

ヘッドポインティング課題における頭部・眼球の物理的位置の影響

山口 大志・金子 寛彦

東京工業大学大学院理工学研究科附属像情報工学研究施設 〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259-R2-60

Effect of the Actual Head and Eye Positions on the Head Pointing to the Visual Target

Masashi YAMAGUCHI and Hirohiko KANEKO

Imaging Science and Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology, 4259-R2-60 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8503

This study investigated the contribution of actual eye positions on the head pointing. Subjects moved their head to the visual targets in various conditions. In Experiment 1, the targets were presented for 8 ms and a fixation point was kept presented at 25 degree left, straight-ahead or 25 degree right in the head centric coordinate. In Experiment 2, the fixation point was presented on the median plane of the subject's trunk. The results showed that when the subject's eyes were kept at the point fixed to the head (Experiment 1), the head pointing systematically shifted to the opposite direction of the eye position. However, when the subject's eye position changed slowly (Experiment 2), the effect of eye position on the head pointing was smaller. From the results, we suggest that the static eye position affects the perceptual head position and the quasi-static change of eye position decreases misperception of the head position.

Key words: head movement, head position signal, space perception, psychophysics

1. はじめに

人間の眼によって、一度に視野に収められる範囲は、顔面の前方に限られている。そのうえ、明晰な視覚像を得ることができる視野の範囲は、網膜の中心窩部分に対応する狭い領域に限られる。したがって、周辺の広い範囲の状況を認識するため、人間は頻繁に眼球や頭部を運動させる。こうして、視線を迅速かつ円滑に移動させることで、視対象を中心視で観察することができる。さらに、視線を目標へ正確に向けることは、手による把握など、その後のさまざまな運動をおこなう際にも、重要な役割を果たす。

視線移動を正確に遂行するためには、頭部および眼球の位置（方向）をできるだけ正しく知覚することが必要である。これらのうち、頭部位置の知覚には、前庭感覚と頸部深部感覚からの入力情報が大きく寄与していることが明らかにされている¹⁾。こうした感覚入力情報に基づく頭部位

置の知覚特性を調べるため、呈示された視覚刺激や音源をターゲットとして、回転頭部運動をおこなわせる実験が過去にいくつかおこなわれている。被験者の課題は、呈示された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とである。このような実験課題はヘッドポインティングとよばれる。

ヘッドポインティング課題を用いた実験により、頭部の知覚的位置は過大評価されること、つまり、ヘッドポインティング時の頭部運動はターゲットに対してアンダーシュートすることが示されている。Hill は、被験者に頭部と眼球を身体の正面に向けさせたまま、身体正面に対して左あるいは右 30° の位置にターゲットとなる視覚刺激（視覚標的）を呈示し、それを 5 秒間観察させた。そして、その視覚標的へ向けてヘッドポインティングさせるという実験をおこなった。その結果、頭部は視覚標的の手前（身体正

中面寄り)で停止することが報告されている²⁾。視覚標的の呈示位置は、被験者の頭部の知覚的位置に等しいとすると、頭部の知覚的位置と物理的位置との間には、ずれが存在することになる。その後、LewaldらとBeckerらは、頭部の知覚的位置と物理的位置との定量的な関係を調べるため、視覚標的を被験者の左右のさまざまな位置に呈示し、ヘッドポインティング実験をおこなった。それによると、呈示された視覚標的の呈示位置が身体正中面から離れるのに従い、アンダーシュートの量は増加した。こうした結果から、頭部の知覚的位置と物理的位置との間に、線形的関係がみられること、そして横軸を知覚的位置、縦軸を物理的位置としてこれらを線形フィッティングしたときの傾きは1以下になることが明らかになった^{3,4)}。

視覚標的へ向けたヘッドポインティング時のアンダーシュートの原因を説明するため、Beckerらは、眼球の偏位を示す感覚入力情報が、頭部位置を示す感覚入力情報へと混入された結果、眼球の物理的位置が頭部の知覚的位置をシフトさせ、ヘッドポインティングのアンダーシュートをひきおこすという、眼球位置情報の頭部位置情報へのクロストーク仮説を提唱している⁴⁾。この仮説を導いた実験においては、被験者らは視覚標的を観察しながらヘッドポインティングをおこなっていたので、少なくともヘッドポインティングの終了時には、視覚標的を固視していたことを前提とした。しかし、視覚標的の位置と実際の頭部位置との間には、ずれ、すなわち頭部のアンダーシュートが存在していたので、視覚標的を固視するために眼球は偏位していたと考えられる。実際に、ヘッドポインティング中の眼球位置を計測することにより、ヘッドポインティングの際に眼球が視覚標的の方向へ偏位していることが報告されている³⁾。しかし、この眼球の偏位は被験者には知覚されず、頭部が正しく視覚標的へ向いていると知覚されていた。このことから、眼球位置の感覚入力情報は、頭部位置の感覚入力情報へと混入され、頭部位置の知覚形成に用いられているという仮説がたてられた⁴⁾。

この仮説を支持する研究も報告されている。Lewaldらは、被験者の頭部を身体の正面に固定した状態で、眼球位置のみをさまざまに変え、そのときの頭部の知覚的位置をポインターで応答させた。その結果、頭部は身体の正面に固定されていたのにもかかわらず、眼球の偏位に伴い、頭部の知覚的位置は眼球の偏位方向と同方向へシフトした⁵⁾。

ヘッドポインティングがアンダーシュートすることを示した上記の先行研究に対して、やや矛盾する報告もある。Blouinらは、被験者の右21°に視覚標的を呈示し、ヘッ

ドポインティングをさせた。しかし、このときには、アンダーシュートはみられなかった⁶⁾。Blouinらの実験は、他の実験と違い、被験者に視覚標的とは別に固視点が与えられていて、眼球位置が頭部の正面に維持されていた。ただし、Blouinらの実験では、視覚標的の位置条件は1つだけであり、眼球の位置条件も頭部に対して正面のみであった。

以上をまとめると、Hill, LewaldらおよびBeckerらの実験では、眼球位置についての明確なコントロールや指示はなく、その結果アンダーシュートが発生した。それに対して、Blouinらの実験では、眼球位置を頭部の正面に固定した結果、アンダーシュートがみられなかった。

これらの先行研究から、ヘッドポインティング時のアンダーシュートの発生には、眼球位置が影響していることが示唆される。しかし、ヘッドポインティングに対する、眼球位置の定量的な影響は、これまでの研究からは示されていない。

また、Beckerらは、ヘッドポインティングの戦略として、頭部運動の前にまず眼球運動(サッカード)で視覚標的を凝視して、その後、眼球の偏位がゼロになるまで眼球と頭部を徐々に動かしてゆく、という仮説を提唱している。この仮説では、眼球の運動速度は考慮されておらず、眼球位置の連続的な微小変化が積分され、頭部運動を終了するための基準として用いられているとしている。すなわち、眼球位置の変化をモニタリングし、眼球位置の偏位がゼロになった(と知覚した)時点で、頭部運動を終了する、ということである⁴⁾。もし、この仮説が正しければ、眼球位置の変化が、ヘッドポインティングに影響を与える可能性が考えられる。

そこで本研究では、視覚標的および眼球(固視点)の位置をさまざまに変えて、ヘッドポインティング実験をおこなうことにより、静的な眼球位置および眼球位置の変化が、頭部の知覚的位置に与える影響を定量的に明らかにすることを目的とした。

2. 実 験 1

実験1では、頭部運動に追従する固視点を設け、眼球位置をコントロールした状態で、視覚標的へ向けてヘッドポインティングをおこなった。その結果から、静的な物理的 eyeball position が、知覚的頭部位置に与える影響を明らかにすることを目的とした。

2.1 実験方法

2.1.1 装 置

被験者は、半径50 cmの半円筒型のスクリーンの前に座り、ヘルメットを装着した。このヘルメットは、そのほぼ

中央にある鉛直軸を中心に被験者の頭部運動に伴って回転した。ヘルメットの回転軸は、円筒スクリーンの曲率中心と一致していた。この軸にはポテンシオメーターがとりつけられており、被験者の頭部の回転角度（頭部位置）の測定に用いられた。被験者の手もとのには、試行の準備の完了と頭部運動の終了を合図するためのボタンが置かれていた。

スクリーンの内側には、被験者の眼とおおよそ同じ高さに7つの緑色 LED（直径 4 mm, 64.4 cd/m²）が、水平軸上にとりつけられていた。このうち1つは、被験者の身体正中面上に位置し（中央 LED）、残りは被験者の頭部回転中心（円筒スクリーンの中心）からみて、左 15°, 10° および右 5°, 10°, 15°, 20° にそれぞれ位置した（標的 LED）（Fig. 1）。これらは視覚標的として用いられ、視距離は約 40 cm であった。

また、固視点として、赤色 LED（直径 4 mm, 187.4 cd/m²）が設置された。この赤色 LED は、ヘルメットの前方に固定された長さ約 40 cm の金属棒の先端にとりつけられた。そして、水平に並べられた緑色 LED の約 5° 上を、頭部運動に伴って左右に移動した。したがって、この赤色 LED の頭部に対する位置は、常に一定であった。また、金属棒をとりつける場所を変えることにより、赤色 LED の水平位置は、自由に変えることが可能であった。本実験では、頭部の正面、右 25°, 左 25° および左 12.5° のいずれかの位置にとりつけられた。

頭部の回転角度を計測するポテンシオメーターからの出力および、視覚標的もしくは固視点となる LED の明滅は、AD 変換装置（計測技研, USBDAQ）を介して、PC（Apple, Power Mac G4）により記録・制御された。

2.1.2 被験者

実験には 8 名の被験者が参加した。全員視力正常または矯正済み、年齢は 23~31 歳の男性 6 名と女性 2 名であった。

2.1.3 手続き

固視点の位置が頭部の正面の条件では、まず中央 LED と固視点が点灯した。被験者は、固視点を凝視しながら、中央 LED を目標にして頭部を正面に向けた。このときの頭部位置を頭部運動の始点とした。頭部を正面に向け終わると、被験者は手もとのボタンを押した。その時点から、1000 から 1500 ms のランダムな時間ののちに、中央 LED が消灯し、同時に標的 LED のうちの 1 つがランダムに選択され、8 ms 間呈示された。被験者は、標的 LED が呈示されるとすぐに、そこへ向けて頭部運動を開始した。

被験者は、固視点の凝視を維持しながら、特に鼻先に注

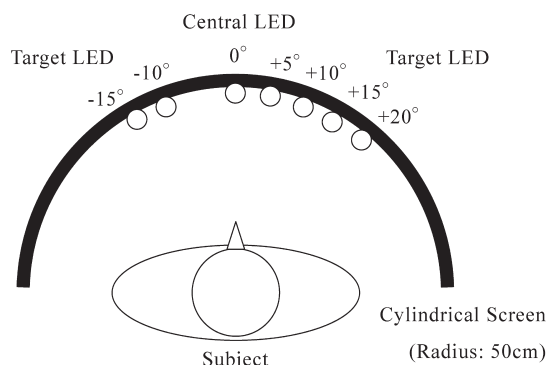


Fig. 1 Spatial arrangement of visual targets (LEDs).

意して、自分の頭部の向きと標的 LED が呈示された方向が一致するまで、頭部を回転運動するように教示された。つまり、被験者は赤色 LED（固視点）に眼を向けた状態で、緑色 LED（標的 LED）が呈示された位置に鼻を向けるように頭部運動をおこなった。このとき、時間的な制限は設けず、できるだけ正確に課題を遂行するよう教示された。さらに、頭部が標的 LED が呈示された方向を一度超えてから再び戻ることにはないように、ゆっくりと運動するように教示された。これは、同じ視覚標的に対するヘッドポインティングでも、右から運動させたときと左から運動させたときとは、わずかに差がでることが報告されているからである⁴⁾。被験者は、頭部の向きが標的 LED が呈示された方向と一致したと知覚すると、手もとのボタンを押した。このときの頭部位置を頭部運動の終点とし、始点から終点までの回転角の大きさをヘッドポインティング応答の結果として解析に用いた。固視点は、試行終了時まで呈示され続けた。また、実験は暗室内でおこなわれ、被験者には LED の光以外は見えなかった。

固視点の位置が、頭部正面に対して左あるいは右の条件では、試行の始めに固視点は呈示されず、中央 LED のみが呈示された。これは、固視点が正面のときの条件に対して、外界の位置手がかりを増やさないようにするためである。被験者は中央 LED を目標にして、頭部を正面に向け、さらにその中央 LED を固視した。その後、被験者は手もとのボタンを押した。その時点から、1000~1500 ms のランダムな時間ののちに中央 LED が消灯し、同時に標的 LED のうちの 1 つがランダムに選択され、8 ms 間呈示された。このとき、被験者は中央 LED を固視していたので、標的 LED の網膜像位置およびその知覚的位置は、固視点が正面に呈示された条件と同様に保たれた。そして、標的 LED の消灯とともに、固視点（赤色 LED）が呈示された。被験者は、できるだけすばやく固視点へ眼を向けたのち、標的 LED が呈示された方向へ向けて頭部運動を

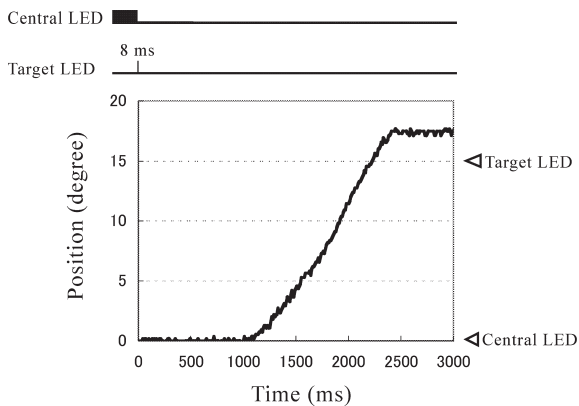


Fig. 2 An example of raw recording of head movement. The visual target was presented at 15 degrees right and fixation point was presented at straight-ahead. Subject was SO. Timing of stimuli presentations was shown on the graph.

開始した。

左右の眼球のそれぞれの回転中心は異なり、さらにそれらは、頭部の回転中心とも異なる。これらの位置について厳密に議論するためには、この点を考慮する必要がある。しかし、本研究では、標的 LED の呈示位置と頭部の物理的位置との関係のもとに、眼球位置を取り扱っているため、以下の解析では、頭部の正面を眼球位置のゼロ点として、固視点の呈示位置を眼球位置とした。

2.1.4 条件

標的 LED の位置条件は全部で 6 種類あった (左 15°, 10° および右 5°, 10°, 15°, 20°)。左側の標的 LED が呈示された試行は、頭部運動をおこなう際に、常に右方向に標的 LED を出し続けることによって、標的 LED が呈示される前に被験者が右方向に頭部運動をおこなうのを避けるために設けたもので、そのデータは解析には用いなかった。固視点の呈示位置は、頭部に対して左 25°, 正面および右 25° の 3 条件であった。また、1 名の被験者 (AT) については、固視点位置が左 12.5° の条件を追加した。この理由は後述する。

それぞれの実験条件の組み合わせ (6 (標的 LED の位置) × 3 (固視点の位置)) について、5 試行ずつおこなった。固視点位置の同じ 30 試行を 1 セッションとして、標的 LED の位置条件は、1 セッション内でランダムに選択された。それぞれの固視点位置の条件については、別セッションで独立におこなった。

2.2 結果

頭部運動の軌跡の代表例を Fig. 2 に示す。これより、教示どおりのゆっくりとした戻り運動のない頭部運動がおこなわれたことがわかる。急速な頭部運動 (ヘッドサッカード) の場合は、速度はおおよそ 70°/s ほどに達し、眼球の

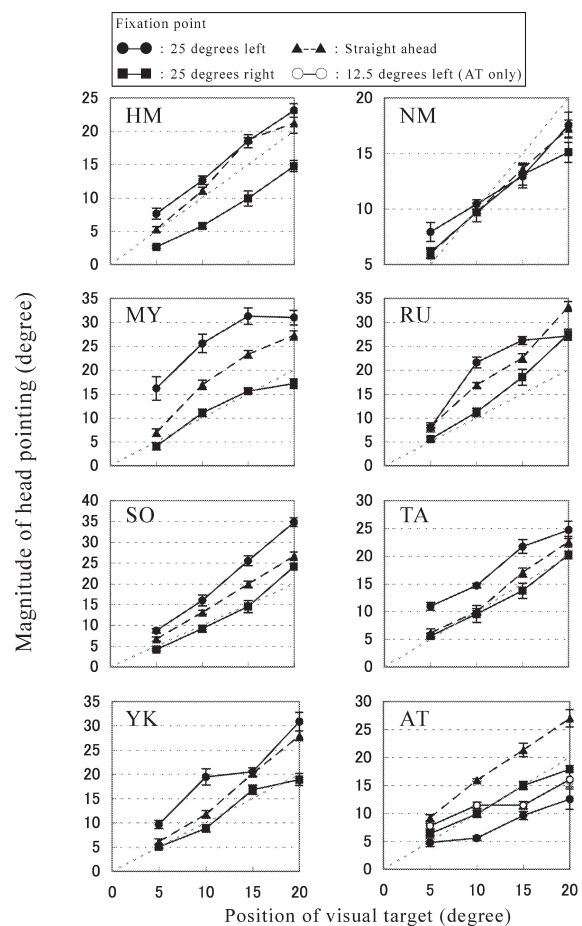


Fig. 3 Result of Exp. 1. The magnitude of head pointing was plotted as a function of the visual target position for each subject. Plus sign indicates the right direction. Error bars indicate standard errors of the means ($N=5$). The symbols show the eye positions relative to the median plane of the head. The filled circles, the filled triangles, the filled squares and the open circles represent 25 degrees left, straight ahead, 25 degrees right and 12.5 degrees left respectively.

サッカードも併発する⁷⁾が、そのような種類の運動とは別の運動であることがわかる。

8 名の各被験者の結果を Fig. 3 に示す。縦軸はヘッドポインティングの応答結果、横軸は標的 LED の呈示位置を示す。縦軸、横軸ともに、プラス方向は右方向を示す。それぞれのシンボルについて、丸 (●) は固視点の呈示位置が左 25°, 三角 (▲) は正面、四角 (■) は右 25° の条件の結果を示す。

この結果より、固視点の呈示位置、つまり眼球位置によって、ヘッドポインティングの応答量が変化することがわかる。ほとんどの被験者において、眼球位置が左 25° の条件 (●) で、最もヘッドポインティングの応答量が大きく、次に正面 (▲)、そして右 25° (■) の順で、ヘッドポインティングの応答量は減少した。すなわち、眼球の偏位

方向とは逆方向へ、ヘッドポインティングの応答量がシフトしてゆく傾向があった。ただし、1名の被験者(AT)の結果は、こうした傾向から外れ、固視点位置が左25°の条件の応答量が右25°の条件の応答量よりも小さかった。この被験者について、固視点を左12.5°に呈示した実験条件を追加した。その結果(Fig. 3, ○)からは、固視点位置が左25°条件の結果より大きく、正面の条件の結果より小さなヘッドポインティングの応答量が得られた。

8名の各被験者の結果を用いて、被験者を繰り返しとして、2要因(標的LEDおよび固視点の位置)の分散分析をおこなった。標的LEDおよび固視点の位置の主効果はともに有意($p < 0.01$)であり、交互作用はみられなかった($p > 0.10$)。つぎに、各被験者について、それぞれの条件での各応答を繰り返しとして、2要因(標的LEDおよび固視点の位置)の分散分析をおこなった。標的LEDの位置の主効果は、被験者ATを含む8名全員で有意($p < 0.01$)であった。固視点の位置の主効果は7名で有意($p < 0.01$)であり、残り1名(NM)については有意傾向($p < 0.10$)がみられた。また、4名(HM, RU, SO, YK)については交互作用($p < 0.05$)がみられた。

同様の傾向を示した7名の各被験者(AT以外の被験者)の結果を用いて、物理的眼球・頭部位置と、知覚的頭部位置との関係を定量的に示すため、以下の式を用いて、重回帰分析をおこなった。

$$T = aH + bE \quad (1)$$

ここで、 T は標的LEDの呈示位置、 H は物理的頭部位置(ヘッドポインティングの結果)、 E は物理的眼球位置(固視点の呈示位置)を示す。そして、その分析結果をTable 1に示す。自由度調整済み決定係数 R^2 は、どれも高い値を示した。係数の有意性については、 a については7名全員で有意な結果($p < 0.01$)を示し、 b については6名で有意な結果($p < 0.01$)、1名の被験者(NM)については有意傾向($p < 0.10$)を示した。

2.3 考 察

8名中7名の被験者について、眼球の偏位方向と逆方向へ、ヘッドポインティングの結果がシフトした。そして、 T (標的LEDの呈示位置)、 H (物理的頭部位置およびヘッドポインティングの結果)および E (物理的眼球位置および固視点の呈示位置)は、式(1)に示されるような線形的な関係を示すことが明らかになった。

実験1の結果は、1章で述べた、Lewaldらによる、頭部の知覚的位置は眼球の偏位方向と同方向へシフトするという報告⁹⁾と矛盾しない。なぜなら、式(1)の E (物理

Table 1 The individual coefficients of Eq. (1) calculated with multiple regression analysis for the result of Exp. 1 and Adjusted R^2 of the analysis was also shown.

Subject	a	b	Adjusted R^2
HM	0.97**	0.14**	0.96
NM	1.10**	0.03*	0.95
MY	0.67**	0.19**	0.94
RU	0.65**	0.07**	0.96
SO	0.72**	0.12**	0.97
TA	0.92**	0.08**	0.96
YK	0.75**	0.12**	0.96

* $p < 0.10$, ** $p < 0.01$.

的眼球位置)の係数である b が0より大きいことから、眼球が偏位すると、 T (標的LEDの呈示位置)、すなわち被験者の知覚的頭部位置は、それと同方向へシフトすることが明らかになるからである。さらにこれは、眼球位置の感覚入力情報が、頭部位置の感覚入力情報に混入され、頭部の知覚的位置に影響することを示唆するものであり、前述したBeckerらのクロストーク仮説⁴⁾を支持する。本実験では、この仮説を定量的な数式を用いて明確に示した。

以上の分析結果から明確に示された、物理的眼球位置の知覚的頭部位置への寄与について、その機能的な有用性について以下に考察する。見張り作業中の航海士の頭部運動の回数と、同様の課題を一般人におこなわせたときの頭部運動の回数を比較した研究によると、航海士のほうが、頭部運動の回数が少ないことが明らかになっている⁸⁾。これより、洗練された観察者は、水平方向の広い範囲を視覚的に認識する必要がある場合、頭部運動の頻度を減らす傾向にあることが示唆される。その理由として、頭部と眼球の重量比を考えれば、わずかでも頭部の運動量を減らしたほうが、エネルギーの消費が軽減されることは容易に考えられる。また、姿勢制御の安定という観点からも、身体の上上部にある頭部は、なるべく動かさないほうが望ましい。頭部位置の知覚メカニズムに、あえて眼球位置の入力信号を足し合わせれば、その分だけ、頭部の運動量を節約することができる。こうした理由から、頭部運動の一部を眼球運動で補うメカニズムが存在しているのではないかと推測される。

しかし、Table 1に示されるように、係数 a および b には個人差があり、この中では特に被験者NMでは、眼球位置の影響が小さかった。個人差の原因の特定は困難であるが、前段落に記述したような、視覚的経験が要因のひとつとして推測される。また、前述したように、被験者ATは他の被験者と大きく異なる傾向を示し、眼球位置が正面の条件に対して、眼球が左右に偏位した条件では、頭部の知覚的位置は右方向へシフトした。眼球位置が左25°の結

果と、左 12.5° の結果との比較からも、この被験者については、眼球の偏位方向ではなく、偏位の絶対量が頭部の知覚的位置に影響していたと推測される。このように、被験者 AT が他の被験者とは定性的に異なる特性を示す原因については、現時点では不明である。

3. 実験 2

実験 1 の結果から、眼球を静止させた位置が、ヘッドポインティングに影響を与えることが明らかになった。しかし、多くの先行研究²⁻⁴⁾ の実際状況では、被験者はヘッドポインティング中に視覚標的を観察していたので、頭部運動に伴って眼球も頭部に対して運動していたと推測される。こうした頭部運動に伴う眼球の運動が、先行研究におけるヘッドポインティングのアンダーシュートのもうひとつの要因である可能性も考えられる。そのため、通常起こる、このような眼球位置の変化がヘッドポインティングに与える影響を検討する必要があると考えられる。

実験 2 では、被験者は身体正中面上に呈示された固視点を凝視しながら、頭部を正面に向けた状態から左右に呈示された視覚標的へ向けて、ヘッドポインティングをおこなった。このとき、頭部が運動するのに従って眼球は頭部運動方向と逆方向に徐々に偏位した。実験 2 では、こうした眼球位置の変化が、頭部位置の知覚に与える影響を明らかにすることを目的とした。

3.1 実験方法

3.1.1 装置

実験 1 と同じ装置を用いたが、ヘルメットに固定された赤色 LED は用いなかった。

3.1.2 被験者

被験者は 7 名で、全員、実験 1 にも参加していた。全員視力正常または矯正済み、年齢は 23~31 歳の男性 6 名と女性 1 名であった。

3.1.3 手続き

まず、中央 LED が点灯した。被験者は、中央 LED を目標にして頭部を正面に向けた。このときの頭部位置を頭部運動の始点とした。頭部を正面に向け終わると、被験者は手もとのボタンを押した。その時点から、1000~1500 ms のランダムな時間ののちに、標的 LED のうちの 1 つがランダムに選択され、8 ms 間呈示された。被験者は、標的 LED が呈示されるとすぐに、そこへ向けて頭部運動を開始した。

中央 LED は、試行中は常に呈示されていて、被験者は中央 LED を凝視しながら、特に鼻先に注意して、自分の頭部の向きと標的 LED が呈示された方向が一致するまで

頭部を回転運動するように教示された。また、実験 1 と同様、時間制限は設けず、ゆっくりとできるだけ正確に頭部運動をおこなうように教示された。さらに、頭部が標的 LED の呈示された方向を一度超えてから、再び戻ることがないようにも教示された。頭部運動が終わると、被験者は手もとのボタンを押すことにより合図した。このときの頭部位置を頭部運動の終点とした。始点から終点までの回転角の大きさを、ヘッドポインティング応答の結果として解析に用いた。

3.1.4 条件

標的 LED の呈示位置は 6 条件 (左 15°, 10° および右 5°, 10°, 15°, 20°) で、実験 1 と同様であった。実験においては、6 条件のうちいずれかがランダムに呈示された。各被験者に対して、それぞれの条件は 5 回ずつ繰り返された。実験 1 と同様、常に右側に標的 LED を出し続けると、被験者が誤って標的 LED が呈示される前に頭部運動を開始する可能性が考えられたため、それを避ける目的で標的 LED が左側に呈示される条件も設けた。しかし、そのデータは解析には用いなかった。

3.2 結果

各被験者の結果を、Fig. 4 に示す。縦軸はヘッドポインティングの応答結果、横軸は標的 LED の呈示位置を示す。縦軸、横軸ともに、プラス方向は右方向を示す。黒丸シンボル (●) は実験 2 から得られた実測結果を示す。

7 名の被験者群の平均値のデータを用いて、各標的 LED の実際の呈示位置と、それに対するヘッドポインティングの応答との差分について t 検定をおこなった。その結果、すべての標的 LED の呈示位置条件において、差分は 0 よりも有意に大きかった ($p < 0.01$)。すなわち、ヘッドポインティングの応答の結果は、標的 LED に対してオーバーシュートする傾向にあった。同様に、各被験者について各標的 LED の呈示位置条件ごとにヘッドポインティングの応答結果を t 検定で分析した。その結果、標的 LED の呈示位置条件のすべてあるいは一部において、6 名の被験者 (HM, MY, RU, SO, TA および YK) でヘッドポインティングの応答結果と標的 LED の呈示位置との間に、有意差がみられた (Fig. 4, * 参照)。

ここで、実験 1 の結果から、実験 2 の結果を以下のように予測する。実験 2 では、固視点は身体正中面上にあったため、頭部位置 (H) と眼球位置 (E) との関係は、 $E = -H$ となる。したがって、式 (1) より、以下の式が導き出される。

$$\begin{aligned} T &= aH + b(-H) \\ &= (a - b)H \end{aligned} \quad (2)$$

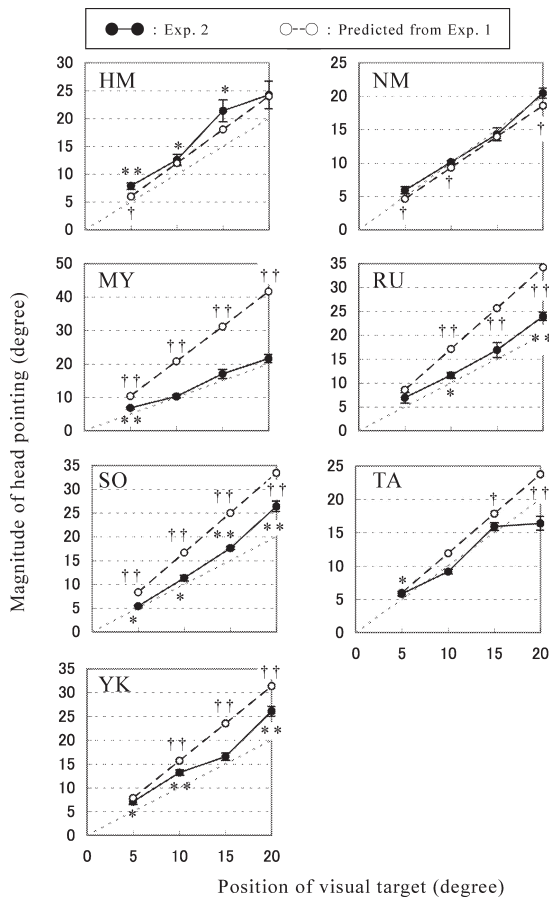


Fig. 4 Result of Exp. 2. The magnitude of head pointing was plotted as a function of the visual target position for each subject. Plus sign indicates the right direction. Error bars indicate standard errors of the means ($N=5$). The filled circles and the open circles represent the results of Exp. 2 and the values predicted from the results of Exp. 1 respectively. * is the symbol which indicates that the difference between the result of Exp. 2 and the visual target position is significant (t -test, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$). † is the symbol which indicates that the difference between the result of Exp. 2 and the value predicted from the results of Exp. 1 is significant (t -test, † $p < 0.05$, †† $p < 0.01$).

ここで T は、標的 LED の呈示位置である。被験者はこの位置へ向けてヘッドポインティングをおこなったため、知覚的頭部位置と置換できる。そして式 (2) より、標的 LED の呈示位置 (T) から、頭部の物理的位置 (H) (ヘッドポインティングの応答結果) は、係数 a , b がわかれば一意に求めることができる。こうして、式 (2) と Table 1 の a , b の値を用いて、各被験者の実験 2 の結果を予測した値を Fig. 4 に重ねて示す (Fig. 4, ○)。

各被験者について、各標的 LED の呈示位置条件ごとに、実験 2 の実測結果と実験 1 からの予測値とを t 検定で比較した。その結果、標的 LED の呈示位置条件のすべてあるいは一部において、5 名の被験者 (MY, RU, SO, TA

および YK) については、実験 2 の実測結果は実験 1 からの予測値に対して有意に大きく、2 名の被験者 (NM, HM) は実験 2 の実測結果は実験 1 からの予測値に対して有意に小さかった (Fig. 4, † 参照)。

実験 2 から得られた実測結果と、実験 1 からの予測値との差分を算出した値について、1 要因 (標的 LED の位置) での分散分析を各被験者のデータについておこなったところ、5 名の被験者 (MY, RU, SO, TA および YK) について、主効果 ($p < 0.01$) がみられたが、2 名の被験者 (HM, NM) ではみられなかった ($p > 0.10$)。

3.3 考察

身体正中面上に呈示された中央 LED を固視し続けることにより、ヘッドポインティングの応答結果がオーバーシュートするようになる傾向がみられた。このオーバーシュートの原因として、まず、実験 1 で明らかになった、頭部運動方向とは反対方向への静的な眼球の偏位による影響が考えられる。そこで、実験 2 の結果 (Fig. 4, ●) と実験 1 からの予測値 (Fig. 4, ○) を比較すると、5 名の被験者 (HM, NM, RU, TA および YK) の一部の条件では、実験 2 の実測結果と実験 1 からの予測値との間には明確な差はみられず、この結果については、静的な眼球の偏位による影響によって説明ができる。

しかし、その 5 名の被験者 (HM, NM, RU, TA および YK) についても、標的 LED の呈示位置条件によっては、実験 2 の実測結果と実験 1 からの予測値との間に有意差がみられ、2 名の被験者 (MY, SO) については、すべての条件において実験 2 の実測結果が実験 1 からの予測値に対して有意に大きいという結果が得られた。したがって、これらの結果については、静的な眼球の偏位とは異なる要因が寄与していると考えられる。実験 2 では身体正中面上に固定された視覚刺激を固視点として、右方向へ頭部運動をおこなったため、眼球位置は左方向へ変化した。このような、ヘッドポインティングの開始時から終了時までの、眼球位置の変化量 (ΔE) を示す、感覚入力情報あるいはエファレンス・コピーによる情報が、実験 2 の結果と実験 1 からの予測値との差分の原因であると推測される。

下に示す式 (3) のように、眼球位置の変化量 (ΔE) が、眼球位置の変化方向 (左方向) と逆方向 (右方向) へ頭部の知覚的位置 (H') をシフトさせたと考えれば、5 名の被験者 (MY, RU, SO, TA および YK) の結果を説明できる。また、被験者 (HM, NM) については、眼球位置の変化が頭部の知覚的位置 (H') を左方向へシフトさせたと考えられるので、式 (3) の係数 c については ($c > 0$) とする必要がある。

Table 2 The individual slope and correlation coefficient calculated with simple regression analysis for the result of Exp. 2.

Subject	Slope	Correlation coefficient
HM	1.16	0.87
NM	0.96	0.96
MY	1.02	0.94
RU	1.13	0.94
SO	1.38	0.98
TA	0.86	0.93
YK	1.21	0.96
Mean	1.10	
S.D.	0.17	

$$T = H' = aH + bE + c\Delta E \quad (c < 0) \quad (3)$$

オーバーシュートの別の原因として、実験2では標的LEDを周辺視で観察したため、その位置を過大評価していた可能性が考えられる。この過大評価量は、視覚刺激の呈示範囲が $5^{\circ} \sim 20^{\circ}$ であるときは、ほぼ一定であることが報告されている^{5,9)}。したがって、この効果がおもな原因であるならば、ヘッドポインティングには、標的LEDの呈示位置にかかわらず、一定のシフトとしてあらわれるはずであり、線形フィッティングした傾きには影響を与えないと考えられる。この可能性を検討するため、実験2の結果から得られる傾きと、視覚標的を呈示し続け、それを中心視で観察することができたと考えられる先行研究の結果から求められた傾きとを、以下に比較する。

実験2の結果について、標的LEDの呈示位置を説明変量、ヘッドポインティングの応答量を目的変量として単回帰分析をおこなった。その結果得られた線形フィッティングの傾きをTable 2に示す。相関係数 R は高い値を示した。また、7名中5名の被験者は、傾きが1以上となった。本実験と異なり、Beckerらのヘッドポインティング実験では、視覚標的は常に呈示され続けており、被験者はそれを凝視しながら頭部運動をおこなったと考えられる。実験には12名の被験者が参加し、得られた結果から求められた傾きの全被験者の平均値（および標準偏差）は、0.82 (0.08)であった⁴⁾。実験2で得られた7名の被験者群の傾きと、Beckerらの12名の被験者群の傾きについて、被験者群間で t 検定をおこなった結果、有意差 ($p < 0.01$) が得られた。これより、実験2のヘッドポインティングのオーバーシュートは、周辺視での観察による、標的LEDの位置の過大評価だけでは説明することは難しいと考えられる。

4. 総合考察

実験1の結果から、眼球の静的な偏位が頭部の知覚的位置に影響を与えることが明らかになった。ほぼすべての被験者において、眼球の偏位と同方向へ、頭部の知覚的位置が系統的にシフトすることを示す結果が得られた。

つぎに、実験2では、眼球位置の変化が、頭部の知覚的位置に与える影響を調べた。過半数の被験者では、眼球位置の変化によって、その変化とは反対方向に頭部の知覚的位置がシフトすることを示唆する結果が得られた。以上の結果から、頭部の知覚的位置 (H') は、式(3)のように表現できる。実験2では、頭部運動について時間制限を設けられなかったため、被験者はゆっくりとした頭部運動をおこなった。したがって、眼球位置の変化も、視覚標的へ向けて弾道的に眼球運動をおこなうサッカードや、移動固視点を能動的に追視する追従眼球運動とは異なる、ゆっくりとした運動であり、その速度成分については無視してよいと考えられる。したがって、実験2における眼球位置の変化は、準静的な変化として捉えられると推測される。ただし、実験2の準静的な眼球運動以外の眼球運動が、頭部の知覚的位置に与える影響については、さらなる議論・検討が必要である。

先行研究では、持続的に呈示される視覚標的を観察しながらヘッドポインティングをおこなうと、アンダーシュートが発生することが報告されている²⁻⁴⁾。式(3)によって表される、物理的眼球位置 (E) および物理的頭部位置 (H) と、知覚的頭部位置 (H') との関係は、上記の先行研究と矛盾しない。例えば、右方向に呈示された視覚標的へ向けてヘッドポインティングをおこなう状態を想定すると、視覚標的を凝視するため、まずサッカードなどの眼球運動によって、眼球が右方向へ偏位すると予想される。この偏位によって、頭部の知覚的位置は物理的位置よりも右方向へシフトする。さらに頭部が視覚標的へ向けて右方向へ運動するのに従って、眼球位置は頭部に対して左方向へ準静的に変化すると考えられる。この変化によっても、頭部の知覚的位置は右方向へシフトする。この結果、視覚標的へ到達していないにもかかわらず、頭部の位置と視覚標的の方向が一致したと知覚され、左方向へのポインティングエラー、すなわちアンダーシュートが発生すると考えられる。

実験2では、身体正中面上に固定された視覚刺激を固視しながらヘッドポインティングをおこなった。その結果、視覚標的を観察しながら、そこへ向けておこなう場合のヘッドポインティングの結果²⁻⁴⁾とは異なり、全体的にわずかなオーバーシュートを示す傾向にあった。この相違点の

原因は、眼球の偏位方向であると考えられる。先行研究において、例えば右方向の視覚標的を固視しながら、ヘッドポインティングをおこなう場合は、実験試行開始から終了時までの間、眼球は頭部正中面に対して右方向に偏位していたと考えられる。したがって、眼球の偏位の静的な効果(式(3)の bE)により頭部の知覚的位置(H')は右方向へシフトした。いっぽう、本研究の実験2では、右方向へのヘッドポインティングの際には、身体正中面上に固視点が呈示されていたため、実験試行開始から終了時までの間、眼球は頭部正中面に対して左方向にあった。したがって、眼球の偏位の静的な効果(bE)により頭部の知覚的位置(H')は左方向へシフトする。よって、この場合のヘッドポインティングはオーバーシュートすることが予想される(Fig. 4, ○参照)。しかし、準静的な眼球位置の変化による効果(式(3)の $c\Delta E$)は、少なくともFig. 4の5名の被験者(MY, RU, SO, TAおよびYK)についてみる限り、こうしたオーバーシュートを適切に減少させ、ポインティングの確度を向上させる役割を果たしている。このことから、眼球の偏位方向と頭部の運動方向とが逆の場合、眼球の偏位の静的な効果(bE)と準静的な眼球位置の変化による効果($c\Delta E$)とが相殺され、頭部が標的に正しく向けられる機能をもつことになると考えられる。また、被験者NMについては、ヘッドポインティングはアンダーシュートすると予測されたが(Fig. 4, ○参照)、実験2のヘッドポインティングの実測結果は予測値よりも大きかった。しかし、実験2の実測結果と標的LEDの呈示位置との有意差はみられず、やはりこの被験者についても、準静的な眼球位置の変化による効果($c\Delta E$)によって、頭部が標的に正しく向けられるようになったと考えられる。

この機能が有効に働いている例として、熟練したバスケットボール選手が、ボールのパスを受けてからゴールへシュートするときの頭部・眼球運動を調べた研究結果を以下に述べる。熟練したバスケットボール選手は、ボールキャッチの直前までは、パスされてくるボールの方向を凝視しているが、キャッチする前からすでに、頭部のみを先にゴールへ向けて運動させること、そしてキャッチと同時にす

ばやくゴールへ向けた視線移動がおこなわれることが報告されている⁸⁾。これは実験2に近い状況である。ここでのゴール方向のように、現在の凝視方向とは別につきに視線を向けるべき方向が定まっている場合には、前段落で説明したように、凝視を続けたままつぎの視線方向へある程度正確な頭部運動がおこなわれると考えられる。そして、頭部だけを先に正確な方向へ向けることができれば、眼位をゼロ点に戻すだけで、スムーズかつ正確に視線移動ができる。頭部を単独で正確に運動させることは、少なくとも視覚的空間認識において最終的な目標ではなく、眼球運動と組み合わせて正確な視線移動を補助することがおもな役割であると考えられる。そのために、式(3)で示すような静的な眼球の偏位の効果(bE)および準静的な眼球位置の変化による効果($c\Delta E$)の相殺機能が、頭部の知覚的位置(H')の確度上昇に役立っているものと思われる。

文 献

- 1) T. Mergner, C. Siebold, G. Schweigart and W. Becker: "Human perception of trunk and head rotation in space during vestibular and neck stimulation," *Exp. Brain Res.*, **85** (1991) 389-404.
- 2) A. L. Hill: "Direction constancy," *Percept. Psychophys.*, **11** (1972) 175-178.
- 3) J. Lewald, G. J. Dorrscheidt and W. H. Ehrenstein: "Sound localization with eccentric head position," *Behav. Brain Res.*, **108** (2000) 105-125.
- 4) W. Becker and H. Saglam: "Perception of angular head position during attempted alignment with eccentric visual objects," *Exp. Brain Res.*, **138** (2001) 185-192.
- 5) J. Lewald and W. H. Ehrenstein: "Visual and proprioceptive shifts in perceived egocentric direction induced by eye-position," *Vision Res.*, **40** (2000) 539-547.
- 6) J. Blouin, L. Labrousse, M. Simoneau, J.-L. Vercher and G. M. Gauthier: "Updating visual space during passive and voluntary head-in-space movements," *Exp. Brain Res.*, **122** (1998) 93-100.
- 7) H. H. L. M. Goossens and A. J. Van Opstal: "Human eye-head coordination in two dimensions under different sensorimotor conditions," *Exp. Brain Res.*, **114** (1997) 542-560.
- 8) 福田忠彦, 渡辺利夫: ヒューマンスケープ (日科技連出版社, 1996) pp. 153-162, pp. 189-198.
- 9) C. L. Morgan: "Constancy of egocentric visual direction," *Percept. Psychophys.*, **23** (1978) 61-68.