

## 頭部ポインティングにおける両眼視差の影響

前川 亮・金子 寛彦

東京工業大学 大学院総合理工学研究科  
〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259-G2-3  
toru.maekawa@ip.titech.ac.jp

(受付：2013年12月5日；受理：2014年5月16日)

### Effect of Binocular Disparity on Head Pointing

Toru MAEKAWA and Hirohiko KANEKO

Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering,  
Tokyo Institute of Technology  
4259-G2-3 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa 226-8502, Japan

(Received 5 December 2013; Accepted 16 May 2014)

Theoretically, we can estimate the direction of an object from vertical disparity produced by the object, if the distance to the object is known. Several studies, however, suggested that vertical disparity had little or no effect on the perception of visual direction. Hence we examine whether vertical and horizontal disparity is used for head pointing, one of the body control or action tasks using the information of visual direction. Subject turned their head to a pointing target, and head movement was measured during the task. We manipulated vertical and horizontal disparity cue by using a stereo display with real time control. The results suggest that the vertical and horizontal disparity affected the goal of head pointing.

#### 1. はじめに

人は、通常、外界の空間構造を把握する際に眼から得られる情報に非常に強く依存している。例えば、歩行に際して視覚以外の感覚情報を遮断してもそれほど違和感なく実行できるが、視覚情報を遮断するととたんに強い恐怖感を覚えるとともに、実際の歩行精度も著しく低下する。視覚情報は人が運動する上で非常に重要な情報であると言える。

視覚情報に基づいて実空間内で身体運動を行うためには、視覚から得られる外界空間情報と自分自身の身体位置を正確に結びつける必要がある。網膜は眼球に固定されているが、眼球は頭部に対して運動可能であり頭部は胴体に対して運動可能である。そのため、網膜像から得ら

れる外界空間情報と頭部または身体位置との関連を正確に知るためには頭部に対する眼球方向、および身体に対する頭部方向を知らなければならない。

頭部に対する眼球方向推定のためのメカニズムを調べるための課題の一つとして、視覚ターゲットへの頭部ポインティングがある。頭部ポインティング課題では、被験者は呈示された視覚ターゲットの方向と頭部の向きとが一致するように回転頭部運動をおこなう。この課題を行うには、ターゲットを網膜にとらえた上で、頭部に対する網膜の方向、すなわち、頭部に対する眼球方向を知らなければならない。眼球は外眼筋によって頭部に連結されており、外眼筋の運動は動眼神経によって制御されている。そして、眼球運動時の眼球位置情報の取得には外眼

筋の固有受容感覚と運動指令の遠心性コピーがその情報の一つとなることが示されている<sup>1)</sup>。

しかし、外眼筋の固有受容感覚以外にも、頭部に対する眼球方向の情報と成る手がかりの存在も示唆されている。Beckerら<sup>2)</sup>は様々な条件下での頭部ポインティングの精度を評価した。その中で、暗所において明所よりも頭部ポインティングの精度が落ちることを示している。また、実験環境が異なるので単純比較はできないが、Lewaldら<sup>3)</sup>は暗所で頭部ポインティング実験を行ったところ、平均で2.6°のアンダーシュートがみられることを報告したのに対して、中溝ら<sup>4)</sup>は明所で行った実験では実際の位置に対するズレは平均で0.79°であるとしている。これらの結果はいずれも明所において頭部ポインティングの精度が向上することを示唆している。さらに、暗黒中で静止した光点を観察し続けるとその点が運動して見える自動運動現象という現象が報告されており<sup>5)</sup>、これも暗中には視対象の定位があいまいになることを示している。外眼筋の固有受容感覚と運動指令の遠心性コピーの与える眼球位置情報は周囲の明暗によって変化しないため、これらのみが頭部に対する眼球方向手がかりであると仮定すると、明所と暗所での頭部ポインティング精度の違いを説明できない。したがって、頭部に対する眼球方向の知覚には、明所のみで得られるターゲット周囲の視覚情報が影響を与えていると考えられる。

頭部に対する眼球位置情報の手がかりとして考えられる視覚情報には、視野内の参照物と両眼網膜像差が挙げられる。視野内の参照物とは鼻や脛など頭部に固定されていて視界内に含まれている部分のことをいう。眼鏡の着用者にとっては眼鏡のフレームなども参照物になりえる。これらは常に頭部に固定されているため、頭部に対する眼球方向の変化に伴ってその網膜座標が変化する。この変化を眼球方向の手がかりとすることが可能である。

両眼網膜像差とは人の眼が左右に離れているために生じる左右眼上の像の差のことである。

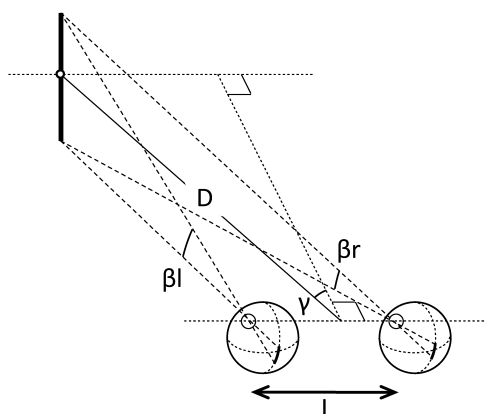


図1 両眼で垂直線分を観察する際の模式図。

網膜像差の大きさは対象と両眼の三次元的な位置関係に依存しており、特にその垂直成分である垂直網膜像差は、対象の距離と方向情報になることが理論的に示されている<sup>6-9)</sup>。以下にその詳細を説明する。図1に、ある1点(白丸)を注視した時の視距離と視方向に対する垂直網膜像差の関係を示す。視距離を $D$ 、頭部正面からの視方向の偏角を $\gamma$ 、両眼間距離を $I$ とし、右眼からの視距離を $D_r$ 、左眼からの視距離を $D_l$ とする。このとき、垂直網膜像差を左右の網膜像の垂直方向の大きさ比 (Vertical Size Ratio,  $VSR = \beta_r / \beta_l$ ) で表すと、網膜像の大きさは眼から対象までの距離に反比例することから $VSR$ は左右の眼からの視距離の逆比となり、以下の式(1)で表される。

$$VSR = \frac{\beta_l}{\beta_r} = \frac{D_r}{D_l} = \sqrt{\frac{D^2 + DI \sin \gamma + I^2 / 4}{D^2 - DI \sin \gamma + I^2 / 4}} \quad (1)$$

これを近似して変形すると以下の式(2)のように表せる<sup>9)</sup>。

$$VSR^2 \approx 1 + \frac{I}{D} \sin \gamma \quad (2)$$

したがって $VSR$ は距離と方位に関する情報を持っていることがわかる。

しかし、垂直網膜像差が方向知覚に与える影響が小さいことは、すでにいくつかの研究によって報告されている。Banksら<sup>10)</sup>はステレオ

スコープを用いて垂直網膜像差量を変数とした刺激を呈示し、被験者は手技操作によるポインタによってその知覚される方向を応答した。その結果、方向知覚において垂直網膜像差の影響は見られなかった。また、Berendsら<sup>11)</sup>は同様に垂直網膜像差を変数とした刺激を呈示して、強制二択応答を用いた頭部正面の方向判断を被験者に課し、方向知覚への垂直網膜像差の影響を調べた。その結果、長時間特殊な垂直網膜像差を見続けることで方向知覚に変化が起きるといふ順応の効果が若干見られたものの、方向知覚に垂直網膜像差による直接の影響はほぼないことが明らかになった。いずれの研究においても、垂直網膜像差は方向の判断にはほとんど利用されないと結論している。

上記のように、垂直網膜像差は方向の知覚にほとんど利用されていないことが示されている。しかし、眼球運動の制御においては、水平や垂直網膜像差が知覚を伴わずに輻輳眼球運動を生起することが報告されており<sup>12,13)</sup>、両眼網膜像差処理のメカニズムは眼球運動の制御と奥行き知覚で異なることが示唆されている。それをふまえて本研究では、垂直網膜像差による運動のコントロールへの影響に着目した。Gloverら<sup>14-17)</sup>は、行動をプランニングの段階とコントロールの段階にわけ、それぞれの段階で視覚刺激から得られる情報が異なっているということを示唆している。またその仮説を支持する実験例として、例えばGloverら<sup>14)</sup>はプラ

ンニング段階で生じる幾何学的錯視の影響がコントロール段階では減少するという実験結果を報告している。これは運動のコントロール段階においては、視覚的フィードバックを用いながら、より処理が単純で精度のよい情報のみをもちいるためだと考えることができる。前節で述べた、Berendsら<sup>11)</sup>およびBanksら<sup>10)</sup>の実験は、方向に関する知覚段階およびプランニング段階応答を調べたものと考えられるため、方向におけるコントロール段階の行動応答、特にその中での垂直網膜像差の働きについてはよく調べられていないといえる。

本研究では、行動を行う際に垂直網膜像差が方向を知る手がかりとして使われているかどうかを明らかにすることを目的とした。そのため、頭部ポインティング課題における、視覚ターゲットの位置とその周囲の両眼網膜像差情報による影響を調べた。実験1では、静止した垂直線分への頭部ポインティングにおける垂直網膜像差の影響を調べた。実験2では、ランダムドットステレオグラムを用いて両眼網膜像差を頭部運動に同期させて動的にシミュレートした際の頭部ポインティングへの影響を調べた。これらの結果から、頭部に対する眼球方向、あるいは頭部方向に基づいた行動において、眼筋の固有受容感覚と両眼網膜像差がどのように影響しているかを検討し明らかにする。

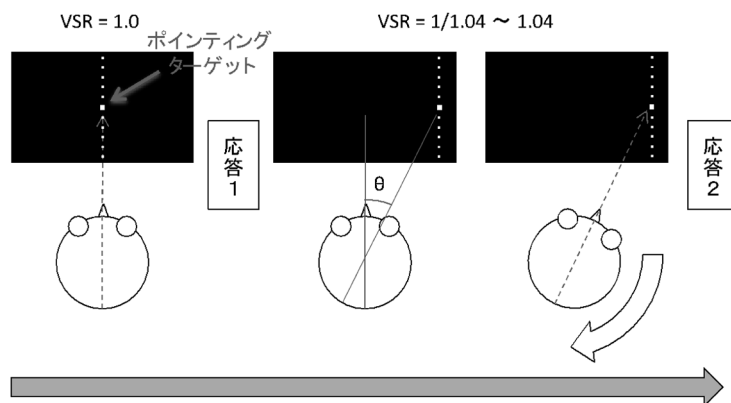


図2 実験1における1試行の流れ。

## 2. 実験1 静止刺激に対する頭部ポインティング

本実験では、図2に示すような単純な垂直線分上に並んだ静止刺激を用いて、垂直網膜像差が頭部ポインティングに与える影響を調べた。前述のように対象のVSR ( $=\beta r/\beta l$ , 垂直大きさ像差)は頭部正面を1として、対象が右にいくほど大きく、左にいくほど小さくなる。したがって、VSRを実際より大きくすれば、対象物が実際より右に存在する状態をシミュレートしたことになる。頭部ポインティングとはポインティングターゲットが頭部正面にくるように頭部を回転させることであるから、もし、頭部ポインティングを行う際の方向手がかりとしてVSRが利用されているならば、VSRを大きくしたときに頭部はより右方向に回転すると予想される。本実験では画面上で1/1.04から1.04の5種類のVSRを持ち、左へ約25°から右へ約25°の位置をシミュレートしたターゲットに頭部ポインティングを行い、VSRの違いによって頭部ポインティング方向に変化が生じるかどうかを調べた。

### 2.1 実験方法

#### 2.1.1 装置

左右眼用の刺激を大型スクリーン（刺激呈示可能範囲：160cm×120cm）に2台の偏光板付き液晶プロジェクタ(SANYO LP-W1000)によってそれぞれ背面投射により呈示し、各プロジェクタ画像に対応した偏光フィルター付眼鏡を被験者に装着させることで、両眼視差情報を呈示した。刺激の作成および呈示は、パーソナルコンピュータ(Apple Mac Pro)上でObjective-CのCocoaライブラリを用いて行われた。2台の液晶プロジェクタによって呈示される刺激の位置および形状は、意図したとおりの視差が再現できるように、あらかじめ十分に調節した。また、左右画像の刺激の輝度の線形性および同一性もプロジェクタの特性に応じてソフトウェア上で補正した。

被験者はプロジェクタと反対側のスクリーン

の前に座り、ヘルメットをかぶってスクリーン上に背面投射された刺激を観察した。そのヘルメットには、4つのLEDターゲットが上向きに取り付けてあった。このLEDターゲットは、頭部上方約40cmの距離に設置されたポジションセンサ(HAMAMATSU C5949)によって位置を計測するためのものであった。ポジションセンサはLEDターゲットのX軸方向の値(頭部上方からみて被験者身体の左右方向)とY軸方向(頭部上方からみて被験者身体の前後方向)の値をそれぞれ-5~+5Vの電圧値で出力した。その値をADコンバータ(CONTEC AIO-16082AY-USB)を用いてコンピュータに取り込み、ターゲット位置を100Hzで記録した。頭部運動の計算では、頭部の運動が水平面内の平行移動または回転移動のみと仮定して、初期位置から最終位置への移動を表現できる平行または回転移動を近似計算した。計算にはMatlabライブラリ(Statistical toolbox)を用いた。

被験者の胸部付近に木製の棒を水平に張り、被験者はそれに胸部を押し付けることによりその位置を一定に保った。頭部は固定せず自由に回転できる状態であった。被験者がスクリーンに対して垂直に向いたとき、両眼の中央からスクリーンまでの距離は約70cmであった。

#### 2.1.2 被験者

実験には男性7名の被験者が参加した。内1名は著者であった。全員視力または矯正視力正常であった。

#### 2.1.3 刺激

刺激は図2に示すように、長さ98cm(視角70deg)の垂直な線分(実際には見えない)上に21個のドットを等間隔に配置したものであった。線分は被験者の眼の高さを中心として、上下それぞれに10個ずつあり、視角35degの範囲に等間隔で配置されていた。各ドットは0.5deg×0.5degの正方形で、線分の中央にある1つだけが0.8deg×0.8degであった。

左右の眼に呈示するドットの間隔を変え、左右像の視角の比をVSRとした。VSRは、前述

同様に左眼像に対する右眼像の大きさの割合で定義し、1/1.04, 1/1.02, 1.0, 1.02, 1.04の5条件を用いた。例えば、VSR=1.04はターゲットが頭部正面から右に位置していることを示し、この条件下では頭部ポインティングが右にずれることが予想される。

#### 2.1.4. 手続き

図2に実験の流れを示す。被験者がテンキーを押すと試行が開始された。まず、被験者の正面にVSRが1.0のポインティングターゲットが呈示された(図2左図)。そして被験者は、ターゲットと頭部方向を一致させるよう、水平方向に頭部運動を行い、十分に一致したと感じたならばテンキーで頭部回転運動の終了を応答した(応答1)。これが、初期位置の調整である。このときに、ターゲットが呈示されてから被験者が応答するまでの時間制限は設けなかった。そしてその後、VSRが1/1.04~1.04のターゲットが水平方向に $\theta^\circ$ 移動した位置に呈示された(図2中図)。被験者は再度ターゲットと頭部方向を一致させ、十分に一致したと感じたならばテンキーで頭部回転運動の終了を応答した(図2右図, 応答2)。これを1試行とし、様々な $\theta$ の刺激に対して実験を行った。

ヘルメットに付属したLEDターゲットの位置の記録は被験者が最初にテンキーを押したときに開始され、1試行が終了するまで連続して記録された。初期位置の応答(応答1)、ターゲットの応答(応答2)における被験者の頭部方向の計算には、被験者がテンキーを押した直前の50ms(5データ点)の平均値を用いた。ターゲットの応答時の頭部方向から、初期位置の応答時の頭部方向を引いた値を、各試行の頭部回転角度として解析に用いた。被験者がポインティングする際には、「鼻から顔面に対して垂直に伸びた直線がターゲットの真下にくるように調整する」と教示した。ポインティングターゲットの位置(図2の $\theta$ )は、被験者の頭部の回転中心の周りに上から見て反時計回りを正として、 $\pm 10^\circ, \pm 20^\circ, \pm 30^\circ$ の6条件であった。それぞれの実験条件の組み合わせについて4試

行ずつを行った。合計で、各被験者において、6( $\theta$ 条件)  $\times$  5(VSR条件)  $\times$  4(繰り返し) = 120試行を行った。

#### 2.2 実験結果と考察

全被験者の平均の結果を図3に、被験者ごとの結果を図4に示す。横軸は刺激のVSRで、縦軸は被験者の応答時の頭部方向(正符号が上から見て反時計回り)である。6つのシンボルはそれぞれ、刺激の水平方向の呈示位置が $-30^\circ, -20^\circ, -10^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ のときの結果を表す。直線は呈示位置ごとにVSRについて直線フィッティングしたものである。エラーバーは標準誤差を示す。

この結果を見ると、半数以上のデータグループ(一つのフィッティング直線に対応するデータ)において、被験者の頭部方向はVSRについて右下がりであり、残りのほとんどはほぼ水平で、右上がりとなっているデータグループは数個である。右下がりということは、VSRが大きくなるほど頭部方向が右にずれる傾向があるということである。これは、VSRが示す方向情報を利用して頭部運動をすると考える予測

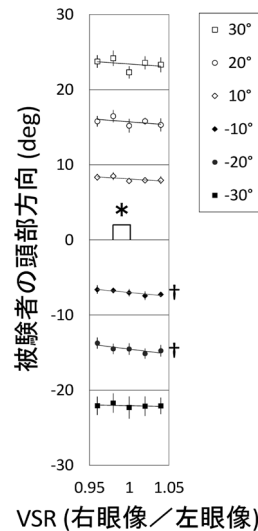


図3 実験1の全被験者の平均の結果。VSR(横軸)に対する頭部方向応答(縦軸)を示す。各シンボルは刺激の実際の呈示方向を示す。\*は分散分析において有意、†は回帰分析において有意だった部分を示す。



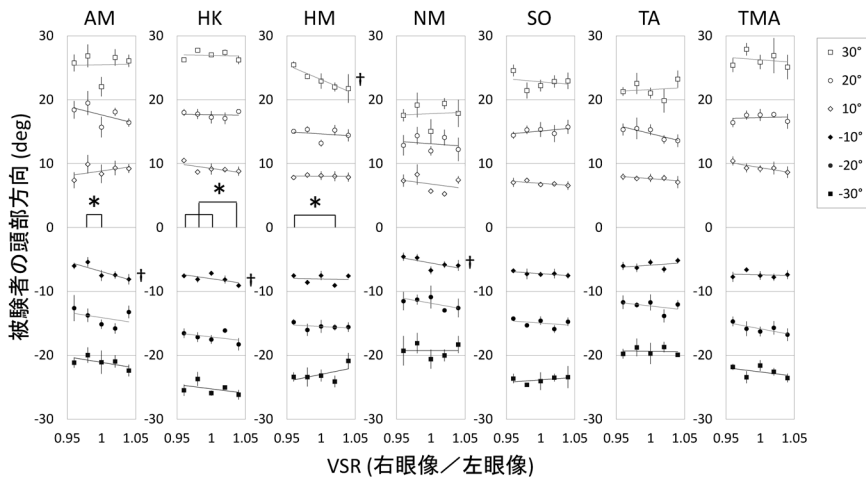


図4 実験1の被験者ごとのVSRに対する頭部方向応答。各グラフが各被験者の結果を示す。グラフの書式は図3と同様。\*は分散分析，†は回帰分析において有意だった部分を示す。

と矛盾がない。また、すべての条件において頭部方向は実際の呈示位置よりも0に近い値を示しており、被験者が十分に頭部を回転させていない、アンダーシュートの傾向があることがわかる。

上記の結果を、刺激呈示位置とVSRの2要因の分散分析によって統計的に検討した。まず、被験者ごとの分散分析を行った。その結果、VSRの主効果が有意であり下位検定で有意な差があった組み合わせについて、図中にマーク(\*)で示してある。すべての被験者において、刺激呈示位置の主効果が有意であり、被験者AM, HK, HMにおいては、VSRの主効果が有意であった( $F(4, 12)=5.60, 6.87, 3.91; p=0.009, 0.004, 0.03$ )が、他の被験者では有意ではなかった( $F(4, 12)=2.47, 2.79, 0.81, 1.23; p>0.05$ )。また、すべての被験者において、刺激呈示位置とVSRの交互作用は有意ではなかった( $F(20, 60)=1.10, 1.40, 1.34, 0.88, 0.72, 0.75, 0.66; p>0.1$ )。次に、被験者間の平均データについて、VSR、呈示位置について2要因の分散分析を行った結果、VSR ( $F(4, 24)=4.95, p=0.02$ )、呈示位置について主効果があった。さらに、VSRについて下位検定を行った結果、VSRが1/1.02条件と1.0条件の間に有意差が見られた。このとき、1/1.02条件の方が1.0条件より左向

きだったことから、予測と一致する方向に変化していたことがわかる。

さらに、VSRによる頭部ポインティングの影響の方向を知るために、呈示位置ごとに回帰分析を行った。図3, 4に、回帰直線と、回帰直線の傾きが5%水準で有意であったデータグループにマーク(†)を記してある。図から回帰直線の傾きが負、つまりVSRが大きくなると頭部が右にずれる傾向のある被験者が4名いたことがわかる(AM  $-10^\circ$ 条件: 傾き $=-31.0, R^2=0.31, t(18)=2.82, p=0.01$ ; HK  $-10^\circ$ 条件: 傾き $=-15.4, R^2=0.21, t(18)=2.21, p=0.04$ ; HM  $30^\circ$ 条件: 傾き $=-45.6, R^2=0.27, t(18)=2.58, p=0.02$ ; NM  $-10^\circ$ 条件: 傾き $=-20.4, R^2=0.20, t(18)=2.12, p=0.05$ )。また、統計的に有意ではないが回帰直線の傾きが負であるデータの方が正であるデータよりも多くみられることがわかる。また、全被験者について呈示位置ごとに回帰分析を行った結果、 $-10^\circ, -20^\circ$ 条件において、回帰直線が有意に負の傾きを示した( $-10^\circ$ 条件: 傾き $=-10.1, R^2=0.19, t(33)=2.77, p=0.009$ ;  $-20^\circ$ 条件: 傾き $=-13.3, R^2=0.24, t(33)=3.20, p=0.003$ )。

結果から、数名の被験者でVSRが大きくなると頭部方向が右にずれる傾向がみられた。これは予測された方向と一致しており、頭部ポイ

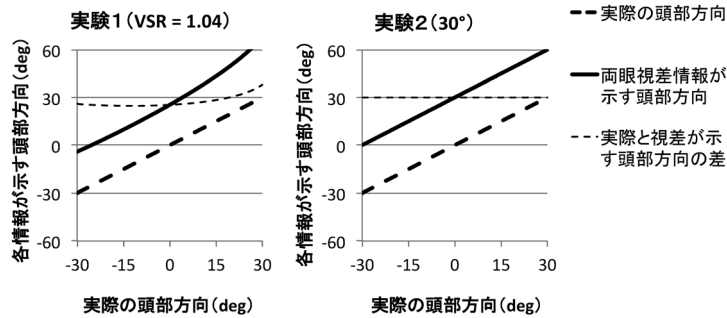


図5 実験1・2における視差情報が示す頭部方向。

ンティングにおいてVSR（垂直視差）が方向手がかりとして利用されていることを示唆する。しかし、その傾向は数名の被験者のいくつかの条件に限られたものであり、VSRの変化による頭部ポインティング角度の変化は最大で2°程度と、非常に小さい値だった。視距離70cmにおける1.04のVSRは、幾何学的には頭部が約25°左の方向に回転したことを意味する。このときに、頭部はわずかに右に回転している（図3）。VSRがシミュレートする角度を基に回帰分析の傾きを計算すると、平均で-0.0128となり、これはVSRが与える影響が理論予測に対して1.28%ほどであることを示している。したがって、VSRの方向手がかりとしての影響の大きさは、あったとしても眼筋固有受容感覚の方向手がかりとしての影響に比べて非常に小さいと言えるだろう。ただし、本実験においてドットの垂直方向の大きさは変えていないため、それが呈示した垂直視差の影響を弱めた可能性がある。例えば、VSR=1.04の条件においてターゲットに付加すべき垂直網膜像差の量は1.92arcminとなり、これは水平視差の検出閾値である0.1~1arcmin<sup>18-21)</sup>を大きく上回っている。そのため、この影響については現時点では否定できない。したがって、今後より詳細な実験を行う必要がある。

すべてのVSR、刺激呈示位置において、応答された頭部方向は実際の呈示位置よりも小さい角度になる傾向がみられた。これは多くの研究で報告されている傾向<sup>2, 3, 22, 23)</sup>と一致している。また、本実験におけるアンダーシュートは

平均で24.5%±0.5%だった。Maurerら<sup>22)</sup>ではアンダーシュートは25%程度、Beckerら<sup>2)</sup>では18%程度となっており、定量的にも本実験の結果は過去の研究の結果と一致している。この頭部運動のアンダーシュートの傾向は、眼球運動制御の信号と頭部運動制御の信号が明確に区別されていないために起きていると考えられている<sup>2, 3, 24)</sup>。

### 3. 実験2 頭部運動に対応して変化する周辺刺激を持つターゲットへの頭部ポインティング

実験1ではポインティングする間、画面上で同じ刺激を呈示していたのに対し、実験2では頭部運動に対応して変化する刺激を呈示した。図5に、実験1と実験2において刺激がシミュレーションしている頭部方向を示す。横軸は実際の頭部の方向であり、縦軸は、その時々呈示される周辺刺激がシミュレートする頭部方向である。実験1では、ポインティング中にディスプレイ上の左右眼像の垂直大きさ比は一定であったため、実際の各頭部方向において、シミュレートした頭部方向が変化してしまっている。それに対して、実験2では実際の頭部方向を基に、実際の頭部方向とシミュレートした頭部方向の差が一定になるように逐次計算して刺激を作成した。これにより、静止対象によって生み出される視差変化をより実際に即して呈示することができ、頭部ポインティングへの周辺視差の影響が強まることが予想される。さらに、実験2では画面全体にランダムドットを配

することで、両眼視差手がかりを強めるように配慮した。

### 3.1 実験方法

#### 3.1.1 装置

実験装置は基本的に実験1と同様であった。視距離のみが異なっており、実験2では50cmであった。

#### 3.1.2 被験者

実験には男性8名の被験者が参加した。全員視力または矯正視力正常であった。

#### 3.1.3 刺激

刺激は、 $116\text{deg}\times 100\text{deg}$  ( $1.54\text{m}\times 1.16\text{m}$ )の視野範囲に分布するランダムドットからなっていた。その一例を図6に示す。ドット密度は、 $432\text{個}/\text{m}^2$ であり、各ドットは標準偏差 $\sigma$ が $0.5\text{deg}$ のガウシアン状の輝度分布を持っていた。このような刺激を用いることによりアンチエアラスの効果で、ドットの滑らかな動きを実現することができた。ポインティングターゲットは $1.1\text{deg}\times 1.1\text{deg}$ の十字だった。各ドットに付与する両眼視差は、被験者の実際頭部方向に対して一定角度( $\phi$ )追加した角度を向いているときの網膜像と同じ網膜像になるようにリアルタイムで計算し、表示した。頭部方向の取得と刺激の計算は60Hzごとに行われた。

ここで、実験2において左回転の角度を追加すること( $\phi$ が正)は、実験1においてVSRを大きくすること(右眼像を拡大呈示)と同じ方向の変化であることに注意する必要がある。例



図6 実験2の刺激例。

えば、 $\phi=30^\circ$ のときには頭部が実際よりも $30^\circ$ 左に向いていることをシミュレートするため、刺激平面が右に $30^\circ$ 移動したと等価である。したがって呈示されるVSRは実際よりも大きな値(右眼像が拡大)となる。

実験1と実験2では近似的には刺激の性質が等しいと考えられる。しかし、実験1では、ディスプレイ上で静止した対象によりVSRをシミュレートした、線分状の狭い範囲の刺激呈示であった。それに対して実験2では、頭部方向に対して動的に変化する刺激を用いて常に意図した角度のVSRを呈示し、視角 $100^\circ$ 以上の広い範囲に刺激を呈示した。いわばより精密なシミュレーションということになり、それをキャンセルするための頭部方向の変化はより大きくなると予想される。

#### 3.1.4 手続き

手続きは実験1と同様だった。まず、被験者正面にポインティングターゲットが呈示され、被験者はそこに頭部を向けた。次に、ターゲットが水平方向にある角度( $\theta$ )移動し、そこへ頭部を向けるタスクを行った。ターゲットの位置( $\theta$ )は、被験者の頭部の回転中心の周りに上からみて反時計回りを正として、 $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ の4条件であった。前述の通り、背景のランダムドットには頭部方向に対して一定角度( $\phi$ )追加した角度を向いているときの網膜像を呈示した。 $\phi$ は $\pm 30^\circ$ 、 $0^\circ$ の3条件だった。各被験者において、4( $\theta$ 条件) $\times$ 3( $\phi$ 条件) $\times$ 10(繰り返し)=120試行を行った。

### 3.2 実験結果と考察

全被験者の平均の結果を図7に、被験者ごとの結果を図8に示す。横軸は両眼視差によってシミュレートした実際の頭部方向からの変位角度( $\phi$ )で、縦軸は被験者の応答時の頭部方向である。4つのシンボルはそれぞれ、刺激の水平方向の呈示位置が $-30^\circ$ 、 $-15^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ のときの結果を表す。直線は呈示位置ごとに両眼視差について直線フィッティングしたものである。エラーバーは標準誤差を示す。

これらの図より、実験1と同様に、被験者の



頭部方向は両眼視差によるシミュレート角度について右下がりとなっていることがわかる。これは、シミュレート角度が左になるほど頭部方向が右にずれる傾向を示しており予測方向と矛盾がない。また、アンダーシュートの傾向も、実験1と同様にすべての条件において確認された。

上記の結果を、刺激呈示位置と両眼視差の2要因の分散分析によって統計的に検討した。分散分析の結果、両眼視差の主効果が有意であり

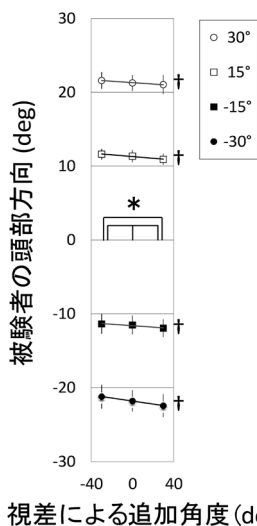


図7 実験2の全被験者の平均の結果。グラフの書式は図3と同様。

下位検定で有意な差があった組み合わせについて、図中にマーク(\*)で示してある。すべての被験者において、刺激呈示位置の主効果が有意であり、被験者8名中6名(KK, LG, RI, RY, YF, YMO)においては、両眼視差の主効果が有意であった( $F(2, 18)=8.18, 6.07, 4.12, 3.71, 6.74, 4.83; p<0.003, 0.01, 0.03, 0.04, 0.006, 0.02$ )が、他の2名の被験者では有意ではなかった( $F(2, 18)=1.86, 2.16; p>0.1$ )。また、被験者YFのみ、刺激呈示位置と両眼視差の交互作用が有意であった( $F(6, 54)=2.43; p<0.04$ )。次に、被験者間の平均データについて、両眼視差、呈示位置について2要因の分散分析を行った結果、両眼視差( $F(2, 14)=34.498, p<0.0001$ )、呈示位置について主効果があった。さらに、両眼視差について下位検定を行った結果、すべての条件間に有意差が見られた。

さらに、実験1と同様に呈示位置ごとに回帰分析を行った。図7, 8に、回帰直線と、回帰直線の傾きが有意なデータグループにマーク(†: 5%水準, ‡: 10%水準)を記してある。統計的に有意または有意傾向の直線は6本であったが(KK -30°条件: 傾き=-0.022,  $R^2=0.10, t(28)=1.75, p=0.10$ ; LG 15°条件: 傾き=-0.023,  $R^2=0.15, t(28)=2.19, p=0.04$ ; RI -15°条件: 傾き=-0.020,  $R^2=0.094, t(28)=1.70, p=$

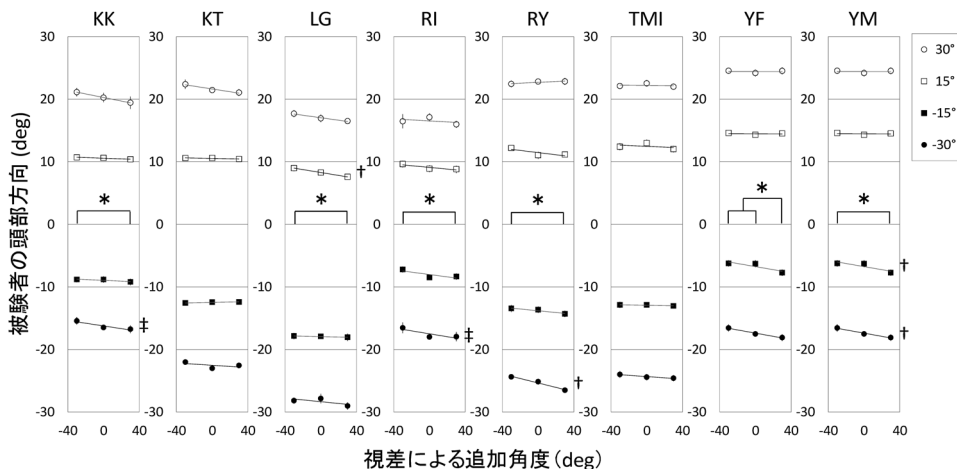


図8 実験2の被験者ごとの両眼視差条件に対する頭部方向応答。各グラフが各被験者の結果を示す。グラフの書式は図4と同様。

0.10; RY  $-30^\circ$ 条件: 傾き $=-0.036$ ,  $R^2=0.30$ ,  $t(28)=3.44$ ,  $p=0.002$ ; YM  $-10^\circ$ 条件: 傾き $=-0.025$ ,  $R^2=0.13$ ,  $t(28)=2.04$ ,  $p=0.05$ ; YM  $-30^\circ$ 条件: 傾き $=-0.026$ ,  $R^2=0.14$ ,  $t(28)=2.16$ ,  $p=0.04$ ), 有意でない条件においても回帰直線の傾きはすべて負, つまり両眼視差によるシミュレートが左に行くほど頭部が右にずれる傾向であった。最後に, 全被験者について呈示位置ごとに回帰分析を行った結果, すべての条件( $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$ )において, 回帰直線が有意に負の傾きを示した。

実験2では, 実験1に比べて広い範囲に刺激を呈示し, さらに視差のシミュレートを動的に行うことでより現実に近い刺激を呈示した。その結果, 実験1と同じ傾向であるが, より安定した傾向が得られ, 統計的にもより強い傾向がみられた。刺激呈示範囲について, 垂直視差は視角 $30^\circ$ 程度の範囲に呈示された値が平均化されて面の傾きの知覚に影響を与えることが知られており<sup>25,26)</sup>, 実験1では刺激呈示範囲が狭かったことが影響の不安定さの要因であった可能性がある。また, 視差のシミュレートを動的にしたことについて, 現実に観察する可能性の高い視差分布を呈示したことで, 垂直視差の方向手がかりとしての信頼性が向上し, 頭部方向への影響を安定させたと考えられる。ただし, 今回の実験ではこれら2つの要因のどちらが有益であったかを確認することはできない。

一方で影響の大きさは, 実験1において理論的なシミュレート角度に対する頭部方向変化量が1.28%であったのに対して, 実験2では平均で1.24%であり, 大きな変化はなかった。回帰直線の傾きに対する $t$ 検定の結果においても有意な差はなかった。また, 呈示位置に対する頭部位置のアンダーシュートは $26.1 \pm 1.5\%$ で, 実験1 ( $24.5 \pm 0.5\%$ )と同じ程度の大きさだった。

#### 4. 総合考察

本研究では, ターゲットの周囲の両眼網膜像差が頭部ポインティングに与える影響を調べた。実験1では背景にディスプレイ上で一定の

垂直網膜像差を呈示したときの頭部ポインティング角度を計測した。その結果, 垂直視差を小さくする方向へ頭部ポインティングがずれる傾向がみられた。次に実験2では, 広範囲の背景領域に頭部運動と同期する両眼視差を呈示したときのポインティング角度を調べた。実験2でも同様に両眼視差から得られる頭部方向と逆方向の頭部ポインティング角度のズレがみられた。以下に, 今回の結果をいくつかの観点から考察する。

##### 4.1 方向情報としての両眼視差の働き

実験1, 2の結果から, 対象の周囲の垂直, 水平両眼視差が頭部ポインティングの方向に影響を与えることがわかった。両眼視差が方向手がかりとして利用できることは幾何学的に予測されており, 今回の影響の方向は予測と一致していた。したがって, 両眼視差は方向手がかりとして利用されていることが示唆された。

しかし, 影響の大きさは理論予測の1.2%程度と小さかった。実験2において実験1よりも影響が強く確認できたにもかかわらず, 大きさが変わらなかったことから, 視差が頭部方向を変える量自体は小さいということがわかる。この両眼視差の小さな影響の意味を理解するために, 同じように行動応答に影響を与える視覚刺激であるオプティカルフローについて考えてみる。視野の広範囲に呈示されたオプティカルフローは同方向の頭部運動や身体動揺を誘発することがよく知られているが, その運動の絶対量は両眼視差と同様に小さい<sup>27-29)</sup>。例えば, 視覚刺激を25mmの振幅で周期運動させたときに生じる頭部運動は約1mmであることが報告されている<sup>29)</sup>。オプティカルフローによる身体への小さな影響の役割は, 身体の安定性を保つことであると考えられている<sup>30,31)</sup>。身体の筋系が与える身体の位置に関する情報はもともとそれほど精度が高くないため, 人の身体制御系は視覚情報など他の情報を用いてそれを補佐している<sup>32,33)</sup>。両眼視差においても同様に考えることができ, 検出精度の高い視差の微妙な変化を利用して頭部-眼球方向の変化を検出

することで、頭部方向や眼球方向の安定性を保っていると考えられる。

#### 4.2 応答方法による視差の影響の違い

本研究では、周囲の垂直、水平視差が頭部ポインティング時の方向手がかりと成りうることを示したが、これは垂直視差が方向知覚に影響をほぼ与えないとしたこれまでの研究と一見矛盾する。しかしこれは「はじめに」で述べたように、知覚やプランニングのための視覚情報処理と行動のコントロールのための視覚情報処理が異なっているためであると考えることができ、両眼視差を呈示することで知覚を伴わずに眼球運動が生起するとした先行研究とも一貫している。

ただし、本研究とこれまでの研究の条件による違いによる可能性も消し去ることはできない。例えば、本研究では頭部運動によって両眼視差が時間的に連続的な変化をしたが、先行研究ではその視差の時間変化情報を利用することができなかった。また、本研究では頭部運動に伴う刺激変化のフィードバックを得ることができたが、先行研究ではすぐに消える対象に対する応答や、見えない棒を使ってのポインティング応答を用いていたため、基本的にフィードバック情報は得られない。今回の実験においてのみ得られたそれらの情報が、本研究で見られた視差の影響につながった可能性もある。したがって、本研究の結果は、2種類の視差処理経路の仮説に矛盾はしていないが、それを強く証明するためには、条件統制をした更なる実験が必要である。

#### 5. むすび

本研究では、実験1で垂直視差が頭部ポインティングに影響を与えることを示し、実験2で広範囲の視野範囲に、刺激の視差を頭部方向に同期させて変化させることでより強い影響が見えることを示した。これらの結果はいずれも対象周囲の両眼視差が方向手がかりとして利用されていることを示す。また、今回の結果と過去の研究の結果の違いは両眼視差が行動コント

ロール応答と知覚またはプランニング応答で異なる影響を与えている可能性を示唆しているが、現時点では得られる情報の違いによる可能性もあり、より詳細な調査が必要であると思われる。

謝辞 本研究は科学研究費補助金（基盤研究（C）24500236）の助成を受けたものである。

#### 文 献

- 1) R. J. Krauzlis and S. G. Lisberger: A model of visually-guided smooth pursuit eye movements based on behavioral observations. *Journal of Computational Neuroscience*, **1**, 265–283, 1994.
- 2) W. Becker and H. Saglam: Perception of angular head position during attempted alignment with eccentric visual objects. *Experimental Brain Research*, **138**, 185–192, 2001.
- 3) J. Lewald and W. Ehrenstein: Visual and proprioceptive shifts in perceived egocentric direction induced by eye-position. *Vision Research*, **40**, 539–547, 2000.
- 4) 中溝幸夫：視方向。日本視覚学会（編）：視覚情報処理ハンドブック，朝倉書店，pp. 441–449, 2000.
- 5) R. L. Gregory and O. L. Zangwill: The origin of the autokinetic effect. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **15**, 252–261, 1963.
- 6) J. E. W. Mayhew and H. C. Longuet-Higgins: A computational model of binocular depth perception. *Nature*, **297**, 376–378, 1982.
- 7) B. Gillam and B. Lawergren: The induced effect, vertical disparity, and stereoscopic theory. *Perception & Psychophysics*, **34**, 121–130, 1983.
- 8) B. J. Rogers and M. F. Bradshaw: Disparity scaling and the perception of frontoparallel surfaces. *Perception*, **24**, 155–179, 1995.
- 9) B. T. Backus, M. S. Banks, R. van Ee and J. A. Crowell: Horizontal and vertical disparity, eye position, and stereoscopic slant

- perception. *Vision Research*, **39**, 1143–1170, 1999.
- 10) M. S. Banks, B. T. Backus and R. S. Banks: Is vertical disparity used to determine azimuth? *Vision Research*, **42**, 801–807, 2002.
  - 11) E. M. Berends, R. van Ee and C. J. Erkelens: Vertical disparity can alter perceived direction. *Perception*, **31**, 1323–1333, 2002.
  - 12) G. S. Masson, C. Busetini and F. A. Miles: Vergence eye movements in response to binocular disparity without depth perception. *Nature*, **389**, 283–286, 1997.
  - 13) D. A. Wismeijer, R. van Ee and C. J. Erkelens: Depth cues, rather than perceived depth, govern vergence. *Experimental Brain Research*, **184**, 61–70, 2008.
  - 14) S. R. Glover and P. Dixon: Dynamic illusion effects in a reaching task: Evidence for separate visual representations in the planning and control of reaching. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, **27**, 560–572, 2001.
  - 15) S. Glover and P. Dixon: Motor adaptation to an optical illusion. *Experimental Brain Research*, **137**, 254–258, 2001.
  - 16) S. Glover and P. Dixon: Dynamic effects of the Ebbinghaus illusion in grasping: Support for a planning/control model of action. *Perception & Psychophysics*, **64**, 266–278, 2002.
  - 17) S. Glover: Separate visual representations in the planning and control of action. *Behavioral and Brain Sciences*, **27**, 3–78, 2004.
  - 18) C. Schor and T. Heckmann: Interocular differences in contrast and spatial frequency: Effects on stereopsis and fusion. *Vision Research*, **29**, 837–847, 1989.
  - 19) L. Cormack, S. Stevenson and C. Schor: Interocular correlation, luminance contrast and cyclopean processing. *Vision Research*, **31**, 2195–2207, 1991.
  - 20) M. S. Livingstone and D. H. Hubel: Stereopsis and positional acuity under dark adaptation. *Vision Research*, **34**, 799–802, 1994.
  - 21) W. J. Tam and L. B. Stelmach: Display duration and stereoscopic depth discrimination. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, **52**, 56–61, 1998.
  - 22) C. Maurer, T. Mergner, W. Becker and R. Jurgens: Eye-head coordination in labyrinthine-defective humans. *Experimental Brain Research*, **122**, 260–274, 1998.
  - 23) 山口大志, 金子寛彦: ヘッドポインティング課題における頭部・眼球的物理的位置の影響. *光学*, **36**, 280–288, 2007.
  - 24) B. D. Corneil and J. K. Elsley: Countermanding eye-head gaze shifts in humans: marching orders are delivered to the head first. *Journal of Neurophysiology*, **94**, 883–895, 2005.
  - 25) S. P. Stenton, J. P. Frisby and J. E. Mayhew: Vertical disparity pooling and the induced effect. *Nature*, **309**, 622–623, 1984.
  - 26) H. Kaneko and I. Howard: Spatial limitation of vertical-size disparity processing. *Vision Research*, **37**, 2871–2878, 1997.
  - 27) F. Lestienne, J. Soechting and A. Berthoz: Postural readjustments induced by linear motion of visual scenes. *Experimental Brain Research*, **384**, 363–384, 1977.
  - 28) 竹田 仰, 金子照之: 広視野映像が重心動揺に及ぼす影響. *テレビジョン学会誌*, **50**, 1935–1940, 1996.
  - 29) A. M. Bronstein and D. Buckwell: Automatic control of postural sway by visual motion parallax. *Experimental Brain Research*, **113**, 243–248, 1997.
  - 30) J. Dichgans and T. Brandt: Visual-vestibular interactions: Effects of self-motion perception and postural control. *R. Held, H. W. Leibowitz and H. L. Teuber (eds): Perception*. Springer, Berlin Heidelberg, 1978.
  - 31) W. H. Warren, B. A. Kay and E. H. Yilmaz: Visual control of posture during walking: Functional specificity. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and*

*Performance*, **22**, 818–838, 1996.

- 32) M. Desmurget and D. Pélisson: From eye to hand: Planning goal-directed movements. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, **22**, 761–788, 1998.
- 33) L. Pisella, H. Grea, C. Tilikete, A. Vighetto,

M. Desmurget, G. Rode, D. Boisson and Y. Rossetti: An “automatic pilot” for the hand in human posterior parietal cortex: Toward reinterpreting optic ataxia. *Nature Neuroscience*, **3**, 729–736, 2000.