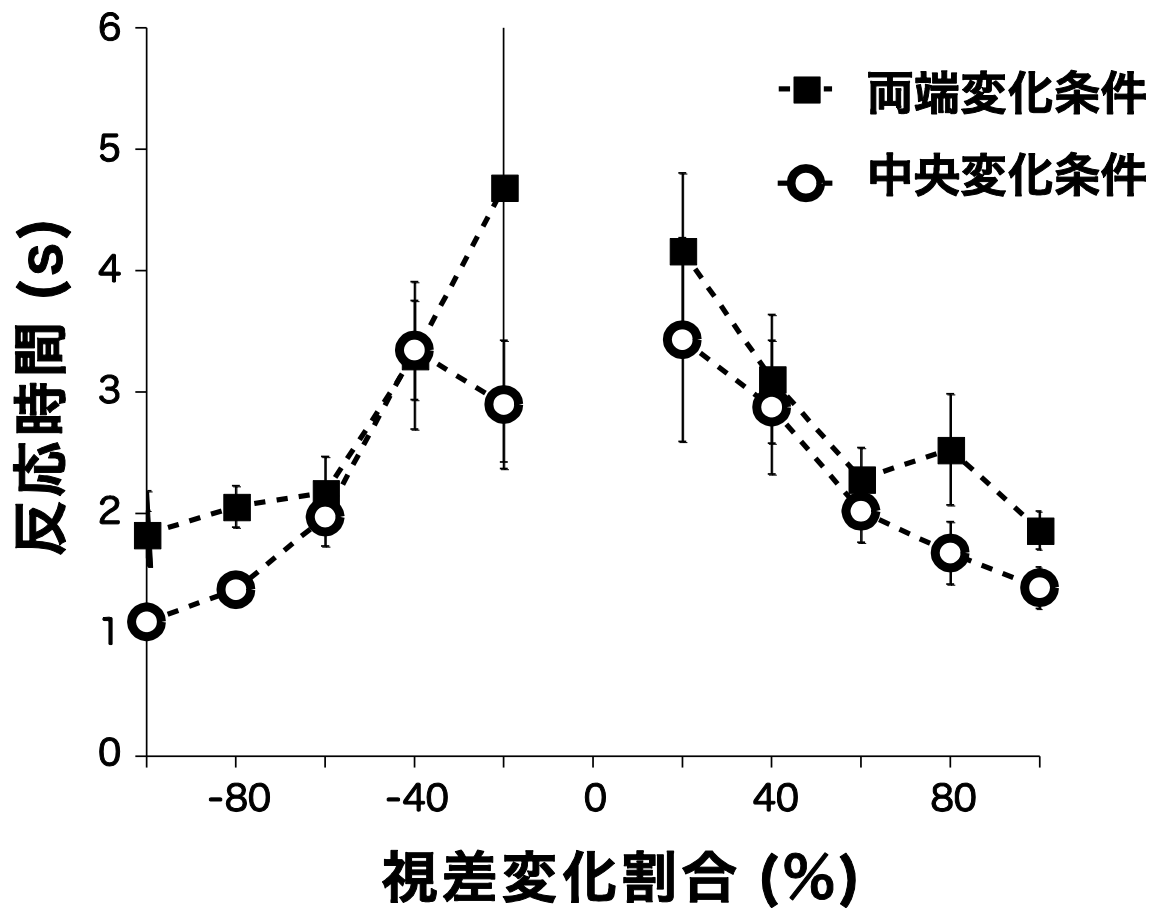


図 3-5 実験 2B の結果(N=4)。横軸は視差変化割合を、縦軸は反応時間を示す。
エラーバーは標準誤差を示す。

になって初めて視差量の変化が検出できるため、それまでの時間が反応時間の差として反映されているものと考えられる。

3.3 本章の考察

本章の目的は、運動視差に基づく奥行き知覚の時間特性を両眼視差、SfMに基づく奥行き知覚の時間特性と比較し、運動視差と両眼視差の統合の様態を検討すると共に、運動視差の検出メカニズムに関する一定の示唆を得ることにあつた。

実験 2A では、間欠的に運動視差による奥行きをつけたパッチを提示し、その刺激から知覚される観察者の主観的な奥行き量を測定した。その結果、視差量を頭部運動の片道分 (1 秒) の期間にわたって平均した場合と同程度の奥行きを知覚することが明らかとなった。実験 2B では、運動視差が突然変化した際にその変化を検出する際の正答率と反応時間を測定した。その結果、過渡的な視差量変化の有無は正答率に影響せず、反応時間は最低 1 秒程度であり、運動速度変に対する反応時間に比べ 700 から 800 ms 程度大きいものであつた。この結果を最も単純に解釈すれば、運動視差からの奥行き計算には 1 秒弱程度の時間を要するものと考えられる。この数字は、両眼視差の処理時間である 100 ms (Norcia & Tyler, 1984; Tyler, 1991) という数字に比べ、かなり長いものとなっている。

今回の実験で得られたこうした結果は、運動視差からの奥行き知覚に要する時間は、両眼視差からの奥行き知覚よりもかなり長いことを示唆し、運動視差からの奥行き表象が、両眼視差からの奥行き表象よりも遅れて形成される、つまり、解の確定が遅れる可能性を示している。このことと、前章で得られた相互作用の非対称性を関連づけることが可能である。つまり、時間的により早い

段階で確定している両眼視差からの奥行き表象，もしくはその前駆的な情報が，遅れて形成される運動視差からの奥行き表象の形成に影響を与える可能性である。さらに，本章で得られた時間特性の結果は，両眼視差からの奥行き表象の形成が，両眼視差の表象形成に関与するよりも，より高次の過程の関与を必要とすることを示唆すると解釈することもできる。もし，そうであれば，時間的のみならず，処理段階としてもより低次のレベルで解が確定する系から，より高次の過程の関与が必要な，解の確定が時間的にも遅れる系への相互作用より強くなるというのは，全体のシステムの成り立ちとしてもありうる構造である。この点は，総合考察で，より詳しく検討する。

さらに，本章の実験から，運動視差の検出アルゴリズムについても示唆を得ることが出来る。本章の実験は，運動視差の成立に必要な時間が両眼視差からの奥行き成立に要する時間よりも，はるかに長いものであり，SfMの成立に必要な時間(Domini et al., 2002; Eby, 1992; Treue et al., 1991)に近いものであるという結果が得られた。絶対値としては，約1秒を要し，これはSfMの所要時間とほぼ等しい。運動視差とSfMとの差異は身体運動が関与するか否かという点だけであり，この類似性と両者の成立時間がほぼ等しくなるという点を併せ考えると，運動視差の検出はおそらくは離散的なマッチング処理ではなく，SfMと同様の，一定の蓄積時間を要する運動処理に基づくものであると考えるのが自然だろう。この点に関しても，総合考察でさらに詳しく検討する。

第四章 総合考察

本論文では、奥行き手がかりの統合、特に運動視差と両眼視差手がかりの間の統合のあり方について、検出閾上の視差量の刺激における相互作用（対比・同化現象）、両手がかりの処理時間の比較という二つの側面から検討した。

4.1 本研究の結果のまとめ

4.1.1 運動視差と両眼視差の閾上での相互作用

本節の内容はこれから刊行する予定であり、「『博士論文の内容を要約したもの』の公表に関するガイドライン」に基づき、刊行されるまでの期間はインターネット公表からは削除する。

4.1.2 運動視差の時間特性

第三章では、運動視差の処理時間を計測し、これまでに知られている両眼視差および SfM の時間特性との比較を試みた。実験の結果、運動視差の視差量の急激な変化を知覚することはできず、運動視差量が周期的に変化する刺激から知覚される奥行きは 1 秒間提示された視差量を平均した刺激からの奥行き知覚量に等しいものであった。また、運動視差量変化に対する反応時間は、運動速度の変化に対する反応時間である 200 から 300 ms (Dzhafarov et al., 1993; Mateeff, et al., 1995)、あるいは両眼視差からの奥行き知覚の処理時間である 100 ms (Norcia & Tyler, 1984; Tyler, 1991) に比べて遥かに長いものであり、むしろ、SfM の処理時間 (Domini et al., 2002; Eby, 1992; Treue et al., 1991) に近いものである。こうした結果は、運動視差の検出が、両眼視差との原理的な等価性から推論されるような初期的な段階だけで結果が定まるようなものではなく、両眼視差と

比較して、より高次の段階の処理の関与を必要とするものであり、むしろ SfM と原理的な類似性を持つことを示唆する。また、この結果は、より速く解が定まる手がかり系は信頼性が高く、より遅い手がかり系に対し、優位性を持つと考えるならば、第二章で得られた、統合における両眼視差の優位性という結果と整合性があるものと考えられることもできる。

4.2 運動視差と両眼視差の統合

本節の内容はこれから刊行する予定であり、「『博士論文の内容を要約したもの』の公表に関するガイドライン」に基づき、刊行されるまでの期間はインターネット公表からは削除する。

4.3 運動視差の検出アルゴリズム

これまで何度も述べてきたことであるが、運動視差の検出には、異なる時間に得た二枚の網膜像を比較する離散的な視差検出と、運動そのもの、相對運動、つまりは網膜像の連続的な変化に基づく視差検出の二つの原理を想定することができる。これまでの運動視差に関する諸研究では、この二つが都合良く使い分けられている。たとえば、多くの研究は、頭部位置が6.5 cm 移動したときの網膜像の差を等価視差とよび、両眼視差との比較の基準にしている。これは、両眼視差検出と運動視差検出の間にアルゴリズム的な等価性を仮定していると考えられるが、同時にその視差が両手がかり系でほぼ等しい奥行きを与えると、いう知覚的な等価性も存在する (Rogers & Graham, 1979)。また、相對運動を元に運動視差を検討した研究も見いだすことはできる。しかし、この二つのアルゴリズムの違いに関する議論は未だ手つかずといっても過言ではない。

今回得られた処理時間のデータは、運動視差検出のアルゴリズムにある程度の示唆を与えるものと捉えることができる。既に述べたように、両眼視差、運動視差共に融合限界は約 10 分であることが知られている。この限界を超えると両眼視差では二重像が生じ、運動視差では対象が動いて知覚されるようになる。もちろん、この限界を超えても奥行き知覚が生じなくなるわけではないが、ひとまずこれを運動視差の空間的な融合限界とすれば、今回用いた刺激では、1 秒間の刺激の運動は 20 分から 60 分であることから、全体の運動が 1 秒だとすると、その 1/6 から 1/2、つまり時間的には 160 から 500 ms 異なる時点での観察位置の異なる網膜像の間の対応を取っていると考えることができる。このように考えると、視差検出から奥行き知覚成立のための計算に要する時間は 500 から 800 ms ということになる。この値は、これまでに知られている両眼視差の知覚

時間に比べて数倍大きい値である。したがって、もし、この仮定が正しいのであれば、両者の計算アルゴリズムはかなり異なったものであろうという推定が成り立つ。また、両眼立体視の処理時間は 100 ms 程度と考えられる(Norcia & Tyler, 1984; Tyler, 1991)。もし両者の計算アルゴリズムがほぼ等価であるとする、この時間は両眼視差、運動視差の間で大きな違いはないものと考えられる。したがって、運動視差は時間的に 500 から 800 ms 離れた時点の網膜像の差を検出していることになる。これを今回の実験刺激の距離パラメータに従って距離次元に変換すると、20 分から 60 分となり、上記の融合限界の数倍以上の視差が用いられていることになる。このような空間的に離れた網膜像間の対応付けは誤対応等の問題が生じ、現実的なものとはいえないだろう。

この時、実験 2A の追加実験のような注視条件であれば、頭部の移動に伴って眼球は回転する。しかし、注視している以上は、画面全体としての網膜像は不変である。従って、頭部の運動に伴う眼球運動は、ここで論じた視差量の評価に影響しないと考えられる。

このように考えると、運動視差の検出に離散的な網膜像のマッチングが用いられている可能性はかなり低いものと考えられる。一方、SfM の知覚に必要な時間は約 1 秒と報告されており(Domini et al., 2002; Eby, 1992; Treue et al., 1991)、今回得られた運動視差の値と同様に、両眼視差の時間加重限界、あるいは運動速度変化検出の反応時間に比べ長い。SfM の所要時間が長い理由としては、運動からの奥行き知覚が安定して成立する条件を満たすよう、それ自体は局所的な微分的な処理からも得ることが出来る運動情報を一定時間蓄積し、十分な精度、安定性を持つ運動情報を得る必要があるからだという議論が支配的である。このような議論を考慮に入れると、今回得られた結果は、運動視差検出が、離散的な網膜像のマッチングよりは、SfM に用いられているものと類似した、比

較的長時間の蓄積を経た運動情報に依存した処理によって検出されることを示唆するものと捉えることができる。こうした考えは、運動視差による奥行きを検出閾は一次運動の検出閾と一致し(Ono & Ujike, 2005), 輝度変調を持たない二次の統計量に基づくパターンで運動視差を提示した場合には奥行き量の判断はできなくなる (Ichikawa et al., 2004)といった運動処理の関与を示した先行研究とも整合的である。また、第三章の実験において、観察者が運動視差の過渡的な変化にほとんど気づかなかったという事実も、こうした考えと整合する。

今回の実験結果からは、上記の様な考察が行えるが、このことは、必ずしも、運動視差検出に離散的なマッチングが行われていないということを意味しないだろう。例えば、運動視においても、いわゆる一次運動検出器のような局所的な運動処理と並行して、マッチングに基づく運動検出が行われていると考えられ、いわゆる近傍運動、遠隔運動 (short- and long-range motion) の区分は、こうしたアルゴリズム上の区分を反映したものだという主張もなされている (Braddick, 1974; Sato, 1998)。また、両眼視差においても、特徴点の両眼間の位置差である absolute disparity と視野全体で奥行きを求めるために必要な relative disparity は別の段階で処理されているとする研究もあり (Cumming & Parker, 1999), 局所的な処理と大域的な処理が並列して存在することは、運動や視差を検出するメカニズムの間で普遍的なものであることも考えられる。運動視差検出の二重性に関しては、次節で SfM に関して提案されている二段階モデルと関係付けて論じてみたい。

4.4 二段階モデル

第三章の実験では、運動視差からの奥行き計算には1秒弱の時間を要するという結果が得られている。この数字は、両眼視差の視差量変化の検出に要する時間として考えられる約100 ms (Norcia & Tyler, 1984; Tyler, 1991) という数字に比べればかなり長いものであった。第一章、および前節でも述べたように、SfMにおける奥行き計算は、運動視差に比べ多量の視覚情報と複雑な計算を必要とし(Ullman, 1979a, b, 1984; Hildreth et al., 1990), 心理物理学の実験においても奥行き知覚が安定するには1秒程度の時間がかかることが報告されている。Treue et al. (1991)によれば、SfMによって奥行きを判断して反応するには700 ms から1000 ms 程度を要し、さらにドットのライフタイムが短くなる(難度があがる)ほど判断に必要な時間が長くなる。また、SfMによる奥行き表象は、1秒程度の時間をかけて加重されることを示唆する研究もある。SfM 刺激を速度一定のまま提示時間だけ変えて奥行き判断を行った場合、短時間の提示では知覚される奥行き量は小さく、500 から1000 ms 以上観察してやっと知覚奥行き量が安定状態に達することが報告されている (Eby, 1992)。また、SfM においてどの程度前の刺激まで知覚に影響を及ぼすか直接調べたところ、1秒以上前に提示されていた刺激が奥行き判断に影響を与えることが示されている(Domini et al., 2002)。

Domini らはこのような心理物理学の実験から、SfM の奥行き検出は150 ms 前後の短時間で大域的な整合性を無視して奥行きを計算する過程と、1秒程度の長い時間かけて大域的整合性をとる統合過程の2段階からなるとするモデルを提唱している(Caudek et al., 2002)。同様の2段階モデルは Burr and Santoro (2001)も提唱しており、彼らは第一段階が200 から300 ms, 第二段階が3000 ms の時間窓をもつとしている。

今回の実験では運動視差の変化弁別についての時間特性を測定し、処理に要する時間は1秒弱であるという結果を得ているが、運動視差から奥行き順序を

判定するためには 32 ms の提示時間で十分とする研究がある(Nawrot & Stroyan, 2012)。この食い違いを整合的に説明するためには、SfM で提唱されている 2 段階モデルと同様のメカニズムを運動視差の検出に想定すればよいのかもしれない。この場合、Nawrot and Stroyan (2012)の報告した高速な奥行き判断は第一段階目、本論文の実験 2 で得られた遅い判断は第二段階目で処理されていると考える。また、視覚研究においては、通常、本論文で扱ったような運動視差は、身体運動込みの知覚であり、SfM は身体運動が関与しない、別のタイプの知覚として扱われることが多い。しかしながら、SfM の場合、「身体、もしくは頭部は動いていない」という情報が関与している可能性がある。そうした情報も一種の身体情報と考えることもできる。そのように考えるならば、運動視差と SfM を統一的に捉えることができるようになる。こうした可能性の検討も、本論文では扱い切れていないが、今後、検討すべき問題であろう。

引用文献

- Adelson, E. H., & Bergen, J. R. (1985). Spatiotemporal energy models for the perception of motion. *Journal of the Optical Society of America A*, **2**(2), 284-299.
- Barlow, H. B., Blakemore, C., & Pettigrew, J. D. (1967). The neural mechanism of binocular depth discrimination. *The Journal of Physiology*, **193**(2), 327-342.
- Bradshaw, M., & Rogers, B. (1996). The interaction of binocular disparity and motion parallax in the computation of depth. *Vision Research*, **36**(21), 3457-3468.
- Braddick, O. (1974). A short-range process in apparent motion. *Vision Research*, **14**(7), 519-527.
- Brenner, E., van den Berg, A. V., & van Damme, W. J. (1996). Perceived motion in depth. *Vision Research*, **36**(5), 699-706.
- Briggs, F. & Usrey, W. M. (2009). Parallel Processing in the Corticogeniculate Pathway of the Macaque Monkey. *Neuron*. **62**(1), 135–146.
- Bülthoff, H. H., & Mallot, H. A. (1988). Integration of depth modules: Stereo and shading. *Journal of the Optical Society of America A*, **5**(10), 1749-1758.
- Burr, D. C., & Santoro, L. (2001). Temporal integration of optic flow, measured by contrast and coherence thresholds. *Vision Research*, **41**(15), 1891–1899.
- Caudek, C., Domini, F., & Di Luca, M. (2002b). Short-term temporal recruitment in structure from motion. *Vision research*, **42**(10), 1213-23.
- Cavanagh, P., & Mather, G. (1989). Motion: The long and short of it. *Spatial Vision*, **4**(2), 103-129.
- Chatterjee, S., & Callaway, E. M. (2002). S cone contributions to the magnocellular visual pathway in macaque monkey. *Neuron*, **35**(6), 1135-1146.

- Cumming, B. G., & Parker, A. J. (1999). Binocular neurons in V1 of awake monkeys are selective for absolute, not relative, disparity. *The Journal of Neuroscience*, **19**(13), 5602-5618.
- Curran, W. & Johnston, A (1994). Integration of shading and texture cues: Testing the linear model. *Vision Research*, **34**(14), 1863-1874.
- De Valois, R. L., Cottaris, N. P., Mahon, L. E., Elfar, S. D., & Wilson, J. A. (2000). Spatial and temporal receptive fields of geniculate and cortical cells and directional selectivity. *Vision Research*, **40**(27), 3685-3702.
- Domini, F., Vuong, Q. C., & Caudek, C. (2002). Temporal integration in structure from motion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **28**(4), 816-838.
- Dzhafarov, E.N., Sekuler, R., & Allik, J. (1993). Detection of changes in speed and direction of motion: Reaction time analysis. *Perception & Psychophysics*, **54**(6), 733-750.
- Eby, D. W. (1992). The spatial and temporal characteristics of perceiving 3-D structure from motion. *Perception & Psychophysics*, **51**(2), 163-78.
- Ernst, M. O., Banks, M. S., & Bühlhoff, H. H. (2000). Touch can change visual slant perception. *Nature Neuroscience*, **3**(1), 69-73.
- Fang, F., & He, S. (2004). Stabilized structure from motion without disparity induces disparity adaptation. *Current Biology*, **14**(3), 247-251.
- Freeman, T. C. A., & Fowler, T. A. (2000). Unequal retinal and extra-retinal motion signals produce different perceived slants of moving surfaces. *Vision Research*. **40**(14), 1857-1868.
- Gillam, B., & Blackburn, S. (1998). Surface separation decreases stereoscopic slant but a monocular aperture increases it. *Perception*, **27**(11), 1267-1286.
- Gillam, B., Blackburn S., & Brooks, K. (2007). Hinge versus twist: The effects of 'reference surfaces' and discontinuities on stereoscopic slant perception. *Perception*. **36**(4), 596-616.

- Gillam, B., Flagg, T., & Finlay, D. (1984). Evidence for disparity change as the primary stimulus for stereoscopic processing. *Perception & Psychophysics*, **36**(6), 559–564.
- Gillam, B.J., & Pianta, M.J., (2005). The effect of surface placement and surface overlap on stereo slant contrast and enhancement. *Vision Research*, **45**(25), 3083-3095.
- Graham M., & Rogers B. (1982). Simultaneous and successive contrast effects in the perception of depth from motion-parallax and stereoscopic information. *Perception*, **11**(3), 247-262.
- Gregory, R. L. (1970). *The Intelligent Eye*. London: Weidenfeld and Nicolson.
- Hildreth, E. C., Grzywacz, N. M., Adelson, E. H., & Inada, V. K. (1990). The perceptual buildup of three-dimensional structure from motion. *Perception & Psychophysics*, **48**(1), 19–36.
- Hill, H., & Bruce, V. (1994). A comparison between the hollow-face and 'hollow-potato' illusions. *Perception*, **23**(11), 1335-1338.
- Hillis, J. M., Ernst, M. O., Banks, M. S., & Landy, M. S. (2002). Combining sensory information: Mandatory fusion within, but not between, senses. *Science*, **298**(5598), 1627-1630.
- Ichikawa, M., Nishida, S. Y., & Ono, H. (2004). Depth perception from second-order-motion stimuli yoked to head movement. *Vision Research*, **44**(25), 2945–2954.
- Jacobs, R. A. (2002). What determines visual cue reliability? *Trends in Cognitive Sciences*, **6**(8), 345–348.
- Johnston, E. B., Cumming, B. G., & Landy, M. S. (1994). Integration of stereopsis and motion shape cues. *Vision Research*, **34**(17), 2259-2275.
- Johnston, E. B., Cumming, B. G., & Parker, A. J. (1993). Integration of depth modules: Stereopsis and texture. *Vision Research*, **33**(5), 813-826.

- Julesz, B. (1960). Binocular depth perception of computer generated patterns. *Bell System Technical Journal*, **39**(5), 1125-1162.
- Kersten, D., Mamassian, P., & Yuille, A. (2004). Object perception as Bayesian inference. *Annual Review of Psychology*, **55**, 271-304.
- Kersten, D., & Yuille, A. (2003). Bayesian models of object perception. *Current Opinion in Neurobiology*, **13**(2), 150-158.
- Landy, M. S., Maloney, L. T., Johnston, E. B., & Young, M. (1995). Measurement and modeling of depth cue combination: In defense of weak fusion. *Vision Research*, **35**(3), 389-412.
- Maloney, L. T., & Landy, M. S. (1989). A statistical framework for robust fusion of depth information. *Visual Communications and Image Processing IV*, 1199, 1154-1163.
- Mamassian, P. (2004). Impossible shadows and the shadow correspondence problem. *Perception*, **33**(11), 1279-1290.
- Maunsell, J. H., & van Essen, D. C. (1983). Functional properties of neurons in middle temporal visual area of the macaque monkey. I. Selectivity for stimulus direction, speed, and orientation. *Journal of Neurophysiology*, **49**(5), 1127-1147.
- Marr, D. (1982). *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. Henry Holt and Co. Inc., New York, NY.
- Mateeff, S., Dimitrov, G., & Hohnsbein, J. (1995). Temporal thresholds and reaction time to changes in velocity of visual motion. *Vision Research*, **35**(3), 355-363.
- McLean, J., & Palmer, L. A. (1989). Contribution of linear spatiotemporal receptive field structure to velocity selectivity of simple cells in area 17 of cat. *Vision research*, **29**(6), 675-679.
- Mitsudo, H., & Ono, H. (2007). Additivity of retinal and pursuit velocity in the perceptions of depth and rigidity from object-produced motion parallax. *Perception*, **36**(1), 125-134.

- Naji, J., & Freeman, T. A. C. (2004). Perceiving depth order during pursuit eye movement. *Vision Research*, **44**(26), 3025-3034.
- Nakayama, K., Silverman, G. H., MacLeod, D. I., & Mulligan, J., (1985). Sensitivity to shearing and compressive motion in random dots. *Perception*, **14**(2), 225-238.
- Nawrot, M. (2003). Depth from motion parallax scales with eye movement gain. *Journal of Vision*, **3**(11), 841-851.
- Nawrot, M. & Blake, R. (1989) Neural integration of information specifying structure from stereopsis and motion. *Science*, **244** (4905), 716–718.
- Nawrot, M., Joyce, L. (2006). The pursuit theory of motion parallax. *Vision Research*, **46**(28), 4709-4725.
- Nawrot, M., Stroyan, K. (2012). Integration time for the perception of depth from motion parallax. *Vision Research*, **59**(1), 64-71.
- Norcia, A. M. & Tyler, C. W. (1984) Temporal frequency limits for stereoscopic apparent motion processes. *Vision Research*, **24**(59), 395-401.
- Ohzawa, I., DeAngelis, G. C., & Freeman, R. D. (1990). Stereoscopic depth discrimination in the visual cortex: neurons ideally suited as disparity detectors. *Science*, **249**(4972), 1037-1041.
- Ono, H. & Steinbach, M. J. (1990). Monocular stereopsis with and without head movement. *Perception & Psychophysics*, **48**(2), 179-187.
- Ono, H. & Ujike, H. (2005). Motion parallax driven by head movements: Conditions for visual stability, perceived depth, and perceived concomitant motion. *Perception*, **34**(10), 477-490.
- Ono, H., & Wade, N. J. (2005). Depth and motion in historical descriptions of motion parallax. *Perception*, **34**(10), 1263–1273.
- Overall, J. E., & Spiegel, D. K. (1969). Concerning least squares analysis of experimental data. *Psychological Bulletin*, **72**(5), 311-322.

- Overall, J. E., Spiegel, D. K., & Cohen, J. (1975). Equivalence of orthogonal and nonorthogonal analysis of variance. *Psychological Bulletin*, **82**(2), 182-186.
- Regan, D., & Beverley, K. I. (1979). Binocular and monocular stimuli for motion in depth: Changing-disparity and changing-size feed the same motion-in-depth stage. *Vision Research*, **19**(12), 1331-1342.
- Rogers, B., Graham, M. (1979). Motion parallax as an independent cue for depth perception. *Perception*, **8**(2), 125-134.
- Rogers, B., & Graham, M. (1982). Similarities between motion parallax and stereopsis in human depth perception. *Vision research*, **22**(2), 261-270.
- Sato M., & Howard, I. (2001). Effects of disparity-perspective cue conflict on depth contrast. *Vision Research*. **41**(4), 415-426.
- Tsai, R. Y., & Huang, T. S. (1984). Uniqueness and estimation of three-dimensional motion parameters of rigid objects with curved surfaces. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, (1), 13-27.
- Treue, S., Husain, M., & Andersen, R. (1991). Human perception of structure from motion. *Vision Research*, **31**, 59-75.
- Tyler, C. W. (1991). *Cyclopean vision*. In D. Regan (Ed.), *Binocular vision* (p. 38-74). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Ujike, H., & Ono, H. (2001). Depth thresholds of motion parallax as a function of head movement velocity. *Vision Research*, **41**(22), 2835-2843.
- Ullman, S. (1979b). The Interpretation of structure from motion. *Proceedings of The Royal Society of London. B*, **203** (1153), 405-426.
- Ullman, S. (1984). Maximizing rigidity: The incremental recovery of 3-D structure from rigid and nonrigid motion. *Perception*, **13**(3), 255-274.
- van Ee, R. (1996). Anisotropy in Werner's binocular depth-contrast effect. *Vision Research*. **36**(15), 2253-2262.

- van Ee R., Banks M., & Backus B. T. (1999). An analysis of binocular slant contrast. *Perception*, **28**(9), 1121-1145
- van Ee, R., & Erkelens, C. J. (1996). Anisotropy in Werner's binocular depth-contrast effect. *Vision Research*, **36**(15), 2253–2262.
- Wallach, H., & O'connell, D. N. (1953). The kinetic depth effect. *Journal of Experimental Psychology*, **45**(4), 205.
- Watson, A. B., & Ahumada Jr, A. J. (1985). Model of human Visual-motion sensing. *Journal of the Optical Society of America A*, **2**(2), 322-341.
- Watson, A. B., & Eckert, M. P. (1994). Motion-contrast sensitivity: visibility of motion gradients of various spatial frequencies. *Journal of the Optical Society of America A*, **11**(2), 496–505.
- Wexler, M. (2003). Voluntary head movement and allocentric perception of space. *Psychological Science*, **14**(4), 340-346.
- Wexler, M., & van Boxtel, J. J. (2005). Depth perception by the active observer. *Trends in Cognitive Sciences*, **9**(9), 431-438.
- Wexler, M., Panerai, F., Lamouret, I., & Droulez, J. (2001). Self-motion and the perception of stationary objects. *Nature*, **409**(6816), 85-88.
- Werner, H. (1937). Dynamics in binocular depth perception. *Psychological Monographs*, **49**(2), 1-127.
- Werner, H. (1938). Binocular depth-contrast and the conditions of the binocular field. *American Journal of Psychology*, **51**, 489-497.

論文内容の要旨

私たちは視覚を通じて三次元の世界を知覚しているが、視覚は二次元の網膜像によるものであり、本質的には奥行き次元の情報を持たない。このため、それぞれは不良設定性を持つ様々な奥行き手がかりを組み合わせることで奥行き推定の精度を高めていると考えられる。このため、奥行き手がかりの統合のあり方を検討することは、奥行き知覚の研究には欠かせない。現在の奥行き統合の標準的なモデル(Landy, Maloney, Johnston, & Young, 1995)では、各手がかりの奥行き出力に矛盾がなければ対等な重みで平均（線形加算）し、矛盾があるときのみ手がかりの重みが大きく変わると想定されている。本研究では、運動視差と両眼視差、二つの手がかりの間の統合を、運動視差と両眼視差の間の対比効果、時間特性の比較を通じてより詳しく検討する。

第二章（実験 1A, B）では、運動視差・両眼視差間の対比効果に関する検討を行った。両眼視差は、運動視差と同じく視差を原理とする奥行き手がかりであり、過去の心理物理学的研究からも様々な共通性が指摘されている。しかし生理学的研究から、両手がかりで視差を検出するまでのメカニズムは大きく異なるものであると考えられている。そこでこの研究では、両手がかりがどの程度密接な関係にあるか調べるため、Gillam, Blackburn, and Brooks (2007)らの対比効果の研究をもとに、それが運動視差と両眼視差の間で生じるかどうかを確かめた。実験の結果、両眼視差どうし、運動視差どうしの対比効果は既存の研究とほぼ同様に生じた一方で、両眼視差と運動視差の間の対比効果は非対称的であり、両眼視差から運動視差への効果は認められたが、逆に運動視差から両眼視差への効果は認められなかった。運動視差どうしの対比効果は両眼視差どうしの対比効果の結果と類似しており、両手がかりは基本的な性質で共通点がある

と考えられるものの、両手がかり間で生じる対比効果には非対称性があり、手がかり間のコンフリクトが無い場合でも、対等な重みづけによる平均では説明できない現象があることが確かめられた。実験1における運動視差と両眼視差の非対称な関係は、両眼視差が運動視差に対して優位となることを示している。この点についてより深く検討するため、第三章（実験2A, B）では、運動視差の処理時間を計測し、既知の両眼視差の処理時間との比較を行った。実験2Aでは、1秒周期で運動視差量の変化する刺激を用い、その刺激から知覚される奥行き量を計測した。その結果、そのような刺激は1秒の周期内の視差量を平均した場合に等しい奥行きを知覚することが明らかになった。実験2Bでは、視差量変化検出の限界を調べるため、提示中に一度だけ視差量が増加する刺激を用い、変化の検出までの反応時間を調べた。その結果、反応には最短でも1秒を要し、これは運動速度変化への反応時間である200から300msに比べ700から800ms程度長いものであった。これらの結果を単純に解釈すれば、運動視差の処理時間は、両眼視差の処理時間である100msに比べはるかに長く、むしろ運動からの構造復元(の処理時間に近いものであるとみなすことができる。

以上の結果は、奥行き統合のあり方は二つの可能性を示唆する。一つは、奥行き表象レベルでの統合の際、手がかり間でのコンフリクトのない場合でも重みづけの違いが生じる可能性である。これはLandy et al. (1995)のモデルを部分的に修正したものとなる。もう一つは、手がかりから奥行き表象が生成される段階での統合もしくは相互作用が存在する可能性である。運動視差の時間特性を考慮すれば、運動視差系での奥行き表象の形成には両眼視差情報が必要とされるという可能性もあるが、この点は今後さらに検討する必要がある。