

運動視差からの奥行き知覚における眼球運動の役割

白岩 史^{*1} 林 武文^{*2}

要 旨

運動視差から安定した奥行きを知覚するためには、視差情報に加えて観測者の眼球運動が重要であることが指摘されている。本研究では、網膜外情報としての眼球運動の必要性について言及した研究を概観する。その上で、これらの報告を検証するために実験を行い、その結果を検討する。

The Role of Eye Movement on Human Depth Perception from Motion Parallax

Aya SHIRAIWA^{*1} Takefumi HAYASHI^{*2}

Abstract

It has been found that the observer's eye movement is a critical factor to achieve a stable depth perception from motion parallax. In the present research, we first surveyed previous research on the necessity of eye movement to obtain extra-retinal information in order to perceive unambiguous and stable depth from motion parallax. Based on these findings, we performed a psychophysical experiment to confirm these research theories, and discussed our findings.

^{*1} 関西大学大学院総合情報学研究科

^{*2} 関西大学総合情報学部

1. はじめに

人間が日常場面で移動運動を成功させるためには、オブジェクトの位置、オブジェクト間の奥行きや相対運動の知識が必要であり、その中で特に重要なのは、奥行き知覚である。奥行きを知覚するために、両眼視差、運動視差、陰影、テクスチャ、遮蔽輪郭など、様々な手掛かりが挙げられているが、3次元世界での人間の奥行きの知覚は、視覚システムにおける2次元網膜像からの情報の解釈に依存している。この中で、明確な相対的奥行き手掛かりとして、最も重要な情報源となるのは、両眼視差と運動視差である。両眼視差は、ある1点を注視した際に出来る2枚の網膜像の僅かなずれ量であり、運動視差は、観察者が移動する際に出来る網膜像の時間的、相対的なずれ量である。視覚システムは、網膜上のオブジェクトの相対運動、即ち3次元空間内でのオブジェクトの相対的な奥行きに対する手掛かりとして、運動視差を用いており、運動視差は、移動運動を成功させるためにも重要な情報源となる。

明確で安定した奥行きは、水平の剪断運動が（1）静止したモニター上に提示され、横方向の頭部運動と連動するとき、または（2）水平方向に平行移動するモニター上に提示され、モニターの運動と連動するときに観察される。さらに、網膜上の剪断運動が、頭部運動やモニターの運動に連動していないときに、奥行き知覚は不安定になり、これは運動性奥行き効果（kinetic depth effect: KDE）として説明されている^[1]。これは、安定な奥行き知覚が、網膜外情報と網膜上運動を必要とすることを示唆するものである^{[2],[3],[4]}。

網膜外情報源として、頭部運動の役割が重要であると仮定されている^[5]。Ujike & Ono^[6]とOno & Ujike^[7]は、被験者の頭部平行移動速度について、奥行き知覚閾値と付随運動知覚閾値を調査し、運動視差からの奥行き知覚における頭部運動の重要性を報告した。しかしながら、頭部運動が運動視差からの奥行き知覚に対して必要な網膜外情報を提供しているかどうかは、意見の相違がある^{[8],[9]}。さらに、自己運動に関する前庭信号は、運動視差に対する網膜外情報源であると報告されている^{[5],[9],[10]}。しかしながら、Rogers & Graham^[11]の行った研究において、被験者の頭部は静止し、刺激はディスプレイの左右の動きに連動していたにも関わらず、明確な奥行きが知覚された。即ち、静止した被験者が観察したディスプレイの運動は、明確な奥行きを作り出すことにおいて、被験者の頭部運動と同様に効果的であることを示している。従って、被験者の頭部運動及び、それに付随する前庭信号は、運動視差からの奥行きを明確で安定に知覚するために必要とされない。

運動視差から明確な奥行きを知覚するために必要な網膜外情報は、Nawrot^{[2],[3]}とNawrot & Joyce^[12]により追従眼球運動であることが提案された。さらに、Mitsudo & Ono^[13]は、Nawrot^{[2],[3]}やNawrot & Joyce^[12]のモデルを拡張し、視覚システムは、明確で安定した奥行き構造を得るために、網膜上運動速度と追従眼球運動速度を加えることにより頭部中心速度を計算し、その頭部中心速度を比較して、網膜上のそれぞれの刺激に奥行きを割り当てている

と報告した。

本論文では、運動視差から明確で安定した奥行きを知覚するために必要な網膜外情報としての眼球運動について考察を行う。初めに、運動視差からの明確な奥行き知覚に眼球運動が必要であることを示した研究について概説する。さらに、心理物理実験によって運動視差に基づく奥行き知覚と眼球運動の関係を調査し、先行研究の妥当性について考察する。

2. 研究動向

運動視差は、被験者の平行移動時などに、外界の様々なボタンから、被験者の網膜上の変化ボタンを作り出すが、この網膜上の運動を作り出すために必要な平行移動には、例えば、能動的な横方向の頭部運動や、車に乗っているときに横窓から外界を観察するときなどに作り出される持続した受動的な平行移動 (motion perspective^[14]) などが考えられる。ここで、Nawrot^[2] は、被験者が、能動的または受動的に動くときに、眼球がある点を注視し続けるために、逆方向に動くということに注目した。被験者から様々な距離にあるオブジェクトは被験者の網膜上では相対的に動くが、補償性眼球運動により注視点は被験者の網膜上に静止し続ける。また、運動視差は被験者の光学的視点の平行移動により作り出されるが、眼球の回転からは作り出されない。何故なら、ある空間内の異なる位置にあるオブジェクトの相対的な位置は、平行移動中には変化するが、眼球の回転中には変化しないからである。従って、視覚システムは、網膜上運動を、外界でのオブジェクトの能動的な運動とは解釈せずに、オブジェクトは静止していると解釈する^[15]。そして、視覚システムは、運動視差を用いて、注視点に対する各オブジェクトの相対的な奥行きを決定し、オブジェクトの運動の知覚を打ち消している^[16]。

ここで問題となるのは、視覚システムが運動から奥行きを復元する際に、明確な奥行きが知覚される場合と、奥行きが反転するなど、曖昧な場合があるのは何故か、ということである。両眼立体視では、網膜像差の大きさが注視点からオブジェクトまでの奥行き値に比例する。それと同様に、運動視差に関して、各オブジェクトの網膜上運動速度は、注視点からオブジェクトまでの奥行き値に比例する。しかしながら、運動視差は両眼視差とは違い、網膜像が注視点より近い点と遠い点を決定するための視覚的情報を持っていないので、奥行き符号については本質的に曖昧となる^[17]。前章でも述べたが、これはKDEとして説明されている^[1]。この後、奥行き知覚を明確にする場合には、遠近情報^{[8],[18]}や両眼視差^{[19],[20],[21]}を視覚的手掛かりとして含む必要があるかもしれないことが示されたが、網膜外情報が絶対必要であることがOno & Ujike^[22]の運動残効 (motion aftereffect; MAE) に基づく実験により実証された。彼らの研究において、知覚された奥行き方向は、被験者の頭部運動方向により決定された。さらに、Ujike & Ono^[6]及びOno & Ujike^[7]により、運動視差からの奥行き知覚において、頭部運動が主要な役割を果たすことが報告された。この研究では、運動視差による奥行き知覚閾値が、

頭部運動速度について定量化された。同じく前章でも述べたが、自己運動に関する前庭信号は、運動視差に対する網膜外情報源である^{[5],[9],[10]}とされるが、Rogers & Graham^[11]の実験により、被験者の頭部運動やそれに付随する前庭信号は、運動視差からの明確な奥行き知覚のために必要ではないことになる。さらに、Rogers & Graham^[11]の実験において、明確な奥行きを知覚するために、刺激は頭部運動に対して逆方向に、ディスプレイの運動に対して同方向に動いた。これらの条件から、頭部運動と逆方向へ遅い眼球運動を引き起こすことが、運動視差からの奥行き知覚における奥行き符号を決定するのに必要なのではないかと考えられる。即ち、網膜外信号は遅い眼球運動に由来するのかもしれないのである。

この遅い眼球運動の重要な役割の1つは、被験者が運動しているときに、視対象を中心窩に捕捉し続けることである。まず、視覚システムと前庭システムが連携して、前庭動眼反射(vestibulo ocular reflex; VOR)を作り出し、視対象への注視を維持する。VORは、身体の動きに応じて、頭部の動きを補償し、視対象を中心窩に捕捉し続ける補償性眼球運動である。VORは、例えば、電車の中で新聞や本を読んだり、または窓の外の風景を見たりすることが出来ることの説明として用いられる。外力により、頭部や身体が運動するときに、これらの運動と位相が180 deg ずれて生じる。前庭器官により感知された頭部の動きを入力信号とし、電気信号に変換して、中枢に情報が送られる。また、VORには、回転性のVOR(RVOR)と並進性のVOR(TVOR)があり、両者は独立に動作することが知られており、運動視差はTVORに従うことが報告されている^[23]。TVORは短潜時を特徴とし^[24]、このゲインは観察距離を伴って変化する^{[24],[25],[26],[27],[28]}。ゲインとは、運動する視覚刺激の速度と眼球運動の緩徐相の速度の比である。

能動的な運動の場合、主な補償性眼球運動は、前庭器官主導のTVORである^[29]。しかしながら、TVORについて、観察距離が短い(1-2 m以下)の場合、大きな眼球運動が必要とされる。さらに、観察距離が短過ぎるので、視対象を中心窩に捕捉し続けることが出来ない。視対象を注視し続けるために、網膜上でのスリップが起き、これにより視機性眼球反応(optokinetic response; OKR)が引き起こされる。OKRは外界の大きな動きに対して起こる反射性の眼球運動であり、VORによって補償し切れない部分を補うように働くことが多いとされる。補償性眼球運動は、一般にTVORとOKRの組み合わせであり、ゲインは1に近い。しかしながら、観察距離が短い場合、上記の理由でOKRが大きくなり、ゲインは一般に1より小さくなる。観察距離の増加と共に、ゲインは1に近づく。また、観察距離が長い場合、OKRは抑制されるか、またはTVORと反対に作用することになり、1より大きくなる^[30]。

OKRは独立した2つの要素を持っているとされる。1つはTVORを視覚的に増強するOKNeであり、もう1つはRVORと関係する遅延型、または間接的要素のOKNdである^{[25],[31]}。さらに、OKRのOKNe要素は、多くの機能と生理学的類似性を視覚的追従メカニズムと共有する^[23]。また、追従とOKRは多くの類似性を持つ。例えば、固視の維持、短時定数、速度貯蓄無し、高加速・高速度、両眼視差に対する感度などである^{[23],[32]}。しかしながら、両者は同

一の眼球運動メカニズムとして言及されない。OKRは追従眼球運動 (ocular following response; OFR) と同じメカニズムであるとされる^{[33],[34],[35]}。OFRは、短潜時 (<70–85ms) であり、反射性の開ループ眼球運動である^{[33],[34]}。一方で、追従は、長い待ち時間と少しの反射があり、自発的な特性を持つ。さらに、追従に対する神経メカニズムは前頭葉眼球運動野の滑動性眼球運動 (smooth pursuit eye movement) の領域を含む^[36] のに対し、OFRに対する神経メカニズムはMSTに焦点が当てられる^{[33],[34]}。それ故に、OKRと追従は、統合された処理過程の異なる側面であると考えることが妥当である。即ち、OKRは正確な方向へ眼球を向けさせ (発動段階)、追従はターゲット上に眼球を注視させる (OKRの後の、閉ループ持続段階) 働きを持つ。追従は開ループ段階及び閉ループ持続段階の両方を持っているので、可能性が無いわけでもなく^[37]、OFRは視覚的追従の開始メカニズムとして提案されている^[33]。従って、被験者の頭部平行移動中に、追従信号がTVORとOKRと共に生成されていると考えられている。

さらに、受動的な運動、即ち、(加速しない) 持続した平行移動と長い観察距離の場合、TVORは活動せず、OKRのみが視対象を注視し続ける働きを持つ。従って、OKRは、被験者の能動的または受動的な、どちらの平行移動中でも起こり、運動視差に対する網膜外信号として働くのではないかと考えられる。

ここで、Nawrot^[2] は、OKRが網膜外信号として働く可能性に注目し、運動視差からの明確な奥行き知覚における、頭部運動、TVOR、OKRの役割を調査した。

2.1 奥行きの知覚に必要な網膜外信号を提供する眼球運動

この節では、Nawrotの研究^[2]を概説する。

全ての実験で、運動視差による奥行きの知覚はMAEにより作り出された。実験に用いた刺激は4本の水平方向の帯から成り、各帯は横0.33deg、縦1.5degの10本の垂直バーより構成された。この刺激領域は全体で6.6deg²であり、中央に注視点として小さな十字が描かれていた。隣接する帯は逆方向に、2.2deg/sで動いた (即ち、1, 3行目、2, 4行目が同方向に動く)。刺激は白黒モニター上に表示され、57cmの距離から観察された。被験者は、レール上のスライダに取り付けられたバイトバーを噛み、頭部を平行移動させた。スライダ運動の長さは20cmであったが、被験者は、通常、その中央の12cmのみで頭部を動かした。さらに、被験者は約2秒で1周期 (0.5Hz) で、滑らかで周期的な頭部運動を行うように指示された。テスト刺激の観察時間は制限されなかったが、被験者は一般に、刺激の奥行き判断をするのに必要な一方向の頭部運動のみで課題を行った。眼球位置は、頭部搭載型赤外線モニターにより測定されたが、これは練習中のみ用いられた。

最初に被験者は、単眼でMAE刺激に30秒間順応した。このとき、刺激の中心にある静止した注視点を注視し続けるように指示された。各試行において、MAE順応運動方向はカウンターバランスがとられていた。MAE刺激順応後に、MAE順応刺激の静止版である静止テスト

刺激を観察した。静止テスト刺激観察時、Ono & Ujike^[22]が述べたようなMAEを被験者は観察した。被験者が頭部運動をすると、この運動方向に対して、飛び出して見える帯の組が変化した。被験者の運動方向と逆方向に動いているように見える帯が手前に知覚され、同方向に動いている帯が奥に知覚された。頭部運動をやめると、奥行きは知覚されず、静止テスト刺激の帯の方向が順応した方向と逆方向に動いているように見えるMAEが知覚された。

各試行における被験者の課題は、注視点の上、または下の帯のどちらが手前に見えるかを示す、2選択肢強制選択（2AFC）であった。各被験者は、それぞれの実験で48試行を行った。全ての観察は単眼で行われ、使用しない眼は眼帯で覆われた。初めの3つの実験の被験者は3名（著者及び目的を知らない被験者2名）であり、最後の実験では5名（著者及び目的を知らない被験者4名、内2名は初めの3つの実験の被験者と同じ）であった。

最初の実験では、静止テスト刺激観察中に、被験者は頭部を左右に平行移動させた（図1）。眼球運動測定結果より、眼球運動は頭部運動と逆位相であったので、テスト刺激上への注視が維持された。各試行に対して、被験者がある一方向に動くときのみ、静止テスト刺激が表示され、逆方向に動くときは注視点のみが表示された。これは、頭部運動を逆方向に反転するときに見られる知覚的な反転を防ぐためである。この結果、静止テスト刺激において知覚された奥行きは、被験者の頭部と眼球運動により決定された。頭部運動と逆方向のMAEを作り出した刺激の帯が、注視点より近くに観察された。これは、運動視差からの奥行き知覚が、被験者の頭部運動から生じる網膜外信号に依存することを意味する。但し、この実験において、頭部運動、TVOR、OKRは共変している。

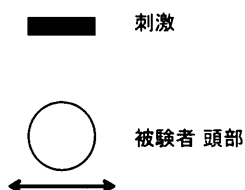


図1 実験1における刺激と被験者の関係。
図中の矢印は、被験者の頭部運動を示す。実験1において、刺激は静止したままであり、頭部は左右に動いた。

次の実験では、被験者は頭部を静止させ、動いている刺激の注視点を注視した（図2）。即ち、頭部運動が取り除かれたことにより、頭部平行移動に起因する前庭器官の活性と、それに伴うTVORも取り除かれたことになる。眼球運動測定結果より、順応後に、被験者は動いている刺激を注視するために、追従またはOKRを行った。この結果、知覚された奥行きは、被験者の眼球運動の方向により決定された。ここでは、眼球運動と同方向のMAEを作り出した刺激の帯が、注視点より近くに見られた。この結果は、Rogers & Graham^[11]の報告を支持するものであり、運動視差から奥行きを復元するために必要な網膜外信号はOKRに由来し、前庭系信号や、前庭系から引き起こされる、例えばTVORなどの眼球運動信号には由来しないこ

とを実証した。

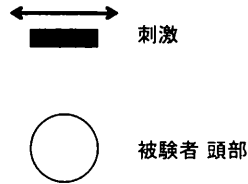


図2 実験2における刺激と被験者の関係。

図中の矢印は、刺激の運動を示す。実験2において、被験者頭部は静止したままであり、刺激は左右に動いた。このとき被験者は注視を維持するために眼球運動を行った。

3つ目の実験では、被験者は頭部運動を行ったが、眼球運動が取り除かれた。即ち、テスト刺激は被験者の頭部運動と連動し、同方向に動いた(図3(b))。このテスト刺激は、頭部運動と逆方向のTVORをキャンセル(または抑制)するために、頭部運動方向と同方向のOKRを引き起こすものであり^[38]、実質、眼球は眼窩内で静止することになる。即ち、この実験は、頭部運動、TVOR、OKRの網膜外信号のどれが、運動視差からの奥行き知覚において必要であるかを決定することを可能にするものであった。一般に、頭部運動と補償性眼球運動は逆方向に、TVORとOKRは同方向に動くが、この実験の場合、TVORとOKRが、注視を維持するために逆方向になり、頭部運動とOKRが同方向になる。従って、もし頭部運動方向とOKRと同方向のMAEが注視点より近くに観察されるなら、OKRが運動視差からの奥行き知覚に用いられており、逆方向のMAEが近くに観察されるなら、頭部運動とTVORが用いられていることを意味する。この結果、OKRと頭部運動と同方向のMAEが近くに観察された。これにより、OKRが運動視差からの奥行き知覚における網膜外信号の情報源であることが示唆された。

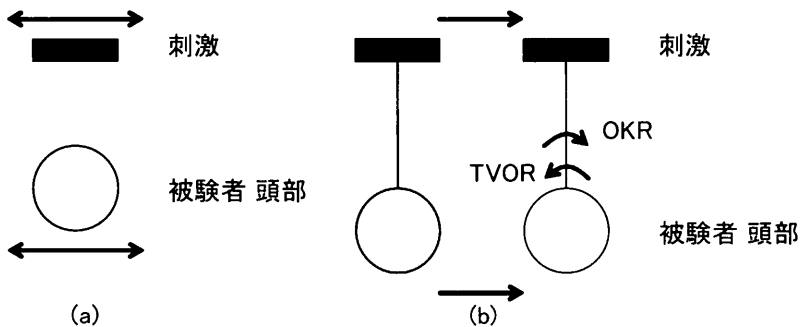


図3 実験3における刺激と被験者の関係。

(a) 図中の矢印は、被験者の頭部と刺激の運動を示す。(b) (a)の時間的な変化。左が頭部運動前の図であり、右が運動後である。曲矢印は、TVORとOKRの眼球運動方向を示す。実験3において、被験者頭部が固定されているように、刺激が頭部運動と連動して同方向に動いた。従って、頭部運動と逆方向のTVORをキャンセル(または抑制)するために、頭部運動方向と同方向のOKRが起こった。即ち、眼球は眼窩内で静止していた。

4つ目の実験では、OKRが運動視差からの奥行き知覚における網膜外信号の情報源になるという仮説を検討するために、OKRが取り除かれた。一般に、明るい場所での眼球運動はTVORとOKRから成り、ゲインは1に近い。しかしながら、暗い場所での眼球運動は、視覚刺激が無いので、OKRを引き起こすような網膜上スリップが無く、TVORのみから成る。また、一般に、近い観察距離でのTVORゲインは1より小さい^[30]。OKRとTVORは線形的な組み合わせであることが示唆されており^{[27],[39],[40],[41],[42]}、明るい場所でのゲイン(TVOR + OKR)から暗い場所でのゲイン(TVORのみ)を引くと、OKRの成分が得られる。

3つの各実験の前に、明るい場所と暗い場所でディスプレイ上のスポット光の観察を行った。被験者はディスプレイ上のスポット光を注視しながら、頭部運動を行うように指示されたが、暗い条件において、頭部運動を始めると、スポット光は消された。それでも、被験者はスポット光がまだ見えており、それを注視し続けていると想像しながら、頭部運動を行った。これにより、得られたTVORゲインの平均は0.88であり、明るい場所でのゲインの平均は1.05であった。従って、補償性眼球運動信号の約20%はOKRに起因することになる。この値に従い、テスト刺激はOKRゲインに比例して動かされ、被験者は頭部運動を行いながらテスト刺激を観察した(図4)。これにより、補償が不十分であるTVORでも注視を維持することが可能であった。

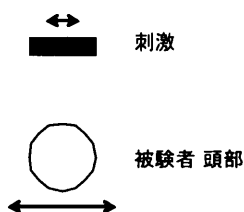


図4 実験4における刺激と被験者の関係。

図中の矢印は、被験者の頭部と刺激の運動を示す。実験4において、OKRを防ぐために、テスト刺激はOKRゲインに比例して動かされた。これにより、補償が不十分であるTVORでも注視を維持することが可能であった。

この結果、試行の49%で、TVORと同方向のMAEが近くに観察された。MAE運動、知覚された奥行き、及び頭部運動またはTVOR眼球運動の方向の間の一貫性のある関係は無かった。また、頭部運動及び眼球運動の方向に関わらず、被験者毎にある特定のMAEの方向に近いと報告した(4人は右方向、1人は左方向)。これは、予備実験でKDE刺激を観察した際、各被験者が近くに見えると報告したKDE運動方向と同じであった。従って、刺激条件が曖昧である場合、被験者が運動から奥行き知覚の何らかのバイアスを得ていることを意味している。これらの実験より、運動視差からの奥行き知覚は、OKRを取り除くことにより曖昧になったので、OKRが、明確な運動視差の奥行き知覚に対する網膜外信号を提供することが示された。さらに、OKRを取り除いた場合の結果の曖昧さと、KDE刺激で観察された曖昧さから、この2つが恐らく繋がっていることも示された。

以上の結果より, Nawrot^[2] は, (1) Rogers & Graham^[11] の報告を確認した, (2) OKR が運動視差から奥行きを明確に復元するために必要な網膜外信号を提供する, (3) この網膜外信号は, 前庭系信号や, 前庭系から引き起こされる, 例えば頭部運動やTVORなどの眼球運動信号には由来しない, と結論付けた.

2.2 眼球運動ゲインに対応する運動視差からの奥行き知覚

この節ではNawrotの研究^[3]を説明する.

Nawrot^[2]により, OKRが運動視差からの明確な奥行き知覚に必要な網膜外信号を提供することが示された. このOKRは, 観察距離が短い場合に大きくなり, 眼球運動ゲインは一般に1より小さくなる. 観察距離の増加と共に1に近づく. さらに観察距離が長い場合にOKRは小さくなるか, TVORに対して反対に作用するために, 眼球運動ゲインは1より大きくなる^[30]. もしOKRが運動視差からの奥行き知覚に用いられているのであれば, この観察距離の変化に基づくOKRの変化は, 運動視差の奥行き恒常性における観察距離の変化に関わる筈である. Nawrotの研究^[3]において, OKRの変化は運動視差の逆二乗則に従うかどうか調査された.

運動視差は, 幾何学的に, 奥行き方向に異なる2点間の距離の2乗の逆数に比例する. これを逆二乗則と言う. 逆二乗則は, 運動視差において, 観察距離が短い場合にのみ成立し, 観察距離が長い場合, 奥行きが知覚されない, 知覚された場合にも奥行きが曖昧, 奥行き反転が起こる, などが報告されている^[4]. これは, 幾何学的に以下の式(1)として示される.

$$d_M = (D_M^2 * \mu) / t. \quad (1)$$

但し, d_M は相対的奥行き, D_M は刺激までの距離(絶対的奥行き), μ は等価視差^{[4],[11],[20]}, t は横方向の頭部平行移動距離^[20]である.

この研究は, 観察距離(D_M)が変化することにより, OKRの変化と共に変わる運動視差(μ)からの奥行き(d_M)の知覚が変化するかどうかを調査することである. ここで, OKRの大きさを反映するためにOKRゲインを用いる. この実験から予想される結果は, 観察距離の増加と共に, OKRが減少することである. OKRは観察距離と共に変化するTVORの大きさと逆に変化する.

運動視差刺激において知覚された奥行きの大きさを測定するために, 2区間強制選択法(2IFC)で, 両眼視差刺激と比較された. 1区間目に等価視差を8 min arcで固定した運動視差刺激が, 2区間目で両眼視差が2-14 min arcの刺激が提示され, 恒常刺激法により比較が行われた. 被験者の課題は, 知覚された奥行きが大きかった区間を報告することであった. 被験者は4種類の観察距離条件で観察を行った. 刺激は, 1周期の正弦関数状の波形面であり, 空間周波数は0.40 cycle/degであった. マッチングを行うために, 運動視差刺激と両眼視差刺

刺激の位相は180degずれて表示された。運動視差刺激は、被験者の頭部平行移動と刺激内のドットの水平の平行移動を連動させることにより生成された。注視点より遠くに見えるドットは頭部運動と同方向に動き、近くに見えるドットは逆方向に動いた(図5)。観察距離は57, 90, 143, 227cmであった。刺激の大きさはディスプレイ上で変わらなかったため、観察距離増加に伴って小さくなったが、網膜像を一定に保つために、刺激情報が各観察距離条件で変えられた。注視点は刺激の中央に描かれ、注視点を含んでいる水平の帯は、常に、両眼視差及び等価視差が0であった。被験者は実験中、刺激中央の注視点を注視し続けるように指示された。さらに、Nawrot^[2]と同様に、OKRゲインが観察距離と共にどのように変化するかを決定するために、眼球運動と頭部運動が、明るい条件(TVOR+OKR)と暗い条件(TVOR)で測定された。被験者は、レール上のスライダに取り付けられたバイトバーを噛み、頭部を平行移動させた。スライダ運動の長さは20cmであったが、被験者は、通常、その中央の12cmのみで頭部を動かした。被験者は0.5-1.0Hzの間で、滑らかで周期的な頭部運動を行うように指示された。なお、両眼視差刺激はLCDシャッターグラスを用いて観察され、運動視差刺激は、シャッターグラスの左眼の視野を遮蔽し、右眼のみで、頭部平行移動を行いながら観察された。眼球位置は、頭部搭載型赤外線強膜反射システムを用いて測定された。被験者は5名(著者及び目的を知らない被験者4名)であった。各被験者は、4ブロック、全44試行を行った。観察距離は、それぞれ57cmから開始した。

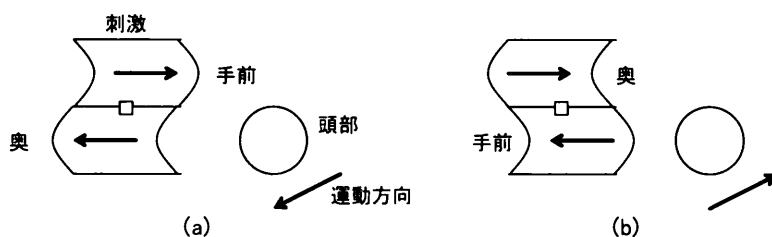


図5 刺激の正弦関数状の奥行き特性と、被験者の平行移動と刺激の運動の関係の例。
この図は、頭部運動と連動して、刺激の上半分が右方向に、下半分が左方向に動いていることを示している。(a) 頭部が左へ運動した場合、頭部運動と逆方向に動く上半分が手前に知覚され、同方向に動く下半分は奥に知覚される。(b) (a)と同様に、頭部が右方向へ運動した場合、上半分が奥に知覚され、下半分が手前に知覚される。

実験の結果、運動視差からの奥行き恒常性が観察距離の増加と共に機能しなくなり、Ono, Rivest, & Ono^[4]の結果と一致した。OKRゲインは、Nawrot^[2]での方法と同様にして計算され、観察距離の増加と共に減少した。これは、観察距離の増加と共に、TVORが補償性眼球運動の大半を占めるようになり、OKRがごく僅かになることを示している。ここで、式(1)に示された逆二乗則を再検討すると、実験結果より以下の式(2)のように表すことができる。

$$d_M = D_M^2 * \mu * pOKR / t. \quad (2)$$

なお、 $pOKRG$ は観察距離57cmでのゲインを1としたときの、他の距離でのゲインの割合である。頭部平行移動距離 (t) の代わりにOKRゲインを信頼するような、運動視差対する逆二乗則の一般形は、OKRゲインと頭部運動の大きさが逆に比例するので、以下の式 (3) のように表すことが出来る。

$$d_M = D_M^2 * \mu / (\theta / OKR Gain). \quad (3)$$

なお、逆二乗則において必要なOKR眼球運動の推定値は $\theta = \arctan(t/D_M)$ によって与えられる。また、式 (3) により予測された近似値と実験におけるマッチングデータの比較は妥当であった。

以上の結果より、Nawrot^[3] は、OKRは観察距離と逆に変化し、観察距離が短い場合に機能する、即ち、TVORゲインが大きく、OKRゲインが小さい場合に、運動視差からの奥行き知覚に対して悪影響を及ぼすと結論付けた。なお、動いている車の横窓から外界を観察する場合、前庭器官は活性されず、TVORは生成されないで、代わりにOKR（または追従システム）が観察者の平行移動に対して補償する働きをし、注視を続けることになる。従って、このような受動的な平行移動においては、OKRは効果的に働くことになる。

2.3 運動視差の追従理論

この節ではNawrot & Joyceの研究^[12]を説明する。

Nawrot^[2] と Naji & Freeman^[43] は、運動視差は被験者の頭部運動と密接に関係するが、基礎を成す神経メカニズムは、曖昧な網膜上運動情報から知覚された奥行き符号を明確にするために、追従のような眼球運動信号に頼っていることを報告した。ここで、Nawrot & Joyce^[12] は、運動視差の追従理論を説明し、この理論を実証することを目的として、様々な観察条件において一連の実験を行った。さらに、追従理論を用いて、知覚された奥行き符号が被験者の網膜外追従信号の方向と共に変化することも、実験により示した。

ここで、運動視差の追従理論を説明するために、簡単な模式図を図6に示す。追従理論において、追従方向と同方向の網膜上運動が注視点より遠くに知覚され、逆方向の網膜上運動が近くに知覚される。実際に知覚される運動に関しては、逆の関係になる。

Nawrot & Joyce^[12] は、追従方向、網膜上運動方向、知覚された奥行きの間の関係が、両眼立体視に対する網膜像差と知覚された奥行き符号の間の関係と同等に正当であることを実証するために以下の実験を行った。

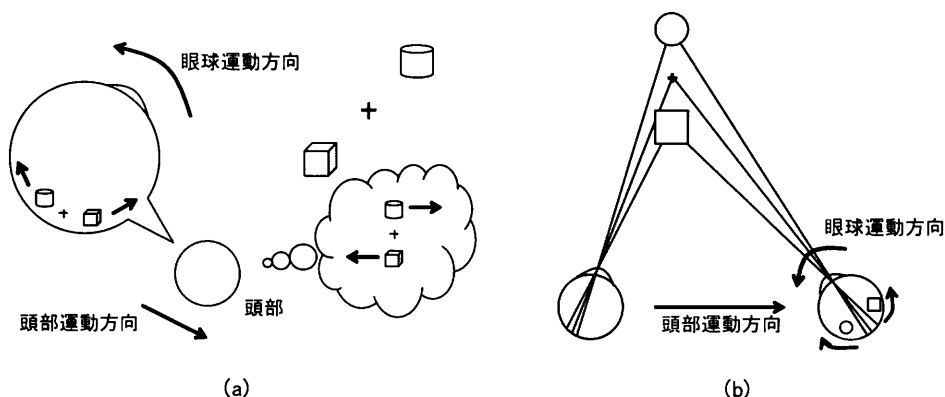


図6 被験者の網膜上のオブジェクトの運動と実際に知覚されたオブジェクトの運動の関係。
 (a) 運動視差は、静止した注視点（十字）上に注視が維持されているとき、被験者の横方向の平行移動（ここでは右方向）により作り出される。雲形のふきだし内に示されている図が実際の知覚されたオブジェクトの相対運動を示し、丸い、眼球形のふきだし内に示されている図が網膜上でのオブジェクトの相対運動を示している。この場合、知覚された相対運動方向は、注視点より近くにあるオブジェクト（立方体）では被験者の頭部運動方向と逆方向（左方向）になり、遠くにあるオブジェクト（円柱）では同方向（右方向）となる。しかしながら、網膜上では、相対的奥行きと運動間の関係は逆方向になる。(b) (a)の俯瞰図。注視点より近いオブジェクトと遠いオブジェクトが、被験者の網膜上でどのように動くかを示している。

刺激は、垂直方向に3周期の正弦関数状のランダムドット波形面であり、ドット間距離が0.27mmの白黒モニター上に表示され、47cmの距離から観察された。空間周波数は0.2 cycle/degであり、刺激窓（13.3×13.3deg）内の白い背景上に、10000個の2×2minの黒ドットから成った。2minの黒線が刺激窓の上半分と下半分に描かれ、刺激窓の中央には注視点を描かれた。この刺激窓は、条件により、モニター面の中央に置かれる場合とモニターに沿って平行移動する場合があった。波形の頂上と谷を表す部分のドットは、運動方向は逆であるが、水平のドット速度が最も速く、他のドット速度は垂直方向の正弦関数から算出された。波形の知覚された奥行きの大きさは、運動視差刺激窓内で、ピークドット速度によって変化した。ドットの配列が違う5種類の刺激があり、各試行でこの内の1つがランダムに選択された。刺激ドットの運動方向は、各試行に対してランダムに選択された。

被験者は、レール上のスライダに取り付けられた顎台に頭部を乗せ、平行移動を行った。スライダ運動の長さは22.5cmであったが、被験者は、通常、その中央の13cmのみで頭部を動かした。被験者は0.5–1.0Hzの間で、滑らかで周期的な頭部運動を行った。ディスプレイモニター面は38×29degであり、約0.5Hzの周期で、手動で約17cm平行移動した。初めの実験の条件4、7で、注視位置が眼球追跡システムを用いて観測され、次の実験では、眼球運動が頭部搭載型赤外線強膜反射システムを用いて測定された。両眼視差条件において、ステレオ刺激はLCDシャッターグラスを用いて提示された。

被験者は暗い部屋で実験を行った。顎台が、頭部運動を行うために横方向に動く条件と、固定された条件があった。また、モニター全体が横方向に平行移動する条件と、刺激窓がモニターに沿って動く条件があった。最初の実験の条件2から7で、被験者は単眼（右眼）で刺激を観察し、左眼を眼帯で覆った。被験者は常に注視点を注視し続けるように指示された。

被験者の課題は、奥行き位相判断を行うこと、即ち、奥行きが遠くに見える部分は、注視点の上下どちらにあるかを報告することであった。実験は閾値を決定するために、階段法^[44]を用いて行われた。階段法とは、この場合、判断が正解であれば等価視差を減少させ、誤った場合には増加させ、繰り返し提示する方法である。等価視差20minで開始し、床（等価視差1 minまたは2 min）か天井（等価視差78min）に達したときか、変化刺激の等価視差の増減が13回逆転した場合に終了した。6名の被験者（著者2名と実験の目的を知らない被験者4名）が実験に参加した。各被験者は、各条件において3ブロックの試行を行った。

1つ目の実験では、モニター、刺激、頭部が、各条件において運動/静止する場合があった。条件は（1）両眼立体視、（2）頭部平行移動（モニター・刺激窓静止）（図7（a））、（3）モニターと刺激窓の平行移動（頭部静止）（図7（b））、（4）刺激窓の平行移動（モニター・頭部静止）（図7（c））、（5）平行移動無し（刺激ドットのみ運動）（図7（d））、（6）頭部平行移動と刺激窓平行移動が同期（モニター静止）（図7（e））、（7）モニター平行移動と刺激窓平行移動が逆（頭部静止）（図7（f））、の7種類であった。

条件（1）において、被験者の頭部、モニター、刺激窓は静止した状態で、被験者はシャッターグラスを掛け、両眼視差刺激を観察した。その結果、予想した通り、立体視刺激により知覚された奥行きは明確であった。被験者は2 min（床）に至るまで、正確に奥行き位相を報告した。

条件（2）において、モニター、刺激窓が静止した状態で、被験者は頭部運動を行いながら、刺激を観察した（図7（a））。刺激ドットは頭部運動と連動した。この条件における眼球運動は、TVOR（前庭）及びOKRと追従（視覚）を組み合わせたものであった。この条件の結果、Rogers & Graham^[11]による報告と同様に、明確な奥行きを知覚した。また、被験者は2 min（床）に至るまで、正確に奥行き位相を報告した。さらに、追従理論に従う結果となった。

条件（3）において、被験者が静止した状態で、モニターと刺激窓が一緒に平行移動した（図7（b））。なお、注視点はモニターと刺激窓の運動と共に約20deg動くことになる。もし追従理論が正確であれば、モニターの平行移動と同方向の刺激窓内で動いているドットが、近くに知覚される筈である。この条件の結果、知覚された奥行きは明確であった。さらに、モニターの平行移動と同方向へ平行移動するドットは、注視点より近くに知覚された。平均の閾値は、等価視差1.25minであった。この結果は、頭部運動が運動視差からの奥行きの明確な知覚に対して必要でないというNawrot^[2]、Rogers & Graham^[11]、Naji & Freeman^[43]による報告を確認した。

条件（4）において、被験者、モニターが静止した状態で、刺激窓が平行移動した（図7（c））。

刺激窓は、静止しているモニターに沿って、0.5Hzで15deg (15deg/s) 平行移動した。被験者は、刺激窓の中央にある注視点を注視し続けた。この条件の結果、知覚された奥行きは明確であった。以前の条件と同様に、追従眼球運動と同方向に動いている刺激ドットが注視点より近くに知覚された。平均の閾値は、等価視差1.07minであった。この結果からも、頭部運動が運動視差からの奥行きの明確な知覚に必要なことが示された。

条件 (5) において、追従信号が、運動視差からの明確な奥行きの知覚に必要ななら、眼球運動を取り除いた場合、奥行き符号は曖昧になる筈である。この条件において、被験者、モニター、刺激窓は静止し、刺激窓内のドットのみが運動した (図7 (d))。この場合、静止した刺激窓 (と注視点) から眼球運動は引き起こされないため、追従信号が無いので刺激は奥行き符号を曖昧にする筈である。この条件の結果、知覚された奥行きは曖昧であった。知覚が双安定であったと報告した被験者もあり、大半の試行が78min (天井) で終了した。これにより、刺激は追従が無い場合に、奥行き符号が曖昧になることが示唆された。

条件 (6) において、頭部運動 (TVOR) 信号のみが、明確な奥行き知覚に必要なかどうか調べられた。Nawrot^[2]の方法を用い、刺激窓は被験者の頭部平行移動と共にモニターに沿って動いた。モニター自体は静止している (図7 (e))。例えば、右方向への頭部平行移動は、右方向へ動いている刺激窓内の注視点を注視し続ける右方向の追従信号を打ち消すために、左方向へのTVORを引き起こす。その結果、眼球は眼窩内に固定される。もし頭部平行移動 (と付随するTVOR) 信号が運動視差において奥行き符号を明確にするために用いられているなら、頭部平行移動と逆方向に動いているドットが注視点より近くに知覚され、追従理論に従うなら、追従と同方向に動いているドットが近くに知覚される。この条件の結果、知覚された奥行き符号は明確であり、追従理論に従った。被験者は1min (床) に至るまで、正確に奥行き位相を報告した。追従理論に関しては条件 (2) の関係と同様であるが、頭部運動方向に関しては、条件 (2) と逆であった。即ち、頭部平行移動は、刺激窓が静止しているか、被験者と共に動いているかに依存して逆方向の知覚を生成した。これより、視覚システムは、運動視差からの奥行きの知覚を明確にするために、頭部運動方向を用いていないことが示唆される。なお、この条件は、Nawrot^[2]と同等の条件であり、この報告を再確認した。

条件 (7) において、被験者は静止しており、モニターと刺激窓が逆方向に平行移動した (図7 (f))。即ち、モニターと刺激窓の運動が逆ということは、刺激は実質的に静止していることを意味する。これによりTVORは生成されない。また、予備実験において、空白のモニターのみを平行移動させた際、遅い位相でモニターを追う、視運動性眼振 (optokinetic nystagmus; OKN) が生成された。なお、刺激窓は、モニターの端まで達したら、画面から消された。

眼球運動の測定において、モニター (及び注視点) の平行移動に遅れてOKNが生成されたが、モニターは平行移動するが、注視点も平行移動 (逆方向) し、実質上、注視点が静止しているときに、上記のOKNを打ち消すための、追従信号がモニターと逆方向に生成された。従って、

モニターと逆方向に運動するドットが近くに知覚されると仮定される。

この条件の結果、奥行き位相判断を行うために、平均4.5minを必要としたが、知覚された奥行きは明確であった。モニターの平行移動と逆方向に動いている刺激ドットが近くに知覚され、追従理論に従う結果となった。また、これは、モニターの平行移動は再帰性OKRを生成し、注視を維持するために、追従信号がOKRを打ち消す（または抑制する）ために生成されることを意味する^[15]。この追従信号は、明白な眼球運動として表されないが、運動視差からの奥行き知覚を明確にするために、視覚システム内で用いられることが示唆される。さらに、この条件において、モニターや刺激窓の運動方向が逆転した際、刺激の奥行き位相の反転が見られた。

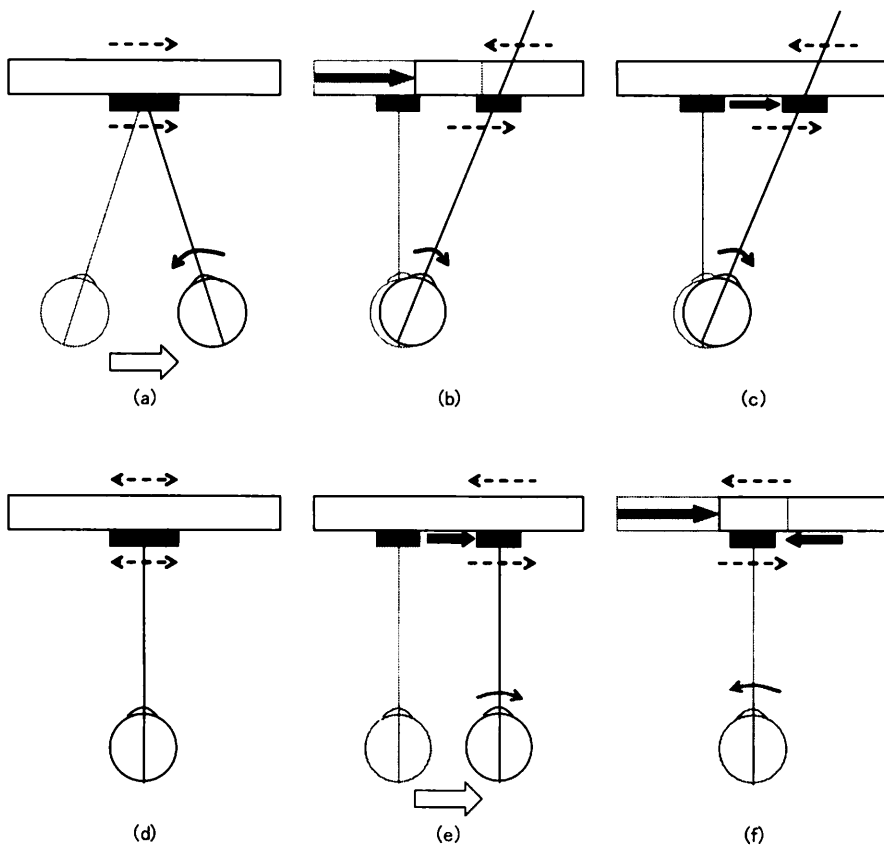


図7 条件2から7の俯瞰図。

図中で、眼球は被験者の平行移動（白矢印）を、小さい黒長方形（と黒矢印）は刺激窓（と平行移動）を、大きな白長方形（と灰矢印）はモニター（と平行移動）を示す。点線は追従理論によって予測された刺激ドットの運動方向を、曲矢印は眼球運動方向を示す。（a）から（f）の詳細は文中に示す。

以上より、知覚された奥行き符号は、刺激窓の中央の注視点上に、安定した注視を維持するために作り出される追従信号の方向によって決定されることが示された。また、特に条件(2)、(6)から、被験者の頭部平行移動は、運動視差における知覚された奥行き符号に対して必要ではなく、奥行き符号の決定もしないことが示唆された。

2つ目の実験では、追従信号の方向に、運動視差からの奥行き符号が依存するかどうか調査された。頭部運動と比較して、刺激運動の割合を変化させると、それにより、知覚された奥行き符号が曖昧になり、その結果、追従信号に依存するために奥行き符号が逆転する方法を決定することが可能になる筈である。

刺激の等価視差は10minに固定されたが、刺激窓の平行移動の割合は、頭部平行移動と比較して決定された。割合0であれば刺激窓は静止しており、条件(2)と同等である。割合1であれば刺激窓は被験者の頭部平行移動と共に動き、条件(6)と同等である。刺激窓の平行移動の割合は、恒常刺激法を用いて、0.2-0.8の間で7段階に変化した。被験者は単眼(右眼)で観察し、その際、刺激中央の注視点を注視し続けるように指示された。被験者の課題は、知覚された奥行き位相を報告することであった。

この結果、知覚された奥行き位相は、刺激窓の運動の割合に依存して変化した。刺激窓の運動の割合が低い場合(0.2-0.3)に、被験者の平行移動と逆方向に動いている刺激ドットが近くに知覚され(条件(2)と同様)、刺激窓の運動の割合が高い場合(0.7-0.8)に、被験者の平行移動と同方向に動いている刺激ドットが近くに知覚された(条件(6)と同様)。奥行き符号は、刺激窓の運動の割合が0.4-0.6の場合に曖昧になった。

もし追従理論が正確であれば、追従信号が最小になると、刺激に対する知覚が曖昧になる。即ち、TVORのみで十分な注視を行えるときには、追従信号は無く、運動視差からの奥行き知覚は曖昧になる筈である。この知覚的曖昧さは刺激窓の運動の割合が0.55付近で見出され、この点で、補償性眼球運動の追従成分が0に近くなることが示唆される。Nawrot^{[2],[3]}で行われた、明るい場所でのゲインと暗い場所でのゲインを比較することにより追従成分が求められた。被験者は、空白のスクリーンの中央にある注視点を注視しながら、頭部平行移動を行った。最初の8秒間は注視点が可視であり、眼球運動と頭部運動を記録した(明るい場所でのゲイン: TVOR + OKR)。次の8秒間で、モニターは消された。被験者は注視点の位置を思い出ししながら注視を続け、頭部平行移動を行った(暗い場所でのゲイン: TVORのみ)。

この結果、被験者の平均の追従成分は0.57であり、奥行きが曖昧になったときの刺激窓の運動の割合とはほぼ一致した。追従は、刺激窓の運動の割合が低い場合、被験者の平行移動と逆方向であり、高い場合は同方向であった。この実験より、知覚された奥行き符号が被験者の網膜外追従信号の方向と共に変わることを実証した。さらに、この追従信号が小さい場合と無い場合に、知覚された奥行きが曖昧になることが示された。また、眼球運動の記録より、知覚された奥行き符号の曖昧さは、追従信号が最小になるときの点で見出されることが示された。

以上の結果から、Nawrot & Joyce^[12]は、(1) 視覚システムは、曖昧な網膜上運動情報か

ら知覚された奥行き符号を明確にするために、追従のような眼球運動信号を用いている。(2) 知覚された奥行き符号が被験者の網膜外追従信号の方向と共に変わり、この追従信号が小さい場合と無い場合に、知覚された奥行きが曖昧になる、と結論付けた。

2.4 オブジェクトが作り出した運動視差からの奥行きと頑健性の知覚における網膜上運動速度と追従速度の加算

この節では、Mitsudo & Onoの研究^[13]を説明する。

既に述べたが、知覚された奥行き順位は、網膜上剪断運動が、頭部またはモニターの運動に連動していないときに不安定であり、これはKDE^[1]として説明される。即ち、これは、安定な奥行き順位が、網膜外信号と結合した網膜上運動を必要とすることを示唆するものである^{[2],[3],[4],[12]}。Nawrot^{[2],[3]}やNawrot & Joyce^[12]は、重要な網膜外信号が追従眼球運動より生じることを提案した。追従眼球運動は、平行移動するオブジェクトを追従することによってだけでなく、頭部平行移動中に静止したオブジェクトを注視することによっても引き起こされる。従って、Nawrot^{[2],[3]}やNawrot & Joyce^[12]は、追従信号が頭部運動やオブジェクト運動について利用することが出来、知覚された奥行き順位を決定することを主張した。しかしながら、Nawrot^{[2],[3]}やNawrot & Joyce^[12]のモデルでは、刺激が剪断運動や平行移動成分を含んでいる場合に、奥行き順位を予測することが出来なかった。また、Braunstein & Andersen^[18]は、網膜上運動速度のみを奥行き順位の決定要因とし、網膜上でより速く動く部分をより近くに観察すると予測するモデルを提案した(網膜モデル)。このモデルは、Nawrotらのモデル^{[2],[3],[12]}とは、網膜外追従速度は奥行き順位を決定するために必要とされないと仮定する点において異なっている。

これらの研究を踏まえて、Mitsudo & Ono^[13]は、新たなモデルを提案した。そのモデルによると、視覚システムは、動いている構造の各部分の追従眼球運動速度と網膜上運動速度を加えることにより計算される頭部中心速度を比較し、より速い頭部中心速度を持つ部分に、より近い奥行きを割り当てることにより、知覚された奥行き順位を予測している。このモデルは、以下の式(4)により表される。

$$\begin{aligned} &\text{if } |v_1 + v_{\text{pursuit}}| \geq |v_2 + v_{\text{pursuit}}|, \quad D_1 \leq D_2, \\ &\text{otherwise,} \quad D_1 > D_2. \end{aligned} \quad (4)$$

D_1 と D_2 はそれぞれ、網膜上角速度 v_1 と v_2 に関して、動いている要素の知覚された距離を、 v_{pursuit} は追従眼球運動の角速度を示す。即ち、一般的に $v_1 + v_{\text{pursuit}}$ は頭部中心速度である^{[8],[43]}。このモデルでは、 $(v_1 + v_2)/2 + v_{\text{pursuit}} = 0$ となるときに、知覚された奥行き順位が曖昧になると予測される。逆に、この状況では、相対運動に対する感度が最大になる筈である^[15]。このモデルは、網膜上でより速く動く部分がより近くに観察されると常に予測されないという点で、網

膜モデルとは異なることとなる。

このモデルが妥当かどうかを調査するために、網膜上で異なる大きさの平行移動成分 ($v_1+v_2 \neq 0$) と異なる大きさの追従眼球運動を導入して実験を行った。特に、(a) v_1 と v_2 の値は、常に追従点に対して運動方向が同じであり、(b) 平行移動成分の絶対値 $[(v_1+v_2)/2]$ が相対運動の絶対値 [切断成分; $(v_1-v_2)/2$] より大きくなるように、 v_1 と v_2 の値を選択した。また網膜上の平行移動方向は、追従眼球運動の方向と逆方向であった。以上のように与えられた刺激条件に対して、知覚された奥行き順位の一貫性 (実験1) と知覚された相対運動に対する閾値 (実験2) が測定された。

実験1において、網膜上平行移動速度と追従眼球運動速度が独立的に操作され、異なる速度のランダムドットで定義された行間で知覚された奥行き順位が測定された (図8)。具体的には、網膜上でより速く動いている行が、より遅く動いている行より近くに見えているときの頻度を測定した。さらに、網膜モデルとこの研究において提案されたモデル (追加モデル) が比較、調査された。この2つのモデルについて、網膜モデルは網膜上でより速く動いている行が常に近くに見えると予測した。追加モデルは、網膜上でより速く動いている行が、遷移追従速度 $[v_{\text{pursuit}} = -(v_1+v_2)/2]$ となるような追従速度が網膜上平行移動速度を上回ったときに、より遠くに見えると予測した。

刺激は、視角にして 33.8×26.7 deg の17インチCRTディスプレイ上に、 11.2×11.2 deg の大きさで表示された。ドット数は300、各ドットは視角 4.5×4.5 min に相当した。刺激領域の中央に、追従点 (22.5×22.5 min) が描かれた。ドットと追従点の輝度は 30.25cd/m^2 、背景輝度は 0.02cd/m^2 であった。ランダムドット x_{dot} と追従点 x_{pursuit} は、それぞれ、以下の式 (5) と式 (6) に示されたように、モニター上を水平方向に正弦関数状に運動した。

$$x_{\text{pursuit}} = a \sin(2\pi\tau/P). \quad (5)$$

$$x_{\text{dot}} = \begin{cases} [a - b(1+d)] \sin(2\pi\tau/P), \\ [a - b(1-d)] \sin(2\pi\tau/P). \end{cases} \quad (6)$$

式 (5) の a は眼球の回転振幅、 τ は時間 ($0 < \tau < 4.8$ s)、 P は周期 (2.4s) である。 a は各試行に対して、0, 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 7.5deg から選択され、それぞれの最大追従速度は0, 4, 8, 12, 16, 20deg/s であった。また、式 (6) の b は網膜上平行移動の振幅、 d は運動視差振幅である。 b は各試行に対して5, 7.5, 10deg/s の最大平行移動速度を作り出し、 d は0.07で一定であった。なお、式 (6) の上式は、網膜上で速く動いているドットについてであり、下式は遅く動いているドットについてである。刺激領域は等間隔に4等分され、もし1, 3行目が速く動くなら2, 4行目が遅く動き、逆の場合も同様であった (図8)。

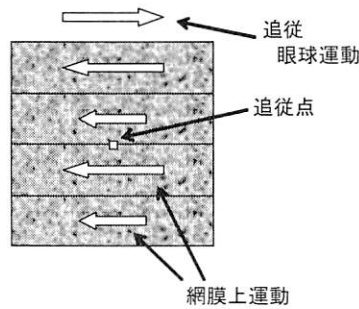


図8 用いられた刺激の略図。

ランダムドット上の4本の矢印はドットの運動（網膜速度）を示す。ドット領域の外側に描かれた矢印は追従眼球運動（追従速度）を示す。網膜速度と追従速度の方向は常に逆方向であった。

被験者は刺激を右眼で観察し、左眼を眼帯で覆った。観察距離は47cmであり、実験は暗室で行われた。

各試行の最初に追従点が1.2秒（半周期）間提示され、次に相対運動無し（ $d=0$ ）のランダムドットが追加され、1.2秒間提示された。最後に相対運動を行う（ $d=0.07$ ）ランダムドットが4.8秒（2周期）間提示された。この間、被験者は出来るだけ正確に注視点を注視し続けるように指示された。相対運動無しのドットを提示した理由は、ドット運動の開始時に引き起こされる可能性のある不正確な眼球運動による奥行き判断を避けることであった^[46]。各観察の後で、被験者は他の行より前に見えた2行を2 AFCで報告した（即ち、1, 3行目が前、または2, 4行目が前）。試行間間隔は1.5秒であった。被験者は11ブロック、全396試行を行った。各ブロックは36試行（追従速度6 × 平行移動速度3 × 運動の位相2）であった。刺激の提示順及び追従点の最初の運動方向（右/左）はランダムであった。1ブロック目は練習ブロックであった。被験者は6名（著者1名と実験の目的を知らない5名の被験者）であった。なお、2人の被験者に対して、別セッションで眼球運動が測定された。

測定された眼球運動より、被験者は、平行移動速度の違いによらず、正確に追従点を追従することが出来たことが示された。

各条件に対して、網膜上でより速く動いている行に対する‘より近い’という応答の割合を計算した。‘より近い’という割合が0.5（遷移追従速度）であった最大追従速度の主効果は、最大平行移動速度の要因として統計的に有意であった。これらの結果は、提案したモデルを支援するものであった。即ち、視覚システムは、網膜上運動速度と追従速度を加えることにより、頭部に対する対象の速度を計算し、その次に、動いているパタンの奥行き順位を決定するために、頭部に対する対象の速度を用いるのである。一方、Nawrotらのモデル^{[2],[3],[12]}は、網膜上平行移動を考慮しないので、このような刺激に対して奥行き順位を予測出来ない。また、追加モデルは、眼球運動が無いときに、網膜モデル^{[8],[18]}を説明することが出来た。

安定した奥行きが観察されるとき、知覚された相対運動は抑制されることが報告されてい

る^{[7],[15],[47]}。従って、異なる網膜上平行移動速度と追従速度の大きさに関して、知覚された相対運動に対する感度を測定すれば、追加モデルをさらに支援することが可能である。実験2では、実験1と同じ刺激を用いて、知覚された相対運動に対する運動視差閾値を測定した。この際、行間の相対運動の判断を簡単にするために、刺激の2, 3行目に2本のプローブ線が埋め込まれた。被験者の課題は、相対運動が検出されるまで、プローブ線間の相対運動の大きさを調節することであった。

知覚された相対運動の感度は、奥行き順位が曖昧になるときに、最大になることが予測される。もし追加モデルが正確であるなら、相対運動の感度は、追従速度が網膜上平行移動速度（方向は逆）になるときに、最大になると予測される。即ち、追加モデルは、相対運動に対する運動視差閾値が実験1で見出された遷移追従速度（‘より近い’という応答の割合が0.5）で最小になる筈である。網膜モデルはこのような結果を予測しない。

刺激及び装置は、以下に示す項目以外実験1と同じであった。例外は、網膜上平行移動速度が5, 10deg/sであったことと、2本のプローブ線（4.5×45.0min）が刺激の2, 3行目の中央に、スクリーンの中央を通過する267ms間提示されたことであった。プローブ線とランダムドットは同じ速度で動き、等輝度であった。

各被験者の課題は、2本のプローブ線間で知覚された相対運動に対する運動視差の下限閾値を決定することであった。被験者は、キーボード操作により、線とランダムドットの運動視差振幅（ d ）を調節した。ランダムドットの運動視差振幅は、プローブ線の運動視差振幅に従って変化した。運動視差の開始時の値は、0か0.14であった。被験者は5ブロック、全108試行を行った。1ブロック目は練習ブロックであり、12試行であった。残りのブロックは24試行（追従速度6×平行移動速度2×開始運動視差2）であった。刺激の提示順及び追従点の最初の運動方向（右/左）。4行に対するドット速度の割り当てはランダムであった。被験者は8名（著者1名と実験の目的を知らない7名の被験者。内2名は実験1にも参加）であった。

この結果、運動視差閾値が最小になる追従速度は、実験1で得られた遷移追従速度に近かった。このことから、追従速度と網膜上平行移動速度が、運動方向は逆であるが、同じ大きさを持つときに、相対運動に対する感度が最大になることが示唆され、提案したモデルを支持する結果となった。

2つの実験結果は、網膜上運動速度と追従速度を加えることにより、運動視差から安定した奥行きを得ることが出来ることを実証した。さらに、このモデルは、網膜上運動が平行移動要素を含むときでさえ、知覚された奥行き順位を予測出来るので、Nawrot^[3]の提案より一般的である。但し、実験結果は、視覚システムが頭部中心速度を正確に処理しないことも示した。これは、追従速度が網膜上速度に関して‘過小評価される’傾向にあるという実証的事実と一致する^[48]。しかしながら、これらの結果は、視覚システムがFreeman & Fowler^[49]によって議論されたように頭部中心表現を構成するために知覚された追従速度を用い、Morvan & Wexler^[50]によって議論されたように知覚的課題における頭部中心速度の処理の重要性を示

すものとなった。

3. 実験

3.1 目的

Nawrot^{[2],[3]}, Nawrot & Joyce^[12], Mitsudo & Ono^[13] は、運動視差から明確で安定な奥行きを知覚するために網膜外信号が必要であることを実証した。しかしながら、Ono & Steinbach^[15] の実験では、刺激の形状による奥行き量の差が見られた。この実験では、OFRからの網膜外情報の必要性を確認することと、刺激の形状による奥行き量の差に関して検討することを目的としている。

3.2 方法

[装置]

Dell Precision PWS470を用いて刺激を生成した。刺激はリフレッシュレート75Hzの21インチCRTモニターに表示された。モニターの解像度は1600×1200である。被験者とモニターとの間の距離は約100cm、刺激に用いたランダムドットパタンの表示領域は12.5×12.5cmであり、視角7.13×7.13degに相当する。ディスプレイの平均輝度は約2.70cd/m²であった。なお実験は暗室で行われた。

[刺激]

刺激として、奥行き方向が垂直方向に変化するランダムドット相対運動刺激を用いた。但し、相対速度（刺激の不連続性）が段階的に操作されており、5条件（矩形波2段、矩形波3段、矩形波4段、矩形波6段、正弦波）が設定された。運動視差は0.40degに固定した。刺激パタンの運動方向は、被験者から画面に向かって左方向であった。運動開始時及び終了時に速度が増減し、それ以外では一定速度で移動する。ドット密度は約9.11ドット/deg²（ドット数：500）であり、空間周波数は約0.07cycle/deg、ドットの大きさは全ての点で一定（1ピクセル）である。追従点は大きさが17.2×17.2minの四角形であり、刺激領域の垂直方向の中央に表示された。追従点の運動方向は被験者から画面に向かって右方向、即ち、刺激パタンの運動方向と逆方向であり、平均6.25mm/sで左端から右端まで動いた。図9（a）は、実験に用いられた矩形波4段の略図である。図横の黒線は、ランダムドットの運動と速度勾配を示し、下の白抜き矢印は追従点の運動を示す。（b）は刺激観察中の眼球の動きを示す。頭部を運動させないため、頭部運動に伴う前庭器官の活性やVORは引き起こされず、追従点を追うためのOFRのみが引き起こされる。

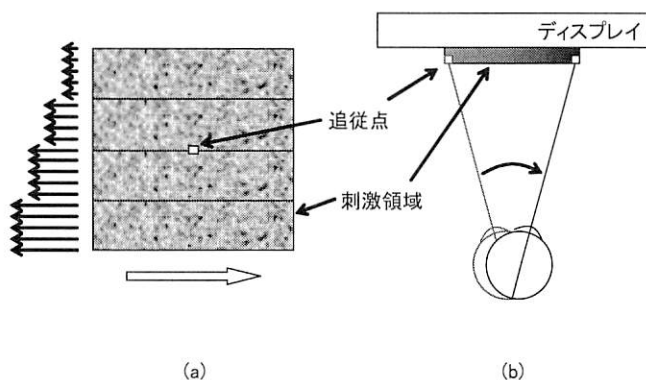


図9 実験に用いられた矩形波4段の略図.

(a) 図横の黒線はドットの運動と速度勾配を、下の白抜き矢印はOFRを示す. 網膜速度と追従速度の方向は常に逆方向であった. (b) 刺激観察中の眼球の動きの俯瞰図. 曲矢印はOFRを示す.

[手続き]

試行が開始されると、最初にディスプレイには、刺激が提示される領域と注視点を示した図形が表示される。キー操作によって、運動視差により奥行きを知覚出来る刺激（ランダムドットボタン）が提示される。この刺激の提示時間は約2秒間であり、その後空白が約2秒間提示される。この刺激提示と空白が刺激の形状1種類につき3回繰り返される。3回目の空白は2秒以上続き、このときに被験者は刺激の評定を行うように指示された。試行回数は練習試行1試行を含む13試行であり、1試行中に5種類の刺激がランダムに提示される。なお、3試行毎に2分間の休憩をとった。また、被験者は単眼（利き目）で刺激を観察し、反対の眼は眼帯で覆った。なお、被験者は試行中、常に、追従点を追従するように指示された。

[課題]

被験者の課題は、知覚された面が連続または不連続のどちらに見えるかを報告し、その奥行き量を決定することであった。なお、奥行き量の評定は、知覚された面の最大振幅を紙に記録することにより、長さで答えた。

3.3 結果及び考察

実験結果を図10に、知覚された面の形状の各割合を図11に示す。図10は刺激の形状と知覚された刺激の奥行き量の関係であり、図11は被験者が提示された各刺激をどのように知覚したかの割合である。図10、11における横軸は、刺激の形状を表す。図10における縦軸は知覚された奥行き量の評定値を表し、正弦波を1.00として規格化されている。

知覚された奥行き量は矩形波2段が最も小さくなり、正弦波が最も大きくなる傾向にあった。全ての刺激に対して奥行きを知覚することが出来た。また、知覚された面の形状は、矩形波2

段、3段が提示されたときに、ほぼ不連続的に知覚される傾向にあり、矩形波6段、正弦波が提示されたときに連続的に知覚される傾向にあった。

矩形波2段に関して、追従点が無い以外は本実験と同じ刺激を用いた以前の報告では、奥行きを知覚出来ない被験者や、他の形状に比べて奥行きを極端に小さく評定する被験者がいた^[51]。さらに、矩形波3段に関しても、本実験より奥行き量は小さく評定された。以前の実験では、追従点が無いためにOFRが引き起こされなかったので、奥行きが曖昧に知覚されたと考えられる。以上より、奥行きを知覚するために、OFRからの網膜外情報が必要であることが考えられる。

しかしながら、上記の以前の報告やOno & Steinbach^[15]と同様に、刺激によって奥行き量に違いが生じた。従って、OFRからの網膜外情報は、運動視差からの明確な奥行き知覚に必要なであるが、完全な情報を提供するわけではないことが考えられる。Ono & Steinbach^[15]が用いた刺激は、正弦波、三角波、鋸波、矩形波であり、この順で奥行き量が減少した。但し、彼らが用いた矩形波は、我々が用いた矩形波2段を縦に2つ並べたような刺激であった。実験の結果より、面を不連続的に知覚する割合が高い矩形波2段、3段の奥行き量を、比較的小さく見積もる傾向があるので、面を不連続的に知覚することが、知覚された奥行き量に何らかの影響を及ぼすと考えられる。また、矩形波2段に関しては、面の境界が1つしかない場合に、前後関係の知識だけでは奥行き順位が曖昧になることが考えられる。これらから、運動視差から奥行きを知覚する際に、対象の形状に対する先験的知識が必要であることが示唆される。

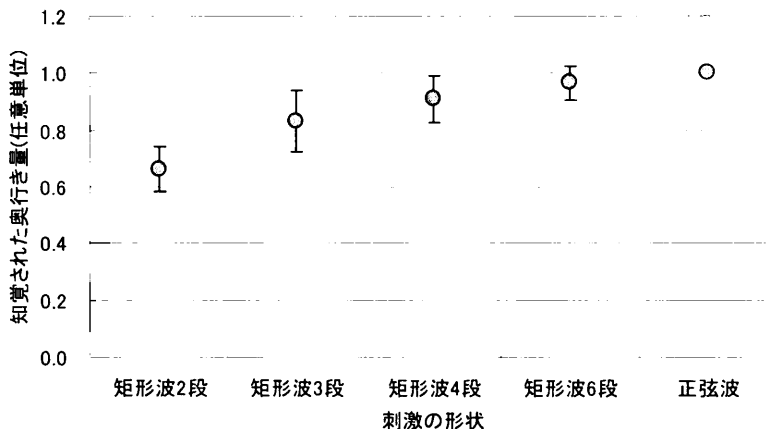


図10 刺激の形状と知覚された奥行き量の関係。
横軸は刺激の形状を、縦軸は被験者が知覚した奥行き量の平均値を、
エラーバーは標準偏差を示す。なお、奥行き量は規格化されている。

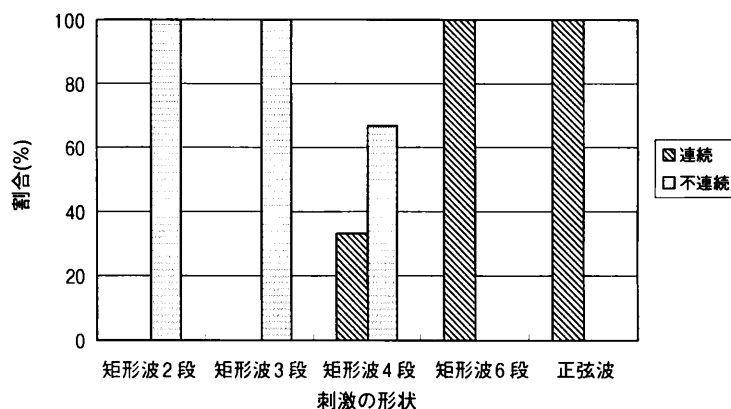


図11 知覚された面の形状の割合。
横軸は刺激の形状を、縦軸は各刺激がどのように知覚されたかの割合を示す。

4. おわりに

本論文では、運動視差から明確で安定した奥行きを知覚するために必要な網膜外情報としての眼球運動について考察を行った。運動視差からの奥行き知覚に眼球運動が必要であることを示した論文について概観し、実験によりこの報告を確認した。

しかしながら、運動視差からの奥行き知覚に関与するメカニズムについて、初期段階は網膜上運動の知覚に基づき、その後、OFRに関与するMST^{[33],[34]}への信号の流れが考えられるが、その処理経路については明確ではない。さらに、形状による奥行き量の違いに関しても検討の余地がある。

今後は、対象の空間形状に関する知識や面の補間を考慮し、運動視差からの奥行き知覚に関して検討する必要がある。また、不連続を含む面の再構成計算を可能とするために、線過程を考慮に入れた計算モデルを検討する予定である。

参考文献

- [1] Wallach, H. & O'Connell, D. N.: The kinetic depth effect. *Journal of Experimental Psychology*, 45, 205-217 (1953).
- [2] Nawrot, M.: Eye movements provide the extra-retinal signal required for the perception of depth from motion parallax. *Vision Research*, 43, 1553-1562 (2003).
- [3] Nawrot, M.: Depth from motion parallax scales with eye movement gain. *Journal of Vision*, 3, 841-851 (2003).
- [4] Ono, M. E., Rivest, J., & Ono, H.: Depth perception as a function of motion parallax and absolute-distance information. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and*

- Performance*, 12, 331-337 (1986).
- [5] Steinbach, M. J., Ono, H., & Wolf, M. E.: Motion parallax judgements of depth as a function of the direction and type of head movement, *Journal of Psychology*, 45, 92-98 (1991).
 - [6] Ujike, H. & Ono, H.: Depth thresholds of motion parallax as a function of head movement velocity. *Vision Research*, 41, 2835-2843 (2001).
 - [7] Ono, H. & Ujike, H.: Motion parallax driven by head movements: Conditions for visual stability, perceived depth, and perceived concomitant motion, *Perception*, 34, 477-490 (2005).
 - [8] Braunstein, M. L. & Tittle, J. S.: The observer-relative velocity field as the basis for effective motion parallax. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14, 582-590 (1988).
 - [9] Rogers, S. & Rogers, B. J.: Visual and nonvisual information disambiguate surfaces specified by motion parallax. *Perception and Psychophysics*, 52, 446-452 (1992).
 - [10] Gibson, E. J., Gibson, J. J., Smith, O. W., & Flock, H.: Motion parallax as a determinant of perceived depth. *Journal of Experimental Psychology*, 58, 40-51 (1959).
 - [11] Rogers, B. J. & Graham, M. E.: Motion parallax as an independent cue for depth perception. *Perception*, 8, 125-134 (1979).
 - [12] Nawrot, M. & Joyce, L.: The pursuit theory of motion parallax. *Vision Research*, 46, 4709-4725 (2006).
 - [13] Mitsudo, H. & Ono, H.: Additivity of retinal and pursuit velocity in the perceptions of depth and rigidity from object-produced motion parallax. *Perception*, 36, 125-134 (2007).
 - [14] Gibson, J. J.: *The perception of the visual world*. Boston: Houghton Mifflin Co (1950).
 - [15] Ono, H. & Steinbach, M. J.: Monocular stereopsis with and without head movement. *Perception and Psychophysics*, 48, 179-187 (1990).
 - [16] Leigh, R. J. & Zee, D. S.: *The neurology of eye movements*. New York: Oxford Press (1999).
 - [17] Farber, J. M. & McConkie, A. B.: Optical motions as information for unsigned depth. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 5, 494-500 (1979).
 - [18] Braunstein, M. L. & Andersen, G. J.: Velocity gradients and relative depth perception. *Perception and Psychophysics*, 29, 145-155 (1981).
 - [19] Nawrot, M. & Blake, R.: A neural network model of kinetic depth. *Visual Neuroscience*, 6, 219-227 (1991).
 - [20] Rogers, B. J. & Graham, M. E.: Similarities between motion parallax and stereopsis in human depth perception. *Vision Research*, 22, 261-270 (1982).
 - [21] Rogers, B. J. & Graham, M. E.: After effects from motion parallax and stereoscopic depth: similarities and interactions. In L. Spillman & B. R. Wooten (Eds.), *Sensory experience, adaptation, and perception: Festschrift for Ivo Kohler* (pp.603-619). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum & Associates (1984).
 - [22] Ono, H. & Ujike, H.: Apparent depth with motion aftereffect and head movement. *Perception*, 23, 1241-1248 (1994).
 - [23] Miles, F. A. & Busetini, C.: Ocular compensation for self-motion: Visual mechanisms. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 656, 220-232 (1992).
 - [24] Bronstein, A. M. & Gresty, M. A.: Short latency compensatory eye movement responses to transient linear head acceleration: a specific function of the otolith-ocular reflex. *Experimental Brain Research*, 71, 406-410 (1988).
 - [25] Busetini, C., Miles, F. A., & Schwarz, U.: Ocular responses to translation and their

- dependence on viewing distance. II. Motion in the scene. *Journal of Neurophysiology*, 66, 865-878 (1991).
- [26] Osa, J. G., Baloh, R. W., Demer, J. L., & Honrubia, V. L.: The effect of target distance and stimulus frequency on horizontal eye movements induced by linear acceleration on a parallel swing. *Annual Review of the New York Academy of Science*, 656, 874-876 (1992).
 - [27] Schwarz, U., Busetini, C., & Miles, F. A.: Ocular responses to linear motion are inversely proportional to viewing distance. *Science*, 245, 1394-1396 (1989).
 - [28] Schwarz, U. & Miles, F. A.: Ocular responses to translation and their dependence on viewing distance. I. Motion of the observer. *Journal of Neurophysiology*, 66, 851-864 (1991).
 - [29] Angelaki, D. E.: Eyes on target: what neurons must do for the vestibuloocular reflex during linear motion. *Journal of Neurophysiology*, 92, 20-35 (2004).
 - [30] Paige, G. D. & Tomko, D. L.: Eye movement responses to linear head motion in the squirrel monkey. II. Visual-vestibular interactions and kinematic considerations. *Journal of Neurophysiology*, 65, 1183-1196 (1991).
 - [31] Cohen, B., Matsuo, V., & Raphan, T.: Quantitative analysis of the velocity characteristic of optokinetic nystagmus and optokinetic after-nystagmus. *Journal of Physiology*, 270, 321-344 (1997).
 - [32] Miles, F. A.: The sensing of rotational and translational optic flow by the primate optokinetic system. In F. A. Miles & J. Wallam (Eds.), *Visual motion and its role in the stabilization of gaze* (pp.393-403). New York: Elsevier (1993).
 - [33] Kawano, K.: Ocular tracking: behavior and neurophysiology. *Current Opinion in Neurobiology*, 9, 467-473 (1999).
 - [34] Miles, F. A.: The neural processing of 3-D visual information: evidence from eye movements. *European Journal of Neuroscience*, 10, 811-822 (1998).
 - [35] Miles, F. A., Kawano, K., & Optican, L. M.: Short-latency ocular following responses of monkey. I. Dependence on temporo-spatial properties of the visual input. *Journal of Neurophysiology*, 56, 1321-1354 (1986).
 - [36] Krauzlis, R. J.: Recasting the smooth pursuit eye movement system. *Journal of Neurophysiology*, 91, 591-603 (2004).
 - [37] Morris, E. J. & Lisberger, S. G.: Different responses to small visual errors during initiation and maintenance of smooth-pursuit eye movements in monkeys. *Journal of Neurophysiology*, 58, 1351-1369 (1987).
 - [38] Tomlinson, R. D. & Robinson, D. A.: Is the vestibulo-ocular reflex cancelled by smooth pursuit? In A. F. Fuchs & W. Becker (Eds.), *Progress in oculomotor research* (pp.517-524). New York: Elsevier (1981).
 - [39] Crane, B. T., Virre, E. S., & Demer, J. L.: The human horizontal vestibulo-ocular reflex during combined linear and angular acceleration. *Experimental Brain Research*, 114, 304-320 (1997).
 - [40] Paige, G. D.: Vestibuloocular reflex and its interactions with visual following mechanisms in the squirrel monkey, I: Response characteristics in normal animals. *Journal of Neurophysiology*, 49, 134-151 (1983).
 - [41] Schweigart, G. & Mergner, T.: Combined action of optokinetic reflex (OKR) and vestibulo-ocular reflex (VOR) in macaque monkey during transient stimulation. *Neuroscience Letters*, 199, 123-126 (1995).
 - [42] Schweigart, G., Mergner, T., & Barnes, G.: Eye movements during combined pursuit, optokinetic and vestibular stimulation in macaque monkey. *Experimental Brain Research*,

- 127, 54-66 (1999).
- [43] Naji, J. J. & Freeman, T. C. A.: Perceiving depth order during pursuit eye movement. *Vision Research*, **44**, 3025-3034 (2004).
- [44] Wetherill, G. B. & Levitt, H.: Sequential estimation of points on a psychometric function. *The British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, **18**, 1-10 (1965).
- [45] Post, R. B. & Leibowitz, H. W.: A revised analysis of the role of efference in motion perception. *Perception*, **14**, 631-643 (1985).
- [46] Mestre, D. R. & Masson, G. S.: Ocular responses to motion parallax stimuli: the role of perceptual and attentional factors. *Vision Research*, **37**, 1627-1641 (1997).
- [47] Sakurai, K. & Ono, H.: Depth perception, motion perception, and their trade-off while viewing stimulus motion yoked to head movement, *Japanese Psychological Research*, **42**, 230-237 (2000).
- [48] Freeman, T. C., Naji, J. J., & Margrain, T. H.: Head-centred motion perception in the ageing visual system. *Spatial Vision*, **15**, 117-127 (2002).
- [49] Freeman, T. C. & Fowler, T. A.: Unequal retinal and extra-retinal motion signals produce different perceived slants of moving surface. *Vision Research*, **40**, 1857-1868 (2000).
- [50] Morvan, C. & Wexler, M.: Reference frames in early motion detection. *Journal of Vision*, **5**, 131-138 (2005).
- [51] 白岩史・林武文: 運動視差による奥行き知覚に関する研究. 関西大学総合情報学部紀要「情報研究」, **30**, 51-79 (2009).