

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	頭部・眼球運動を考慮した車両運転時の空間認知特性に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	村瀬健二
Author(English)	Kenji Murase
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12271号, 授与年月日:2022年6月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:金子 寛彦,小池 康晴,中山 実,吉村 奈津江,永井 岳大,福田 一帆
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12271号, Conferred date:2022/6/30, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

博士論文

「頭部・眼球運動を考慮した車両運転時 の空間認知特性に関する研究」

東京工業大学大学院 総合理工学研究科

物理情報システム専攻

村瀬 健二

目次

第1章	序論.....	1
1.1	背景と目的.....	1
1.1.1	車社会と求められる機能.....	1
1.1.2	研究目的	1
1.2	関連する従来研究.....	2
1.3	本論文の概要.....	6
第2章	眼球運動特性に基づいた車両走行時の奥行き知覚モデル.....	7
2.1	はじめに	7
2.2	奥行き知覚モデルの検討方法.....	9
第3章	様々な注視位置における心理物理的ホロプターの同定（実験1）	10
3.1	はじめに	10
3.2	両眼対応点の計測.....	12
3.2.1	実験概要	12
3.2.2	実験装置	12
3.2.3	実験方法	15
3.2.4	実験結果	17
3.2.5	ホロプター断面の幾何学的予測	25
3.2.6	考察.....	29
3.2.7	結論.....	31
第4章	周辺対象認知の頭部と眼球の角度特性（実験2）	32
4.1	はじめに	32
4.2	基礎実験（実験2-①）	34
4.2.1	実験概要	34
4.2.2	実験装置	34
4.2.3	実験方法	35
4.2.4	実験結果	39
4.2.5	呈示角および車速の効果.....	42
4.2.6	走行シーンの効果.....	43

4.2.7 考察.....	44
4.3 ドライビングシミュレータ実験（実験 2-②）	45
4.3.1 実験概要	45
4.3.2 実験装置	45
4.3.3 実験方法	46
4.3.4 実験結果と考察.....	47
4.3.5 結論.....	50
4-A. 付録	51
4-A.1 補正提示角（実効値）の演算方法	51
第 5 章 外乱刺激入力による眼球運動への影響（実験 3）（非公開）	53
第 6 章 総合考察.....	54
6.1 車両走行時の奥行き知覚モデル	55
6.2 奥行き知覚モデルの適用.....	56
6.3 ホロプター形状のナビ画面における認知性の検討（実験 4）	57
6.4 本提案の発展性，他分野への応用	71
第 7 章 結論.....	73
参考文献.....	76
謝辞	80

第1章 序論

1.1 背景と目的

1.1.1 車社会と求められる機能

これまでの自動車開発では、主に燃費性能や、車体強度といった自動車の基本性能の向上が重視されてきた。すなわち機械中心の考え方が主流であったが、技術の進化に伴い、各社の基本性能の差は縮小傾向にある。近年では、自動車は単なる移動手段としてではなく、より安全かつ、より快適な空間であることが求められるようになってきた。つまり、人間中心の考え方にシフトしており、コックピット視界の適正化の重要性が増している。

一方、ドライバーは、自動車の運転時に周辺の道路環境に注意を払いながら、安全に運転操作を行うため、運転中の車両の位置（ナビシステムの地図）や速度（メーター）といった情報呈示デバイスに視線を向ける脇見は、できるだけ短時間で正確に行いたいと考えている。したがって、自動車のコックピット開発において、人間の認知メカニズムを解明し、理想の情報呈示法を検討することは、人間中心設計の考え方から極めて重要である。

1.1.2 研究目的

人間の視覚特性を用いたシミュレーション技術が実現できれば、設計段階で人間の視認状態を予測することが可能となる。その実現のためには、人間の視認行動特性と、人間の眼球構造に基づく知覚機能を明らかにし、それらから人間の認知のモデル化を行う必要がある。人間は視対象を認知する際、大きく分けて、身体、頭部および眼球の協調運動により対象を中心窩で捉える段階（Step1）と、目で対象を捉えて映像として知覚する段階（Step2）を行っている。したがって、自動車運転時に、何らかの情報を得るために脇見行動をするとき、頭部と眼球がどのように動き、そして眼球の網膜を介してどのように見えるか、という段階それぞれを定量化することで、短時間での認知処理が必要な運転環境において、最適な情報呈示を実現するための設計に有用なデータになると考えられる。これらのデータは、従来の主観評価に頼った情報呈示位置や輝度調整といった開発ではなく、人間の認知メカニズムに基づいた視空間座標によるコックピット設計を可能にする。

1.2 関連する従来研究

人間の知覚機能に関しては、対象を中心窩で捉える段階において、視野の周辺に投影される像についても考える必要がある。両眼で1点を見つめた場合、注視点と両眼の節点を通る円上の全ての点は、左右の眼から見た注視点とのなす角が幾何学的に等しく、この円は Veith-Muller 円（幾何学的ホロプター）と呼ばれる [1]。Veith-Muller 円上の点は、両眼の幾何学的対応点に像をつくる（図 1.1）。しかし、心理的な対応点に像をつくる点集合は、網膜上で均一ではなく、水平面上では Veith-Muller 円の外側にあり（図 1.2）[2]、正中面上では上方に傾いた線分であることが報告されており[3]、それらは心理物理的ホロプター（経験的ホロプター）と呼ばれる。そして、Grove らは、視野の全域では、外側が手前に湾曲し、上方が遠方に傾いた形状の面であることを報告し（図 1.3）[4]、吉海と金子は視線方向によってその心理物理的ホロプターの形状が変化することを示した [5]。このような知見から、視対象の位置（距離、角度）に対し、両眼対応点に像をつくるホロプターの位置、すなわち周辺視で明瞭に見えると考えられる空間位置を、眼球網膜構造に基づいて幾何学的に導出できる可能性が考えられる。そしてこの心理物理的ホロプター、すなわち両眼対応点に像を結ぶ位置を視覚情報呈示の最適位置と考えることは、コックピット形状の設計指針の一つとなり得る。

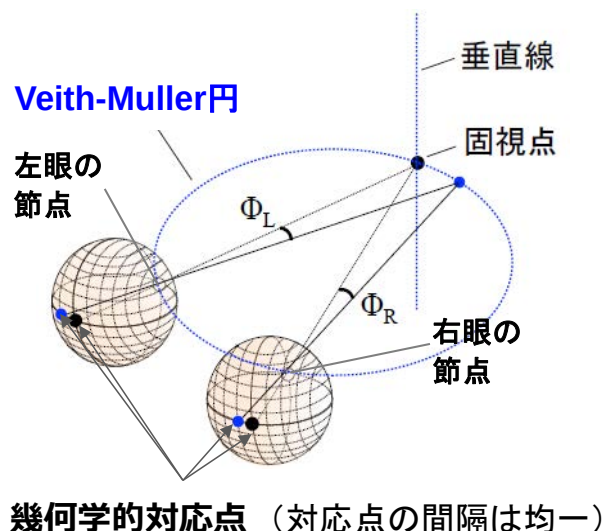


図 1.1 Veith-Muller 円と両眼の網膜上の対応点との関係

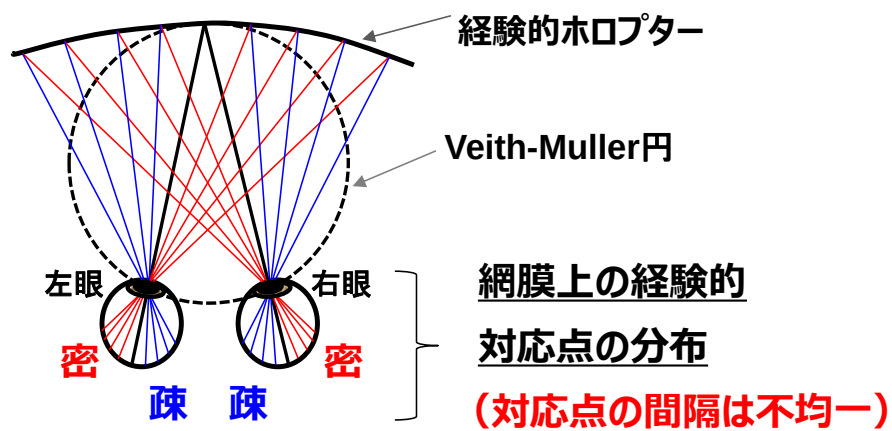


図 1.2 両眼の網膜上の対応点分布イメージ（上視）

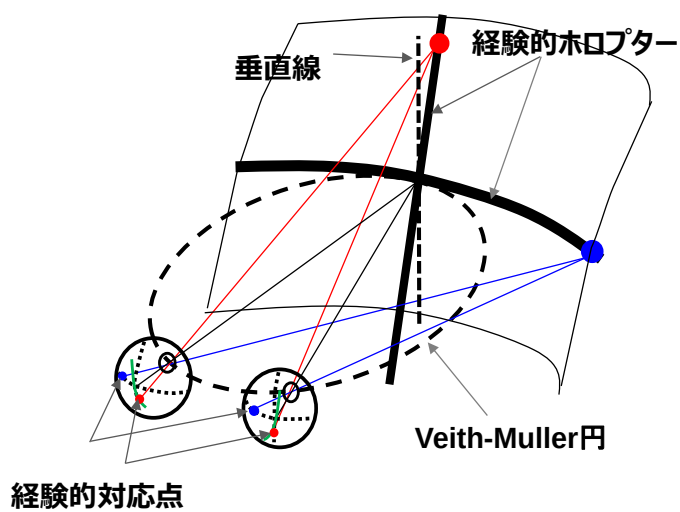


図 1.3 心理物理的ホロプター（経験的ホロプター）のイメージ

しかし、上に述べたホロプターに関する知見は視点位置のみに基づいており、自動車走行時の外乱入力（オプティカルフロー、加減速 G など）による眼球運動への影響を考慮したものではなく、そのままでは、自動車の情報呈示デバイスに設計適用することは難しい。また、自動車運転において、車室内デバイスの呈示情報を得るための協見では、眼球運動だけでなく、頭部運動も同時に行われる。したがって、注視する方向と距離によって決まる心理物理ホロプターを3次元空間内にモデル化し、認知し易い車室内インテリア空間の設計検討に活用するには、自動車運転特有の協見における眼球と頭部の協調運動の特性、すなわち視対象を認知する際の最初の段階（Step1）の特性を解明する必要がある。

一方、人間の行動特性に関しては、頭部と眼球運動の動きと認知の関係について、多くの報告がある。例えば、視認行動における頭部角の知覚的位置は物理的位置より小さい角度であることが報告されている。Hill は、被験者に頭部と眼球を身体の正面に向けた状態から、身体正面の左右位置に呈示したターゲット指標を5秒間観察するタスクを課した実験を行い、物理的な頭部位置が指標の方向の手前で停止することを報告している[6]。その後、頭部の知覚的位置と物理的位置との定量的な関係として、指標の呈示角度が身体の正面から離れるほど、頭部に対する視標の知覚的位置が正面となった場合の物理的頭部位置のアンダーシュート量が増加すること（指標の呈示角度に対する、頭部角の比率が小さくなること）が報告されている[7,8]。さらに山口と金子は、空間認識において、眼球の偏位方向へ頭部の知覚的位置がシフトし、眼球位置の感覚情報が頭部の知覚的位置に影響すること、頭部と眼球が協調運動して正確な視線移動を補助することを報告している[9,10]。

また、周辺にある視対象を観察するとき、その頭部と眼球の角度比率が視対象の位置によって変化することも報告されている。山田らは、頭部を拘束しない自由視で複数の視対象を順に注視していく実験において、水平 10° を超える位置にある対象の観察では、頭部と眼球の運動角度比率は、頭部角が眼球角の約2倍であること、そして、およそ水平 10° の小さな角度では、頭部と眼球の運動角度比率にばらつきが大きいことを報告している[11,12]。これは、人間の水平方向の有効視野が 15° 前後とされており、眼球移動のみで自然に認知できる境界付近であるため、頭部を動かす場合と動かさない場合が混在し、ばらつきが大きかったと推察できる。

しかし、これらの報告は、自動車走行時の動的環境における視対象の認知過程での、頭部と眼球の運動特性を検討したものではなく、静的環境における単純記号の視標を用いた検証であるため、動的環境である車室内の情報呈示に対する認知行動特性とは合致しない

可能性がある。運転時は外部環境を観察し、予期できない外界の対象を認知しながら運転操作を行うため、広範囲に注意を広げあらゆる対象にも対応できる構えが必要だが、車室内の呈示情報を取得する場合は、位置や情報がおおよそ決まっている対象を認知するため、ある程度狭い範囲に注意を向け、運転を妨げないようにできるだけ短時間で内容を理解する構えが必要となる、と考えられる。

ただし、走行環境の違いが、これらの心理的な構えにどの程度影響するのは明確ではない。例えば、速い車速での走行時は、対象の位置変化が大きいこと、衝突した時のリスクが高いこと、あるいは有効視野が狭窄すること[13]などから、圧迫感が増加し、前方への注意が高まることが予想される。また、中島らは視線のみを向ける視認と、頭部と視線を協調運動しながら向ける視認を比較し、頭部を向ける方が、視覚処理が促進されることを報告している[14]。これらのことから、走行環境によって、認知における頭部と眼球の運動角度に影響を及ぼす可能性があり得る。すなわち、走行環境によって、前方に強く注意を向ける必要がある際に周辺対象を認知する場合は、できるだけ短時間でその対象をみるため眼球運動を主に用い、前方にさほど強く注意を向ける必要がない場合には、周辺対象を十分に認知するために頭部運動を主に用いてその刺激を観察すると考えられる。

1.3 本論文の概要

そこで本研究では、車両走行時の動的環境におけるコクピット内のインテリア認知について、人間の奥行き知覚のモデル化を行い、具体的な情報呈示方法を新たに提案するとともに、その有効性について検証する。

第2章「眼球運動特性に基づいた車両走行時の奥行き知覚モデル」では、人間の認知行動と眼球機能に基づいた車両走行時の奥行き知覚モデル化への取組みの全体像について述べる。

第3章「様々な注視位置における心理物理的ホロプターの同定（実験1）」では、両眼の網膜対応点と空間位置である、心理物理的ホロプターの特性を定量的に明らかにする。

第4章「周辺対象認知の頭部と眼球の角度特性（実験2）」では、自動車運転時の動的環境における認知行動である、頭部と眼球の運動角度特性を定量的に明らかにする。

第5章「外乱刺激入力による眼球運動への影響（実験3）」では、自動車運転時の動的環境における認知機能である、オプティカルフローによる眼球運動への影響を定量的に明らかにする。

第6章「総合考察」では、第3章～第5章の結果をまとめ、車両走行時の奥行き知覚モデルの構築について述べる。

第7章「結論」では、本論文の要約と今後の課題について述べる。

第2章 眼球運動特性に基づいた車両走行時の奥行き知覚モデル

2.1 はじめに

自動車走行時の車室内のインテリアにおいて、適切に視覚情報を呈示するためには、まず人の視覚特性を知る必要がある。走行時におけるドライバーの視界は、自身との相対位置が変わらないインテリアと、自身との相対位置が変わる外界風景の流れ（オプティカルフロー）が同時に見えるといった、自動車のコクピット特有のものであるため、その中で視対象の見え方を解明することは重要である。

ドライバーは、運転席への乗り込み、着座後に周辺を見渡すことで、まず自身とインテリアとの相対位置関係（距離・方向）を把握している。そして運転時には、その位置感覚を比較基準として、自車と外界との位置関係を推測し、安全を確保して運転している。したがって、運転時には、メーターやナビといった意識的に見る対象に加え、無意識に見える対象（Aピラー、インパネ等）の配置にも気を配り、ドライバーの視界での視対象の見え方を適切にする必要がある。そのためには、視線方向だけでなく、無意識の眼球運動の挙動を解明し、それらを考慮した上での必要な情報の効率的な呈示と運転を妨げない内装レイアウトの設計が必要である。

人の視対象の知覚における情報処理の流れを図 2.1 に示す。人は視対象を左右の眼球網膜にそれぞれ投影された像を脳内で統合し、奥行き手がかりを得ている。その奥行き手がかりとしては、輝度、動き、両眼視差、色、テクスチャー、陰影、形状などがある。

これらの中でも、本論文では、車室内インテリアといった近距離にある対象の知覚に対する影響の大きい奥行き手がかりである、両眼視差について検討する。

そこで次に、人には視対象がどのように見えているかといった、人間の視覚機能について、眼球構造に基づき分析する。

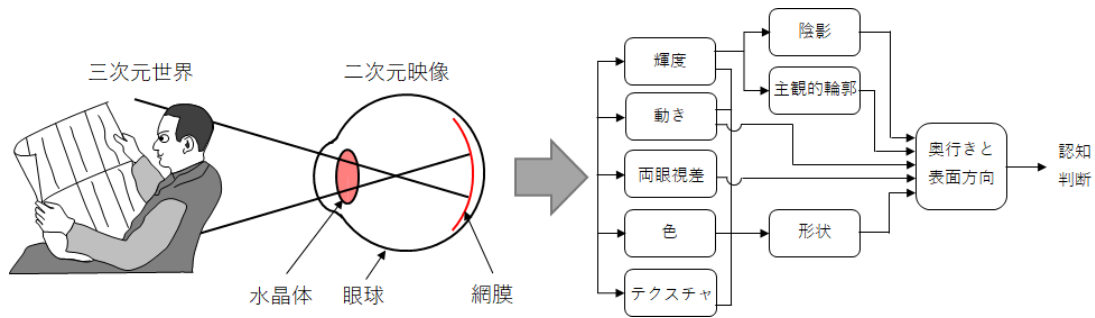


図 2.1 人の視対象の知覚における情報処理の流れ

※ 引用；白井支朗：脳・神経システムの数理モデル—視覚系を中心に—(1997))

左右の眼球網膜上には、一つの外界対象の左右像が重なって同一位置に知覚される、経験的（心理物理的）眼球網膜対応点が存在する（図 2.2: Empirical (psychophysical) corresponding point). それにより人が左右像を単一に知覚する空間中の位置が同定され、それは経験的（心理物理的）ホロプター(Empirical (psychophysical) horopter)と呼ばれている[15]. このような両眼視による空間知覚の基準位置となるホロプター形状が内装設計の1つの指針となると考えられる. 例えば、注視時に両眼網膜対応点に像を結ぶ位置は、人が認知しやすい面形状と考えられ、この面をモデル上で推定し情報を配置するような車室内インテリア構造を設計することが考えられる. そのためには、ホロプター形状を同定することが必要である.

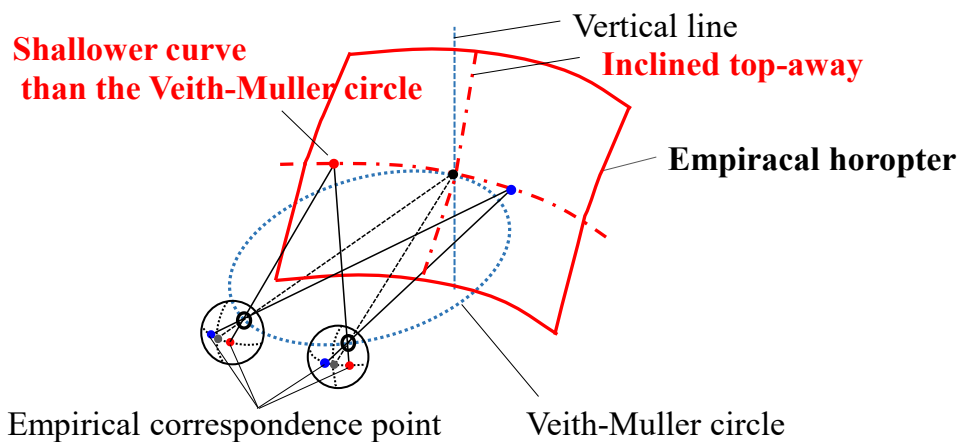


図 2.2 左右眼による経験的眼球網膜対応点（心理物理的ホロプター）

2.2 奥行き知覚モデルの検討方法

図 2.3 に、過去に報告されたデータから推定した、静止した状態におけるホロプター形状に基づいた、車両内の奥行き知覚基準位置（奥行き知覚モデル）の全体像を示す。本研究ではこれを発展させて、車両走行時のホロプター推定に基づき、車両走行時の奥行き知覚モデルを同定する。

実験1では人間の眼球構造に基づく知覚機能を明らかにし、実験2では人間の視認行動特性を明らかにする。そして、実験2の視線方向に、実験1の網膜対応点から導出した空間位置に投影することで、車両静止時の奥行知覚モデルを構築する。

さらに、実験3では走行時外乱の眼球運動影響を明らかにする。その眼球運動の変化量（輻輳角、回旋角など）を、実験1の網膜対応点に反映させた後、同様に、実験2の視線方向に、空間位置投影することで、車両走行時の奥行き知覚モデルを構築する。この奥行き知覚モデルにより、人が認知し易い奥行き知覚面を推定することで、コクピットの情報呈示方法を検討する。

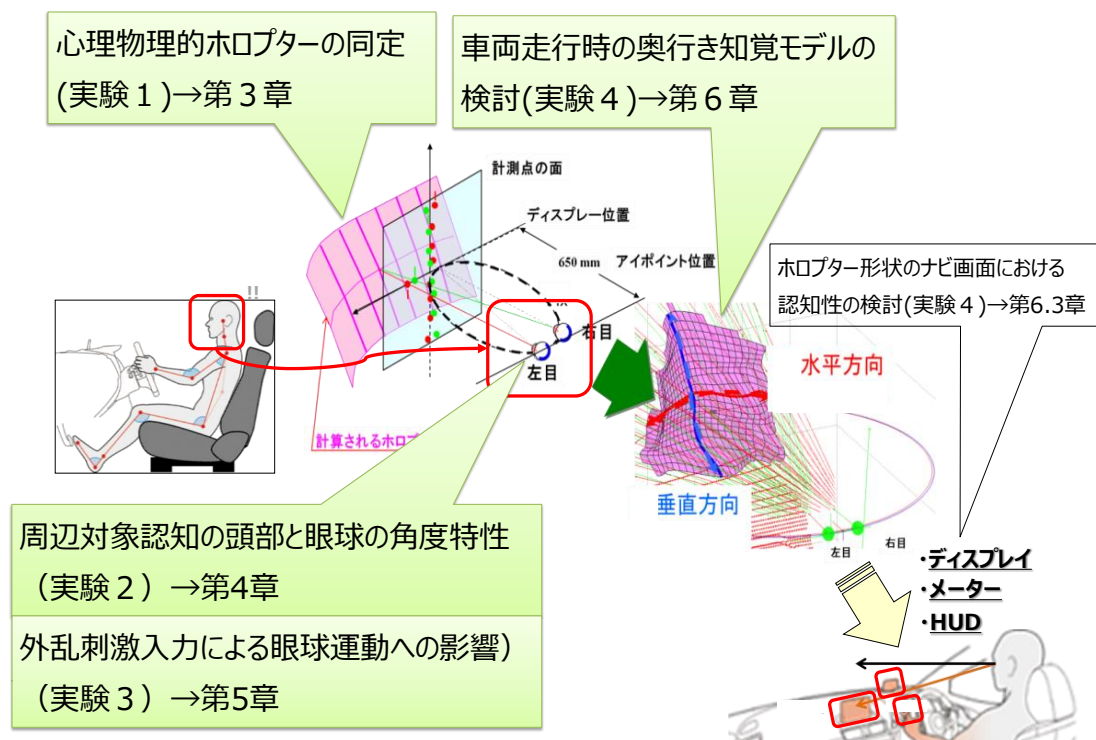


図 2.3 「人間の認知行動と眼球機能に基づいた車両走行時の奥行き知覚モデル化」の全体像

第3章 様々な注視位置における心理物理的ホロプターの同定（実験1）

3.1 はじめに

人間は対象を眼で捉えて知覚する際、眼球の網膜を介して得られた映像を、脳内で融像し立体的に知覚している。例えば、両眼で1点を見つめることにより、視距離に応じ水晶体の厚みが変化して焦点調節されるが、この時、注視点周りの画角1~2°程度の領域（中心視）は、眼球網膜の中心窩で結像するよう調節され、中心視より外側の視野周辺の領域（周辺視）に投影される像の見え方も同時に変化する。人の網膜の視細胞分布は均等ではないため（鼻側が疎、耳側が密）[2]、この網膜上の対応点の偏りが、知覚される視野特性にも大きく反映されることが考えられる。また、両眼の網膜像のずれが小さい場合、すなわち両眼像がパナムの融像領域内に提示された場合は、知覚的に1つの物体に見え、網膜像のずれが大きい場合は、知覚的に融合せず複視（二重像）が生じる。人間が対象を注視する際の見え方に関しては、これまで多くの研究の報告がされている。

対象を中心視で捉え、両眼で注視した場合、注視点と両眼の節点を通る円上の全ての点は、左右の眼から見た注視点とのなす角が幾何学的に等しい。この円は Veith-Muller 円、あるいは幾何学的ホロプターと呼ばれ、円上の点は、左右の網膜上で幾何学的な対応点に像をつくる（図 1.1）[1]。さらに、この注視点を通る垂直成分も、左右の網膜上で幾何学的な対応点に像をつくり、同様に幾何学的ホロプターとなる。しかし、「両眼像が融合し単一に見える」という主観により定義される心理物理的対応点の網膜上の対応点の分布は一様ではないことが知られており（図 1.2）、その点に像を作る外界空間内の点の集合は、水平面上では Veith-Muller 円の外側の曲線となり、正中面上では上方が遠方に傾いた線分となり、心理物理的ホロプターと呼ばれている。そして、Nakayama[3]や Grove[4]らは、ホロプター概念を面に拡張し、その心理物理的ホロプターの視空間上の形状は、外側が手前に湾曲し、上方が遠方に傾いた面であることを報告した(図 1.3)。

しかしながら、これらの知見は正面のホロプター形状を同定したものであり、それ以外の視線方向におけるホロプター形状を同定したものではない。そして、視線方向の違いが影響する理由は、眼球の向きを変える外眼筋の構造から考察することができる。つまり、人の眼筋は一眼あたり6本あり、上下左右の位置に付着する4本の直筋（内直筋、外直筋、

上直筋、下直筋）と、斜めに付着する2本の斜筋（上斜筋、下斜筋）から構成されているため、どの方向に視線を向けるとしても、1本の眼筋が単独で収縮することではなく、6本の眼筋が協調運動しながら視線移動が行われている。その際、眼筋の付着位置や収縮方向に応じて、眼球の回旋運動が生じるため、同じ視距離でも、異なる視線方向にある場合は、網膜上の対応点が異なることから見え方も異なると考えられる。

視線が正面以外の方向であるときのホロプターに関しては、いくつかの可能性がある。第一は、両眼対応点は網膜に固定されていると考えられるため、視線が正面方向の場合に同定された両眼対応点と視線方向から、幾何学的に推測できる可能性である。第二は、視線方向を変化させる際に、眼球の視線軸周りの回旋運動が生じるため[16,17]、眼球に固定された対応点と回旋運動、視線方向の幾何学的関係から予測できる可能性である[18]。また、注視する場合でも両眼は正確に注視点に向かず少しのずれ（Fixation disparity）が生じることも知られている[19]、この影響も加味する必要があるかもしれない。第三は、視線方向の変化により対応点に変化して、それに応じてホロプターも変化する可能性である。対応点の変化は、眼球の形状の歪みなど物理的な要因と、視覚情報処理過程におけるアルゴリズムによる要因の可能性がある。

そこで本稿では、正面方向以外に視線を向けた場合において、両眼対応点の位置を測定し、その対応点に像をつくるホロプターの位置、すなわち周辺視で単一像に見える空間位置を同定することを目的とした。視方向の実験条件として、水平方向（左、右） 30° 、垂直方向（上、下） 30° 、および正面方向 0° とし、それぞれにおける両眼対応点を測定し、ホロプターの違いを比較した。

本章の一部は、映像情報メディア学会で発表した研究成果に基づいている[20]。

3.2 両眼対応点の計測

3.2.1 実験概要

被験者は 3D 眼鏡を装着し、ディスプレイ中心位置に対して視距離 450 mm 位置に着座し、バイトバーで頭部を固定した状態で、両眼に異なる映像を観察した (図 3.1 (a)). ここでの視距離とは、被験者の両眼中央位置とディスプレイ中心位置の固視点 (長方形枠内に十字) との直線距離である. この固視点, および画面を上下, 左右均等に 5 分割した格子点のいずれかを中心として白丸 (直径 3° , 塗りつぶし) が左右眼に交互に呈示された [21]. 被験者は固視点を注視した状態で, 周辺視で左右眼に呈示される白丸を, テンキーを用いて両眼で重なって見える位置に上下, 左右に移動させるタスク [3] を, 各格子点周り (固視点を除く) の 24 ヶ所にて実施した. 1 つのタスクが完了した後に確定キー (数字の 0) を押すことで, 両眼に呈示される白丸が知覚的に重なる位置, すなわち両眼対応点に像を作るディスプレイ上の位置として記録した. 引き続いて, 次の格子点位置でのタスクが開始された. 本タスクに時間的な制約はなく, 被験者が納得いくまで調整が行われた. 両眼像の呈示位置は, 格子点に対して点対称であり, 上下左右テンキーの操作により, 格子点の周りに常に点対称に移動する設定とした.

3.2.2 実験装置

実験装置は, 被験者に視覚刺激を呈示する 3D ディスプレイ (ASUS VG278H, 27 型ワイド液晶, 画面サイズ: $600 \times 337.5 \text{ mm}$, 解像度: $1920 \times 1080 \text{ Pix}$), 液晶シャッター方式の 3D 立体視システム (NVIDIA 3D VISION2 Kit), 刺激呈示を制御するパソコン (DELL XPS8500, NVIDIA GeForce GTX660 搭載) から構成された. 3D ディスプレイのリフレッシュレートは 120 Hz であり, 3D メガネの片眼あたりのリフレッシュレートはその半分の 60 Hz であった. 3D メガネを介し両眼に直径約 3° の白丸の刺激が約 1.0 秒間隔で交互に呈示された. 例えばある瞬間には, 左眼に白丸と固視点, 右眼には固視点のみが呈示された. また, 被験者の頭部はバイトバーを用いて固定された. 図 3.1 (b) に示すとおり, 視方向別のディスプレイ配置の 5 条件は全て, 視距離 450 mm とし, 前述のように測定点は $15.7^{\circ} \times 15.7^{\circ}$ の視野を左右, 上下に均等に分割した格子点 (固視

点を除く) 24 箇所であった。本計測では、固視点から最大 15.7° の位置に呈示された指標を、両眼で重なって見える位置に移動するタスクのため、今回設定した直径 3° の白丸指標が、周辺視で輪郭まで十分に知覚できる大きさである必要がある。そこで、網膜上の位置と視力の関係[22]より検討する。網膜上の角度で 15.7° 位置の視力は、中心視の $1/5$ 程度に低下することから、中心視で知覚可能な図形を 0.5° サイズとすると[23], 同等に知覚できるようにするには5倍の 2.5° サイズ以上であれば良い。したがって、視標が 3° サイズであれば、 15.7° 位置において、周辺視で十分に形状知覚できると推察する。

そして、被験者から見たディスプレイの位置は、正面 0° 、左 30° 、右 30° 、上 30° 、下 30° の5方向のいずれかとし、画面中央に視線を向けた時、表示面が視線に垂直となるよう配置した。データの解析はすべてオフラインで行われた。これらの装置は暗室ブース内に設置されており、被験者はディスプレイ上の刺激以外は何も見えなかった。

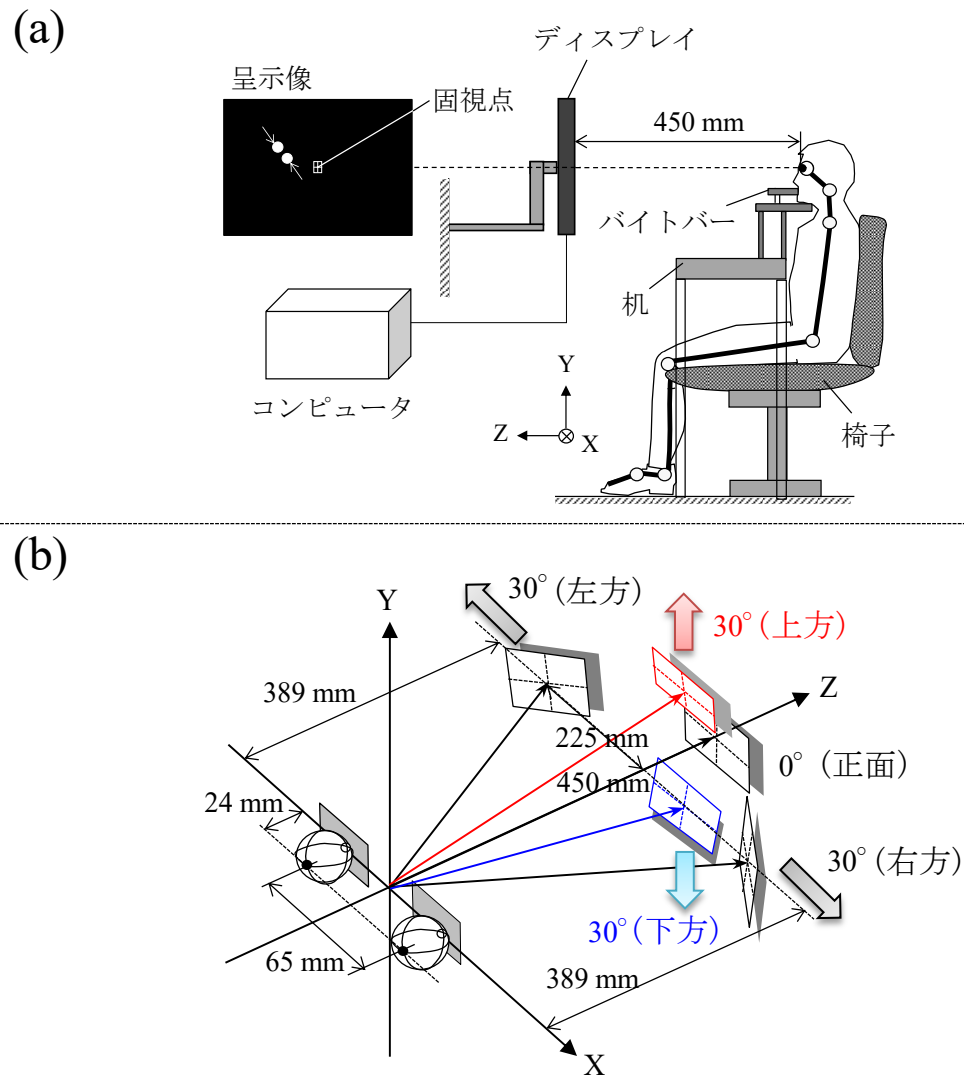


図 3.1 (a) 実験装置の全体図(上図), (b) 視方向別のディスプレイ位置(下図).

3D ディスプレイ, 3D メガネ, テンキー, 刺激呈示&操作記録システムから構成された. 頭部はバイトバーで拘束され, シャッターグラスで両眼に 60Hz で交互に映像呈示された.

3.2.3 実験方法

被験者はディスプレイの中心を固視し続け、白丸の刺激が 24 ヶ所の格子点のいずれかを中心に、両眼で点対称となるランダムな初期変位で呈示された (図 3.2 (a)). 左眼映像と右眼映像は約 1.0 秒毎に逆位相で呈示され、点滅して見える 2 つの白丸の位置が重なって見えるようテンキーの操作で上下左右に動かすことで調整した。その操作により、白丸は格子点に対して点対称に均等に移動する設定としており、2 つの白丸が格子点に同時に近付くか、離れるかのいずれかであった (図 3.2 (b)). また、被験者は、裸眼または矯正による正常視力を有する成人 (20~50 代の男性 7 名) であった。そして、5 つの方向のディスプレイ位置に対し、24 ヶ所の計測を各 6 回、合計 720 トライアル行った。各ディスプレイ位置において測定する 24 ヶ所はランダムな順序で呈示された。また、7 名中 6 名は、正面、水平方向 (左 or 右)、垂直方向 (上 or 下) の順に計測し、1 名は垂直方向 (上 or 下)、正面、水平方向 (左 or 右) の順に計測された。ただし、各方向の測定は十分に時間間隔を空けて行っており、計測順による影響はないと思われる。

なお、全ての被験者には実験に先立ち実験内容を書面にて説明し、インフォームドコンセントを得て実験を行った。

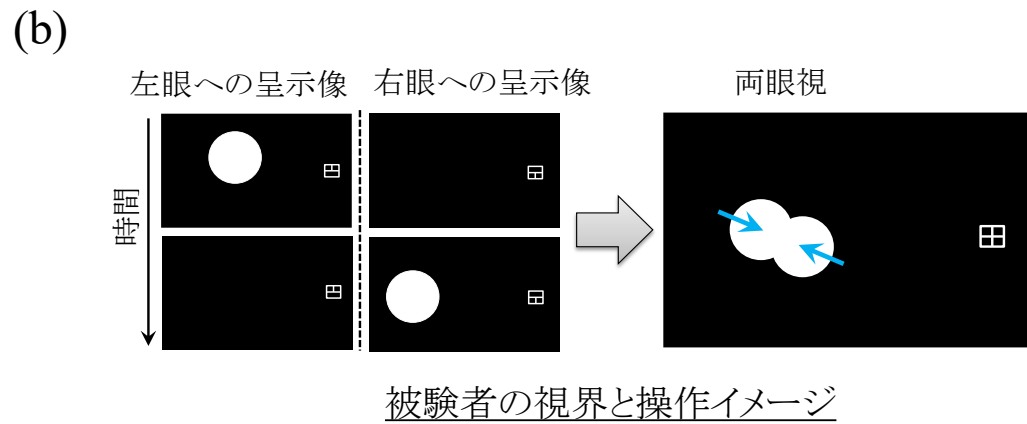
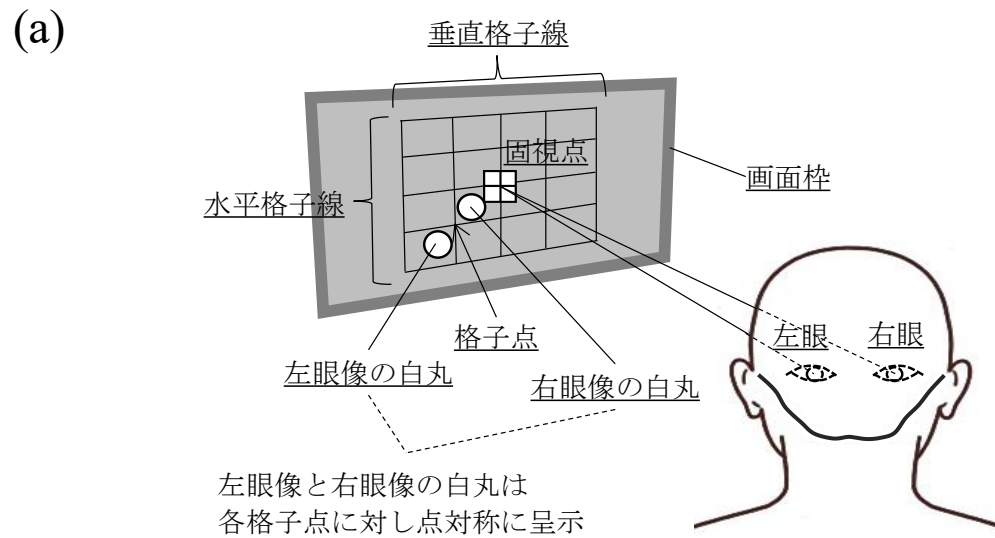


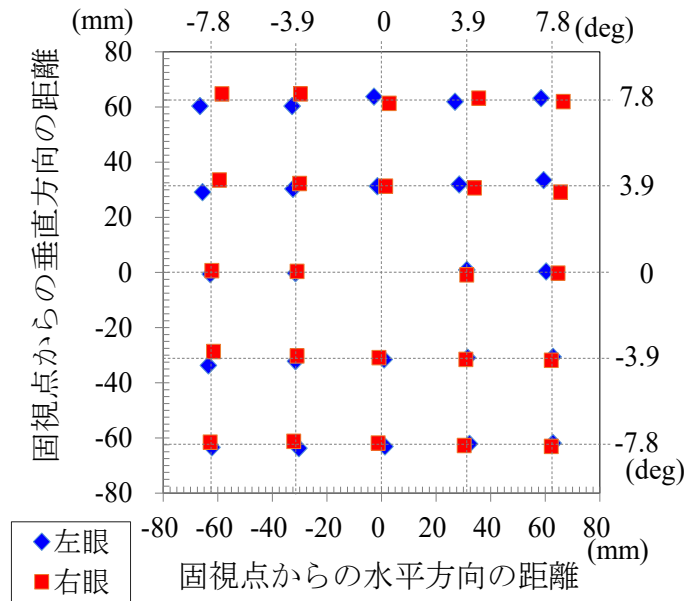
図 3.2 (a) 被験者への呈示映像の概要,
 (b) 各タイミングにおける視覚像 (左) とそれらを両眼像として一致させる 1 タスクの操作イメージ (右)

3.2.4 実験結果

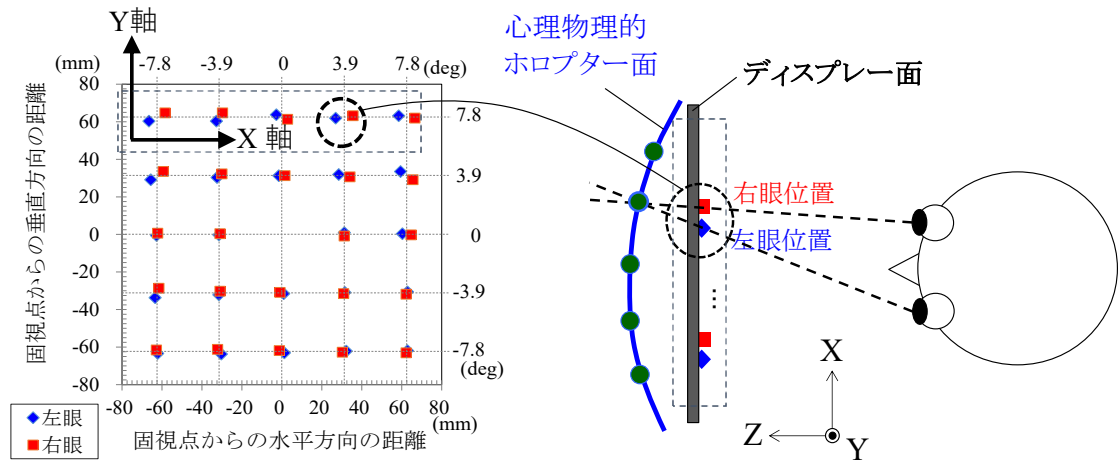
図 3.3 (a) に、一人の被験者の計測結果例を示す (Sub.A, 20 代男性, 上方 30° 注視). 図の横軸は, ディスプレイ中心から刺激位置までの水平方向の距離, 縦軸はディスプレイ中心から刺激位置までの垂直方向の距離である. 図中のプロット点は中央の固視点から $\pm 3.9^\circ$, $\pm 7.8^\circ$ の水平方向, および垂直方向の位置にある 24 点それぞれを中心として, 中央の固視点注視時に両眼像が重なって知覚された, 左右眼像のディスプレイ上の呈示位置 (◆は左眼像, ■は右眼像) である.

この結果から, 左右の眼から見た心理物理的対応点に像を作る空間の点である心理物理的ホロプターを推定することができる. つまり, 測定された位置と, 左右眼球の節点を結ぶ二直線の交点が, この注視点での空間上の対応点となる. 図 3.3 (b) はその導出の概念図である. 図中では, ホロプターの位置がわかるよう, 被験者を真上から見て, 二次元の XZ 平面上で視線が交点を持つように描いたが, 実際の三次元空間において, 左右の視線は必ずしも同一平面上にはないので二直線が交わることは稀である. そこで, 二直線が交わらない場合の対応点は, 二直線の距離が最短となる二点の midpoint と定義した.

(a)



(b)



両眼と計測点を結ぶ直線の交点を計算

図 3.3 (a) 左眼と右眼の心理物理的対応点に像を映す刺激のディスプレイ上の位置の結果例, ,

(b) 心理物理的ホロプター面の 3D 推定イメージ

図 3.4, 図 3.5 に、このようにして求めた被験者 1 名の心理物理的ホロプターの計測結果を示す (Sub.B, 40 代男性)。図 3.4 の横軸は奥行 (前後) 方向の距離, 縦軸は垂直 (上下) 方向の距離である。左図は垂直方向の格子ラインそれぞれにおけるホロプター形状 (ディスプレイの中央より右方向が正), 右図は平均のホロプター形状, エラーバーは標準偏差である。

図 3.4 の左図をみると, 左方 30° , あるいは右方 30° において, 固視点の左右の垂直格子ライン形状に, 大きな変位が生じているように見えるが, 他の条件 (正面 0° , 上方 30° , 下方 30°) では, ほぼ同様な傾向とみなせる。他の被験者の結果もほぼ同様な傾向であったため, 垂直方向の 5 つの格子ラインにおけるホロプター形状を平均し, それぞれの視方向の垂直ホロプター形状とみなした。この結果を, 図 3.4 右図に示す。このグラフより, 固視点が正面 0° の条件に対し, 上方 30° , および下方 30° 条件において, ホロプター断面の垂直方向の傾きに違いが見られた。すなわち, 上方 30° では上側がより奥に傾き, 下方 30° では逆に上側が相対的に手前に傾く傾向が見られた。

図 3.5 は, 被験者を上から見た場合のホロプター断面である。横軸は水平 (左右) 方向の距離, 縦軸は奥行 (前後) 方向の距離である。左図は水平方向の格子ラインそれぞれにおけるホロプター形状 (ディスプレイの中央より上方向が正) を示す。右図は平均のホロプター形状, エラーバーは標準偏差である。この結果から, 水平方向の 5 つの水平格子ラインにおけるホロプター形状は同様な傾向であることがわかる。そのため, それらのホロプター形状を平均し, それぞれの視方向の水平ホロプター形状とみなした。この結果を, 右図に示す。このグラフより, 視方向が左方 30° と右方 30° において, ホロプター断面の水平方向の傾きに違いが見られた。

以上の検討により, 画面内の水平位置もしくは垂直位置を平均したホロプター形状 (図 3.4, 図 3.5 の右図) を直線で近似し, その傾きによって, 各視点における水平および垂直ホロプター形状の指標とすることとした。そこで, 各被験者の測定結果に対してホロプターの傾きを計算した。ホロプターに関する先行研究[1,3,4]で報告されているように, 正面注視時のホロプター形状の特徴は, 左右の外側が手前に湾曲し, 上方が遠方に傾いた面であることであり, 今回の結果もそれと同様である。そのため, ここで用いた直線での近似は必ずしも適切とは言えないが, 視線方向によるホロプター形状の違いをシンプルに分析できると考え, 用いることとした。

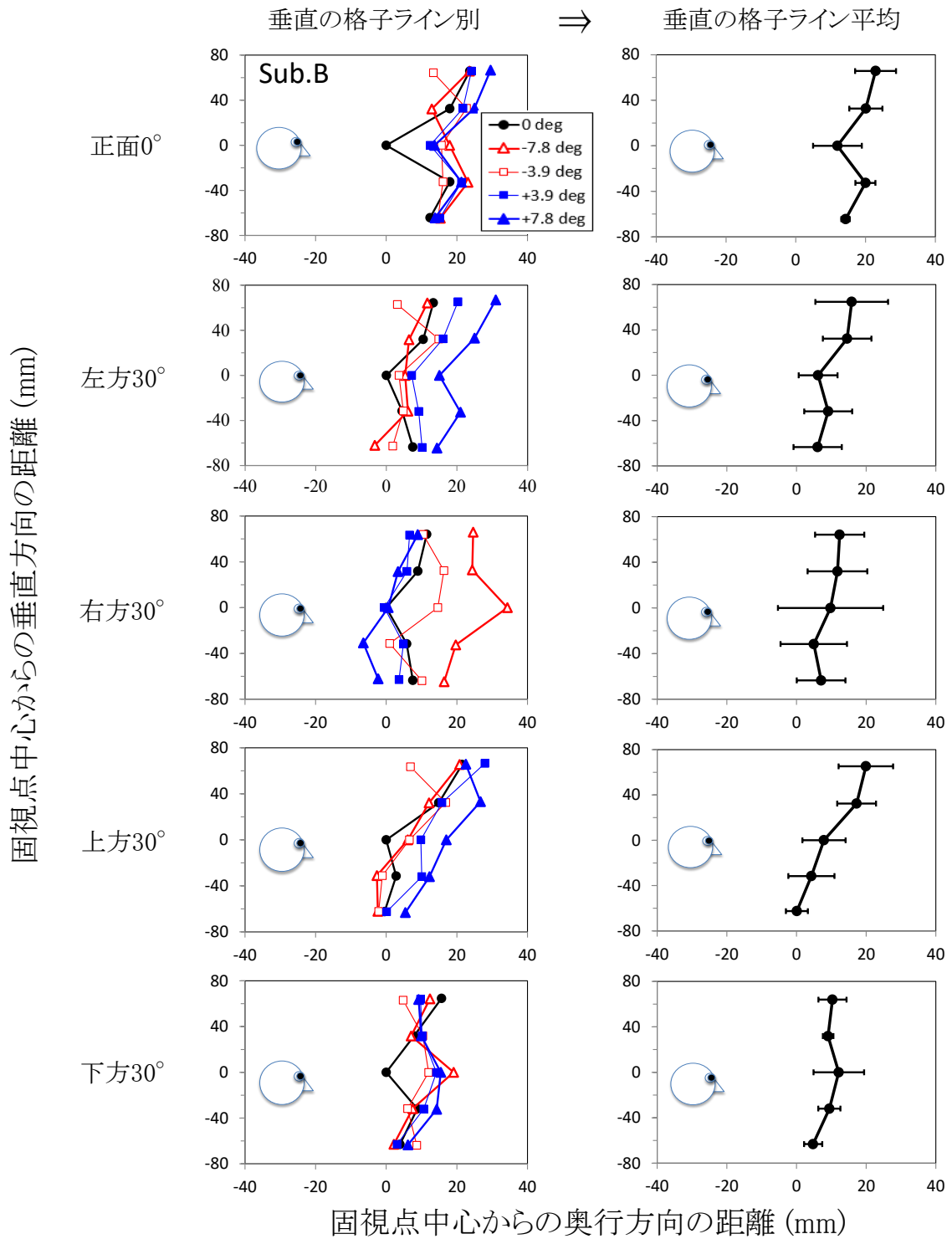


図 3.4 垂直方向のホロプター断面の変化 (左図：格子線別，右図：全平均)

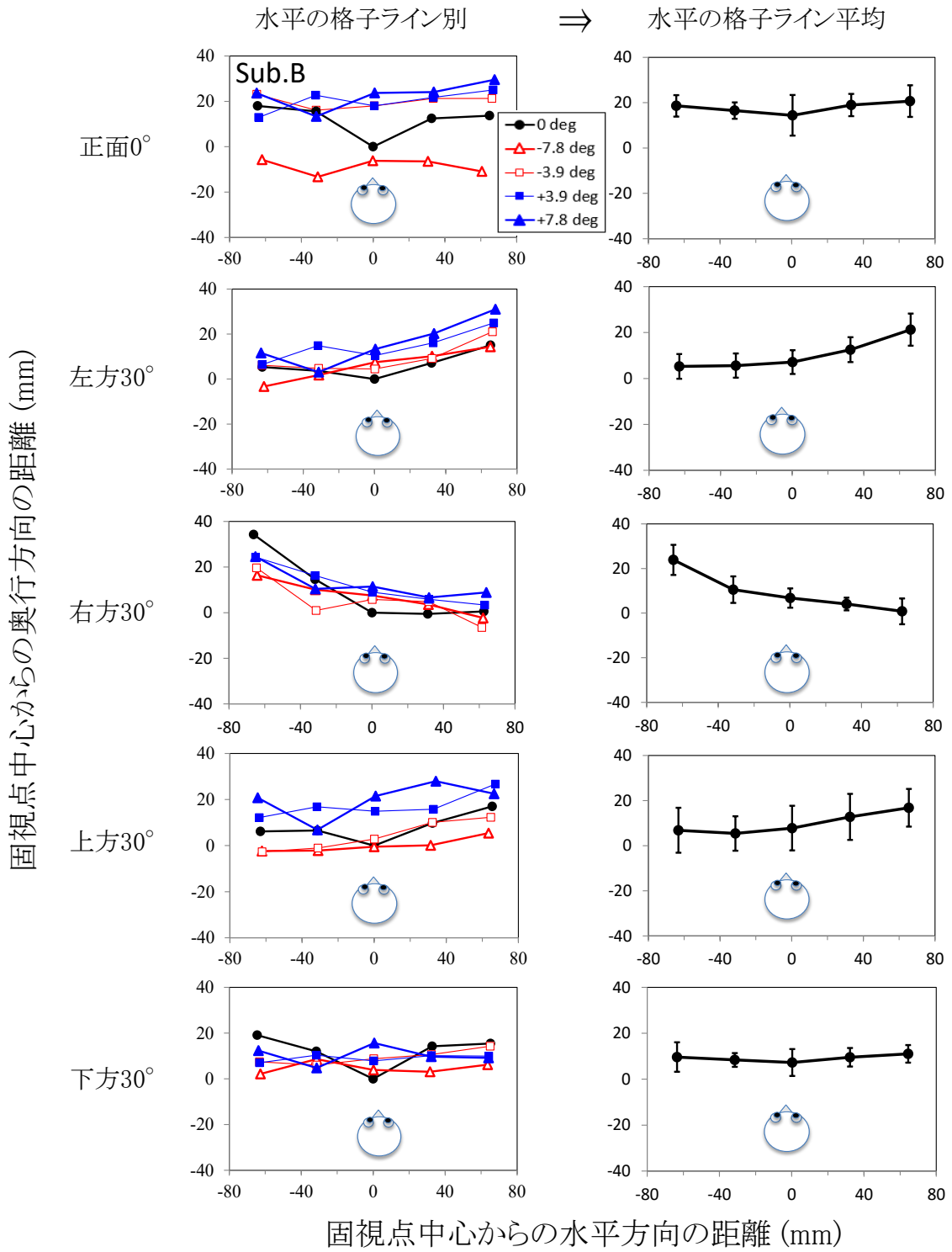


図 3.5 水平方向のホロプター断面の変化 (左図：格子線別，右図：全平均)

図 3.6 に、被験者ごとおよび平均の垂直方向のホロプター形状、およびそれらの傾きの結果を示す。ただし、ここでの傾きとは、図 3.6 の左側のグラフのプロット点から、最小二乗法で求めた線形近似式 $y = ax + b$ の係数 a により定義したものである。エラーバーは標準誤差である。

図 3.6 上段（左）の平均グラフをみると、垂直方向のホロプター形状は、全体的に正面 0° の視線位置に対し、上方 30° では上面がより奥に倒れ、下方 30° では傾きが浅くなる傾向が見られた。図 3.6 上段（右）の傾き角で比較すると、視線が正面 0° の場合の傾き角に対し、上方 30° では相対的にプラス、下方 30° では相対的にマイナスになっていることがわかる。一方、左方 30° 、右方 30° では正面 0° に対し、明確な傾向の違いは見られなかった。

次に、これらの傾向を統計的に検討するため、被験者 7 名の垂直方向のホロプター形状の傾き角に関し、視線方向条件に対する分散分析を行った。その結果、視線方向の主効果は、ホロプター断面の垂直方向の傾き角において、有意差が認められた（ $F(4,30) = 5.287$, $p = 0.0034$ ）。ライアン法を用いた多重比較による下位検定の結果、下方 30° に対する上方 30° 、および右方 30° の条件の違いで有意であった（ $t(30) = 4.567$, $p = 0.0001$, $t(30) = 2.681$, $p = 0.0130$ ）。

図 3.7 に、被験者ごとおよび平均の水平方向のホロプター形状、およびそれらの傾きの比較の結果を示す。ここでの傾きは、図 3.6 の傾きの演算方法と同じである。エラーバーは標準誤差である。

図 3.7 上段（左）の平均グラフより、水平方向のホロプター断面は、全体的に正面 0° の視線位置に対し、左方 30° では左面が手前（右面が奥）に傾き、右方 30° では右面が手前（左面が奥）に傾く傾向が見られた。また、上方 30° 、下方 30° では正面 0° に対し、被験者間で一貫した傾向の違いは見られなかった。

次に、これらの傾向を統計的に検討するため、被験者 7 名の水平方向のホロプター断面の傾き角に関し、視線方向条件に対する分散分析を行った。その結果、視線方向の主効果は、ホロプター面の水平方向の傾き角において有意差が認められた（ $F(4,30) = 19.057$, $p < 0.0001$ ）。ライアン法を用いた多重比較による下位検定の結果、視線方向が左方 30° 、または右方 30° に対する他の全ての視線条件の違いで有意であった（ $p < 0.01$ ）。

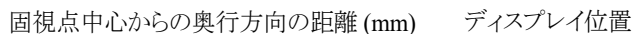


図 3.6 垂直方向のホロプター断面と傾き角の変化

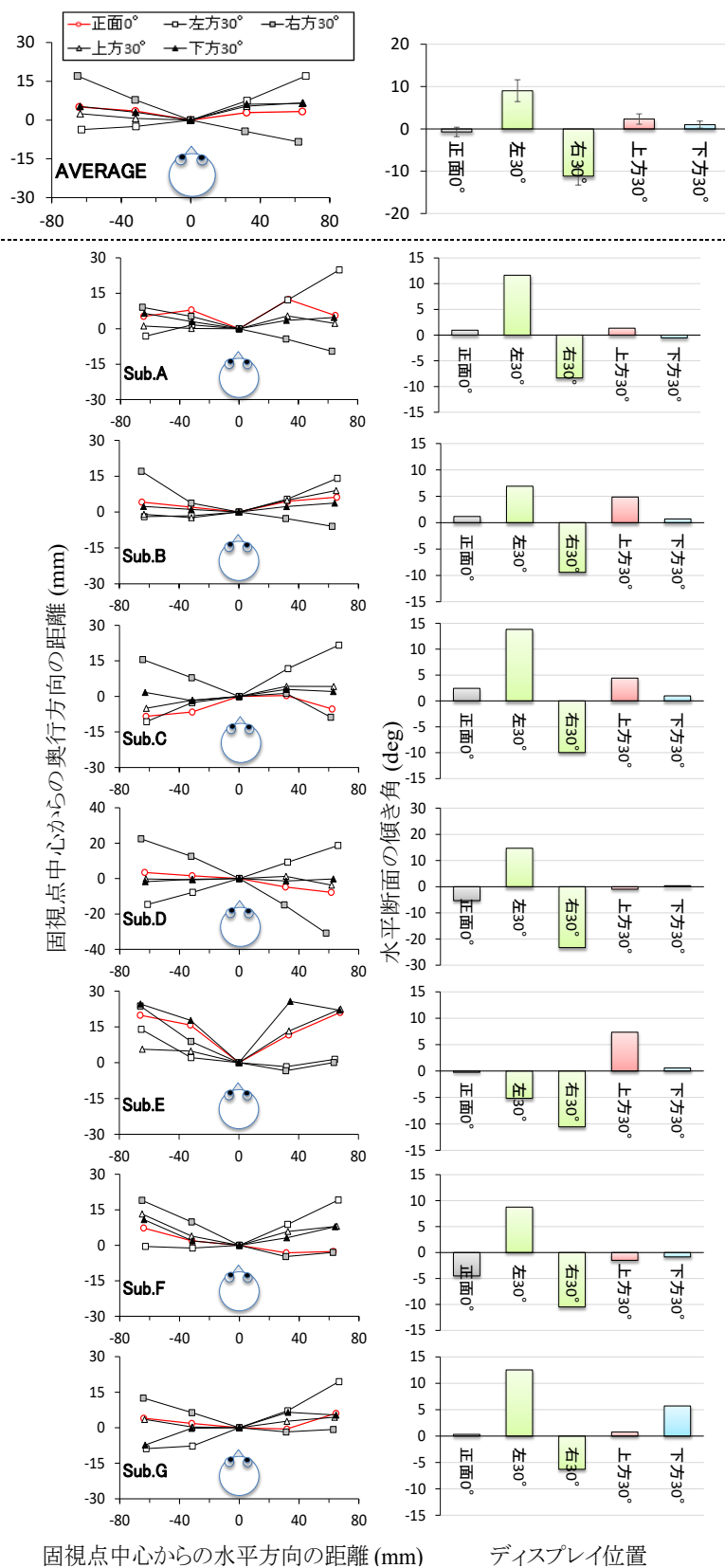


図 3.7 水平方向のホロプター断面と傾き角の変化

3.2.5 ホロプター断面の幾何学的予測

前項では、左方 30°、右方 30° と正面 0° との比較で、水平方向の断面形状に明確な傾向の違いが見られた。そこで、水平方向に視線移動した場合に、水平方向のホロプター断面形状の実測値と、正面 0° の結果からの推定値との比較を行う。本検討は、視対象の見え方を適正化する設計検討において、視線位置からホロプター形状を予測できるモデル化を検討する上で、重要である。

図 3.8, 図 3.9 に、正面 0° の全被験者平均の対応点のデータを用い幾何学的に推定した、視線が左右方向の水平および垂直ホロプター形状（以下、理論値と称す）と、実際に計測した実測値を比較した結果を示す。図中の破線は左右眼の節点と固視点を通る Veith-Muller 円、左図の左方 30° と右図の右方 30° の黒丸ラインは実測値、白丸ラインは理論値である。理論値は、図中の左方 30°、右方 30° のみ表記した。ここでの理論値の演算方法は、まず正面 0° で実測した 24 点の対応点の全てに対し、両眼の節点と繋いだベクトルの成す角度を求めリスト化し、そして正面以外の視線条件の固視点に対し、このリスト化された角度を用いて 24 点の仮想対応点を割り当てた。

図 3.8 の水平ホロプター断面における比較結果より、左方 30°、および右方 30° では、固視点に対し、中心寄りの内側に近づくほど、あるいは外側に遠ざかるほど、理論値との偏差が大きくなっている。そして、左方 30° ではホロプター面の右端、右方 30° ではホロプター面における左端で最も偏差が大きいのとき最大 29.6 mm)。そして、実測したホロプター形状は、正面 0° から推定される理論値より、被験者が正対する平行面に近づく方向に回転した状態、すなわち、左方のホロプター面の場合の右端、右方のホロプター面の場合の左端の面を、やや手前に回転させた状態であることがわかった。また、図 3.9 の垂直ホロプター断面における比較結果より、左方 30°、および右方 30° において、正面 0° から推定される理論値は、実測値と比べ固視点の上側でやや遠方に傾く傾向が見られたが、その差は微小であり（右方上側のとき最大 4.3 mm）、概ね実測値に近い特性を示した。

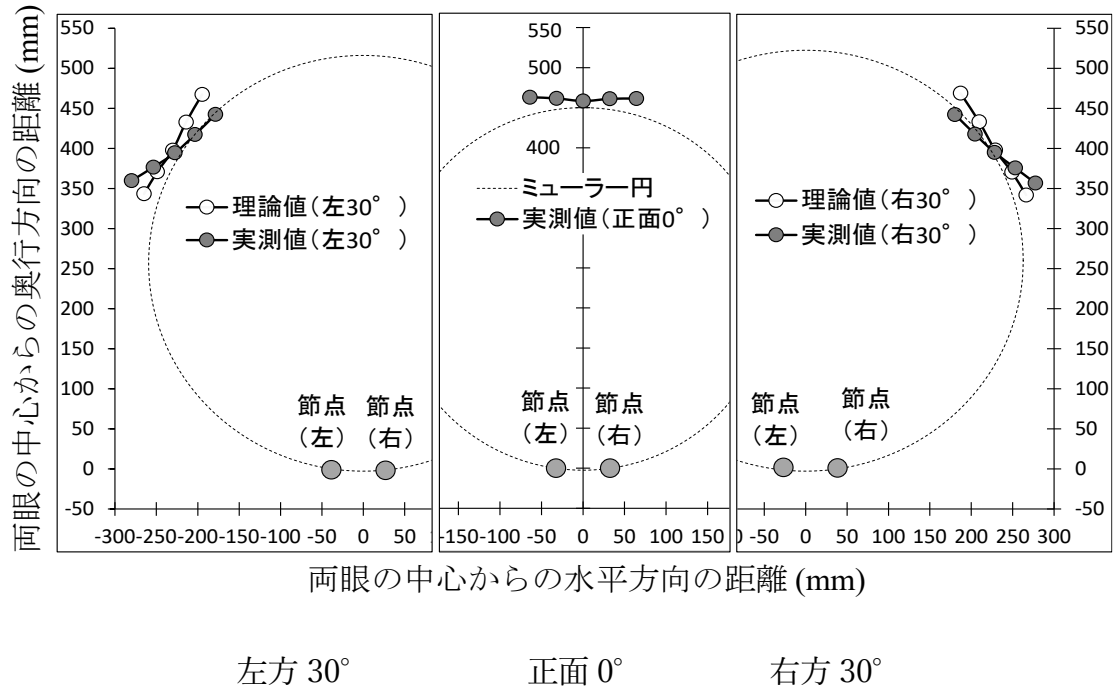


図 3.8 水平方向のホロプター断面の理論値と実測値（左右の視線方向）

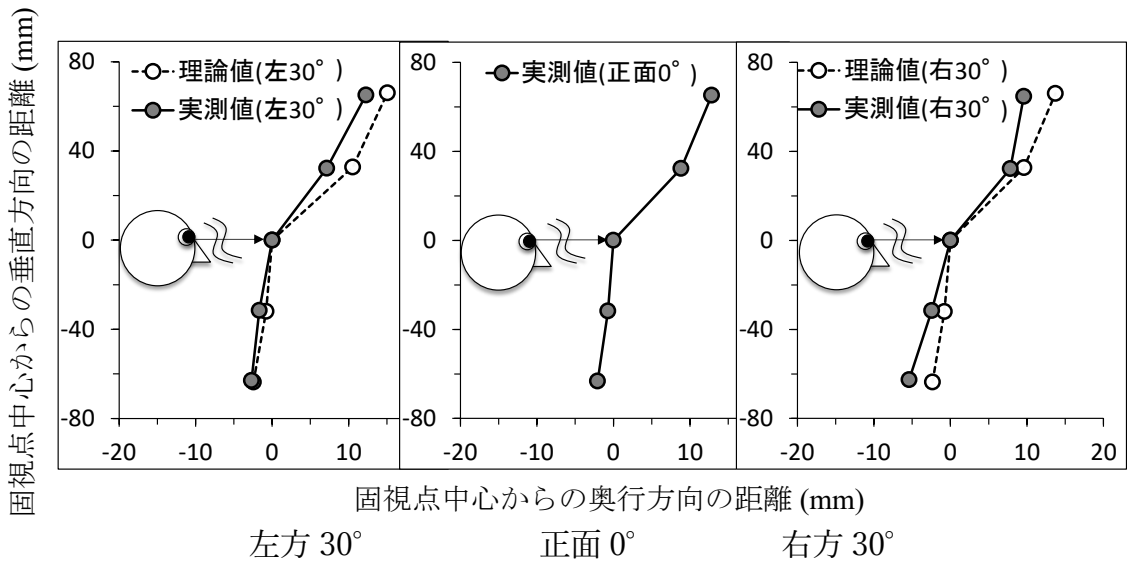


図 3.9 垂直方向のホロプター断面の理論値と実測値（左右の視線方向）

図 3.10, 図 3.11 に, 視線が上下方向の水平および垂直ホロプター形状と, 実際に計測した実測値を比較した結果を示す. 図中の破線, 黒丸ライン, 白丸ライン等の記号の意味は, 図 3.8, 図 3.9 と同様である. 理論値は, 図中の上方 30° , 下方 30° のみ表記した. また, 図 3.10 の上・下 30° の Veith-Muller 円は, グラフ上では上からの投影図となるため楕円となる.

図 3.10 の水平ホロプター断面における比較結果より, 上方 30° , および下方 30° において, 正面 0° から推定される理論値は, 実測値と形状がほぼ一致した. 右側の拡大図を見ると, 上方 30° , 下方 30° とともに, その差は微小 (上方右側のとき最大 3.3 mm) であった. すなわち, 上下方向の視線移動による水平ホロプター断面形状への影響は小さいことがわかった.

また, 図 3.11 の垂直ホロプター断面における比較結果から, 実測したホロプター形状は正面 0° から推定される理論値よりも, 上方 30° では, 上側が遠方かつ下側が近方に傾いていた. 一方, 下方 30° では, 逆に, 上側が近方かつ下側が遠方に傾いていることがわかった.

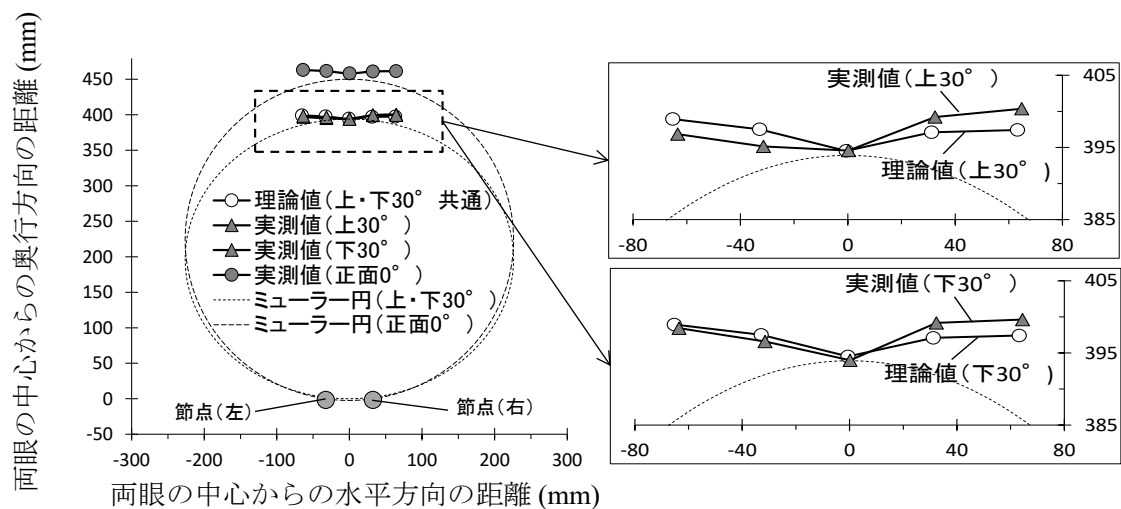


図 3.10 水平方向のホロプター断面の理論値と実測値 (上下の視線方向)

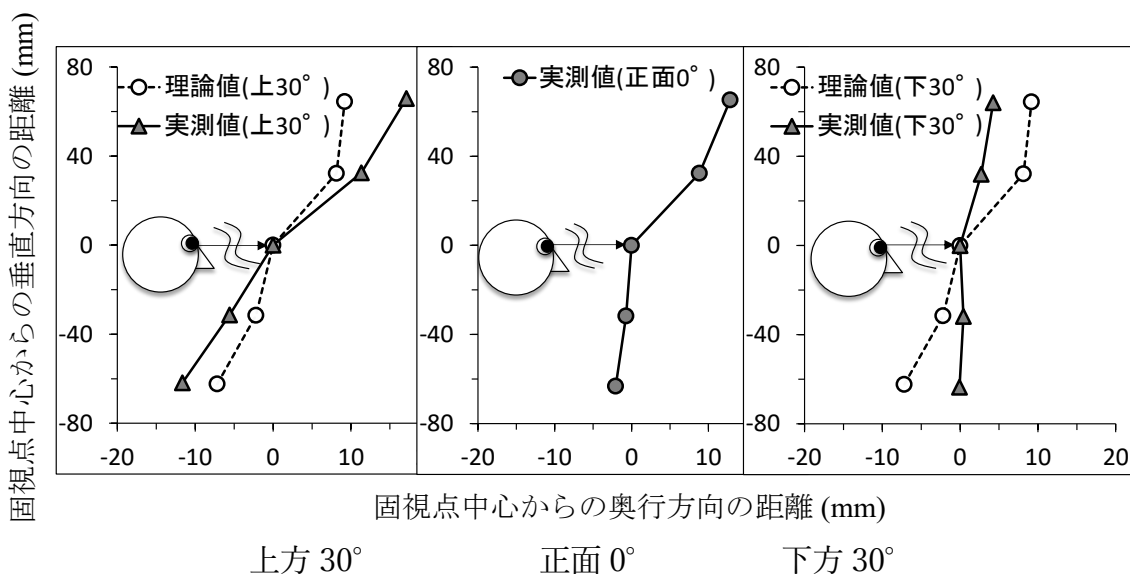


図 3.11 垂直方向のホロプター断面の理論値と実測値 (上下の視線方向)

3.2.6 考察

今回、被験者の頭部を真正面方向に固定した状態で、視線方向の異なる条件にて、心理物理的対応点を計測し、垂直方向および水平方向の心理物理的ホロプター形状について分析した。まず、正面 0° 注視条件の垂直、および水平方向のホロプター断面は、基本的に先行研究[3,4,5]の結果と同様に、左右の外側が手前に湾曲し、上方が遠方に傾く傾向を示した。

次に、視線方向の違いでは、垂直方向のホロプター断面は、正面 0° 注視条件に比べ、上方 30° 注視条件で上面が奥に傾き、下方 30° 注視条件で後方への傾きが浅くなる傾向が見られた。この傾向を明確にするため、垂直方向の傾きを直線で近似し、その傾きを視標として統計的解析を行った。その結果、上方 30° 注視条件と下方 30° 注視条件で有意差が認められ、これらの違いが明確になった。この原因として、上下の視線移動では、視線軸周りに、回旋輻輳眼球運動が生じた可能性がある。例えば、上方 30° で外回旋、下方 30° で内回旋の眼球運動が生じたとすれば、理論的には、垂直方向の傾きが実測値の傾向と一致する。視線移動は6本の眼筋の協調運動により行われるため、眼筋の付着位置や収縮方向により、回旋運動の方向や大きさに違いが生じたと推察される。例えば、図 3.11 に示した垂直ホロプター断面の理論値の演算では、視線方向による回旋輻輳眼球運動については考慮されていないため、実測値との偏差が大きくなった可能性がある。今後、視線方向と回旋輻輳眼球運動との関係を定量的に明らかにすることで、ホロプター形状の理論値の予測精度を向上できる可能性がある。

水平方向のホロプター断面は、正面 0° 注視条件に比べ、左方 30° 注視条件で上から見て右が奥に傾く傾向、右方 30° 注視条件で右が手前に傾く傾向が見られた。この傾き角の大きさについて、全被験者平均により、正面 0° 注視条件での実測値から幾何学的に推定される傾き角（理論値）と実測値を比較した結果、実測値は理論値よりも、左方 30° 注視条件で平均約 21.3° 手前側に傾き、右方 30° 注視条件で平均約 16.7° 手前側に傾くことが明らかになった。つまり、左右共に理論値よりも約 20° 前後、正対方向、すなわち額面並行面に近づく方向に回転した状態であった。そして、この角度の大きさにはやや個人差はあるものの、理論値より手前側に回転する傾向は被験者共通であった。

その原因として、第一に、左方 30° 、あるいは右方 30° を見る際の視線移動で眼球がわずかに変形し、実測の正面 0° から推定した理論値とは、対応点の位置がずれたことが可

能性として考えられる。第二に、左右を注視した際の両眼の視角差による回旋量の違いで、対応点がねじれた可能性も考えられる。第三に、眼鏡を装着した被験者の場合、正面注視と左右注視での視方向によるレンズの厚みの違いから、両眼像にひずみが生じた可能性も考えられる。この第三の可能性に関しては、一人の被験者で、眼鏡をかけた場合と、コンタクトレンズを装着した場合を計測し、水平方向のホロプター形状を比較検証した。その結果、傾きの差は、左方で約 1.3° 、右方で約 1.0° と微小であった。この傾向を詳細に確認するため、正面 0° 、左方 30° (眼鏡)、左方 30° (コンタクト)の3条件、および正面 0° 、右方 30° (眼鏡)、右方 30° (コンタクト)の3条件でそれぞれ統計検定した結果、正面 0° に対する、左方 30° 、および右方 30° の各条件で有意差が認められたが ($F(2,15)=29.559, p=0.0001$, $F(2,15)=268.095, p<0.0001$)、ライオン法を用いた多重比較により、眼鏡とコンタクトの条件違いでの有意差は認められなかった (左方 $30^\circ: t(10)=0.924, p=0.3774$, 右方 $30^\circ: t(10)=2.274, p=0.0462$)。すなわち、眼鏡の装着が、理論値とのずれの原因である可能性は低い。

「まえがき」で述べたように、視線が正面以外の方向であるときのホロプターに関して、幾つかの可能性が考えられる。

第一は「正面方向の場合に同定された両眼対応点と視線方向から、幾何学的に推測できる可能性」であるが、3.2.5 章で検討したように、この可能性に基づいて幾何学的に理論値を演算して実測値と比較すると違いが明らかになった。このため、網膜上に固定された両眼対応点と眼球位置のみからはホロプターを予測できないことが明らかになった。

第二の「正面方向の両眼対応点と視線方向および回旋眼球運動により推測できる可能性」については、上下の視線方向と垂直方向のホロプターの実測値の傾きから、上方注視で外回旋、下方注視で内回旋したと考えれば定性的に対応することがわかった。このため、視線方向に応じた回旋眼球運動の発生を仮定すれば、ホロプター形状を予測できることが示唆された。

しかし、左右の視線方向における水平ホロプターの予測値と実測値の比較(図 3.8)より、回旋眼球運動の発生だけではホロプターを予測できないことが明らかである。このため、第三の「視線方向によって対応点が変わる可能性」も考慮すべきである。本論文ではこの原因については検証していないが、左右方向の視線移動に伴った眼球の形状の歪みなど物理的な要因と、視覚情報処理過程におけるアルゴリズムの要因により対応点が変わる可能性が考えられる。

3.2.7 結論

本研究では、視線方向の異なる条件にて、心理物理的ホロプターの対応点を調べた。その結果、正面 0° 注視条件に対し、垂直方向のホロプター断面は上下方向の注視により、上下方向の傾き角が異なる傾向が見られた。一方、水平方向のホロプター断面は左右方向の注視により、左右方向の傾き角が異なる有意な傾向が見られた。以上の結果から、視線方向の違いにおけるホロプターの断面形状を推定できる見込みが得られた。

今回、静的な実験室環境におけるホロプターについて視線方向も考慮して、ホロプター面を予測できるようになったと考える（静的ホロプターモデル）。次章以降では、さらに、自動車走行シーンを想定して、動的環境の外部刺激（オプティカルフロー、加減速など）による眼球運動影響を定量的に明らかにし、上記モデルに織込むことで、外部刺激環境下でのホロプター面を予測できるようにすることを目指す（動的ホロプターモデル）。そして、これらのモデルに基づき、実際の走行シーンを想定した上で、視対象が明瞭に見えるホロプターの考え方から、車室内での情報呈示や奥行き空間の見え方を整え、運転し易いインテリア設計が可能になると考える。

第4章 周辺対象認知の頭部と眼球の角度特性（実験2）

4.1 はじめに

人間は視対象を認知する際、大きく分けて、身体、頭部および眼球の協調運動により対象を中心窩で捉える段階（Step1）と、眼で対象を捉えて映像として知覚する段階（Step2）がある。自動車運転において、車室内デバイスの呈示情報を得るための協見では、眼球運動だけでなく、頭部運動も同時に行われる。したがって、注視する方向と距離によって決まる心理物理的ホロプターを3次元空間内にモデル化し、認知し易い車室内インテリア空間の設計検討に活用するには、自動車運転特有の協見における眼球と頭部の協調運動の特性、すなわち視対象を認知する際の最初の段階（Step1）の特性を解明する必要がある。

頭部と眼球運動の動きと認知の関係については、これまで多くの報告がされている。例えば、視認行動における頭部角の知覚的位置は物理的位置より小さい角度であることが報告されている。Hill は、被験者に頭部と眼球を身体の正面に向けた状態から、身体正面の左右位置に呈示したターゲット指標を5秒間観察するタスクを課した実験を行い、物理的な頭部位置が指標の方向の手前で停止することを報告している[6]。その後、頭部の知覚的位置と物理的位置との定量的な関係として、指標の呈示角度が身体の正面から離れるほど、頭部に対する視標の知覚的位置が正面となった場合の物理的頭部位置のアンダーシュート量が増加することが報告されている[7,8]。さらに山口と金子は、空間認識において、眼球の偏位方向へ頭部の知覚的位置がシフトし、眼球位置の感覚情報が頭部の知覚的位置に影響すること、頭部と眼球が協調運動して正確な視線移動を補助することを報告している[9,10]。

また、周辺にある視対象を観察するとき、その頭部と眼球の角度比率が視対象の位置によって変化することも報告されている。山田らは、頭部を拘束しない自由視で複数の視対象を順に注視していく実験において、水平 10° を超える位置にある対象の観察では、頭部と眼球の運動角度比率は、頭部角が眼球角の約2倍であること、そして、およそ水平 10° の小さな角度では、頭部と眼球の運動角度比率にばらつきが大きいことを報告している[11,12]。これは、人間の水平方向の有効視野が 15° 前後とされており、眼球移動のみで自然に認知できる境界付近であるため、頭部を動かす場合と動かさない場合が混在し、ばら

つきが大きかったと推察できる。

しかし、これらの報告は、自動車走行時の動的環境における視対象の認知過程での、頭部と眼球の運動特性を検討したものではなく、静的環境における単純な記号の視標を用いた検証であるため、動的環境である車室内の情報呈示に対する認知行動特性とは合致しない可能性がある。運転時は外部環境を観察し、予期できない外界の対象を認知しながら運転操作を行うため、「広範囲に注意を広げあらゆる対象にも対応できる構え」が必要だが、車室内の呈示情報を取得する場合は、位置や情報がおおよそ決まっている対象を認知するため、「ある程度狭い範囲に注意を向け、運転を妨げないようにできるだけ短時間で内容を理解する構え」が必要、と考えられる。ただし、走行環境の違いが、これらの心理的な構えにどの程度影響するのかは明確ではない。例えば、速い車速での走行時は、対象の位置変化が大きいこと、衝突した時のリスクが高いこと、あるいは有効視野が狭窄すること[13]などから、圧迫感が増加し、前方への注意が高まることが予想される。また、中島らは視線のみを向ける視認と、頭部と視線を協調運動しながら向ける視認を比較し、頭部を向ける方が、視覚処理が促進されることを報告している[14]。これらのことから、走行環境によって、認知における頭部と眼球の運動角度に影響を及ぼす可能性があり得る。すなわち、走行環境によって、前方に強く注意を向ける必要がある際に周辺対象を認知する場合は、できるだけ短時間でその対象をみるため眼球運動を主に用い、前方にさほど強く注意を向ける必要がない場合には、周辺対象を十分に認知するために頭部運動を主に用いてその刺激を観察すると考えられる。

そこで第4章では、実際の自動車運転時の環境に近い動的環境での認知行動における、頭部と眼球の運動角度特性について検討した。運転負荷の異なる実験条件として、車線数と車速の異なる視覚刺激動画と、そのシーンで不規則に人や車が登場する、不安感のある動画を準備した。その動画を観察する被験者に、周辺の視標刺激に対する認知課題を与えた基礎実験（実験2-①）と、さらに運転操作課題を加えた実車実験（実験2-②）にて、頭部と眼球の運動角度特性（以下「頭部角」、「眼球角」とする）を調べ、それらの関係を定量的に明らかにすることを目的とした。

本章の一部は、日本バーチャルリアリティ学会で発表した研究成果に基づいている[24]。

4.2 基礎実験（実験2-①）

4.2.1 実験概要

自動車運転シーンを模擬した視覚刺激（オプティカルフロー，以下「OF」とする）に固視点と文字視標を重畳した動画を被験者に呈示し，文字視標を視認し回答させる課題を与えた．本実験では，画面中央に固視点を設け，周囲の視覚像の遠近法の消失点とその点とほぼ同位置になるように調整した．単位時間あたりの刺激の移動量が大きいほど OF が大きいと定義する．例えば，シミュレーションの走行車速（以下「車速」とする）が速い場合がそれに該当する．今回，OF 量の大小条件としては車速の違い，走行シーンの条件としては，a)車線数の違い，b)人や車の有無，c)トンネルもしくは並木道，といった条件の異なる動画を作成した．そして，これらの走行シーン動画を観察する中で，周辺視野に呈示される視対象を頭部と眼球を動かして視認する行動認知課題を課し，その時の頭部角と眼球角を計測した．

4.2.2 実験装置

実験装置は，被験者に視覚刺激を呈示する大型ディスプレイ（SHARP, 70 型），刺激呈示を制御するパソコン，動画再生装置からのトリガー信号出力装置（Contec DIO-0808TY-USB），頭部方向調整用のレーザーポインタ，眼球運動計測装置（EyeSeeTech, EyeSeeCam），トリガー信号受信装置（EyeSeeTech, Sync-Box TN1501），頭部運動計測装置（Motion Analysis Hawk）から構成された．眼球運動計測装置は，小型カメラ，ハーフミラー，赤外線照明から構成され，被験者の頭部にバンドによって固定された．この装置は，ハーフミラーを介して赤外光を眼球に照射し，カメラによって眼球像を記録し，画像処理により瞳孔および角膜反射像を検出し，眼球位置を出力する．頭部運動計測装置は，専用のキャプチャーカメラで頭部に5か所装着した反射マーカー（球体，直径 10 mm）を追跡し頭部位置の3次元位置を出力する．刺激の呈示と眼球運動データ，頭部運動データの同期は，動画再生時にトリガー信号を出力し，眼球，頭部運動の各計測装置でそれぞれ受信する構成とした．動画再生とトリガー信号との時間差は，眼球運動計測装置の視野映像を画像解析し，後処理で時間補正した．データの解析はすべてオフラインで行われた．これらの装置は暗室ブ

ース内に設置されたため、被験者はディスプレイ上の刺激以外は、何も見えなかった。眼球運動計測装置、頭部運動計測装置のサンプリング周波数は、それぞれ 120 Hz と 60 Hz であった。

4.2.3 実験方法

被験者はディスプレイの正面の視距離 1000 mm 位置に着座し、走行動画を観察した（図 4.1）。その際、自ら運転するイメージを持ち安全な走行を保ちながら正面の固視点の周辺を見るよう教示した（運転タスク）。それと同時にディスプレイ中央の固視点中心から水平方向に、 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ のいずれかのランダムな 6 位置に各 2 回、ひらがな 1 文字を、視標呈示開始から次の視標呈示開始まで 5.3 秒の間隔（ただし、1 つ目の文字呈示のみ 10 秒後）で合計 12 回呈示した。これを 1 トライアルの実験とした（走行動画は約 1 分 14 秒間である）。そして文字が呈示されたらなるべく正確に視線を向けて読みあげるよう教示した（文字認知タスク）。この際、運転のイメージを常に持ち、安全な走行を保ちながら普段の運転時の脇見をイメージし、頭と眼を自然に動かして対象を見るよう教示した。また、文字を読む時以外は頭部が正確に正面を向くよう、頭部に固定したレーザーポインタを正面の固視点に合わせるよう指示した。

図 4.3 に実験刺激の流れを示す。走行シーンによりシミュレーションした車速は 0~240 km/h の 5 段階であった（0, 30, 60, 120, 240km/h）。走行動画は市街地（片道 1 車線、片道 2 車線）および高速道路（片道 2 車線の並木道、トンネル道）の直進走行シーンを用いた。これらはドライビング・シミュレーター（以下「DS」と称する）のバーチャル道路地図映像データから抜粋した。各走行シーンに対し、5 段階の車速を各 3 回、合計 15 トライアルの走行動画をランダムな順に観察させた。呈示文字の位置、種類もランダムに組合せた。走行動画に重ねて呈示されたひらがなは、不連続な線の組合せからなり、輪郭のみでは容易に判断できない文字（あ、な、ほ等）を選定した[25]。また、走行車線の消失点が隠れないよう固視点は白丸半透明（直径約 23 mm）とした。被験者が視標を認知するには、まず文字の出現に周辺視で気づき（第一段階）、次によく見えるよう眼や頭を動かして中心視で見る（第二段階）、という 2 段階があると考え、それぞれの段階での文字サイズを変化させた。第一段階では、水平 10° 、 20° 、 30° の位置でそれぞれ、視角 47.1 分、94.2 分、189.6

分 (0.78° , 1.57° , 3.16°) のサイズで刺激を呈示した。これは、各位置での視力を同等にすることを意図し、水平 10° の文字サイズに対し、 20° , 30° 位置のサイズは網膜上の各位置における視力の逆数の比率 (2 倍, 3 倍) となっている (図 4.2) [22]。そして次の第二の段階では中心視で指標を観察すると考え、呈示位置による視距離の違いを考慮し、視角が同じになるよう画面上の文字サイズを調整し、水平 10° , 20° , 30° 位置でそれぞれ、27.4 mm, 28.7 mm, 31.2 mm とした。

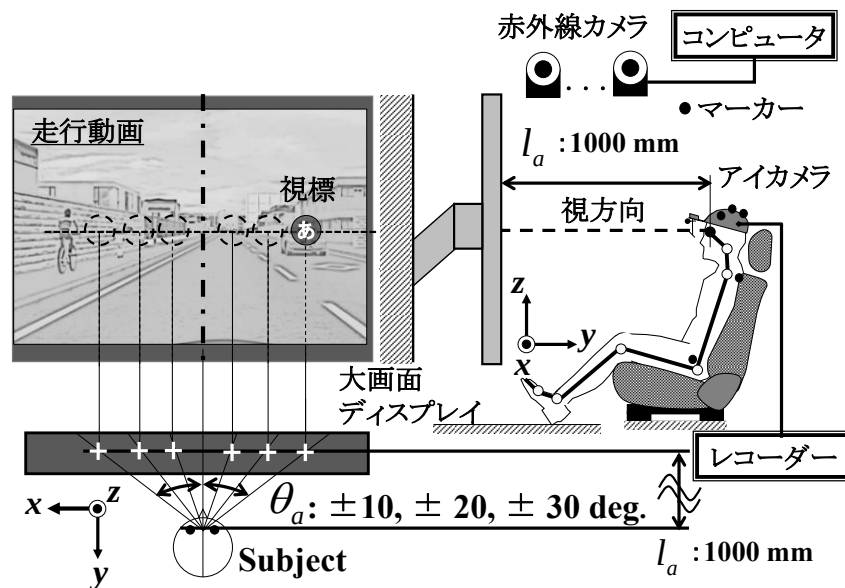


図 4.1 実験装置の概要 (頭部と眼球の角度特性計測)

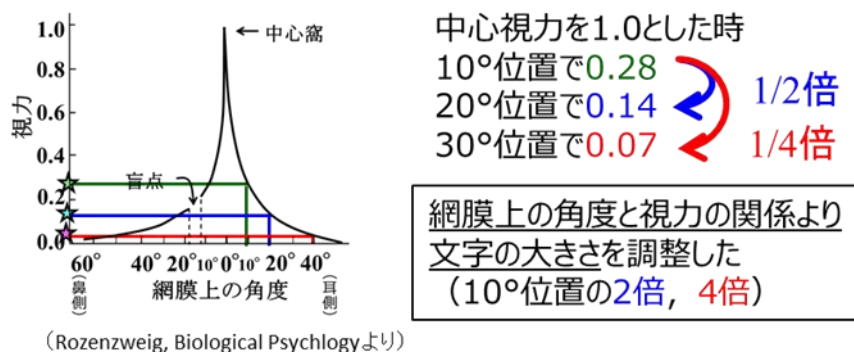


図 4.2 網膜上の位置と視力の関係

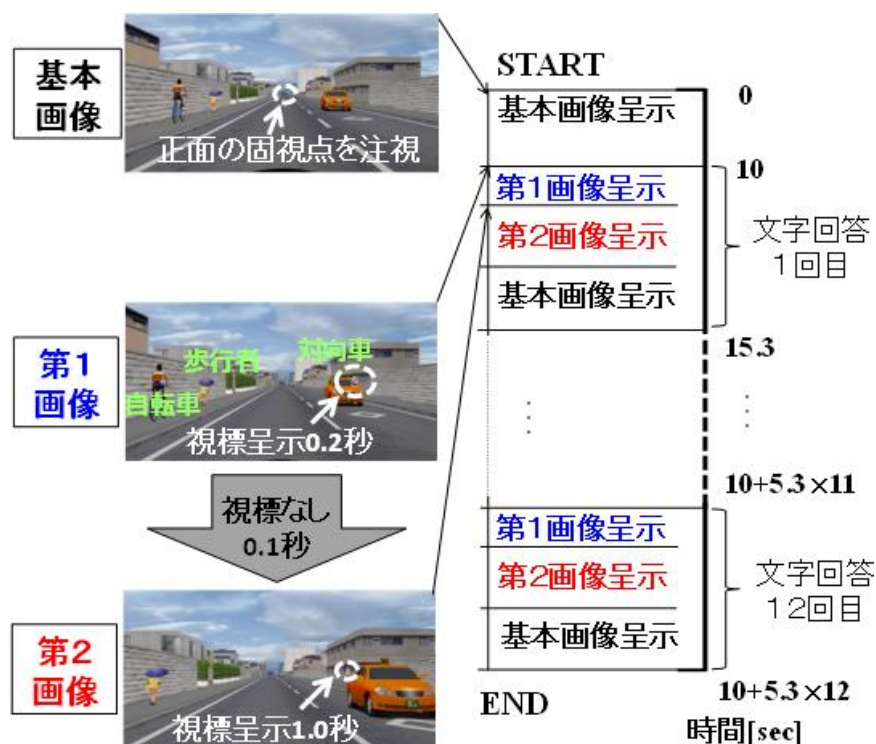


図 4.3 1 トライアル中の刺激呈示の流れ

図 4.3 における映像の内訳は、「基本画像」が提示文字のない 4.1 秒の映像、「第 1 画像」が第一段階の文字提示 0.2 秒の映像、「第 2 画像」が第二段階の文字提示 1.0 秒の映像（合計 5.3 秒）、である。被験者は、裸眼または矯正による正常視力を有する成人（30~40 代の成人、男性 4 名、女性 1 名）であり、実験目的についてはナイブであった。なお、全ての被験者には実験に先立ち実験内容を書面にて説明し、インフォームドコンセントを得て実験を行った。

図4.4、図4.5に被験者に呈示した走行動画の例を示す。図4.4の左上図が市街地片道1車線において人や車が登場しない動画、右上図が同じ道路環境で人や車が登場する動画（以下、「人車なし」、「人車あり」）である。左下図、右下図は、市街地片道2車線において、それぞれ人車なし、人車ありの動画である。「人車あり」刺激では、人、自転車、オートバイ、自動車ランダムに登場し、人や自転車が車道にはみ出して危険に感じるシーンも時折発生させた。また、自車は常に左レーンの走行車線を走行し、自車より遅い車は存在しない設定とした。図4.5の左図が高速道路の並木道、右図がトンネル道である。図中の青線は代表的なOFの方向成分を簡易的に示したもので、実際の呈示動画には表示されない。

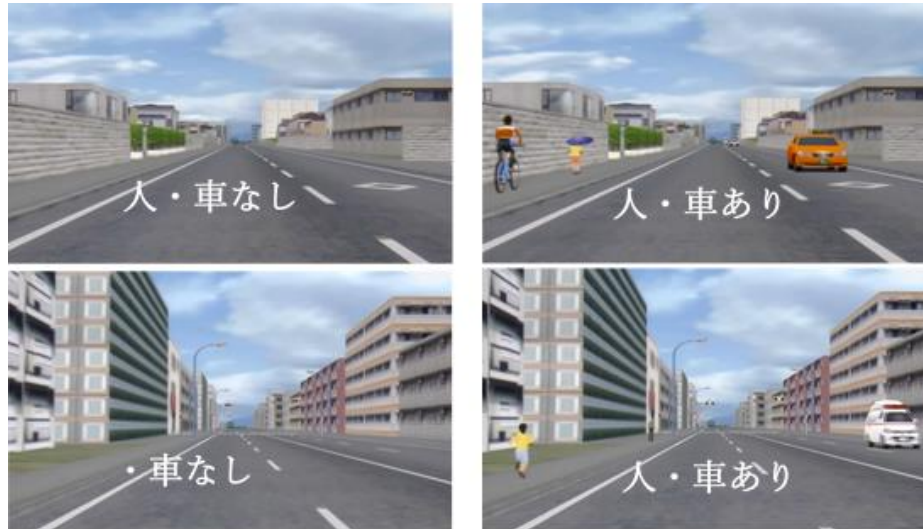


図 4.4 市街地走行シーン例（上段：片側 1 車線，下段：片側 2 車線）

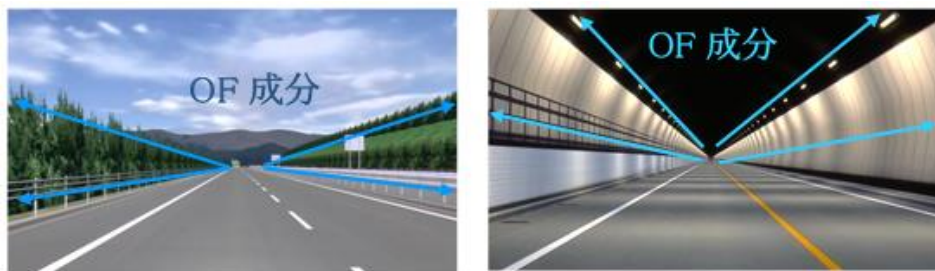


図 4.5 高速道走行シーン例（左図：並木道，右図：トンネル）

4.2.4 実験結果

図 4.6 に本実験の視認行動における頭部と眼球の運動軌跡の例を示す（40 代男性，市街地 1 車線，人車あり）。図 4.6 より，頭部と眼球が協調運動して視認する状況がわかる。指標出現を知覚すると，まず眼球が呈示角相当の大きさに動き，少し遅れて頭部が指標側に動くと同時に，眼球が頭部と逆方向に動く。そして自然に対象を認知できると感じる頭部と眼球の位置で回転を止め，眼球を停留させて呈示文字を確認する。その後，再び視線を正面に戻している。この眼球と頭部の運動特性は他の被験者も同様であった。

また，人間の単語同定に必要な注視時間は平均200～250 msecであり，そのうち眼が同じ位置に停留する最初の約80 msecで，認知に必要な視覚情報を獲得するといわれている[26]。そこで今回，頭部角と眼球角の大きさは，この認知条件を満たす眼球停留区間の内，頭部角のピーク直後から100 msecを平均した。

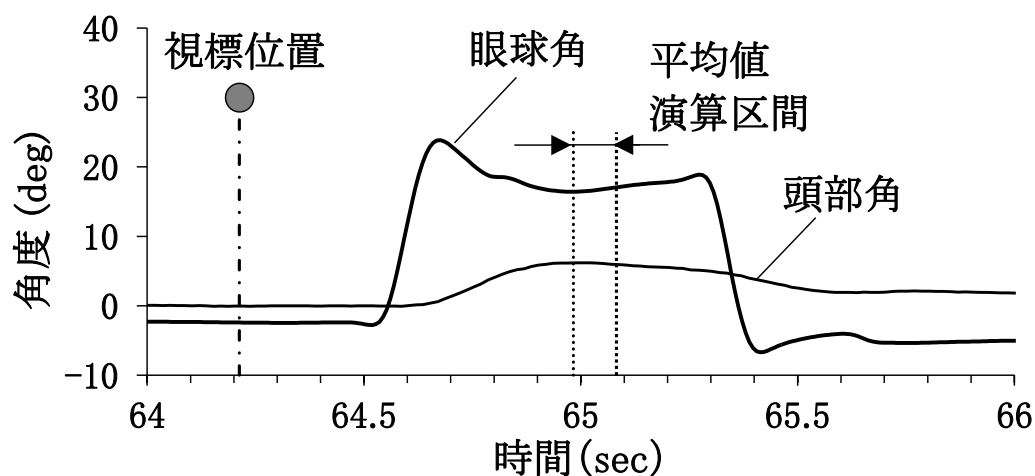


図 4.6 頭部と眼球の角度軌跡の例（視標位置：30°）

図 4.7 の a) ～f) に、図 4.4, 図 4.5 にて示した 6 つの走行シーンである、市街地 1 車線 (人・車なし)、市街地 2 車線 (人・車なし)、市街地 1 車線 (人・車あり)、市街地 2 車線 (人・車あり)、高速道並木道 (人・車なし)、高速道トンネル (人・車なし)、における、頭部と眼球の運動特性の被験者 5 名の平均値を示す。図中の各シンボルは刺激の呈示角度 (▲: 10°, ○: 20°, ■: 30°) に対応し、図の横軸はシミュレーションした走行速度、縦軸は眼球角 (左図)、頭部角 (中央左図)、合計角 (中央右図)、頭部の角度比率 (右図)、エラーバーは標準誤差を示す。中央右図の実線は、頭部角と眼球角を足し合わせた合計角で、破線は補正呈示角 (実効値) で、頭部の回転および並進による眼球位置の移動を考慮し補正した (A.付録参照)。大きさの同じ左右の呈示角の結果は共に符合をプラスとし平均した。頭部の角度比率とは、頭部角を合計角で除算した値の百分率である。

本実験では、第 2 画像のひらがな文字呈示を判読に十分な 1.0 秒間行い、文字をできるだけ正確に視線を向けて読みあげるよう教示したため、文字視認時の正答率は見逃し (眼球角の変化なし) を含めて 99.3% であった (被験者 5 名の文字呈示の総数 5400, 見逃し総数 39 より)。第 1 画像は周辺の呈示で 0.2 秒と短時間であったため、観察者の内観として、その段階で文字を正確に判読することは不可能であった。また、見逃し時のデータは、結果から除外した。

図 4.7 の中央右図で示した呈示角 10°, 20°, 30° における眼球と頭部の合計角は、走行シーンや車速の違いに拠らずほぼ一定値となることがわかる。ただし、指標呈示角度とは必ずしも一致していない。この原因の一つは、刺激設定時の角度と、実際に測定された頭部、眼球角度の幾何学的関係に由来するものであり、頭部の回転中心が両眼間の中点 (刺激角度の基準位置) より後方にあることと、回転に伴う頭部の並進位置変化によるものである。頭部回転、および並進から補正した刺激呈示角の実効値を破線で記載した。この値は、実際の頭部、眼球の測定値の合計に近づくが、差がみられた。その原因として、今回の文字認知課題では、対象を必ずしも視野の中心で捉えなくとも認知できている可能性が考えられる。参考までに、補正呈示角の演算方法の詳細は、本章の最後の A.付録に記載する。

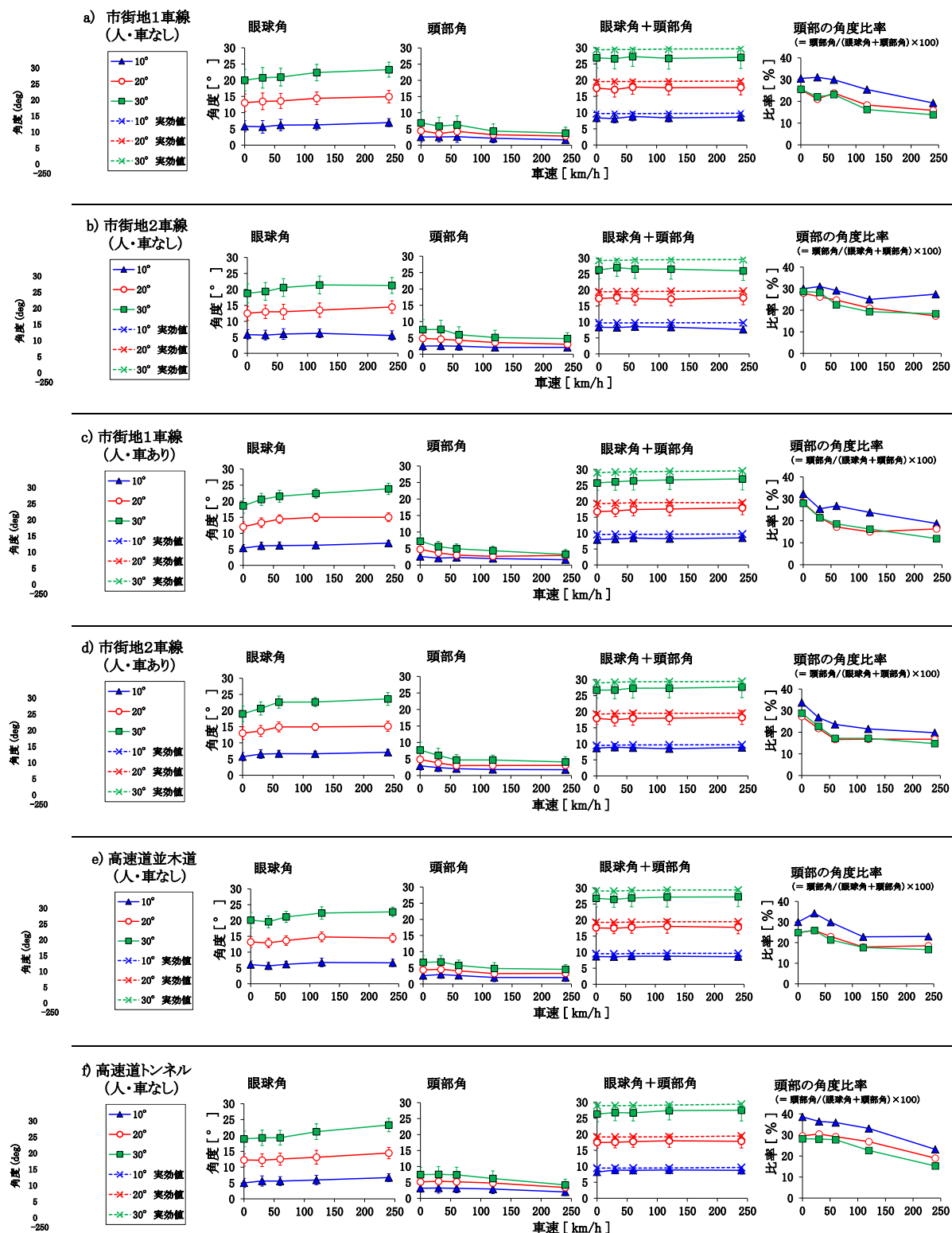


図 4.7 走行シーンごとの眼球と頭部の協調運動特性まとめ

(被験者 5 名平均. 左から, 眼球角, 頭部角, 合計角, 頭部の角度比率)

4.2.5 呈示角および車速の効果

図 4.7 より、全走行シーンにおいて、刺激の呈示角度が大きくなると、頭部角と眼球角が大きくなることが明らかである。全走行シーンにおいて、車速が大きくなるほど、視線移動量における眼球角の比率が大きくなり、頭部角の比率が小さくなる傾向がみられた。

これは、高速走行時には、運転操作ミス、あるいは周囲環境（人、車）の動きに対する反応の遅れが、重大事故に繋がる危険性が高いため、短時間で認知処理を完了させる必要があるのに対し、人の認知処理過程は、対象を周辺視野内で知覚した後、さらに視線を移動して中心視で捉え（網膜の中心窩を向ける）、脳の働きで内容を理解するため、この周辺視で知覚してから中心視で対象を捉えるまでの時間を短縮するように行動したと考えられる。眼球は頭部より重量が軽いため、移動速度が速いことが知られている。自然な認知行動における眼球と頭部運動の速度目安は、眼球運動が毎秒 500° 以下、頭部運動が毎秒 70° 以下であり[27,28]、無意識に頭部より移動速度が速い眼球運動の比率を増し、認知効率を高めた、と解釈できる。

これらの傾向を統計的に検討するため、頭部、眼球運動データに対し、3 要因（呈示角、OF 速度、走行シーン）の分散分析を行った。その結果、呈示角の主効果は眼球角、頭部角で有意 ($F(2,410)=196.7, p<.01, F(2,410)=9.3, p<.01$)、OF 速度の主効果は眼球角、頭部角で有意 ($F(4,410)=4.5, p<.05, F(4,410)=4.9, p<.01$)、呈示角と OF 速度の交互作用は眼球角、頭部角で有意 ($F(8,410)=5.5, p<.01, F(8,410)=6.4, p<.01$) であった。下位検定の結果、眼球角、頭部角ともに、呈示角 20° において、OF 速度 0 km/h に対する 240 km/h の条件で有意 ($F(2,120)=3.2, p<.05, F(2,120)=3.1, p<.05$)、呈示角 30° において、OF 速度 0~30 km/h に対する 120~240 km/h の条件で有意 ($F(2,120)=10.2, p<.01, F(2,120)=11.4, p<.01$)、であった。

走行シーンの主効果は眼球角、頭部角において有意差は認められなかったが ($F(5,410)=0.636, p>.1, F(5,410)=0.542, p>.1$)、走行シーンと OF 速度の交互作用は、眼球角で有意傾向 ($F(20,410)=1.5, p<.1$)、走行シーンと呈示角と OF 速度の交互作用は、眼球角で有意、頭部角で有意傾向 ($F(40,410)=1.8, p<.01, F(4,410)=1.4, p<.1$)、であった。下位検定の結果、呈示角 30° において、走行シーンと OF 速度要因の効果が、眼球角で有意 ($F(20,120)=2.9, p<.01$) であった。

4.2.6 走行シーンの効果

前節で述べたように、走行シーンと OF 速度の交互作用が眼球角において、統計的にその効果が認められた。そこで、走行シーンによる背景刺激の効果を明確にするため、呈示角ごとに走行シーンの眼球角を重ねた結果を図 4.8 に示す。図の横軸はシミュレーションした走行速度、縦軸は眼球角である。図 4.8 より、全呈示角において、高速道トンネル、市街地 2 車線・人車なしで眼球角が小さく、市街地 1 車線・人車あり、市街地 2 車線・人車ありで眼球角が大きい傾向がみられた。

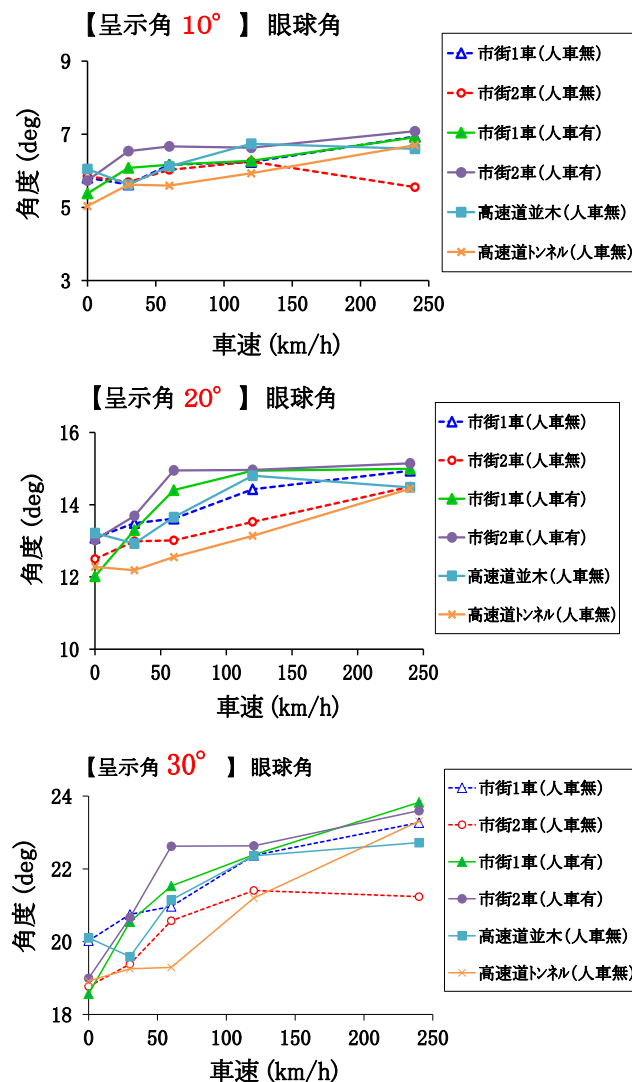


図 4.8 各呈示角での眼球角の比率

(上段：10° 呈示，中段：20° 呈示，下段：30°)

4.2.7 考察

基礎実験（実験2-①）の結果より，運転シミュレーション速度が速い時，すなわち運転タスクにかかる負荷が大きく，周辺の対象を素早く認知する必要がある場合は，頭部より眼球運動が増加する傾向があることが明らかになった．先に述べたように，この原因の一つは，頭部と眼球の重量差による，運動速度差が考えられる．また，対象が身体の正面から大きく離れた 30° 位置の認知行動では，遅い車速（ 30 km/h 以下）と，速い車速（ 120 km/h 以上）において，また 20° 位置でも，停車時（ 0 km/h ）と超高速（ 240 km/h ）において，頭部と眼球の運動角度特性に有意差があることが示された．

走行シーンの違いによる影響としては， 30° 位置で OF 速度に対する眼球の運動角度特性に有意差があることが示された．そして図 4.7 より，高速トンネル，および市街地 2 車線・人車なしでは眼球角が小さく，市街地 1 車線・人車あり，市街地 2 車線・人車ありで眼球角が大きい傾向がみられている．つまり，対象が少なく外界に対する認知負荷が少ないときに眼球角が小さくなったと考えられる．この結果は，自動車コックピット内の情報呈示デバイスへの適用において重要である．

4.3 ドライビングシミュレータ実験（実験2-②）

4.3.1 実験概要

基礎実験（実験2-①）では、運転時において周辺に呈示される刺激に対する認知行動（頭部および眼球運動）の特性を調べた。実験2-②では、Driving simulator（以下 DS）を用いて実際の運転環境に近い状態で、実験2-①と同様な実験を行い、実際の緊張感や注意分散に近い状態で、周辺に呈示される視覚刺激に対する認知行動（頭部および眼球運動）の特性を調べた。被験者の課題は、大型スクリーンに表示した高速道路を指定車速（0, 40, 100, 160 km/h）で走行しながら（運転タスク）、左前方に設置した小型ディスプレイ画面に呈示される4文字熟語を回答すること（文字認知タスク）であった。ただし、車速0 km/hの時は、アクセルペダルの操作は行わない。そして、走行シーンは片道2車線の高速道路の並木道とした。

4.3.2 実験装置

実験装置は、被験者に走行映像を呈示する大型スクリーン（縦2000×横5600 mm サイズ）、プロジェクタ（Canon SX7）、DS制御用PC（HP XW6600 Workstation）、実車（車種アクセラ、右ハンドル車）、車載CAN（コントローラエリアネットワーク）とDSとの接続装置、眼球運動計測装置（EyeSeeTech, EyeSeeCam）、頭部位置計測装置（ビデオカメラ Sony HDR-CX675、マーカー板）から構成された。実車のアクセル開度、ハンドル角などの制御信号が同期してDSの車速やステア角に反映された。また、被験者の頭部に設置したマーカー板を後方からビデオ撮影し、マーカーの重心座標の変化量を画像解析して、頭部角、頭部座標を後処理で求めた。実験室の照明を消してDSを操作することで、運転している没入感を十分得られる環境とした。

4.3.3 実験方法

実験環境のシステムと実験方法の概要を図 4.9 に示す。被験者は大型スクリーン正面に設置した実物の自動車の運転席に着座し、エンジンをかけ、自らのアクセル操作によって DS 上で指定の車速を保った。実物の自動車を用い、車室内空間の運転席視界でアクセル操作を行わせることで、なるべく運転時に近い環境を再現することを意図した。この時、車のシフトは DS の機構上、常にニュートラルにして実験を行ったが、AT（オートマ）車による定常走行時の認知を想定しているため、運転中にシフト操作を行わないことによる運転感への影響はないものと考えた。そして、DS の車速は、実際のアクセル開度データを車載 CAN(Controllor Area Network の略。少ない配線で高速かつ確実な通信ができるシリアル通信プロトコルのこと。主に複雑な ECU 制御が必要である自動車に用いられる技術)から出力し、そのアクセル開度から演算した仮想車速を同期してメーターに表示させた。

次に、小型ディスプレイに 4 つの 4 文字熟語からなる 4 行の文字が、トリガー音とともに 6 秒間隔で 40 回呈示された(図 4.9 左下)。その呈示位置は、被験者の両眼の中心から、前 715 mm、左 370 mm (355~385 mm)、下 178 mm、水平左方向 $26.4\sim 28.3^\circ$ 、垂直下方向 14° とし、文字の垂直方向の大きさは 8.3 mm (画角 17.2 分)とした。これらの数値はナビゲーションシステムの平均的な位置、文字サイズを想定して決定した。

実験者はその熟語呈示の約 3 秒前（トリガー音の合間）に、一つの行番号を被験者に口頭で指示し、被験者は刺激呈示後に指定された行の熟語を読み上げた。

OF により模擬された車速は 0, 40, 100, 160 km/h のいずれかであった。被験者には、トリガー音が鳴り刺激が呈示されたら、速やかに、なるべく正確に視線を移動し、熟語を読み上げるよう教示した。また、実験 2 では、4 文字熟語の読み上げを行うことができる場合は、確実な注視が達成されていたと考え、熟語としての読み方を間違った場合も、文字としての認識は正しくしたとみなし、データから除外しなかった。

実験には被験者 3 名（実験 1 を行った A, B, C）が参加した。なお、被験者には実験前に実験内容を書面で説明し、インフォームドコンセントを得て実験を実施した。

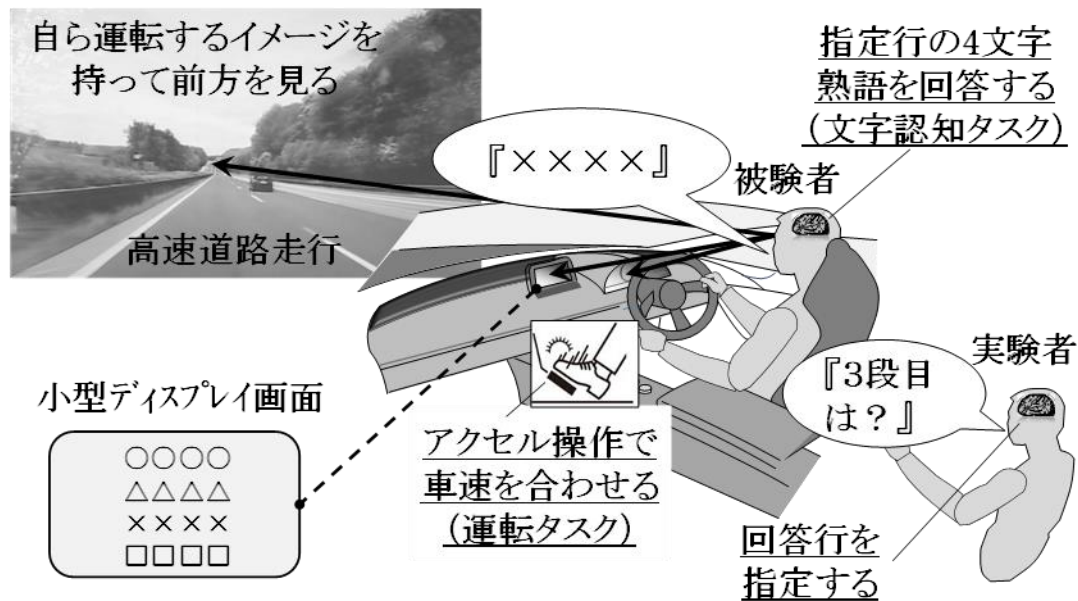


図 4.9 実験 2-②の実験装置概要
(実車コックピットを用いた DS 装置)

4.3.4 実験結果と考察

頭部と眼球の運動特性の被験者 3 名の結果を図 4.10 に示す。各図の左グラフが実験 2-② (DS) の結果、右グラフが実験 2-①の、同じ被験者、同じ道路条件 (高速道路の並木道) の結果である。横軸はシミュレーションした走行速度、縦軸は眼球角または頭部角、バーは標準偏差を示す。また、実験 2-②では対象が全て左側に呈示されたので、左方向の角度を正とした。今回、実験 2-①の呈示角 30° (ひらがな 1 文字呈示) の条件と、実験 2-②の呈示角 $26.4^{\circ} \sim 28.3^{\circ}$ (漢字 4 文字熟語呈示) の条件は、ほぼ同程度なので、比較可能と考える。

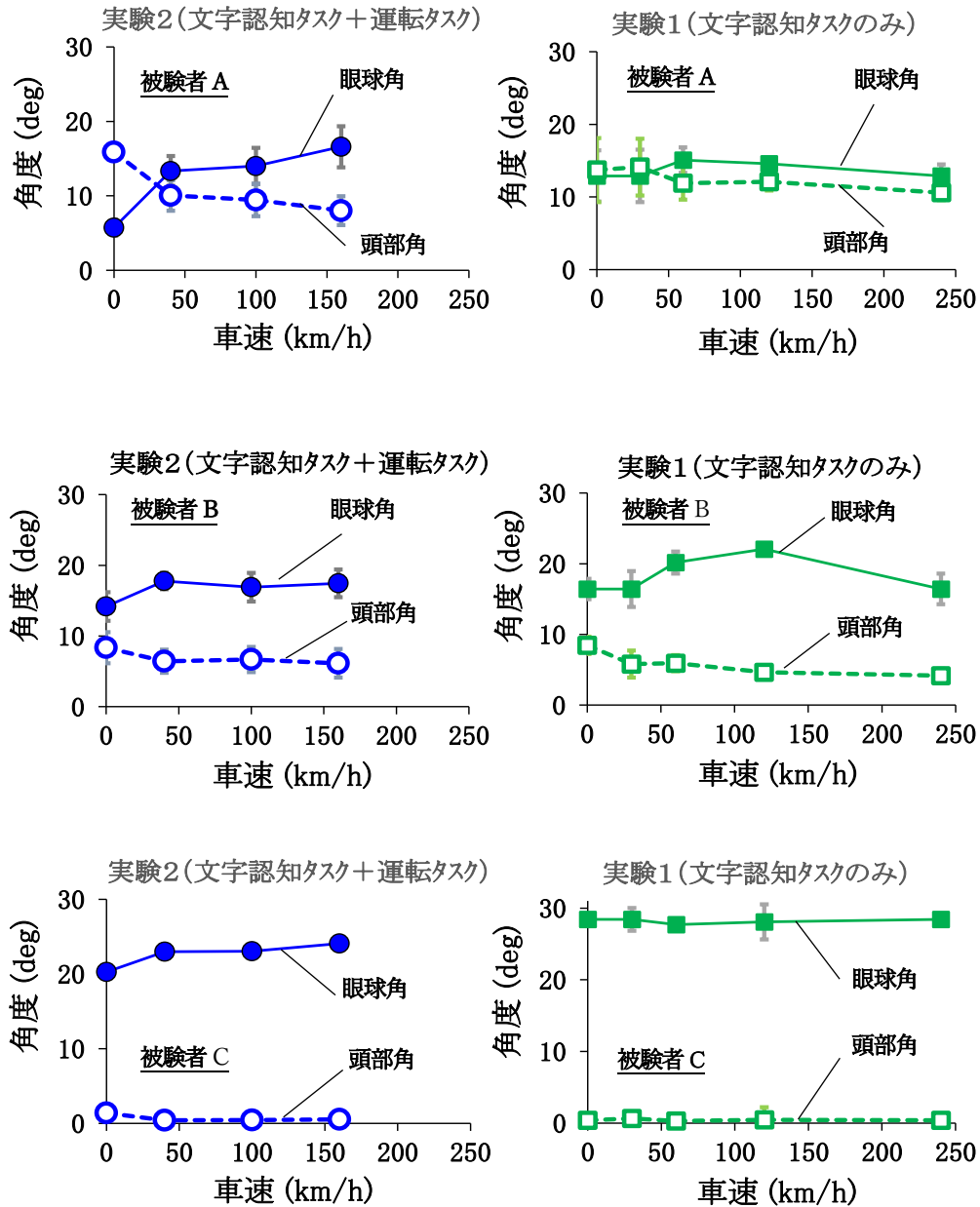


図 4.10 被験者ごとの眼球と頭部の角度特性の結果
(左図：実験 2-② (DS 実験), 右図：実験 2-① (基礎実験))

次に、これらの被験者3名に対し、実験2-②の結果（実際の自動車運転環境を模擬したDS実験）が、実験2-①の結果（実験室環境での基礎実験）にどの程度整合しているかを確認するため、図4.11に縦軸を頭部の角度比率（頭部角／（眼球角＋頭部角））に変換した結果を示す。

図4.11の結果から、実験2-①で頭部の角度比率が大きい被験者は、実験2-②でも角度比率が大きい傾向にあること、そして実験2-①と実験2-②で共通して車速の増加に対し、頭部の角度比率が減少傾向にあることがわかった。これは、安全のために前方を集中して見る必要のある走行時においても、周辺の対象に注意を向ける必要があるため、なるべく効率的に認知できるように、頭部よりも動きが速い眼球運動の角度比率が増した、と解釈できる。

また、各被験者における頭部の角度比率は、実験2-①と実験2-②で類似しているようにみえる。車速0 km/hの停車時は、実験2-①に比べて頭部の角度比率がやや高い傾向がみられるが、それ以外の速度調整が必要な速度では、実験2-①に近い特性を示している。つまり、実際の自動車運転環境を模擬したDS実験により、実験2-①で得られた認知行動特性がある程度、妥当であることが示された。そのため、実験2-①の知見を用いて、実際の自動車走行時の認知行動を予測できる可能性、およびカーナビ、タコメータの位置や角度など、インテリア設計に活用できる可能性が示唆された。

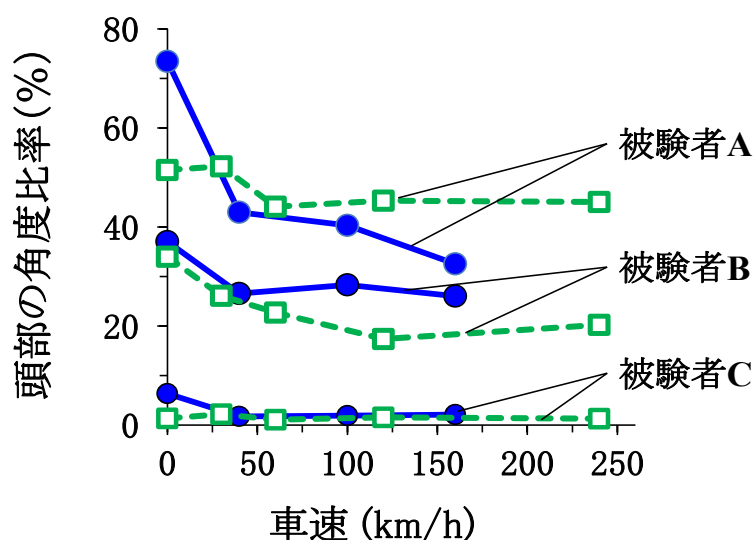


図4.11 各被験者の実験2-②と実験2-①の頭部の角度比率を比較した結果
（実線：実験2-②（DS），破線：実験2-①）

ただし、文字認知タスクとしては、実験 2-①は、正面ディスプレイに対する水平ランダム位置への視標呈示（ボトムアップ的注意）、実験 2-②では左下前方の小型ディスプレイに対する固定位置への視標呈示（トップダウン的注意）、といったタスクの質に違いがある。つまり、実験 2-①では、注意資源が広範囲に及ぶ認知であり、実験 2-②は、文字認知タスク自体は容易だが同時に行う運転タスクにより、残り少ない注意資源を特定位置に集中させる認知といった違いである。これらの違いが認知行動に影響する可能性はあるが、いずれも少ない注意資源で効率的な認知を必要とする点は共通しており、比較可能と考える。

4.3.5 結論

本研究では、自動車運転時の周辺視標に対する認知行動における頭部と眼球の運動角度特性を調べた。その結果、視覚刺激のシミュレーション速度が速くなるほど、周辺対象を見る場合の頭部運動角度が小さくなる傾向が見られた。人車の有無、空間の広がり、といった走行シーンの違いによっても、頭部運動角度が異なる可能性があることも示唆された。それらの結果から、運転のための認知負荷の増加にしたがって、周辺指標認知のための頭部運動角度が減少し、眼球運動角度が増加することが示唆された。そして、実際の自動車の運転環境に近い DS 実験においても、実験 2-①で得られた認知行動特性と同様の傾向が得られる可能性があることを確認した。

今後は、運転時の複合的なタスクの影響の検討、および、視覚刺激だけでなく、前庭・体性感覚系からの加速度情報による影響についても検討し、実際の自動車運転時の眼球、頭部運動の特性を明らかにすることが課題である。さらに、眼球構造に基づく、両眼の視線が合う空間位置であるホロプターの検討も進め、本結果による認知行動特性と統合し、自動車運転時の認知モデルを構築し、それらの知見を効率的な車内情報呈示手法の確立につなげていく。本研究の結果から、認知負荷の違いによって物理的には同じ位置に呈示される視覚対象を認知する際の頭部と眼球運動比率が変化することが明らかになった。この知見は、DS など各種シミュレータの設計など、バーチャルリアリティ分野における重要なテーマの一つである臨場感の定量的評価手法の提案につなげることができるかもしれない。すなわち、認知行動における頭部と眼球運動を計測することにより、観察者の環境に対する没入感、臨場感を定量化できる可能性が考えられる。

4-A. 付録

4-A.1 補正呈示角（実効値）の演算方法

本実験では、頭部を拘束しない認知行動計測であるため、視標の認知する際に、頭部は首を支点に水平回転運動、および並進移動が同時に行われる。水平回転により、眼球位置は正面注視時より、左右方向では指標側に、前後方向では後ろ側に移動する。並進移動に関しては、山田らは、頭部が視標方向に平行移動することを報告している[29]。

このように、眼球位置が移動することにより、視標の呈示角は、補正呈示角（実効値）に変換する必要がある。参考まで、その補正呈示角の演算方法を図 4.12 に示しておく。

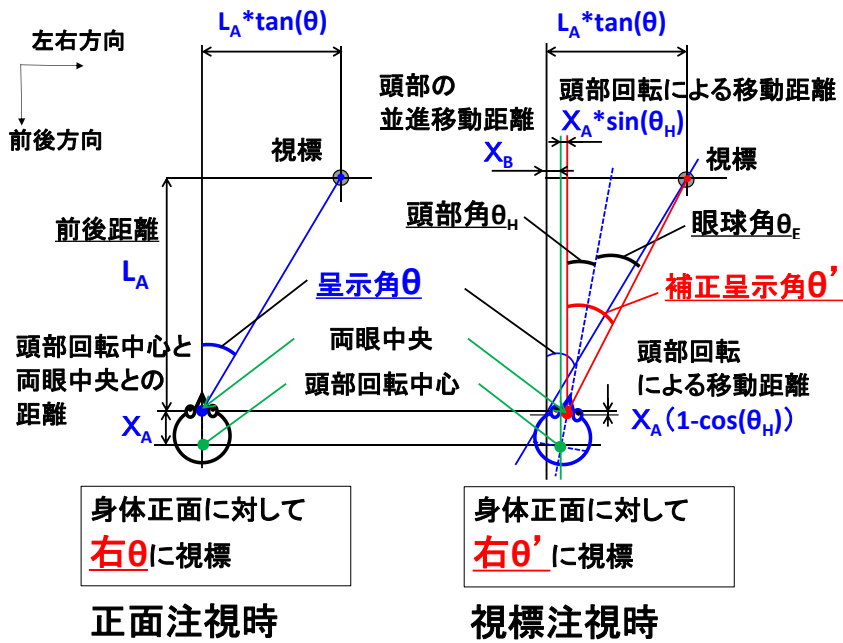


図 4.12 補正呈示角(実効値)の演算方法

(左図: 正面注視, 右図: 視標注視)

補正呈示角 θ' は以下の演算式により求めた。

$$\theta' = \tan^{-1} \left(\frac{L_A \times \tan(\theta) - X_A \times \sin(\theta_H) - X_B}{L_A + X_A(1 - \cos(\theta_H))} \right)$$

θ : 呈示角, θ_H : 頭部角, θ_E : 眼球角 (deg)

L_A : 前後距離 (mm)

X_A : 頭部回転中心と両眼中央との距離 (mm)

X_B : 頭部の並進移動距離 (mm)

$X_A = L_H / \pi \times (1 - \beta)$ (mm),

頭囲 L_H : 580 mm, 頭部回転中心係数 β : 0.33

$X_B = \theta_H \times \alpha$ (mm),

並進移動係数 α : 1.0 mm / deg

頭部回転中心は、頭部後端から頭幅の 3 分の 1 の位置とし(β), 頭囲は一般成人男性平均値とした。今回、補正した呈示角は、計測結果の妥当性を確認するために演算した参考値である。頭部回転中心位置は一般成人男性の平均的な指標から求め、並進移動係数 α は推定値である。

第5章 外乱刺激入力による眼球運動への影響（実験3）（非公開）

※ 学会未発表の内容が含まれるため非公開

元論文の第5章は、以下3つの実験に関する内容で、構成されている。

- ・ OF 刺激有無および移動方向による眼球運動影響の実験
- ・ OF 刺激の速度による眼球運動影響の実験
- ・ 実車走行時の加減速 G 入力による眼球回旋運動への影響

第6章 総合考察

第3章から第5章の結果についてまとめる。

第3章では、眼で対象を捉えて映像として知覚するメカニズムを明らかにするため、様々な注視位置における心理物理的ホロプターの同定を行った。まず頭部が静止した状態で視線を左右上下に向けた時の、両眼対応点を測定し、ホロプター形状を推定した（静的ホロプター）。従来研究では、正面方向のホロプターについて、外側が手前に湾曲し、上方が遠方に傾いた形状の面であることが報告されているが、それ以外の視線方向とホロプター形状との関係については明確ではなかった。そこで、被験者の頭部の方向を真正面に固定した状態で、視線方向の異なる条件にて、心理物理的対応点を計測し、ホロプター形状を推定し、それらの違いの有無、およびその特徴を明らかにするため、垂直方向と水平方向のホロプター断面について分析した。その結果、垂直方向のホロプター断面は、正面0°注視条件に比べ、上方30°注視条件で上面が奥に傾き、下方30°注視条件で上面が手前に傾く傾向が見られた。この結果から、上方30°注視条件では、外回旋眼球運動が生じ、下方30°注視条件では、内回旋眼球運動が生じる可能性があると考えられた。次に、水平方向のホロプター断面は、正面0°注視条件に比べ、左方30°注視条件で右上がり、右方30°注視条件で右下がりの傾向が見られた。この傾き角の大きさについて、正面0°注視条件での実測値から幾何学的に推定される傾き角（理論値）と、実測値を比較した結果、例えば被験者 RY では、実測値は理論値よりも、左方30°注視条件で約11.2°手前側に傾き、右方30°注視条件で約8.2°手前側に傾くことが試算された。つまり、共に理論値よりも約10°、正対方向に回転した状態であった。この角度に個人差はあるものの、理論値より手前側に回転する傾向があることがわかった。以上により、静的環境において、視線方向の違いによるホロプター形状を推定できるようになった。

第4章では、自動車運転時を想定した動的環境において、周辺対象認知での頭部と眼球の運動角度特性を計測した。その結果、視覚刺激のシミュレーション速度が速くなるほど、周辺対象を見る場合の頭部運動角度が小さくなる傾向が見られた。人や車の有無、空間の広がり、といった走行シーンの違いによっても、頭部運動角度が異なる可能性があることがわかった。この結果は、運転のための認知負荷の増加にしたがって、周辺指標認知のための頭部運動角度が減少し、眼球運動角度が増加することを示唆している。

以上により、走行シーンの異なる動的環境において、頭部と眼球の運動角度特性を推定できるようになった。

第5章では、OFによる眼球運動への影響を明らかにした。回旋輻輳運動に関し、OFの移動速度の増加に伴い、より外回旋輻輳へと段階的に変化する傾向がある可能性が見られた。これは、物理的に同じ位置の視対象であっても背景刺激であるOFの移動速度の影響で見え方、すなわち、左右眼像が融合して明瞭に見える外界の空間位置（心理物理的ホロプター）が変化することを示唆している。ただし、この傾向は被験者間で異なっており、今回実験を行った被験者全員に平均データに対しては統計的な有意差は見られなかった。以上により、走行速度の異なる動的環境において、静的環境と異なる眼球の回旋輻輳運動が生じる可能性がみられ、この回旋輻輳運動の傾向をある程度推定できるようになった。

6.1 車両走行時の奥行き知覚モデル

3章から5章の結果より、自動車運転時に、何らかの情報を得るために脇見行動をするとき、頭部と眼球がどのように動き、そして眼球の網膜を介してどのように見えるか、それぞれの段階を定量化することができた。つまり、人間の協調運動特性と人間の知覚特性をそれぞれ分析した。これらの結果から、総合的に人間の見え方を予測できる認知モデルを構築することが可能であると考え（図6.1）。すなわち、実験1、2、3の結果をモデル上で統合することで、自動車走行時の奥行き知覚モデルを構築し、正確な奥行き知覚による運転し易いインテリア環境を構築できるようになる。具体的には、実験1の心理物理的ホロプターの同定結果[20]から、静的環境における視対象が正確に見える奥行き知覚面の両眼網膜対応点のリストを構築し、実験2の周辺対象認知の頭部と眼球の

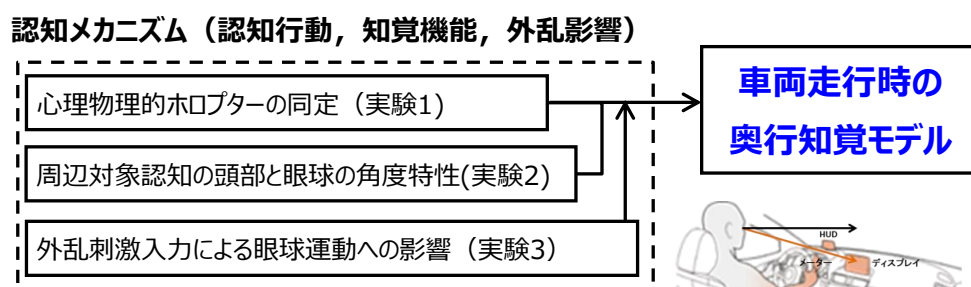


図 6.1 奥行き知覚モデルの構成イメージ

の角度特性の結果[24]により，異なる速度での走行時における視線角を推定し，上記リストに照らし，理想の奥行知覚面を推定演算できる．さらに，実験3の外乱刺激による眼球運動への影響の結果を用いて，眼球位置を補正することで，動的環境においても，理想の奥行知覚面を演算推定することができる（「奥行き知覚モデル」と称する）．

6.2 奥行き知覚モデルの適用

図 6.2 に奥行き知覚モデルの適用イメージを示す．図 6.2 の上段は，実験1の静的環境における心理物理ホロプターの計測データを用い，仮想空間の正面の注視位置に，多項式近似によるホロプター曲面を描画したものである（左図は斜方から見た図，右図は側面図）．また，動的環境においては，実験2で得られた走行シーンに応じた視線角データと，実験3で得られた眼球運動特性（眼球位置データ）を，モデル内の両眼の指定条件に反映することで，動的ホロプター面を描画することができる．

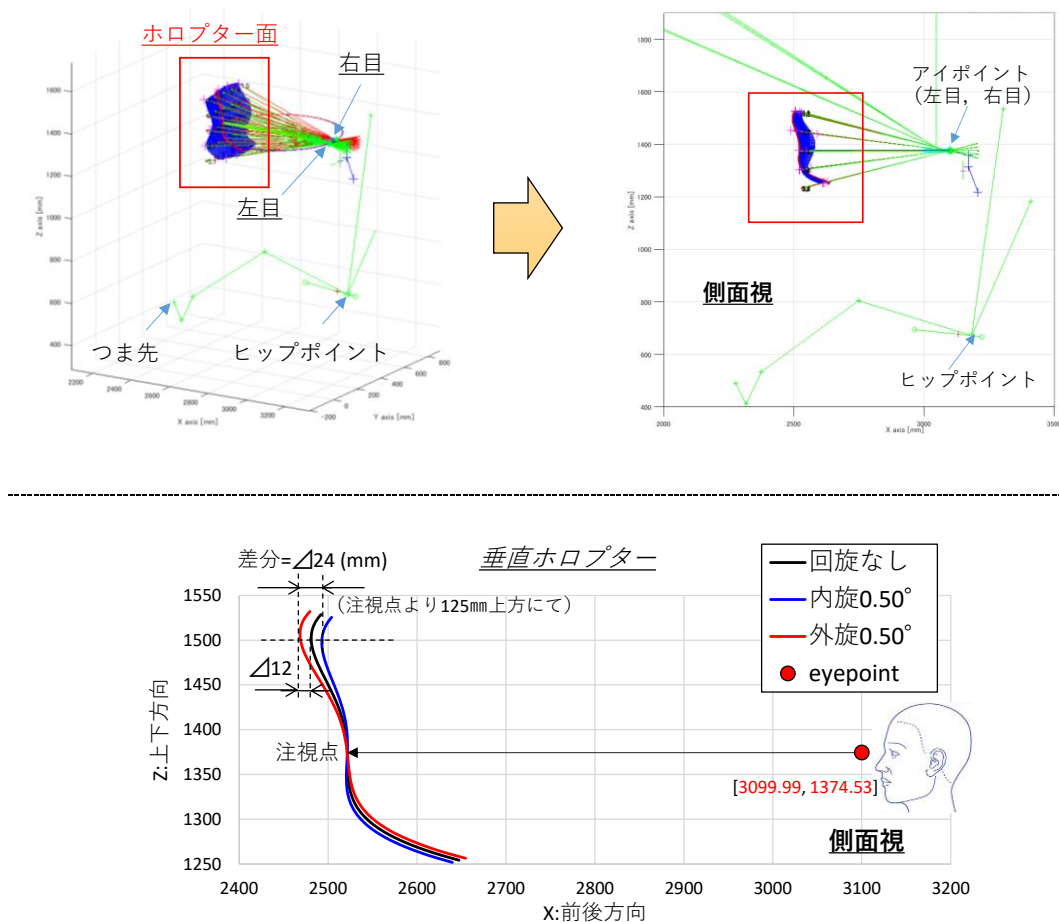


図 6.2 奥行き知覚モデルの適用イメージ

図 6.2 下段は、動的環境において眼球が回旋運動した場合のホロプター面の変化量を試算した結果である。正面注視時の静的ホロプター面に対し、例えば、眼球が 0.5° 外回旋、または 0.5° 内回旋した場合、注視点における垂直断面ラインは、眼球が外回旋すると上部が奥に傾き、内回旋すると逆に、上部が手前に傾くことを示す。また、その変化量は、注視点の 125 mm の上方の位置において、外回旋 0.5° 、内回旋 0.5° のいずれも、前後に約 12 mm ずつ、移動することが試算できた。以上のように、静的環境、または動的環境におけるホロプター面を、モデル上で推定演算することが可能となった。

ただし、眼球回旋運動特性については、まだ十分解明できていない。例えば、認知行動における頭部の傾きによる影響や、視線移動による影響など、モデル検討の際には考慮が必要である。ヒトのバランスや平衡感覚に関する様々な入力系（前庭感覚入力、視覚入力、体性感覚入力）が反射系や出力系へどのように影響するのか、

また、モデル推定では、眼間距離（瞳孔間距離）もパラメータの 1 つであり個人差も見られる。眼間距離は、成人女性が 56～64mm、成人男性が 60～68mm が目安である。実験 1 は全て成人男性が被験者であるが、女性や子供の眼間距離は、成人男性に比べて狭いことが多いため、ホロプターをモデル演算する際には注意が必要である。

6.3 ホロプター形状のナビ画面における認知性の検討（実験 4）

6.3.1 はじめに

車両運転時にカーナビの地図情報を読み取る際、ドライバーは脇見をするが、その脇見時間は短い方がより安全に運転することができる。走行中の画像表示装置の操作に関しては、自工会がガイドラインを設けている。これは各メーカーの自主対応という位置づけであるものの、カーナビが交通の円滑化に有用であることを認めつつ、一般ドライバーを守るためのカーナビの設計における基本方針をまとめたものである[35, 36]。このガイドラインにおいて、画面中心位置がアイポイントから俯角 30° 以内であることや、タスク完了までの総視認時間が 8 秒以内、といった注意事項が記載されている。しかし、1 回の脇見における許容時間については明確にされていない。しかし、米国運輸省道路交通安全局（通称 NHTSA（National Highway Traffic Safety Administration））の調査において、事故発生時の脇見時間は約 1.8 秒と報告されていること（社内報告資料による）、あるいは走行中の操作機能評価に用いられる Occlusion（視界遮断）法のシャ

ッター開時間が1.5秒と規定されていることから[37, 38], 1回の脇見時間は最大1.5秒程度と仮定し, 画像表示装置を設計すべきであると考ええる。

そこで次に, 人間の認知メカニズムの観点から, ドライバーがナビを視認する際の, 眼球の動きや反応を時系列で詳細に分析し, 脇見時間が短くなる条件について検討する。ここでは, 運転中に正面の道路を見ている状態からの脇見を想定する。まず, 視線移動して, 周辺の対象を中心視で捉える (①), そして焦点調節して像を明瞭化する (②), 次に脳内で過去の知見を比較して映像の意味を理解する (③), その後, 正面の道路に視線を戻す (④), といった4ステップが考えられる。

カーナビが本格的に市場に導入された1990年代前半では, カーナビ画面の位置は, 水平方向には現在と同様に車両の中央位置であり, 垂直方向ではハンドル中央付近の高さであったが, 脇見により安全性が低下する課題があった。そこで, 脇見時間を短縮するため, 最も効果的な上記①の視線移動を短くする手段として, 視界を妨げない範囲で, 上限近くにレイアウトされるようになった。さらに, 画面の大型化やワイド化で呈示範囲を増やし, さらに文字サイズや文字数, フォント, 輝度などのチューニングにより, 見栄え, 質感についても検討が行われてきた。また, 視線移動を短くする他の手段として, ドライバーの確認頻度が高い車速情報は, HUD 技術を用いて, ドライバーの正面の窓枠内の高さに呈示できるように進化した。

しかしながら, ドライバーへ提供される情報量は増加の一途をたどっており, 情報提供のさらなる効率化が求められている。そこで今回, ドライバーの一連の脇見行動を分析した。つまり, 運転中にカーナビを見て, 情報を収集し, 再び正面を見るまでの流れの中で, 眼球位置を時系列で分析し, 認知に必要な要素について検討した (図6.3)。

その結果, これまでは, 脇見時間の短縮のため, 主に視線の移動距離を短くする方策が検討されてきたが, 今後さらなる改善には, 対象に視点を向け, 情報の中身を理解する工程の時間短縮も必要である。つまり, 視対象の像を正確に知覚し, 脳内で経験と照らし意味付けする, といった2段階であるが, この前者の所要時間の短縮について考える。まず像を知覚する際の, 視線の収束を早めるには, 視点の揺らぎを小さくすることが大事である。そのためには, 周辺視の見える像の質を高め, 視線を狙いの位置に収束し易くする必要がある。すなわち, 焦点調整が速くなる対応が必要である。そこで本研究では, ②の焦点調節時間を短縮するための方策を見出すことを目的とする。具体的には, 対象をじっくり見た場合に, 視認し易くなる中心視の見え方だけでなく, 視線移動に伴う周辺視の見え方を改善し, 対象へ視線移動し易くするような手段を検討する。

そこで、両眼像による知覚のし易さに着目し、心理物理ホロプターの考え方から、ホロプター面沿いに情報呈示することで、瞬間的な認知性が向上できると仮定した。この仮定の妥当性を明らかにするため、ナビディスプレイの形状をホロプター沿いに曲面化した場合と、それ以外の形状で、認知時間を比較した。

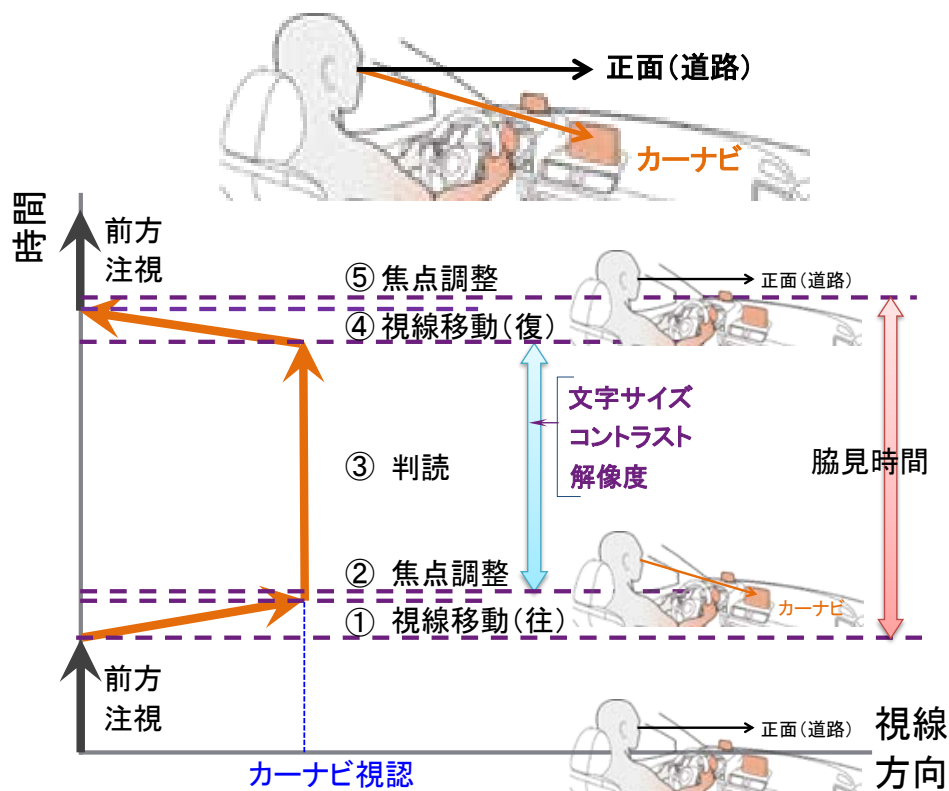


図 6.3 運転時にドライバーがカーナビ情報を取得する際の行動
および認知の流れ

6.3.2 DS を用いたナビ認知実験（実験 4-①）

(1) 実験概要

被験者は DS (Driving simulator) 用の大型スクリーンを用いて、実際の運転環境に近い状態で、周辺に呈示される視覚刺激に対する認知時間を計測した。視覚刺激は、大型スクリーンに表示される高速道路を車速 60 km/h で定常走行するときの動画であった。走行シーンは片道 2 車線の高速道路の並木道とした。被験者は、実際に走行するイメージを持ちながら、左前方に設置された、ナビ画面を想定した小型ディスプレイ画面の指定箇所（左列、中央列、右列のいずれか）の数字列を回答すること（数字認知タスク）であった。その際、被験者は眼球運動計測装置を装着し、視線角度と頭部角度を計測した。

(2) 実験装置

実験装置は、被験者に走行映像を呈示する大型スクリーン（縦 2000×横 5600 mm サイズ）、プロジェクタ（Canon SX7）、DS 制御用 PC（HP XW6600 Workstation）、実車（車種アクセラ、右ハンドル車）、眼球運動計測装置（EyeSeeCam）から構成された。そして、実験室の照明を消し、運転している没入感を得やすい環境とした。

(3) 実験方法

図 6.4 にディスプレイの傾き条件、図 6.5 に実験環境のシステムと実験方法の概要を示す。被験者は大型スクリーン正面に設置した実物の自動車の運転席に着座し、シミュレーションの並木道を 60 km/h で直進走行する動画を観察した。車室内空間の運転席視界でハンドルを握り、自ら運転しているイメージを持ちながら観察するよう教示した。次に、車両室内中央の小型ディスプレイ位置に、ナビの電話番号入力画面の印刷画像（3 行 4 列の 12 マスに、0～9 の 10 個の数字とハイフン、空欄からなる）を貼り付けた面を設置した（図 6.5 右上）。ディスプレイ中心位置は、実車（車種：アクセラ）の設置位置と同じ位置であった。また、車両のレイアウト設計時にも用いられる、アメリカの成人男性の平均とされる AM50 体型（身長 175 cm、座高 88cm、体重 78kg）を基準とした場合、ディスプレイ中心位置は、両眼の中心位置から、前方 644 mm、左方 376 mm（右端 285～左端 468 mm）、下方 189 mm（上端 127～下端 238 mm）、水平左方向は 30.3°（右端 23.8°～左端 35.9°）、垂直下方向 16.3°（上端 11.1°～下端 20.4°）であった。ただし、本実験では、日常の運転姿勢における自然なディスプレイ認知での脇見時間を計測することを目的としたため、被験者に自らシートポジションを調節して頂いており、被験者の体格やシート位置による見え方への影響は、許容することとした。解析時に考察する。ディスプレイの傾き条件は、ノーマル（量産車の設置状態のこと。水平方向の傾きは 0°、垂直方向の傾きは 4.8° 後傾）、右斜め 30°、右斜め 30° ホロプター曲面、上傾斜 10°、上傾斜 20°、上傾斜 30° の 6 条件とした。また、上記の通り、ディスプレイ中心位置は、水平左方向に 30.3° であることから、垂直軸周りに水平回転した条件は、ディスプレイ中央に向けた視線にほぼ直交するよう、右傾斜 30°（右端が奥側、左端が手前側となる向き）とした。

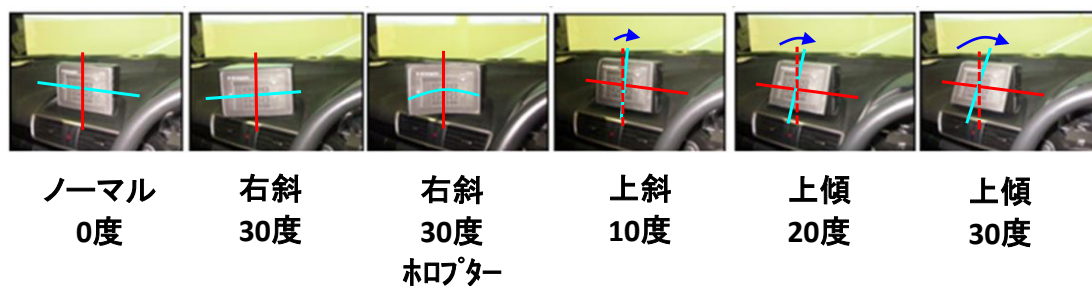


図 6.4 本実験のディスプレイの傾き条件（6 仕様）



図 6.5 実験風景とナビ画面（上段），および実験システムの概要図（下段）。

実験者は一つの列番号（1：左列，2：中央列，3：右列）を被験者にランダムに口頭で指示し，被験者は自らのタイミングでディスプレイに視線を移動し，指定された行の数字列を読み上げた．被験者には，速やかに，なるべく正確に視線を移動し，数字列を読み上げた後，視線を正面の戻すよう教示した．また，ここでの脇見時間とは，ディスプレイに視線を動かし始める瞬間から，数字を読み上げ後に正面注視に戻し終わるまでの所要時間と定義した．試行回数は，ディスプレイの傾き条件あたり各2回とした．1回の計測時間は約70～80秒で，その間に10回の読上げタスクを実施した．総計測時間は約15分，所要時間は約1時間であった．実験には被験者1名が参加した．なお，被験者には実験前に実験内容を書面で説明し，インフォームドコンセントを得て実験を実施した．

(4) 実験結果

図6.6にカーナビ画面の各設置位置における，脇見時間の結果を示す．上段が中央列の認知に要した脇見時間，下段左図が左列，右図が右列の認知に要した脇見時間である．ここでの脇見時間の定義は，正面からの視線の移動し始めから，画面の数字を読み上げ，正面への視線の戻し終わり（視線の水平方向の揺らぎが収束）までの，所要時間とした．

図6.6の上段（中央列の認知）の結果では，ノーマル条件に比べ右斜め 30° ，右斜め 30° ホロプター，上傾斜 10° の3条件では脇見時間が14%以上短くなった．上傾斜 20° ，上傾斜 30° でも8%以上短くなった．したがって，水平方向，および垂直方向にディスプレイ面を傾けることで，認知時間の短縮効果が得られる可能性が示された．

次に，この脇見時間の傾向について，統計的に検討するため，中央列の認知データに関し，ディスプレイの傾き条件（ノーマル，右斜め 30° ，右斜め 30° ホロプター曲面，上傾斜 10° ，上傾斜 20° ，上傾斜 30° ）に対する分散分析を行った．その結果，認知時間において有意差は認められなかった（ $F(5,12)=0.522, p=0.7551$ ）．

また，上傾斜 10° ～上傾斜 30° 条件のように，現状のノーマル仕様（後傾 4.8° ）よりも，さらに後ろに傾ける場合は，太陽光の反射量が増し，画面が見え難くなる背反課題が新たに加わるため，同時に対策を検討する注意がある．

一方，図6.6下段左（左列の認知），下段右（右列の認知）の結果を見ると，ノーマル条件とそれ以外の条件では，同様の脇見時間であった．

ここで，効果の大きかった右斜め 30° ，および右斜め 30° ホロプター条件の中央列の認知について理由を考察する．右斜め 30° 条件では，傾斜により中央列の距離が近

くなり認知し易くなったと考えられるが、一方で同様に距離が近くなった左列の認知では、ノーマル条件と協見時間に差が見られないため、単純に距離の影響だけではなさそうである。また、ノーマル条件の中央列の認知に要する協見時間が1.05秒、左列は0.83秒、右列は0.78秒であることから、中央列は極端に協見時間が長いことがわかる。おそらく、左列、右列は枠に沿って見ることで比較的認知が容易であるが、中央部は明確な基準線が無いためと考えられる。その点、右斜め30°ホロプター条件は、曲率の中心に視点を向け易いため、効果が得られたと推察できる。また、右斜め30°条件は、中央列の協見時間が0.84秒に対し、右列では0.81秒（差分-0.9秒）、左列では0.84秒（差分0.0秒）とばらつき0.9秒であるのに対し、右斜め30°ホロプター条件は、中央列の協見時間が0.86秒に対し、右列では0.81秒（差分-0.5秒）、左列では0.87秒（差分+0.1秒）と、ばらつき0.6秒であった。すなわち、右斜め30°条件よりも、右斜め30°ホロプター条件の方が、ばらつきが約0.3秒小さいことから、右斜め30°ホロプター条件の方が、見え方の変化が少ないエリアが広範囲にあると考えられる。これは、ホロプター面上の点は両眼視差ゼロの座標位置であり像認知し易いといった、ホロプターの考え方と一致する。

本実験では、特に鉛直軸まわりに水平方向へホロプターに沿った方向に傾ける方が、水平軸周りに上方が遠方、すなわちホロプターに沿った方向に垂直方向へ傾けるより、高い効果が得られた。また、右斜め30°条件と右斜め30°ホロプター条件では、中央列の認知でほぼ同等の効果が得られた。すなわち、曲面化せずとも平面で傾きを適正化することで、同等の効果が得られる可能性がある。今後、引き続き検証すべき課題と考える。

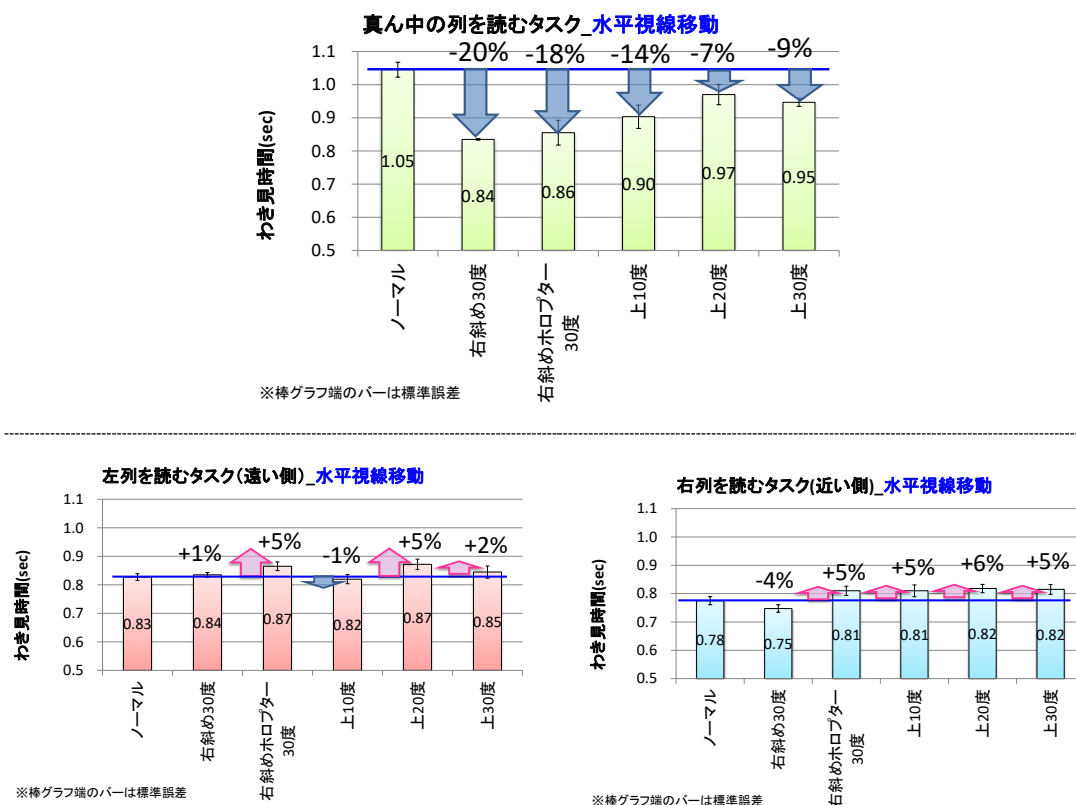


図 6.6 ナビ画面形状と協見時間 (DS 実験)

6.3.3 実車テストコース走行によるナビ認知実験 (実験 4-②)

(1) 実験概要

被験者はマツダ構内のテストコースにおいて、実車（マツダ、アクセラ）を 60km/h で定常走行しながら、周辺に呈示される視覚刺激に対する認知時間を計測した。ディスプレイ形状の条件は、実験 4-①の条件と同じ 6 条件（ノーマル、右斜め 30°、右斜めホロプター 30°、上傾斜 10°、上傾斜 20°、上傾斜 30°）とした。被験者は眼球運動計測装置を装着後、さらにヘルメットを装着し、視線角度と頭部角度を計測した。

(2) 実験方法

実験方法の概要を図 6.7 に示す。図中の赤線の交点が、アイカメラ計測による視点位置を示している。被験者は実車の運転席に着座し、テストコース内の直進路区間において、停車状態から車速 60 km/h まで加速後、60 km/h で定常走行し、実験者に準備できた旨を口頭で伝える。その後、実験者は、カーナビ画面の三つ列のうち、一つの列を被

験者に口頭で指示する（「中央列の数字は何ですか？」など）。被験者は 60 km/h での定常走行の運転を継続しつつ、自分のタイミングで脇見を開始し、指定された行の数字列を読み上げた。その際、被験者には、速やかに、なるべく正確に視線を移動し、数字列を読み上げるよう教示した。

被験者は、裸眼または矯正による正常視力を有する成人男性 2 名（被験者 KI：30 代，被験者 KM：40 代）であった。テストコースの約 900 m の直進路区間にて、1 回の計測を行った。1 回の計測あたり 8~10 回の読上げを行うタスクを、上記 4 つのディスプレイの傾き条件に対し、3 回ずつ実施した。また、天候は、被験者 KI の計測時が晴れ、被験者 KM の計測時が雨であった。なお、被験者には実験前に実験内容を書面で説明し、インフォームドコンセントを得て実験を実施した。



図 6.7 実車走行実験の概要図

(4) 実験結果

カーナビ画面の設置位置と脇見時間の関係について、数字列ごとの結果を図 6.8 に示す。上段は全列の平均、下段は上から中央列、左列、右列の結果である。また、脇見時間の定義は実験 4-①と同じであり、左列は実験 4-①と同じ被験者である。

まず、被験者 KI の結果について述べる。全列の平均でみると、ノーマル条件と比較して、各設置位置条件で 5~8%ほど脇見時間が短縮した。中央列では、右斜め 30° ホロプター条件での脇見時間がノーマルと同等であったが、左列、右列では、それぞれ 12%、10%ほど脇見時間が短縮されており、認知性の向上効果が確認できた。

次に、被験者 KM の結果について述べる。全列の平均でみると、ノーマル条件と比較して、右斜め 30° ホロプター条件のみ、3%ほど脇見時間が短縮した。中央列では、右斜め 30° ホロプター条件でのみ 8%短縮、右列では 2%短縮した。一方、右斜め 30° 条件では、右列のみ 13%短縮した。主にこの 2 条件で、認知性の向上効果が確認された。

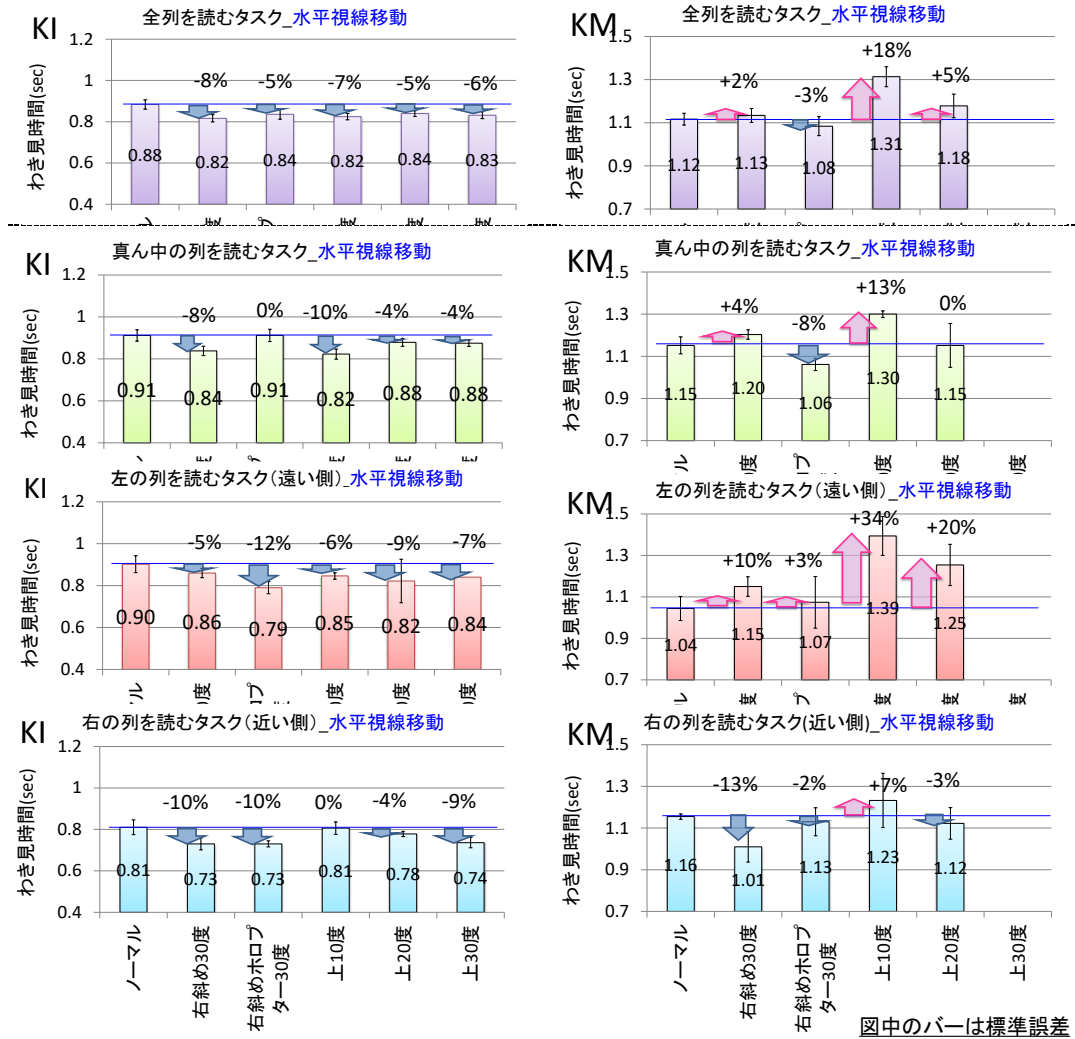


図 6.8 ナビ画面形状と脇見時間 (実走実験)

この脇見時間の傾向について、統計的に検討するため、被験者毎に、ディスプレイの傾き条件（ノーマル，右斜め 30°，右斜め 30° ホロプター曲面，上斜め 10°，上斜め 20°，上斜め 30°）における分散分析を行った。その結果，被験者 KI では，全列の平均において有意傾向 ($F(5,114)=2.227, p=0.0578$)，下位検定によりノーマル条件に対する右斜め 30° 条件で有意差が認められた。また，中央列においても有意差が認められた ($F(5,54)=2.608, p=0.0373$)。一方，左列，右列においては，有意差は認められなかった ($F(5,24)=1.590, p=0.2084, F(5,24)=2.129, p=0.1038$)。

被験者 KM では，全列の平均において有意 ($F(4,70)=4.227, p=0.0046$)，その下位検定により上斜め 10° 条件に対する，他の全条件で有意差が認められた。また，中央列においても有意傾向 ($F(4,54)=2.377, p=0.0864$)，下位検定により上斜め 10° 条件に対する右斜め 30° ホロプター条件で有意傾向であった。一方，左列，右列においては，有意差は

認められなかった（ $F(4,20)=2.191, p=0.1163, F(4,15)=1.238, p=0.3462$ ）。

以上の結果より、被験者2名ともディスプレイの傾き条件による、認知時間に対する有意差が認められ、特に中央列ではその傾向が顕著であった。

このように設置位置がホロプター位置に近い条件において、脇見時間が短くなる傾向は確認できたが、その効果が得られる視認範囲に違いが生じた。この原因は、おそらく、被験者の体格差による視点位置の違いが影響したと考えられる。本実験では、普段通りの運転でのナビを見る脇見を想定したため、シートポジションも自由に合わせて頂き、視角の違いは誤差として許容した。その結果、被験者KI（身長160cm）のアイポイントは、被験者KM（身長177cm）に比べ、約85 mm低く、45 mm前方の位置となった。

図6.9にKIとKMのノーマル条件での視線角の平均値を示す。図より、KIの方がKMより、ディスプレイ注視時の、水平方向の視角が大きいことがわかる。同様に、KIの方が垂直方向の視角は小さくなる。このような視角の違いが、認知し易い位置に若干のずれを生じた可能性がある。ただし、先行研究において、身長差が大きい被験者28名（身長4.3～7フィート：約129.5～213.4cm）の、目の高さと眼間距離に対する網膜のせん断角度に相関関係がないことが報告されており[39,40]、注視時の視線の方向と距離が同条件であれば、理論的に同様の認知特性が得られると考えられる。

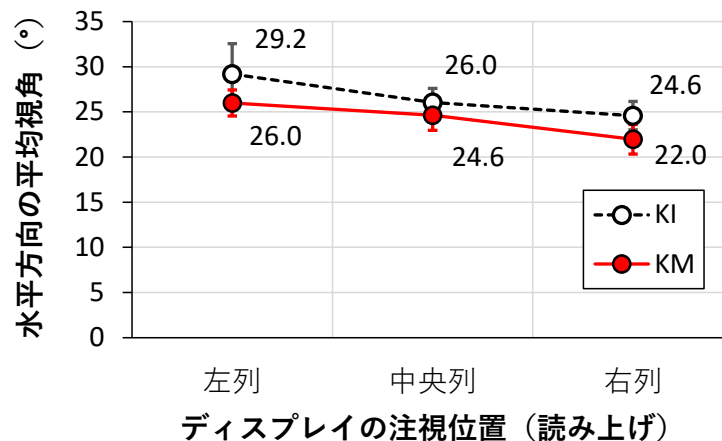


図 6.9 被験者2名の平均視角の比較結果（ノーマル条件）

次に、被験者 KI の中央列に着目し、本実験（実験 4-②）と、前項の DS 実験（実験 4-①）の結果を比較すると、右斜め 30° と上斜め 10° において、脇見時間の短縮効果が大きい点に、傾向の一致が見られた。ただし、全体的に実験 4-②では、その効果が小さかった。この原因として、実際に車を運転する走行実験では、走行映像を観察する DS 実験に比べ、周辺車両に対する注意の意識に違いがある。つまり、実走時は事故リスクを考慮し、周辺車両に多くの注意を向け、脇見に対する注意配分量が小さくなる。したがって、パイの小さい注意配分量の改善となり、効果が目減りした可能性がある（図 6.10）。



図 6.10 実験法と脳内の注意配分量との対応イメージ

しかしながら、少なからず効果は確認されている。そのメカニズムについて詳細に分析するため、実車走行時の、ノーマル条件と右斜め 30° ホロプター条件との視線の軌跡を比較した結果を、図 6.11 に示す。

その結果、水平視線角の時系列変化（左列図）を見ると、ノーマル条件では視線が段

階的に移動し、注視までの時間のロスがみられるが、ホロプター条件では、視線が揺らぎなく留まり、時間のロスが小さいことが分かる。また、中央列の図は、横軸が水平方向の視線角、縦軸が垂直方向の視線角を示しており、視界そのものをイメージできるようにしたものである。この視線軌跡のプロット（赤線）を見ると、カーナビに視線を向けた際（左下の位置）、ノーマル条件の方が水平方向のずれが大きくなっており、視対象に視線が停留するまでに揺らぎが生じていることが見て取れる。

以上のことから、ホロプター面上の指標の方が、平面上の指標よりも、視線移動時に、対象を捉え易くなり脇見時間の短縮効果が得られる見込みが得られた。今回、ホロプター形状により、実際に脇見時間の短縮効果が得られることを、簡易的な予備実験で確認することができた。ただし、今後、さらに条件統制した上で追加検証が必要と考える。また、カーナビのディスプレイを右に 30° 傾斜させて設置することは、現行ナビのレイアウト変更で済むことからコスト面で有利なため、同様に検証していきたいと考える。

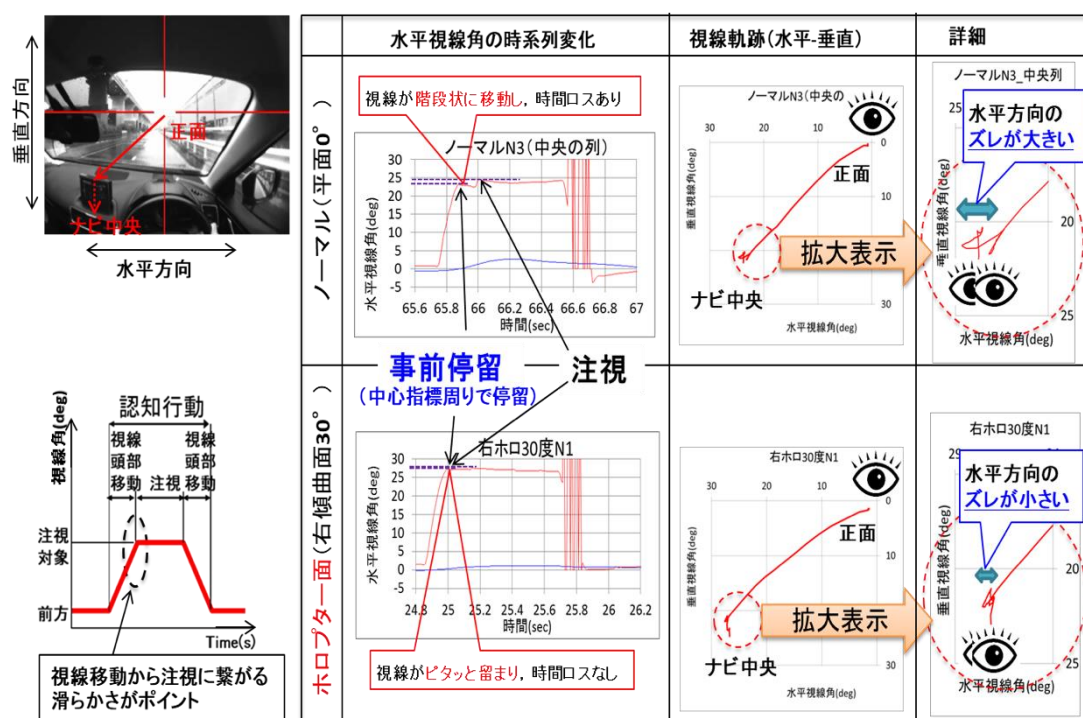


図 6.11 実車走行時のナビ形状の違いによる視線の軌跡の比較

次に、奥行き知覚モデルの車室内空間への適用について考える。図 6.12 は奥行き知覚モデルによるインテリア設計イメージである。図の上段で示すように、運転時にドライバーは、あらゆる方向に視線移動して必要な情報を収集している。特に、カーナビや速度メーターなどの情報呈示デバイスを見る時は、できるだけ早く情報収集できることが望ましい。一方で、外界との境界である窓枠周りの車体骨格には、窓枠の側面部（フロントガラスとドアガラスの間のフレーム、A ピラーと呼ばれる）、下面（インパネ面）、上面（ルーフ面）があるが、これらは運転時の車幅感覚や、外界の視対象との距離・方向を推測する指標となりうる。つまり、本モデルは情報呈示デバイスの認知性向上だけでなく、車室内インテリア形状の設計にも有用と考える。具体的には、運転時の外部環境や車速により変化する、視線角度や眼球運動特性を反映した動的ホロプター面をモデル上で予測演算し、インテリア構造に適用することで、正確な知覚が得られ、運転しやすいドライバー視界を設計できると考える。図の下段は、これらの特性データを用い、あらゆる注視位置で、動的ホロプター面を予測したイメージ図である。

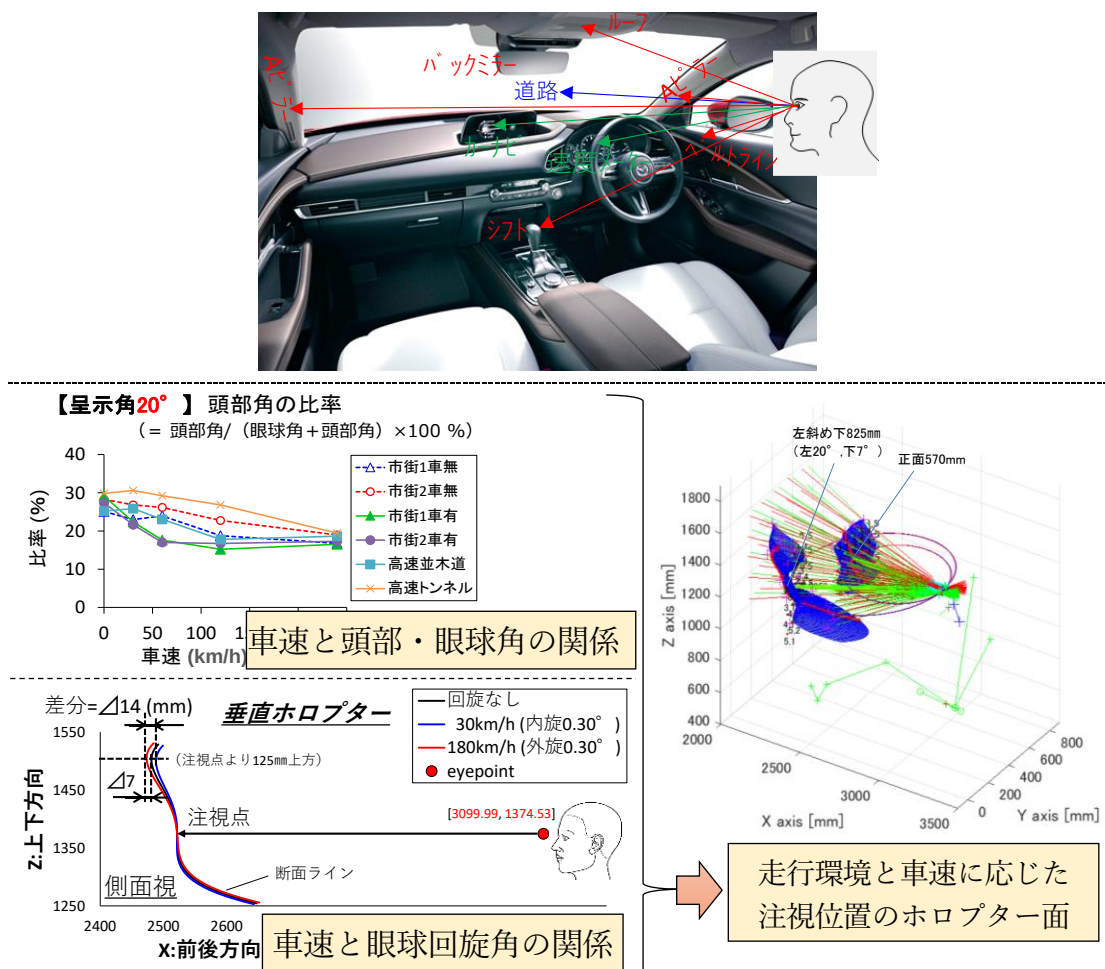


図 6.12 奥行き知覚モデルによるインテリア設計への適用イメージ

6.4 本提案の発展性、他分野への応用

図 6.13 に、奥行き知覚モデルの適用先とその効果について整理した全体像を示す。本モデルは人間の眼球網膜対応点を実験的に同定した結果をベースモデルとして、動的刺激環境での認知行動特性や眼球運動影響を定量化し、上記モデルに織込むことで、静的および動的環境下での視対象の見え方に関し、両眼像が理論的に明瞭になる面形状を推定するものである。つまり、本モデルを用いて、視対象の奥行き知覚の最適化検討が可能である。例えば、情報呈示デバイスの形状や位置に適用すれば、短時間の認知や、従来と同じ視認時間でより多くの情報を得られる。呈示面を曲面化する場合、像の見え方への影響を考慮する必要があるが、角度的に小さいため、影響は小さいと推察される。また、窓枠周辺部品の形状に適用すれば、明瞭に見える奥行き知覚の手掛かりとなり、自身とインテリアとの距離感や方向感覚が正確になる可能性もある。その結果、車幅感覚が正確になり、運転し易さに繋がる可能性がある。図 6.13 の右下のグラフは、近年の自動車のドライバー環境の概念図である（赤松，2016）。横軸は外的状況からのタスク要求、縦軸は運転パフォーマンスである。近年、ドライバーが運転時に処理する情報量は増加傾向にあるが、ドライバーは安楽かつ余裕を持って運転できることを望んでいる。

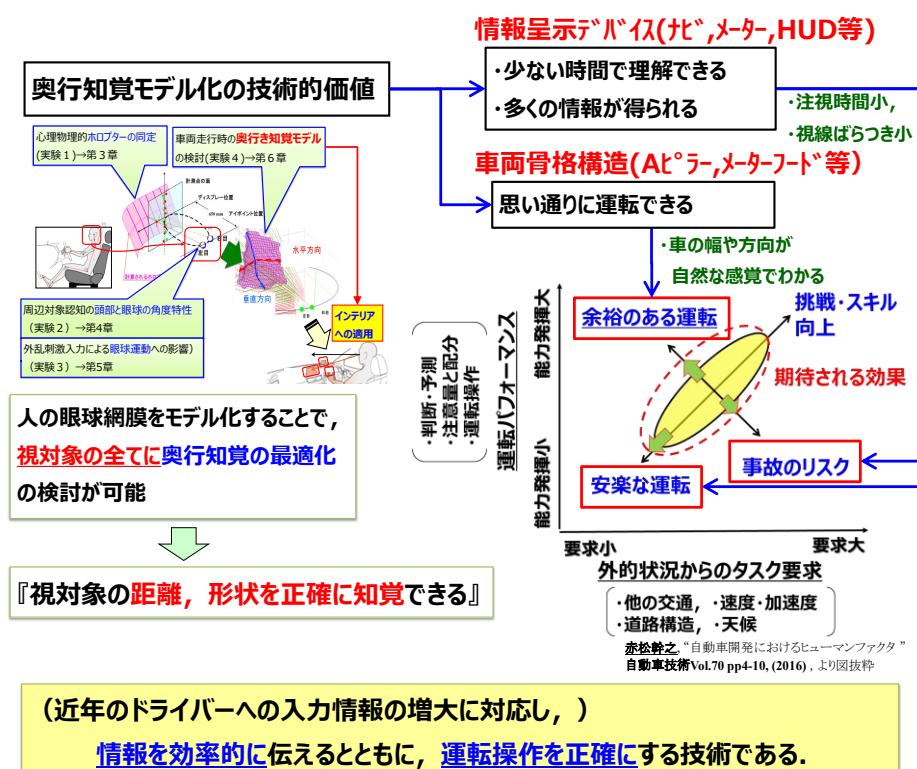
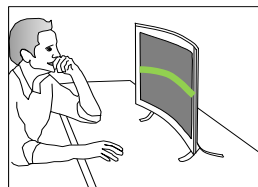


図 6.13 奥行き知覚モデルの発展性

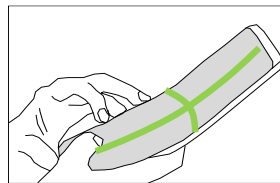
したがって、効率的な認知をサポートする必要がある、人の認知メカニズムに沿った本モデルの活用は有用である。一方、視覚系の疲労により、眼の焦点調整や認知の機能が低下することが報告されており[41,42,43,44]、その影響も考慮し、認知状態を予測する必要がある。また、眼球運動から運転疲労状態を解析すること可能である[45]。近年、センシング技術やアルゴリズムの進歩により、小型カメラやセンサー等を活用してドライバー状態を推定できる環境が整いつつあり[46,47,48]、このような技術と上手く組み合わせることで、ドライバー状態に応じ、より適切な認知に繋がるようにしていきたいと考える。

次に他分野への応用について述べる。前述のとおり、本モデルは、人間の眼球網膜対応点の同定をベースにしており、人間が見る対象全てに対し、奥行知覚の最適化の検討が可能である。また、静的および動的環境に合わせて呈示することを想定しており、情報呈示デバイス全般、住居等の建造物の外壁・内装、自動車以外の乗り物など、様々な分野に応用できる技術と考えられる。参考までに、図 6.14 に応用イメージを示す。

・ディスプレイ、タブレット、電子ミラー等の**明瞭性**が求められる電子機器



ディスプレイ



タブレット



自動車（電子ミラー）

・狭いコクピット空間での**認知性**の向上



航空機（タコメーター）



自動車（スイッチ）

・車室内や住居等の**包囲感**の向上



自動車（シート周り）



住居

図 6.14 奥行き知覚モデルの他分野への応用イメージ

第7章 結論

本研究では、人間の視認行動特性と人間の眼球構造に基づく知覚機能から、人間の視認状態を予測し、人間にとって運転し易い車室内空間の設計指針を構築することを目的とした。人間の視認行動を「周辺対象認知の頭部および眼球の協調運動」と考え、人間の眼球構造に基づく知覚機能を「眼で対象を捉えて映像として知覚する網膜対応点を同定」と考え、それぞれどのように動き、どのように見えるかを定量的に解析した。その結果、走行シーンと注視位置に応じた頭部角と眼球角の関係、および注視位置に応じた網膜対応点を明らかにし、注視位置における眼球角を用いたホロプターモデルで視認状態を予測可能にした。さらに、走行時の外乱刺激環境での視認状態を予測可能なモデルに改訂するため、外乱刺激入力による眼球運動への影響を分析した。また、ホロプター面の知覚し易さを検証するため、ナビ画面形状の違いによる認知性の評価を行った。

以下に、本論文の要約と各章の概要、および結論を総括する。

第3章では、450 mm 視距離での注視方向別のホロプターの対応点を計測し、垂直方向、および水平方向の傾きを分析した。その結果、正面0° 注視条件に対し、垂直方向のホロプター断面は上下方向の注視により、上下軸の傾き角が異なる傾向が見られた。一方、水平方向のホロプター断面は左右方向の注視により、左右軸の傾き角が異なる傾向が見られた。これらの結果から、視線方向の違いによるホロプター断面形状を推定できる見込みを得た。また、正面0° 注視条件から推測される理論値と実測値との差分を考慮することで、視線方向に応じてホロプター面を机上予測できるようになった。

第4章では、自動車運転時の周辺視標に対する認知行動における頭部と眼球の運動角度特性を調べた。その結果、車両走行シミュレーション速度が速くなるほど、周辺対象を見る場合の頭部運動角度が小さくなる傾向が見られた。また、人や車の有無、空間の広がりなど、走行シーンの違いでも頭部運動角度が異なる可能性があることが示唆された。基本的に、運転のための認知負荷の増加にしたがって、周辺指標認知のための頭部運動角度が減少し、眼球運動角度が増加することが示唆された。

第5章では、オプティカルフロー(OF)視覚刺激観察時の水平および回旋輻輳眼球運動特性を解析した。その結果、OF 視覚刺激の移動方向の違いによる一貫した傾向は見ら

れなかった。OF 視覚刺激の移動速度の違いにおいても、被験者間で一貫した統計的に有意な傾向は見られなかったが、回旋輻輳運動に関しては、OF の移動速度の増加に伴い、より外回旋輻輳へと段階的に変化する傾向がある可能性が見られた。これは、物理的に同じ位置の視対象であっても背景刺激である OF の移動速度の影響で見え方、すなわち、左右眼像が融合して明瞭に見える外界の空間位置（心理物理的ホロプター）が変化することを示唆している。また、今回試みたノニウス法を用いた眼球回旋運動の同定に関しては、本実験条件において、アイカメラによる客観的計測データとの統計的に有意差は認められなかった。つまり、アイカメラ計測による眼球回旋輻輳運動の傾向の定量化と同様、ノニウス法を用いた同定法によっても、眼球回旋輻輳運動の傾向を同定できる可能性は否定されなかった。また、OF の移動速度に対しても有意差は認められなかった。今後もし仮に、ノニウス法が実測データと整合することが確かめられれば、本手法の計測は比較的容易に行えるため、個人特性に応じた情報呈示ができる、快適な車室内空間を設計する上で、有効な同定法となる可能性がある。また、実車走行時の加減速 G 入力による眼球回旋運動についてノニウス法を用いて計測した。その結果、加速 G 入力で眼球の内回旋、減速 G 入力で外回旋となる傾向が見られた。ただし、他のノニウス法による実験と同様、アイカメラによる客観的計測データとの整合については検討課題である。

第6章では、2～5章の知見に基づき、動的ホロプター形状に基づいた最適知覚位置モデルを提案するとともに、カーナビ画面形状とそのホロプター形状および対象の認知時間との関係を分析した。その結果、車両の横軸に平行なノーマル仕様（市販車の状態、水平の傾き 0° ）に対し、ナビ注視時の視線に直交する傾斜面、あるいはこれと同じ傾斜かつホロプター形状とした場合に、脇見時間が実走実験で最大約10 %（DS実験では最大約20%）程度短くなる傾向が見られた。また、ノーマル条件とホロプター条件との視線の軌跡を比較した結果、ノーマル条件では視線が段階的に移動し、注視までの時間のロスがみられるが、ホロプター条件では、視線が揺らぎなく留まり、時間のロスが小さいことが示された。以上のことから、ホロプター面上の指標の方が、平面上の指標よりも、視線移動時に、対象を捉え易くなり脇見時間の短縮する可能性が高いことがわかった。

これらの研究成果から、人間の視認状態を予測し、人間にとって運転し易い車室内空間の設計が可能と考えられる。車室内の情報呈示デバイス、インテリア部品など視野全体を、このホロプターモデルの考え方で設計することで、単なる視対象が見易いだけでなく、統一したドライバー視界の設計が可能となる。また、本論文で、異なる視線方向

におけるホロプターの網膜対応点の一部を明らかにしたことで、視方向別のホロプターモデル化が可能となる。自動車業界をはじめとした設計業務で、机上での視認状態予測が可能となり、開発の効率化が一段と進むことを期待する。

今後の課題として、下記3点が考えられる。

- ・車両走行時の身体加速度を考慮したホロプターモデルの構築。

実車走行時は、オプティカルフロー刺激だけでなく体感刺激が同時入力されるため、姿勢変化を伴う加速度など複雑な要因や、その際の眼球運動への影響など、幅広く解明し、実際の走行シーンを考えた視認状態推定により、さらなる運転し易い視界の向上が可能となる。

- ・注意状態と眼球運動を考慮したホロプターモデルの構築。

周囲の人や車の動き、目立つ建物や障害物、など注意対象による視野範囲の変化を考慮して、視認状態の予測精度の向上を図る。

- ・わくわくする車室内空間の設計。

ドライバー視界のどの部位がどのように見えたら、違和感なく運転でき、余裕を持った運転ができるかを解明し、自らが主体的に操縦できていると感じさせる理想の視界を実現する。

今後、これらの課題を解決することで、視認性の良い自動車の実現できるだけでなく、視認状態を制御する設計技術として、他分野にも広く活用できるようになると考えられる。

参考文献

- [1] Tyler, C. W., Regan, D. (Ed.) : Binocular vision; The horopter and Binocular fusion; Cronly-Dillon, J.R. : Vision and Visual Dysfunction (Ed.), London, 9, pp.19–37 (1991)
- [2] Ogle, K. N. : Research in Binocular Vision; Hafner Publishing, New York (1965)
- [3] Nakayama, K., Tyler, C. W., Appleman, J. : A new angle on the vertical horopter; Investigative Ophthalmology & Visual Science 16 Supplement, 82 (1977)
- [4] Grove, P. M, Kaneko, H. & Ono : The backward inclination of a surface defined by empirical corresponding points; 30, pp.411-429 (2001)
- [5] 吉海亮介, 金子寛彦 : 異なる視線方向におけるホロプター形状の違い; 信学技報, Vol.114, No.347, pp33-36 (2014)
- [6] Hill, A. L. : Direction Constancy; Perception & Psychophysics, 11, pp.175-178 (1972)
- [7] Lewald, J., Dorrscheidt G. J, and Ehrenstein, W. H. : Sound localization with eccentric head position; Behav. Brain Res, 108, pp.105-125 (2000)
- [8] W. Becker and H.Saglam : Perception of angular head position during attempted alignment with eccentric visual objects; Exp. Brain Res, 138, pp.185-192 (2001)
- [9] 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・眼球の物理的位置の影響; 光学, Vol.36, No.5, pp.280-288 (2007).
- [10] Masashi Yamaguchi, Hirohiko Kaneko : Integration system of head, eye and retinal position signals for perceptual direction; Optical Review, Vol.14 (6), pp.411-415 (2007)
- [11] 山田光穂, 福田忠彦 : 大画面ディスプレイから受ける心理効果の客観的評価に関する基礎的検討-頭と眼の動きの相互関係について; テレビジョン学会誌, Vol.43, No.7, pp714-722 (1989).
- [12] 山田光穂 : 眼球運動による脳の視覚情報処理機構の研究; 東海大学紀要電子情報学部 Vol.5, No.1, pp.37-44 (2005)
- [13] 鈴木雅寿, 近野淳一, 佐藤美恵, 長谷川光司, 春日正男, 阿山みよし : 自動車運転時の交差点区間における有効視野の検討; 映像情報メディア学会技術報告, Vol.30, No.42, pp.53-54 (2006)
- [14] 中島亮一, 方昱, 松宮一道, 徳永留美, 栗木一郎, 塩入論 : 自然情景観察における頭部方向に基づく眼球位置分布の偏り; 日本認知科学大会発表論文集, Vol.29, pp.1-25 (2012)

- [15] Schreiber, K. M., Hillis, J. M., Filippini, H. R., Schor, C. M., & Banks, M. S. : The surface of the empirical horopter; *Journal of Vision* 8 (3): 7, pp.1-20 (2008)
- [16] Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessell, T. M., Siegelbaum, S. A., Hudspeth, A. J., Mack, S. (Ed.): *PLINCIPLES OF NEURAL SCIENCE*, Fifth Edition; Medical Sciences International, Ltd., Tokyo (2014)
- [17] 鵜飼一彦 : 眼球運動の種類とその測定; *光学*, Vol.23, No.1, pp.2-8 (1994)
- [18] Schreiber, K. M., Tweed, D. B., Schor, C. M. : The extended horopter : Quantifying retinal correspondence across changes of 3D eye position; *Journal of Vision*, Vol.6, pp.64-74 (2006)
- [19] Fogt, N., Jones, R. : Comparison of Fixation Disparities Obtained by Objective and Subjective Methods; *Vision Research*, Vol.38, No.3, pp.411-421 (1998)
- [20] 村瀬健二, 吉海亮介, 武田雄策, 原利宏, 金子寛彦 : 偏った視線方向における心理物理的ホロプターの同定; *映像情報メディア学会誌*, Vol.76, No.3, pp.408-415 (2022)
- [21] Ledgeway, T., Rogers, B. J. : The effects of eccentricity and vergence angle upon the relative tilt of corresponding vertical and horizontal meridia revealed using the minimum motion paradigm; *Perception*, Vol.28, pp.143-153 (1999)
- [22] 安田稔 : 画像と視覚(Ⅱ) 一視覚の基礎的性質一; *日本写真学会誌*, Vol.47, No.4, pp.275-283 (1984)
- [23] 福田忠彦 : 図形知覚における中心視と周辺視の機能差; *テレビジョン学会誌*, Vol.32, No.6, pp.492-498 (1978)
- [24] 村瀬健二, 武田雄策, 原利宏, 金子寛彦 : 自動車運転時の周辺対象認知における頭部と眼球運動; *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.23, No.3, pp.207-216 (2018)
- [25] 渡部叡 : 注視点の観察と情報抽出に関する一考察; *画像技術*, Vol.2, No.12, pp1-12 (1971)
- [26] 淀川英司, 東倉洋一, 中根一成 : 電子情報通信学会, 視聴覚の認知科学; コロナ社, 東京都 (1998)
- [27] 懸田孝一 : 読書時の単語認知過程 眼球運動を指標とした研究の概観; *北海道大学文学部紀要*, Vol.46(3), pp.155-192 (1998)
- [28] 沖中大和, 満上育久, 八木康史 : 人の眼球と頭部の協調運動を考慮した視線推定; *情報処理学会研究報告*, Vol.2016-CVIM-202, No.18, pp.1-8 (2016)
- [29] 山田光穂 : 2次元平面状の視標を注視させたときの頭部運動と眼球運動の協調関係の分析; *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol.J75-D2, No.5, pp.971-981 (1992)

- [30] Miller, E. F. : Counterrolling of the human eyes produced by head tilt with respect to gravity; *Acta Oto-Laryngologica*, 54 (1-6), pp.479-501 (1962)
- [31] 坂口卓弥, 神尾崇, 龍前三郎, 清水優史 : 仰臥位における視軸まわりの回転刺激に対する眼球回旋運動; *人間工学*, Vol.37, No.2, pp.75-83 (2001)
- [32] 小林直樹, 八代利伸, 石井正則, 関口千春 : 眼球反対回旋運動 Ocular Counterrolling (OCR)に影響を及ぼす要因; *耳鼻咽喉科展望*, Vol.44, No.6, pp.457-465 (2001)
- [33] 下野孝一 : 輻輳運動と両眼ステレオプシス; *光学*, Vol.23, No.1, pp.17-22 (1993).
- [34] Hatada, T. : Characteristics of human vision for VDT; *Japan Ergonomics Society*, 22 (2), pp.45-52 (1986)
- [35] 「画像表示装置の取り扱いについて 改訂第 3.0 版」; 日本自動車工業会, pp.1-8 (2004)
- [36] 飯星明 : 車載情報機器の基準と運転中使用規制; *国際交通安全学会誌(IATSS Review)*, Vol.31, No.2, pp.33-38 (2006)
- [37] Senders, J. W., Kristofferson, A. B., Levison, W. H., Dietrich, C. W., Ward, J. L. : The attentional demand of automobile driving; *Transportation Research Board, Highway Research Record*, No.195, pp.15-33 (1967).
- [38] 佐藤稔久, 赤松幹之, 田中敦, 畑田淳, 傳田志哉, 石井隆昭 : 道路交通環境によるタスクダイヤモンドの推定手法 (多分野に広がるモバイル研究の最前線); *モバイル学会誌*, Vol.3(1), pp.13-19 (2013)
- [39] Cooper, E. A., Burge, J., Banks, M. S. : Do People of Different Heights have Different Horopters?; *Journal of Vision*, Vol.10 (7) : 372 (2010)
- [40] Cooper, E. A., Burge, J., Banks, M. S. : The vertical horopter is not adaptable, but it may be adaptive; *Journal of Vision*, Vol.11 (3): 20, pp.1-19 (2011)
- [41] 木村達洋, 早坂明哲, 瀬川典久, 山崎清之, 村山優子, 宮崎正俊 : 視覚系疲労の少ないヒューマンインターフェース開発に向けた評価法の提案; *情報処理学会論文誌*, Vol.44, No.11, pp.2587-2597 (2003)
- [42] 斉藤進 : 視覚疲労測定法; *Vision*, No.5, pp.27-31 (1993)
- [43] 瀬谷安弘, 高橋二郎, 今中國泰 : 反応時間と視覚疲労の関係 —長時間の視覚かダウの遂行およびアスタキサンチン成分を含む栄養補助食品の摂取の効果—; *日本生理人類学会誌*, Vol.14, No.2, pp.59-66 (2009)

- [44] 岩崎常人 : 3D ディスプレイを用いた視覚負荷による眼精疲労; 人間工学誌, Vol.38, No.1, pp.44-53 (2002)
- [45] 菅原朋子, 宮川晃一, 田口敏行, 村岸裕治 : 前庭動眼反射機能に着目したドライバ運転疲労の要因解析; 自動車技術会論文集, Vol.50, No.4, pp.1132-1137 (2019)
- [46] 柳平雅俊, 安土光男 : 運転状態推定技術の開発ー心拍解析による眠気状態の検出ー; PIONEER R&D, Vol.14, No.3, pp.17-27 (2004)
- [47] 岡田直之, 杉江哲, 濱上斉, 藤岡稔, 山本晋 : ドライバ状態推定に向けた視線検出技術の開発; 富士通テン技報, Vol.33, No.1, pp.3-8 (2016)
- [48] 日向匡史, 木下航一, 西行健太, 長谷川友紀 : 自動運転時代におけるドライバモニタリング技術; OMRON TECHNICS, Vol.50, No.1, pp.36-41 (2018)

謝辞

本研究と論文は、多くの関係者の協力により作成することができました、この場を借りて感謝を述べさせていただきます。

東京工業大学 工学院 情報通信系 教授 金子 寛彦 博士には、長年、人間の空間認識、眼球運動に関する研究において、マツダ株式会社との共同研究で大変お世話になり、視覚・視界の基礎研究から車両走行時を想定した異種感覚統合の研究まで、幅広くご指導いただきました。この論文作成においても、論文シナリオの組み立て方や、データを深く洞察する力、口頭発表の要所を教え導いていただき、論文としての形にまとめることができました。厚く御礼申し上げます。

東京工業大学の学生の、総合理工学研究科 物理情報システム専攻 吉海 亮介 氏、および工学院 情報通信系 深作 亮介 氏には、本研究の実験データの取得、プログラム作成において、多くのご協力をいただきました。深く感謝いたします。

マツダ株式会社 技術研究所 革新創生研究領域 部門統括研究長 西川 一男 博士には、視覚・視界領域の専門家になることを期待する旨、お伝えいただき、社会人博士としての研究進捗についても、随所にお声がけいただき、励みになりました。深く感謝いたします。

当時の、先進ヒューマン・ビークル研究領域 感性工学研究長 岸 篤秀 氏には、学位取得を強く勧めていただき、人間研究の素人であった私に、大きな研究目標を与えていただきました。深く感謝いたします。

上席研究員 武田 雄策 博士には、本研究の遂行にあたり、視覚の基礎研究と車室内空間の設計を繋ぐ研究の考え方、進め方について多くの助言を頂き、またプログラミングや実験システム構築についても、上司として、博士の先輩として、広範囲にご指導いただきました。深く感謝いたします。

現、感性工学研究長 原 利宏 氏には、本研究の成果を車両の構造設計に繋げるお客様価値の考え方について、ご指導いただきました。深く感謝いたします。

統合制御開発研究部門 シニアスペシャリスト 岩瀬 耕二 氏には、当時、視界研究テーマの同僚として、多くの実験に協力いただき、また画像処理プログラミングや、実験システム環境の構築に関しても、ご協力いただきました。深く感謝いたします。

最後になりますが、学位所得に向け、いつも心に支えになってくれた父母、義父、娘、そして博士後期課程入学から4年、満期単位取得退学後2年、の合計6年間の長期

にわたり，暖かく私を応援し，支えてくれた妻に深く感謝します.