

付録 A 用語の説明

サッケード これは、ある注視点から他の注視点への眼球運動を指す。注視時間は、約 $1/4$ 秒から 1 秒間持続し、サッケードは、次の注視を行うに要する時間がどの程度かに従って、 $1/50$ 秒から $1/10$ 秒程度続く。サッケードは、非常に速やかに生じるので、眼球運動に費やされる全時間の 10 % を占めるにすぎず、注視は全時間の 90 % にあたる（知覚は一般に注視中にのみ生じる）

スムーズパーシュート これは、運動対象を注視し、眼で追跡するとき生じる眼球運動である。運動の速さは、毎秒 60° あるいはそれ以上まで、対象の運動にほぼ近似させることができる（この場合、眼が動いている間に知覚が生じることがある）。

輻輳と開散 両眼視を維持するために左右眼の視線を同じ方向でなく、逆方向に動かす機能をよせ運動 (Vergence) というが、両眼の内よせ運動を輻輳 (Convergence) と呼び、外よせ運動を開散 (Divergence) と呼ぶ。輻輳は次の 4 つの要素からなる。

緊張性輻輳 解剖学的安静位 (死亡したときの眼位) から生理学的安静位 (無調節で融像を除去したときの眼位) に眼位をもってくるための輻輳である。

調節性輻輳 近方視での両眼視では、眼球が同時に内側に向く輻輳とともに、調節が行われる。調節と輻輳の間には密接な量的関係があり、通常調節が輻輳よりも優位に立つ。

融像性輻輳 融像にともなう輻輳であり、両眼単一視するために、調節性輻輳の過不足を調整する補助的役割を持つ。

近接性輻輳 光学的には無限遠にあっても実際の指標が近くにある場合におこる輻輳である。

参考文献

- 1) S. Fukushima, M. Takahashi, and H. Yoshikawa: A STUDY ON VR-BASED MUTUAL ADAPTIVE CAI SYSTEM FOR NUCLEAR POWER PLANT, Proc. of FIFTH International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations, & Safety (NUTHOS-5), pp.DD3-1-DD3-6, (1997).
- 2) 新井 豪: Eye-Sensing HMD の試作とその評価実験, 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士論文 (1997)
- 3) 福島 省吾, 高橋信, 吉川 榮和: 眼球画像計測機能付きヘッドマウントディスプレイの開発, 第 39 回ヒューマン・インタフェース研究会資料, Vol.11, 197/202 (1996)
- 4) 苧阪 良二, 中溝 幸夫, 古賀 和郎 (編): 眼球運動の実験心理学, 名古屋大学出版会 (1993)
- 5) 田中 直彦、所 敬 (編): 現代の眼科学, 金原出版, (1985).
- 6) 石原 忍 (創著) 鹿野 信一 (改訂): 小眼科学, 金原出版, (1991).
- 7) 清水 弘一 (編): 標準眼科学, 医学書院, (1995).
- 8) 泉 武博 (監修) NHK 放送技術研究所 (編): 3次元映像の基礎, オーム社 (1995)
- 9) 森田 寿哉, 比留間 伸行, 三橋 哲雄, 元木 紀雄: 両眼融合式立体画像における大きさの知覚と輻輳運動, テレビジョン学会誌, Vol.50, No.9, 1300/1310 (1996)
- 10) 山田 光穂: 最近の眼球運動の研究動向, 信学技報 TECHNICAL REPORT OF IEICE (1995-12)
- 11) J.L.Andreassi :心理生理学 ヒトの行動と生理的反応, ナカニシヤ出版, (1985).
- 12) D . Noton & L. Stark :Scanpath in eye movements during pattern perception , Science , Vol.771 , pp.308-311 , (1971).
- 13) M. Fujii, R. Fukatsu, Y. Aizawa, N. Takahata, M. Yamada, & S. Murakami :Cognitive disturbances in visual information processing in Alzheimer's disease, Vision, Memory and the Temporal Lobe , pp.179-185 , (1990).
- 14) 本間秀祐 :顔の認知に関する研究, 日本補綴学会誌 , Vol.33 , pp.848-862 , (1989).
- 15) 乾 敏郎 (編): 認知心理学 1 知覚と運動, 東京大学出版会, (1995)
- 16) 安西 祐一郎, 苧阪 直行, 前田 敏博, 彦坂 興秀: 認知科学 9 注意と意識, (1994)

謝 辞

本研究を進めるにあたり，適切な御助言，御指導をいただきました吉川榮和教授に心から感謝致します。

本研究を進めるにあたり，研究全般にわたって直接御指導をいただきました福島省吾氏に感謝致します。

また，本研究を進める上で数々の貴重な助言をいただいた手塚哲央助教授に感謝いたします。

また，本研究を進めるにあたり，数々のご助言，ご指摘を頂きました下田宏助手に感謝致します。

そして，研究に限らず様々な面でご支援してくださった吉川研究室の皆様から心から感謝致します。

のときには、奥行き距離が無限遠もしくは奥行き距離が 30cm 周辺で多くの被験者で融像が困難となった。このことは、両眼融像は両眼視差の大きさだけでなく視差の変化速度にも依存することを示している。また以上の実験より、従来の自覚的な立体視検査にはよらず、他覚的検査が容易に実現できることが示された。

第5章では、応用実験としてMR画像注視時の視点位置測定と、視点と注意に関する認知実験を行った。MR画像としては立体視で観察することが不可欠な脳血管画像を採り上げ、実際に視点履歴を測定した。その結果、被験者が注目している対象の判別が可能であることが確認できた。しかし、実際に応用するにあたっては、HMDのディスプレイの解像度を改善し、より詳細な画像を呈示できるようにする必要があるが、これは今後の課題としたい。また認知実験では、注意の方向が視線方向からはずれるような状況を設定し、そのようなヒトの内面状態が客観的に測定できるかどうかを、瞳孔径を指標として評価を試みた。実験結果より、一部の被験者で視線方向から注意が周辺に及んでいる状況では瞳孔径が増大するという興味深い結果が得られた。種々の機器運転員の注意力が散漫になるときに重大な事故を招くような状況において、このような結果が役に立つかもしれない。人間の注意力を測るという目的のためにさらに詳細な実験に繋げる予定である。

第 6 章 結論

本論文では眼機能および視覚系指標から様々な有益な情報を抽出することを目的として当研究室で試作開発した Eye-Sensing HMD を用いて奥行きを含めた視点位置の計測および視覚認知実験を行った。

まず、第 3 章では昨年度試作した Eye-Sensing HMD の仕様について述べ、今年度付加した両眼瞳孔撮像機能、新たに考案した視点位置導出法の評価実験を行った。注視画面の領域を分割し各領域において 2 点の参照点を用いて線形補間を行うという昨年度の視点位置較正法の問題点として、較正のための参照点から離れた位置における視点位置精度が劣化すること、また分割された領域境界線を横切るような視点移動が行われた場合に視点が不連続に移動するという問題点などがあった。そこで、それらの問題点を解決するために、参照点 5 点で構成される画面領域を三角形領域に分割し、領域の境界となる 2 つの基準ベクトルを各領域ごとに設定し、三角形領域内の任意の点を基準ベクトル和で合成する方法で比較評価した。この方法では、領域の境界部分では隣り合うどちらも領域においても同じ 1 つの基準ベクトルで合成されるため、領域の境界を横切る視点移動の場合も視点位置は連続な移動となることが確認できた。また参照点から離れた位置における精度も従来の方法より改善された。

第 4 章では、両眼視差を含んだテスト画面を用いて、両眼立体視時における輻輳角を測定した。静止画における立体オブジェクト注視時では、与えられる奥行き距離が眼前に近づくにつれて、表示された視対象の奥行き位置より遠方を注視していることが測定された輻輳角により明らかになった。これは、与えられる奥行き距離がディスプレイ位置より手前にくるものの、眼の焦点距離は依然としてディスプレイ位置にあるため、過度の輻輳を抑制しようという眼機能の現れであると考えられる。また被験者の中には、視対象に対して測定された輻輳角が大きく離れており、測定値からは融像していないであろうと判断できる場合においても、融像していると感じている者もいた。このことは眼機能と主観との不一致を示しており、このような状態での両眼立体視は健康上において何らかの問題点をもたらす可能性があり、両眼立体視機能を利用するときには注意を要する。立体動画を用いた実験では、立体オブジェクトの移動速度が輻輳角にして約 8 [deg/sec]

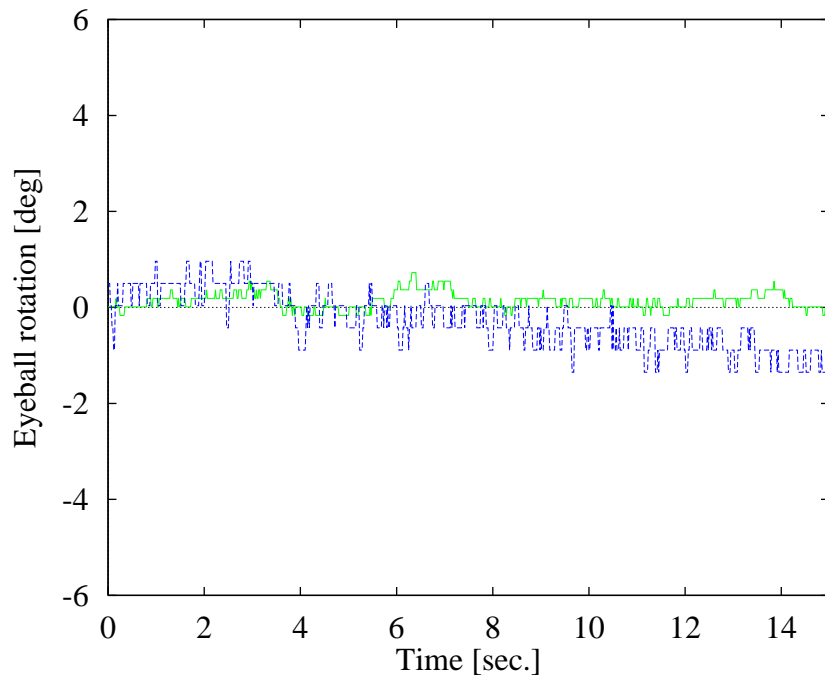


図 5.23: 中心視での眼球回転 (被験者 SF)
(実線; 水平回転, 点線; 垂直回転)

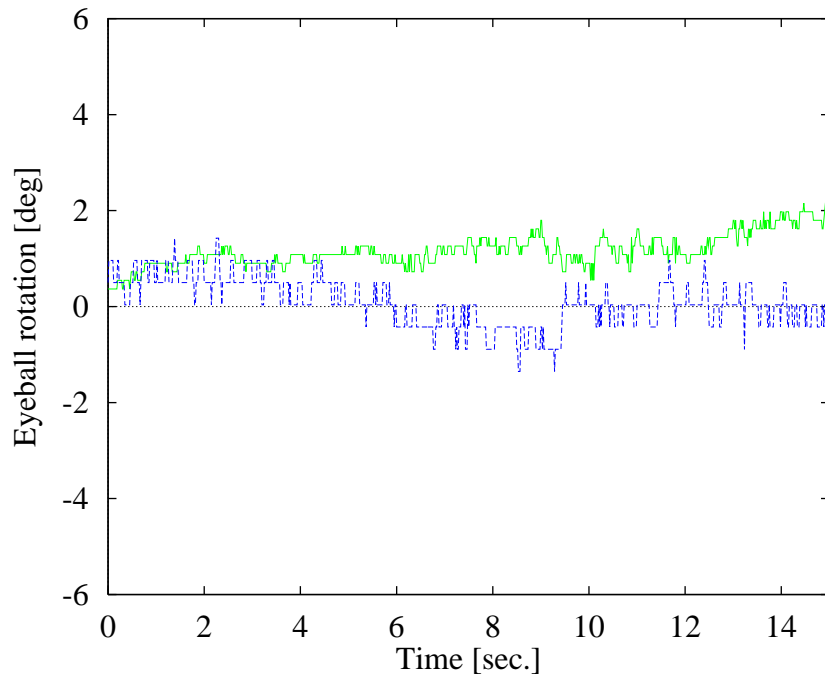


図 5.24: 周辺視での眼球回転 (被験者 SF)
(実線; 水平回転, 点線; 垂直回転)

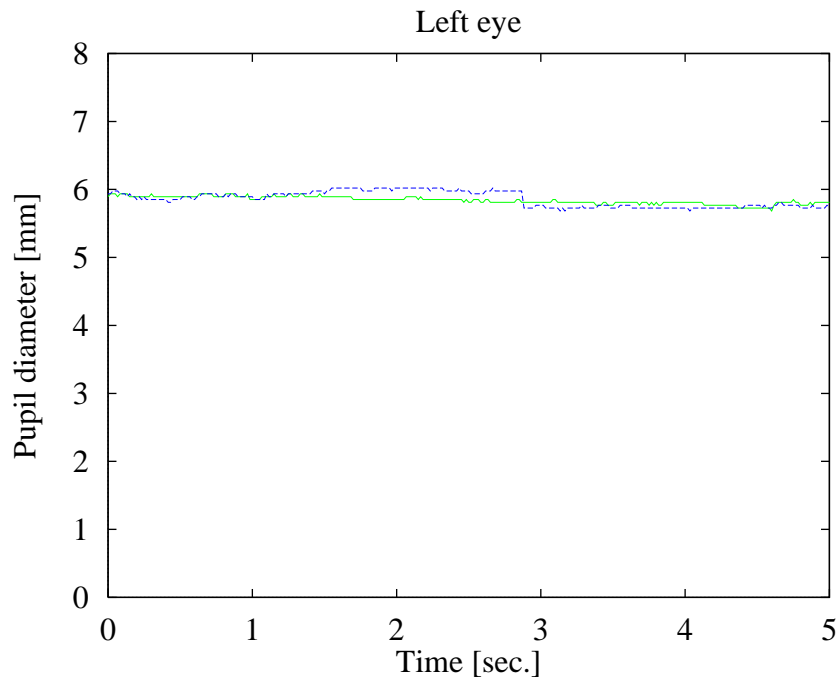


図 5.21: 周辺視効果 (前注意過程 ; 左眼 ; 被験者 SF)
 (実線 ; 中心視 , 点線 ; 周辺視)

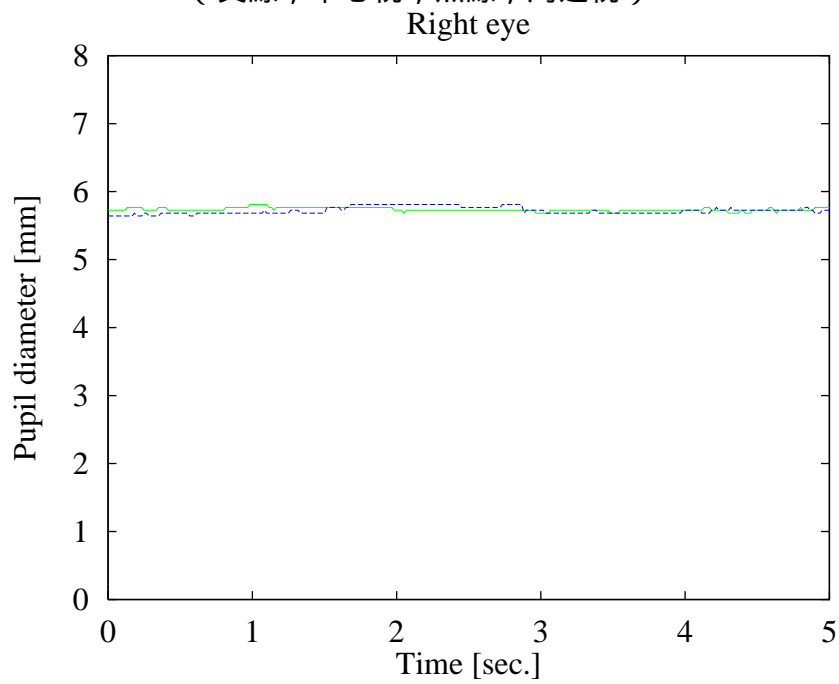


図 5.22: 周辺視効果 (前注意過程 ; 右眼 ; 被験者 SF)
 (実線 ; 中心視 , 点線 ; 周辺視)

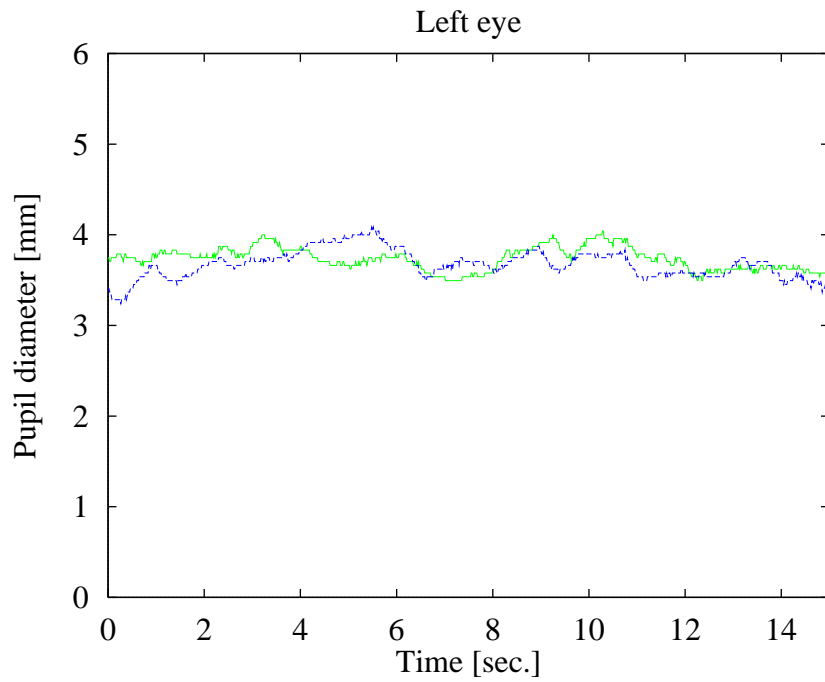


図 5.19: 周辺視効果 (文字暗唱; 左眼; 被験者 TM)
 (実線; 中心視, 点線; 周辺視)

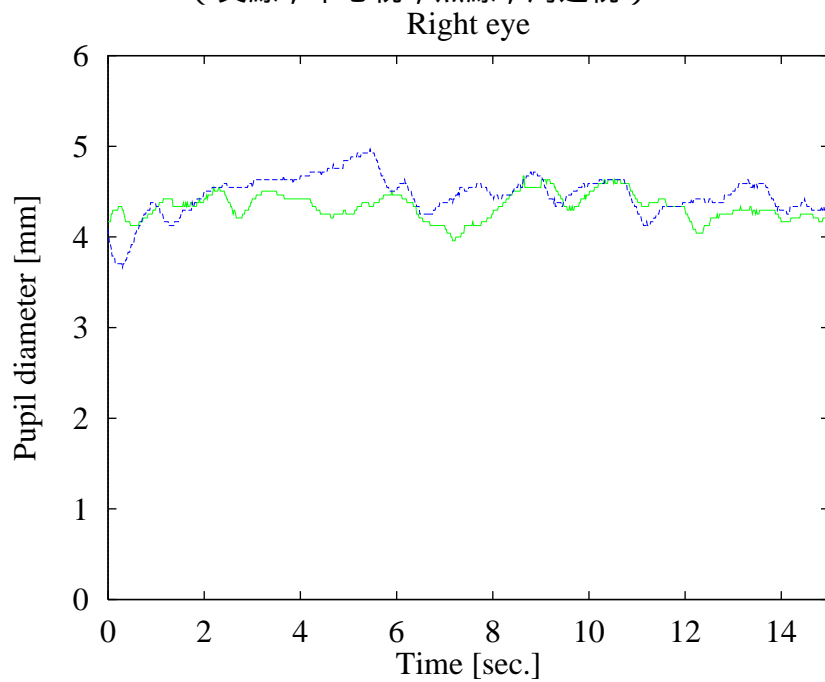


図 5.20: 周辺視効果 (文字暗唱; 右眼; 被験者 TM)
 (実線; 中心視, 点線; 周辺視)

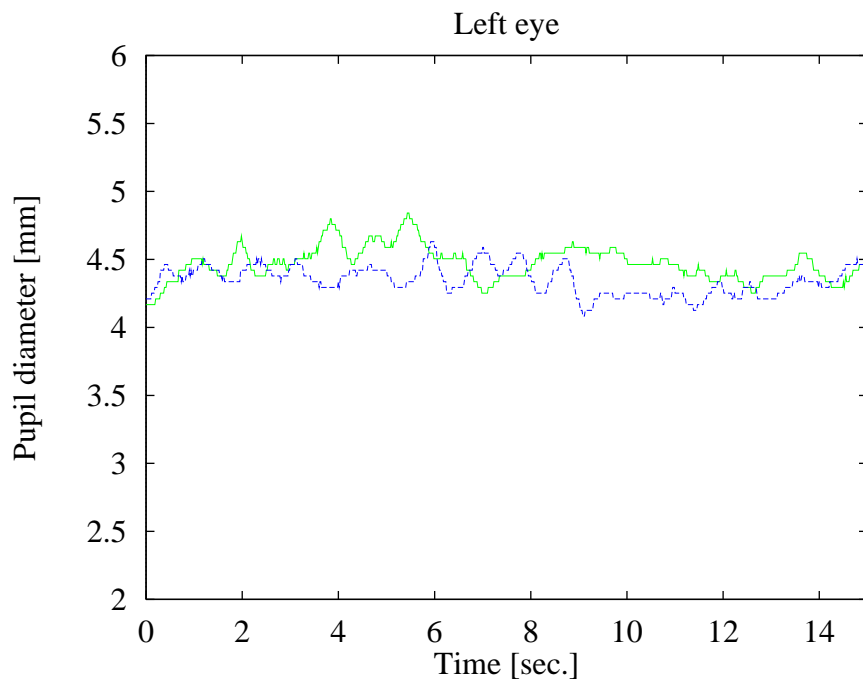


図 5.17: 周辺視効果 (文字暗唱; 左眼; 被験者 DM)
 (実線; 中心視, 点線; 周辺視)

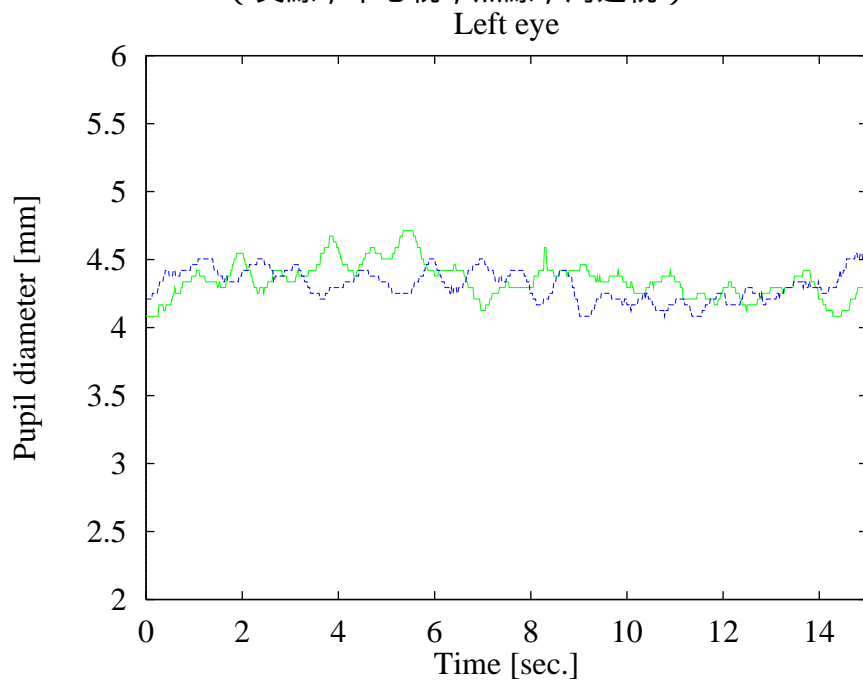


図 5.18: 周辺視効果 (文字暗唱; 右眼; 被験者 DM)
 (実線; 中心視, 点線; 周辺視)

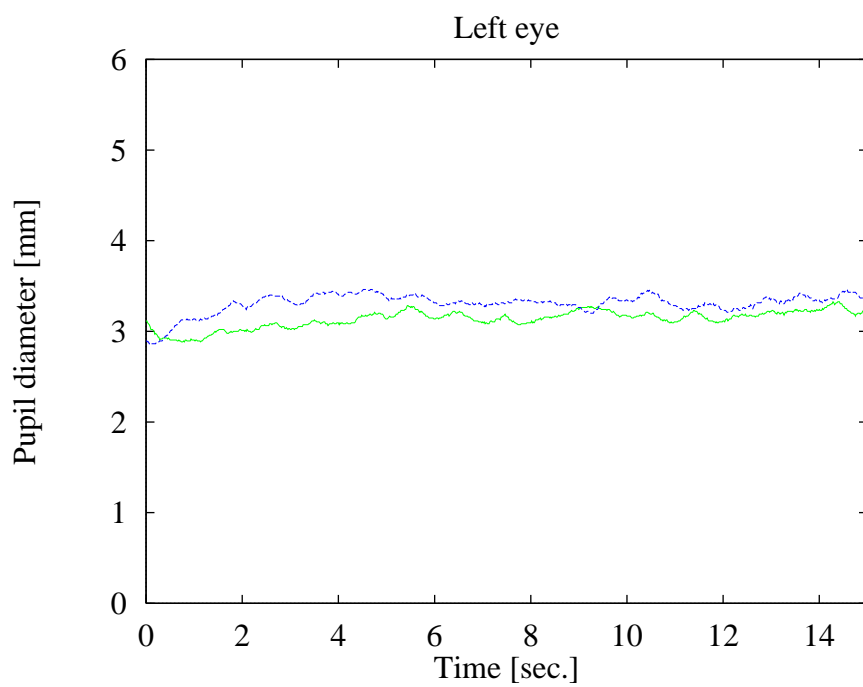


図 5.16: 20 回試行の平均値 (文字暗唱 ; 左眼 ; YA)
 (実線 ; 中心視 , 点線 ; 周辺視)

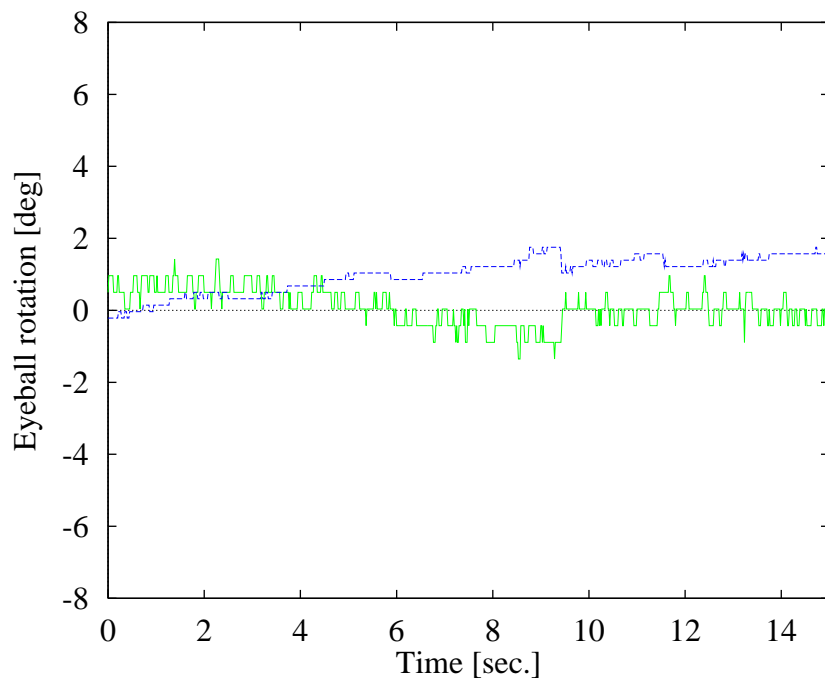


図 5.15: 周辺視での眼球回転 (文字暗唱; 左眼; YA)
 (実線; 垂直回転, 点線; 水平回転)

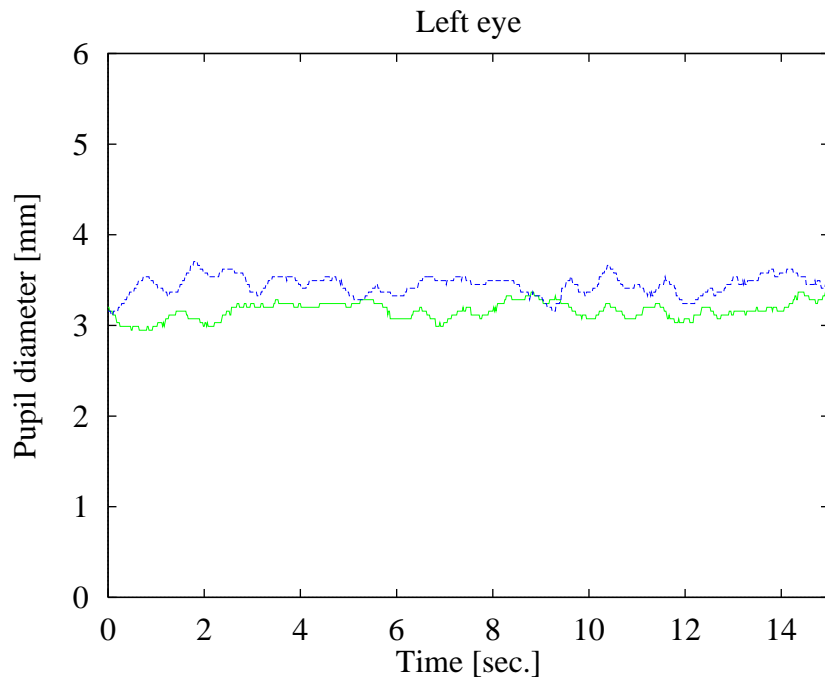


図 5.13: 周辺視効果 (文字暗唱; 左眼; 被験者 YA)
(実線; 中心視, 点線; 周辺視)

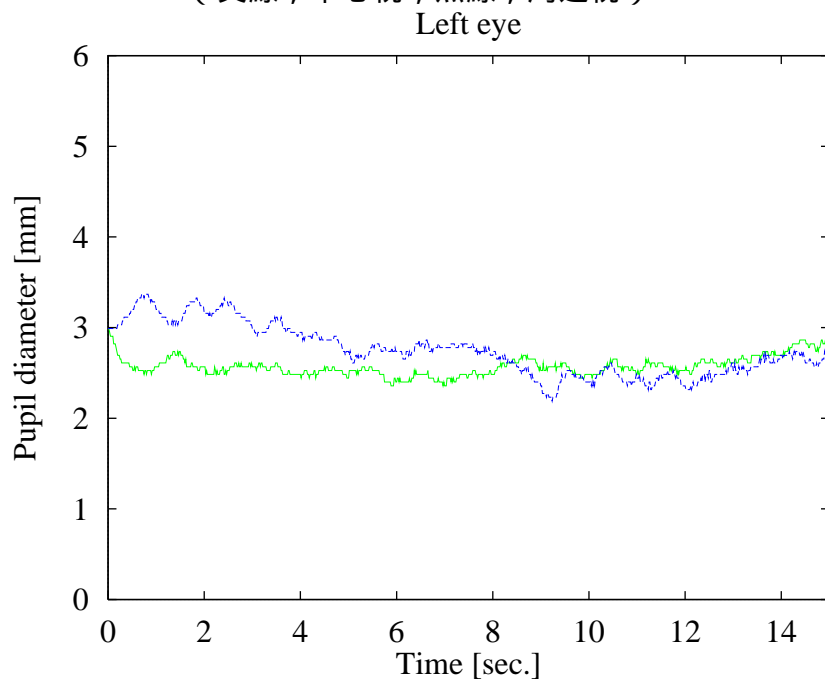


図 5.14: 周辺視効果 (文字暗唱; 右眼; 被験者 YA)
(実線; 中心視, 点線; 周辺視)

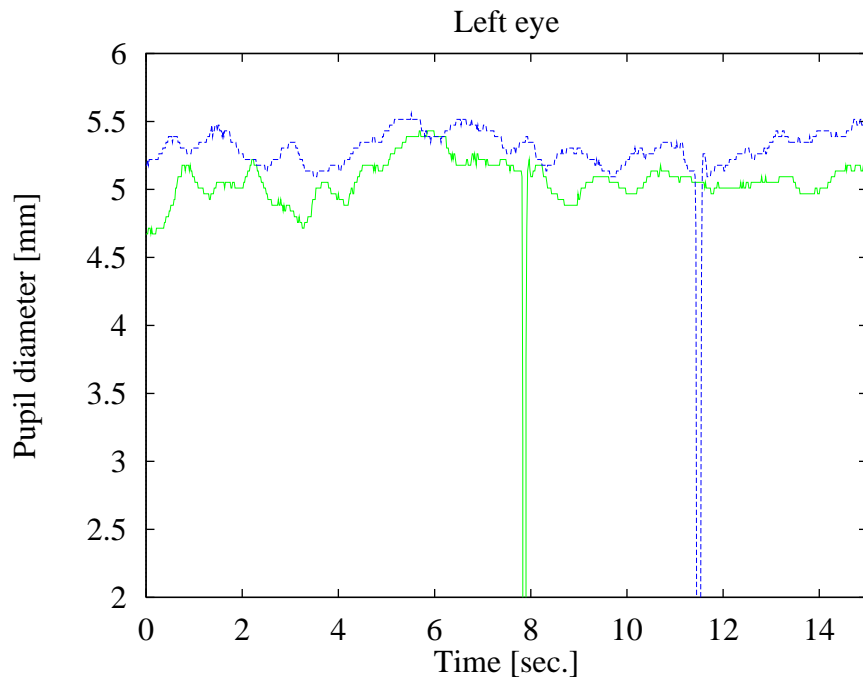


図 5.11: 周辺視効果 (文字暗唱; 左眼; 被験者 SF)
(実線; 中心視, 点線; 周辺視)

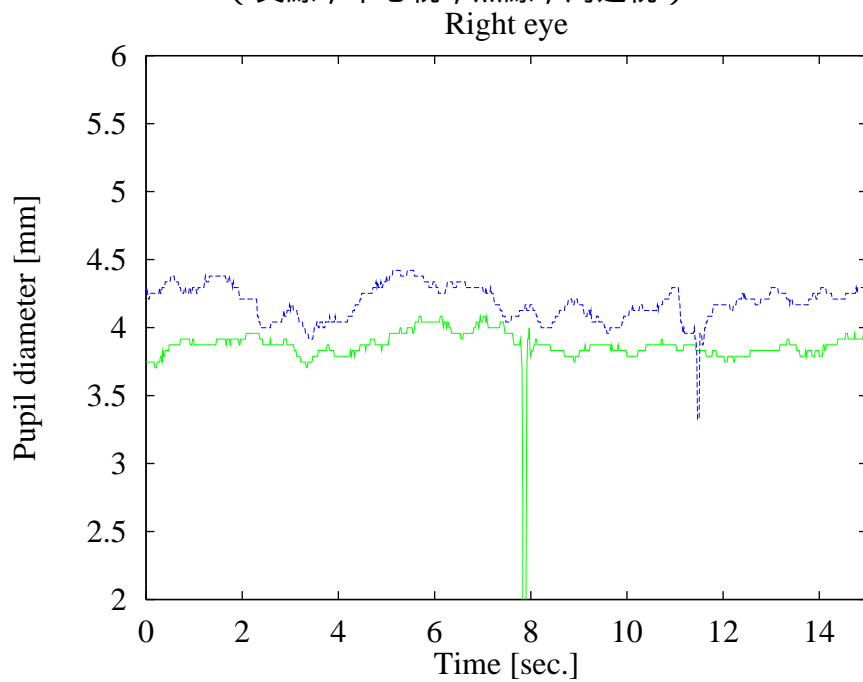


図 5.12: 周辺視効果 (文字暗唱; 右眼; 被験者 SF)
(実線; 中心視, 点線; 周辺視)

5.2.3 実験結果と考察

文字暗唱実験について

実験結果を図 5.11 ~ 図 5.20 に示す。これは、実験中の被験者の瞳孔径の時間変化をあらわしており、実線部分は中心に視点をあわせ中心を暗唱した場合で、点線部分が中心に視点をあわせ周辺を暗唱した場合のデータになっている。被験者 SF の実験結果である図 5.11, 5.12 では、左右両眼とも中心を暗唱した場合の方が周辺を暗唱した場合より小さい瞳孔径を示している。この傾向は被験者 YA にも当てはまり図 5.13, 5.14 のような結果になっている。これは、被験者が注意を周辺に向けることにより空間的な注意領域が広がったことが原因だと考えられる。また、その時図 5.15 からわかるように眼球はほとんど回転していないので視点は中心の文字に向けられていることが確認できる。視点位置が中心の文字にあることを全ての被験者に対して確認した。被験者 YA に対して中心を暗唱した場合、および周辺を暗唱した場合の測定された瞳孔径データをそれぞれ 10 回ずつ加算平均をとった場合でも図 5.16 より有意な差があることが確認できる。

しかし、図 5.18 ~ 図 5.20 に見られるように、被験者 DM, TM の場合には注意の方向に関わらず、瞳孔径に有意な差は見られなかった。

光刺激実験について

実験結果を図 5.21, 5.24 に示す。図 5.21, 5.22 は文字暗唱実験で瞳孔径に変化が見られた被験者 SF の光刺激実験での瞳孔径の時間変化データである。また、図 5.23 ~ 図 5.24 はその時の眼球の回転の様子である。図 5.21, 5.22 より視点位置が固定されていることが確認できる。

前注意過程であるこの光刺激実験では、注意方向と視線方向が異なる場合の瞳孔径に変化は見られなかった。つまり、注意過程では、その注意の方向によって瞳孔径に差が生じたが、前注意過程ではその注意の方向によらず、瞳孔径には変化はみられなかった。おそらく、前注意過程では注意が十分に周辺視方向に向かなくても、周辺視領域の変化を知覚することができるため、注意過程でみられた瞳孔径変化が現れなかったものだと考えられる。

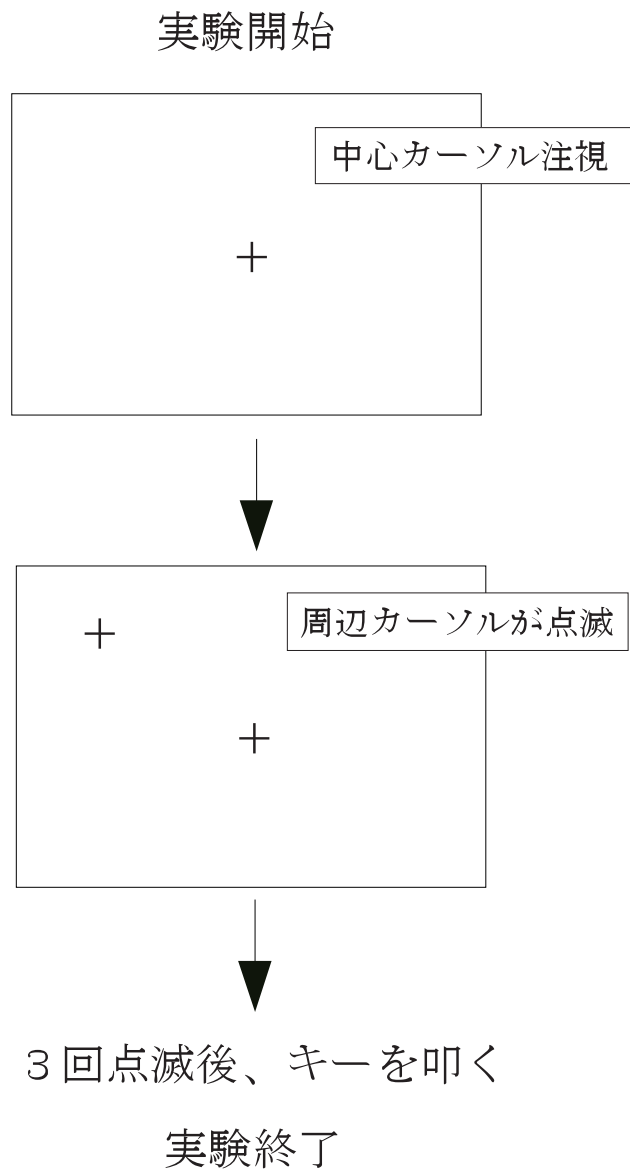


図 5.10: 周辺視効果；光刺激実験手順

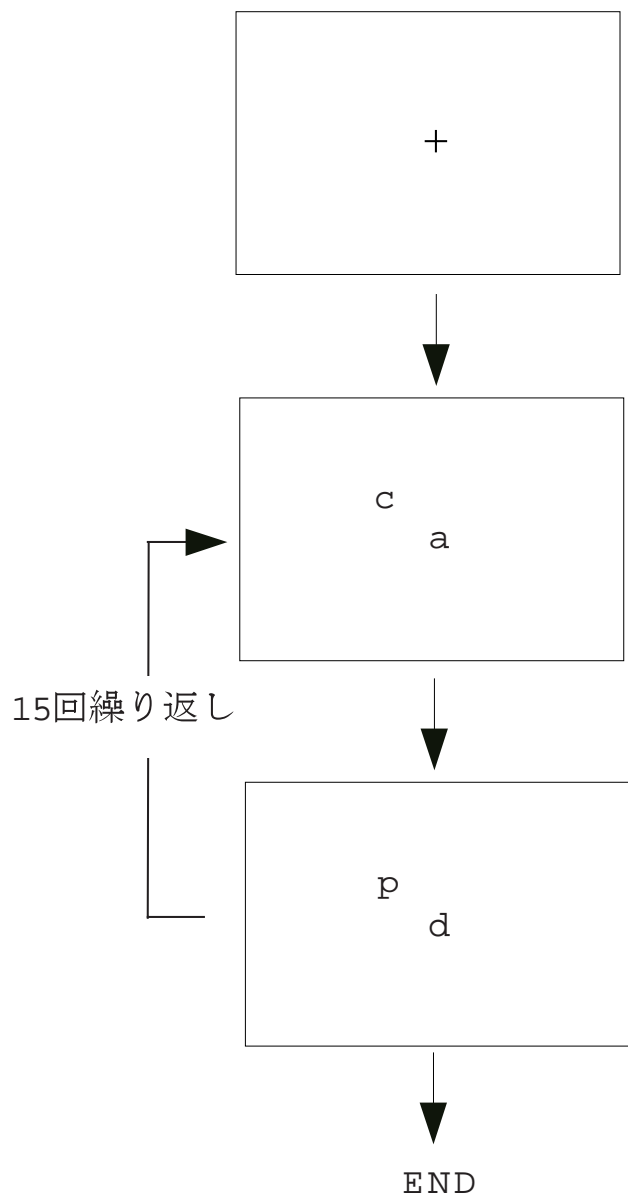


図 5.9: 周辺視効果；文字暗唱実験

文字暗唱実験

被験者には、まずこのタスクに十分慣れてもらってから実験を開始した。実験に使用する画面は、図 5.9 のように、中心部分と周辺部分に任意の文字が表示されており、その文字がそれぞれ 1 秒ごとに違う文字に変化しそれが 15 回、繰り返されるというものである。

周辺に表示されている文字は、有効視野*内に表示するため予備実験により周辺文字の注視点からの距離を定め、被験者に実験開始前にあらかじめ表示されている十字カーソルを注視してもらい、その状態から実験を開始する。実験開始後は、まず中心の文字に視点をあわせた状態で、順次変化していく文字を読んでもらう。その際の被験者の瞳孔径、視点位置を ES-HMD により計測した。測定時間は 15 秒間で 1 秒ごとに中心部分、周辺部分ともに文字が変化する。次に、中心に視点をあわせた状態で周辺にある文字を読んでもらう。中心の文字を読んだときと同様に 15 秒間測定を行う。この 2 つの測定をそれぞれ 10 回ずつ合計 20 回行う。

光刺激実験

実験に使用する画面は、図 5.10 のように、中心部分に十字カーソルが表示されており、実験開始数秒後に周辺部分の任意の位置に十字カーソルが表示、0.5 秒後に消えるという点滅の動作が起こる。点滅する間隔はランダムで 3 回目の十字カーソルの表示と同時に被験者にキーを叩いてもらい実験終了となる。なお、3 回目の十字カーソルの表示からキーを叩くまでの時間を測定しており、1 秒以上の場合は注意方向が周辺視領域になかったとして再測定とした。測定中の被験者の瞳孔径、視点位置を ES-HMD により計測した。

被験者

文字暗唱実験では、研究室内男子学生 SF, YA, DM, TM の 4 名を被験者とし、実験中は被験者の頭部の位置ずれ等によって生じる誤差を抑えるため顎の位置を固定し、瞬きは可能な限りしないよう指示した。光刺激実験では文字認知実験を行った被験者 4 名のうち 2 名に対して計測を行った。

* ある点を注視したとき、一定の課題処理が達成できる空間的範囲。空間的注意の広がりに関係する。

注意が何かに向けられるというとき，それはまず物理空間の中で一定の大きさと方向をもったベクトルのようなものとして考えられる．それはたいてい眼球の方向，すなわち視線と一致しているが，それから逃れて独立に移動するかもしれない．第九の演奏会に行ってみよう．バイオリン奏者は楽譜を目で追いながら，指揮者に注意の視線を送る．スポットライトのような注意が楽譜に集中し，次の瞬間にすばやく指揮者の方向に移動し，再び楽譜に戻る．指揮者の視線はオーケストラの中を移動しながら，注意はオーケストラ全体をカバーする．このような注意のありかたを「空間的注意」ということが多い．

この空間的注意がおよぶ領域の広さは可変であり，ズームレンズの絞りのように，視野が広い領域をカバーするとき空間解像度が低く，視野が制限されるとき空間解像度が高くなるため，注意領域はズームレンズにたとえられている^{15, 16)}．

前注意過程と注意過程

視野内に多くの類似した背景刺激がある場合，ある1つの視対象が，色，形，動きなどの視覚属性のうち，1つについて他と異なっていると，その1つのみ飛び出て見え，それを見つけるためには注意を必要としないこの過程は自動的，無意識的であり前注意過程 (Pre-attentive Process) と呼ばれている．それに対して，2つ以上の属性を組み合わせたときに他と異なっている場合には，自動的，無意識的には見つけることができず，注意によって視野を探索することが必要となる．これを注意過程 (Attentive Process) と呼ぶ^{15, 16)}．

実験の目的

本実験の目的は，ある点を注視しているとき，被験者の注意が，視線方向に向けられているのか，周辺方向に向けられているのかを，瞳孔径の大きさから判断することである．課題としては前注意過程と注意過程に関する2種類を考え，それぞれの課題において，視線方向と注意方向を同じにする場合と異なる場合について考える．これはズームレンズ効果の評価ともいえる．

5.2.2 実験方法

注意過程の課題として文字暗唱課題を，前注意過程の課題として光刺激反応課題を行った¹⁵⁾．

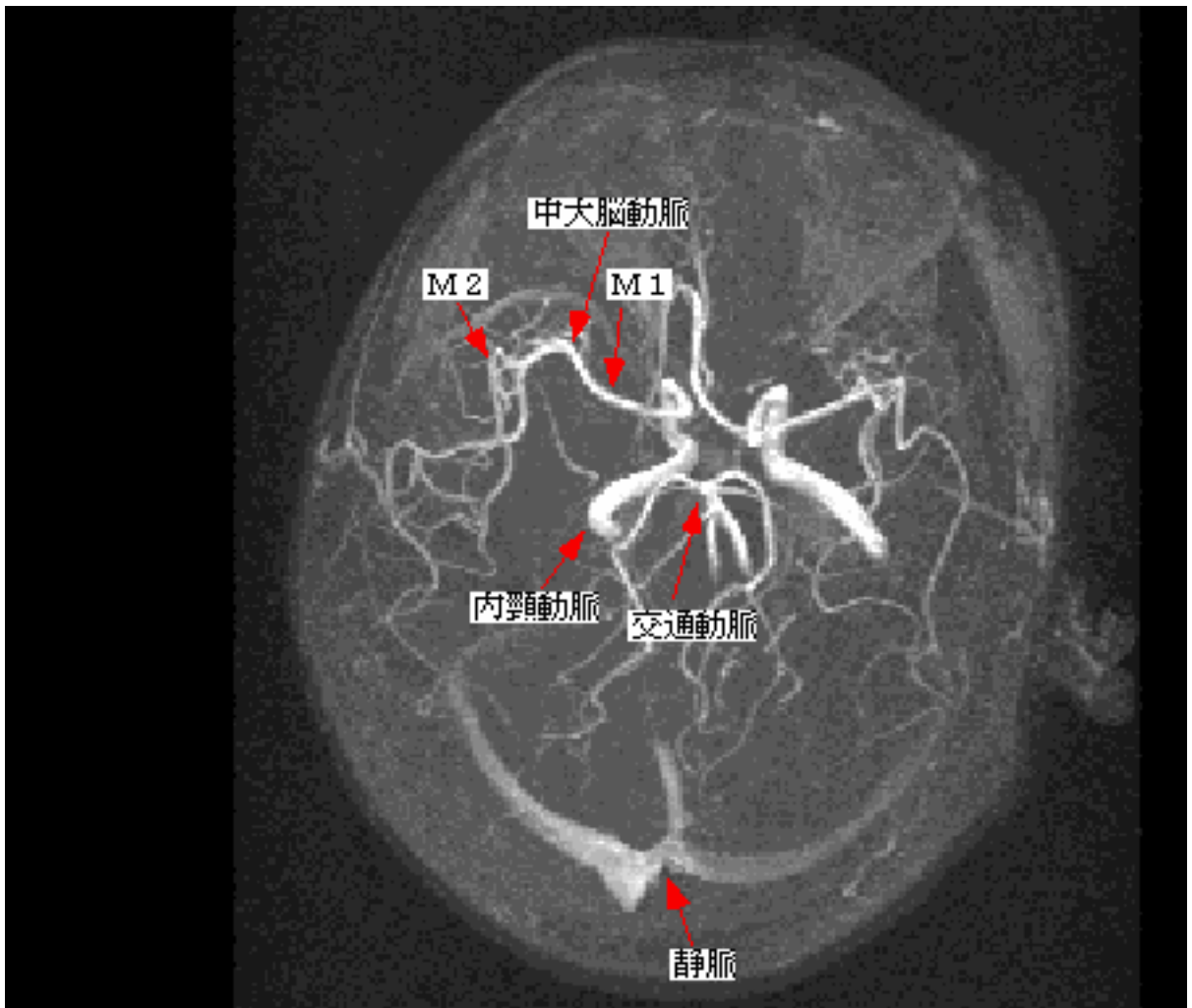


图 5.8: 脑血管写真 (左眼用)

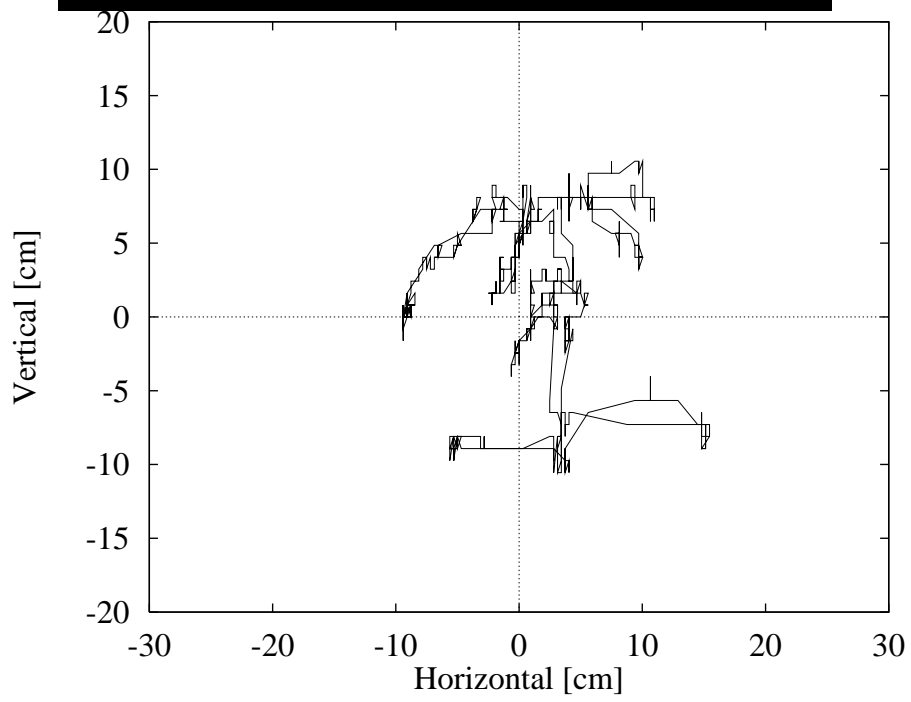
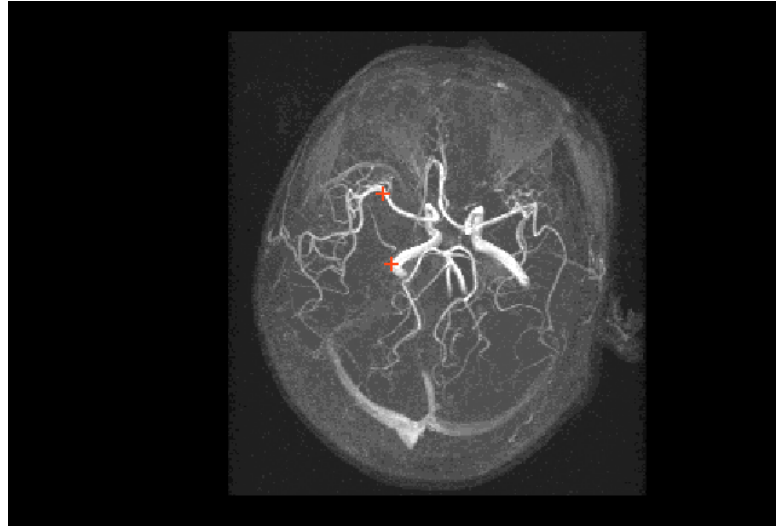


图 5.7: 视点履歷 (左眼)

脈の M1 と M2 の分岐点などである。本実験の被験者は医学知識をもたず、脳血管画像を観察するのが初めてであるため、あまり診断に関連のない静脈にも多くの時間を割いて注視していることが図 5.7 よりわかる。

以上に述べたように ES-HMD を用いると両眼立体視時においておよその注視位置が判別できることがわかった。しかし、脳血管画像は非常に複雑であるため、診断時の専門家の視点追跡などの実際応用に際しては MR 画像よりもさらに解像度の大きいデジタルサブトラクションアンギオ画像などを利用し、ES-HMD のディスプレイ解像度を向上させる必要がある。

5.2 視覚認知実験

前節では、MR 画像を例にして、注視点の追跡を行った。一般に視点位置が注意を向けている対象とされているが、視線方向と注意の方向が異なるとき、そのような状態を他覚的に計測できるであろうか。自動車の運転中やプラント制御盤の操作中など注意が散漫になったり、注意が視対象からはずれたときに重大な事故を招く危険性がある場合、そのような状態を計測によって判別できることは、心理学のみならず工学的にもその意義は大きい。本節では定量指標として瞳孔の大きさをとりあげ、注意の方向と視線の方向が異なる状態での瞳孔の特性を客観的に評価することを試みる。

5.2.1 周辺視とズームレンズ効果

人間の視野は、左右に 180° 、上下に 150° 位あるといわれている。人間は視野全体を一様に見ているのではなく、中心でとらえる部分と周辺でとらえる部分がある。視線方向の視覚を中心視、それ以外を周辺視と呼んでいる。

この中心視と周辺視では、視力、すなわち空間解像力が異なる。視力の値は中心から周辺にしたがって、急激に低下する。中心から周辺にわずか 1.5° ほどずれただけで、解像力は中心視力の約 30 パーセント程度になってしまう。つまり、われわれは見たいものがある場合にはその視対象に視線を向け、空間解像力に優れた中心視でみる必要がある。

では、周辺視は何の役にも立っていないのかということそうではなく、周辺で重要な情報の手がかりがある場合、それを周辺視により知覚し、視線をその方向に転ずる。

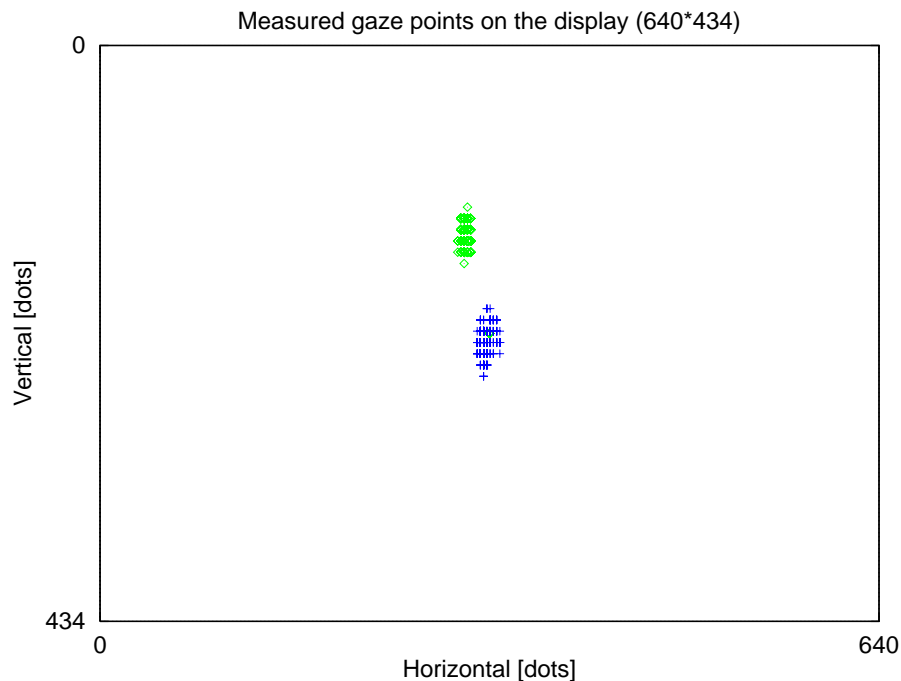


図 5.6: 脳血管注視時の視点位置分布 (左眼)

5.1.2 脳血管画像注視時の視点移動測定

実験方法

被験者には特に指示を出さず，10 秒間自由に図 5.2，5.3の脳血管画像を見てもらった。被験者は，このような脳血管写真を初めて見るステレオノーマルの男子学生 1 名とした。

実験結果と考察

図 5.7に画像注視中の左眼の視点軌跡を示す。被験者の視点移動はおおよそ次のとおりである。

内頸動脈 → 交通動脈 → 中大脳動脈 → 静脈 → 交通動脈

また測定後の内観報告によると，画像中の特に内頸動脈と中大脳動脈の奥行き位置が明瞭に判別できたと報告した。

ところで専門家が着目する点に関して，血管の閉塞を伴い生命に危険を及ぼす可能性のある瘤ができやすい箇所はおおよそ決まっていて図 5.8に示す交通動脈内の血管の分岐および合流点，内頸動脈と中大脳動脈との分岐点，そして中大脳動

管である内頸動脈につけられた下側の十字カーソルを注視した場合がグラフの点線部分である。このデータは、被験者が輻輳運動により中大脳動脈が奥側に、内頸動脈が手前側に位置するよう観察していることを示している。被験者の主観報告も「下の十字カーソルの方が手前に見えた」と実験データと一致していた。また、十字カーソルの計算上の奥行き位置は上カーソルが 68.42cm，下カーソルが 52cm であるが、図 5.5 と比較すると上、下カーソルとも計算上の奥行きの方が手前側に来ている。奥行きの差は計算上の値と実験データの値とも約 15cm で一致している。これは、4 章で得られた実験結果に示されるように、呈示された立体像の奥行き位置よりも、奥側を注視するという結果に合致する。なお図 5.6 はそれぞれのカーソルを注視したときの視点位置を示す。図に示されるように、被験者は 2ヶ所の指示された位置を注視していることがわかる。

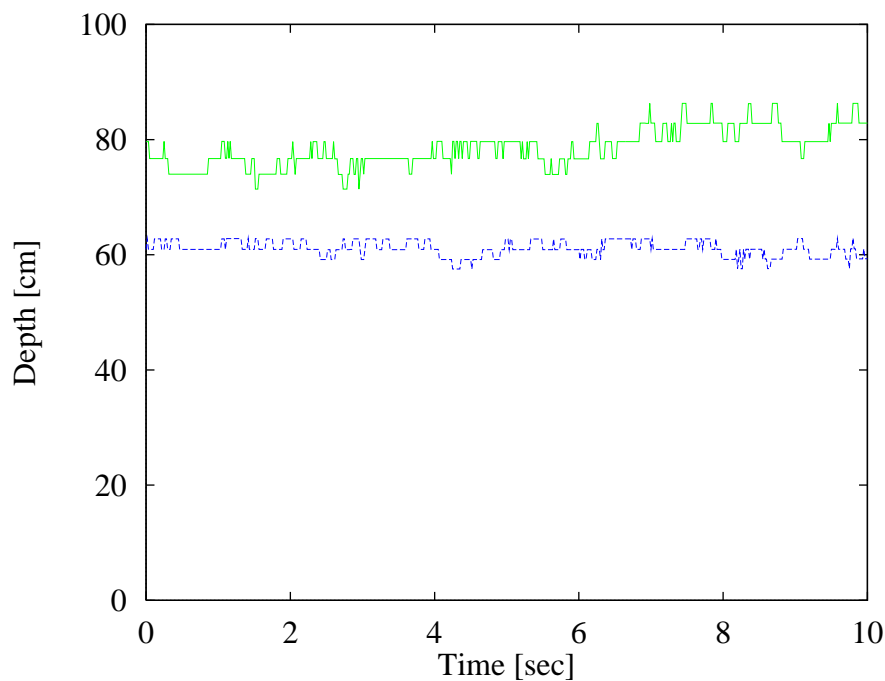


図 5.5: 脳血管の注視時の奥行き
(実線 ; 上カーソル注視 , 点線 ; 下カーソル注視)

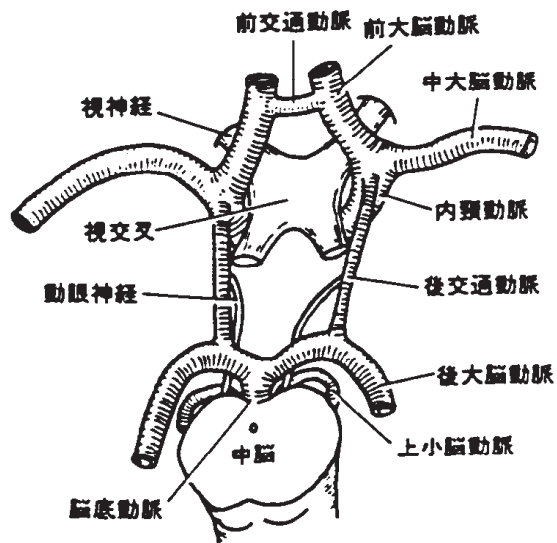
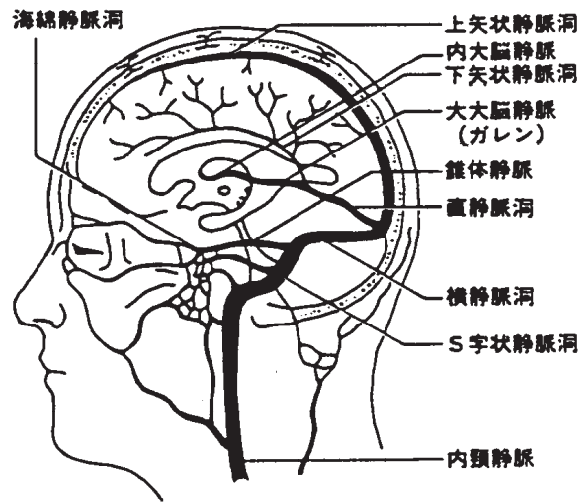


図 5.4: 頭部の主要動脈



图 5.2: 脑血管画像 ; 左眼用



图 5.3: 脑血管画像 ; 右眼用

た医者 の 3 次元視点履歴を追跡することはどの点を注目すべきかを教示してくれ、初学者にとっても貴重な情報を提供してくれるものと期待できる。学習者の履歴と比較することにより効果的な教示システムの構築も可能となる。

5.1.1 脳血管画像の特徴点の視点位置測定

前章で述べた単純な評価用画像と比較して、脳血管写真はかなり複雑であることが図 5.2, 5.3 よりわかる。撮像角度の異なる 2 枚の脳血管写真を融像させ立体視を行った場合、様々な奥行きで融像することになる。そこで、まず正常に奥行き感を得られているかどうかを判定するために、ある特定の融像点のみの視点位置を測定し、被験者の立体視が立体画像と適合するかどうかを調べた。特定の融像点として図 5.4 に示す内頸動脈と中大脳動脈の M2 部を選択する。

実験方法

実験は、ES-HMD の左右両眼の表示ディスプレイに図 5.2, 5.3 のような視差を与えた脳血管画像を表示し、被験者にその左右両眼画像中にある十字カーソルを 10 秒間注視してもらおうというものである。また、画像中の十字カーソルが融像するように事前に練習を行った。

十字カーソル位置は 2 つ用意しており、下の太い血管が内頸動脈を、上の細い血管が中大脳動脈を表している。これら 2 つの点を注視する作業をそれぞれ 3 回ずつ行った

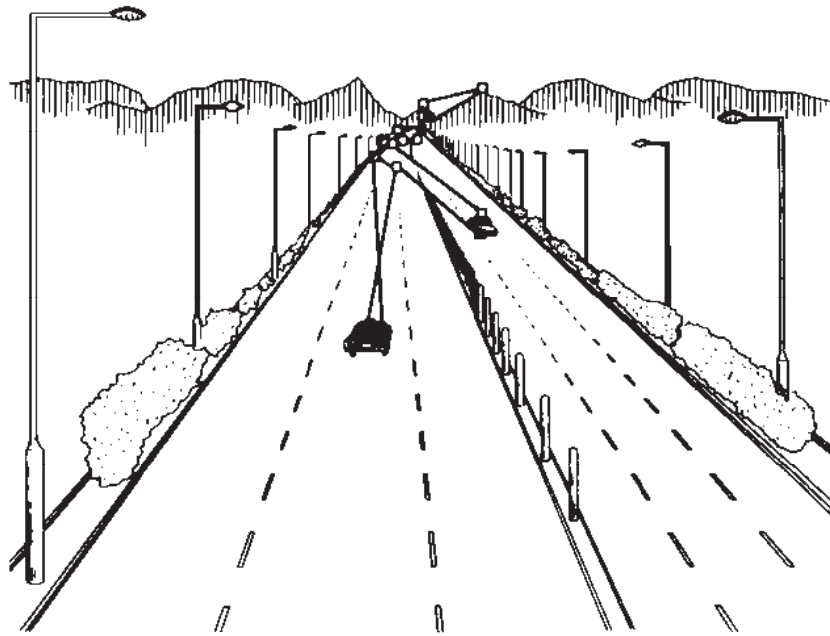
測定の途中で被験者が無意識に瞬目してしまったり眼に痛みを感じたりして 10 秒間の開眼状態を続けられなかった場合や、睫毛などによる無視できないノイズが入った場合は再度測定を行った。

被験者

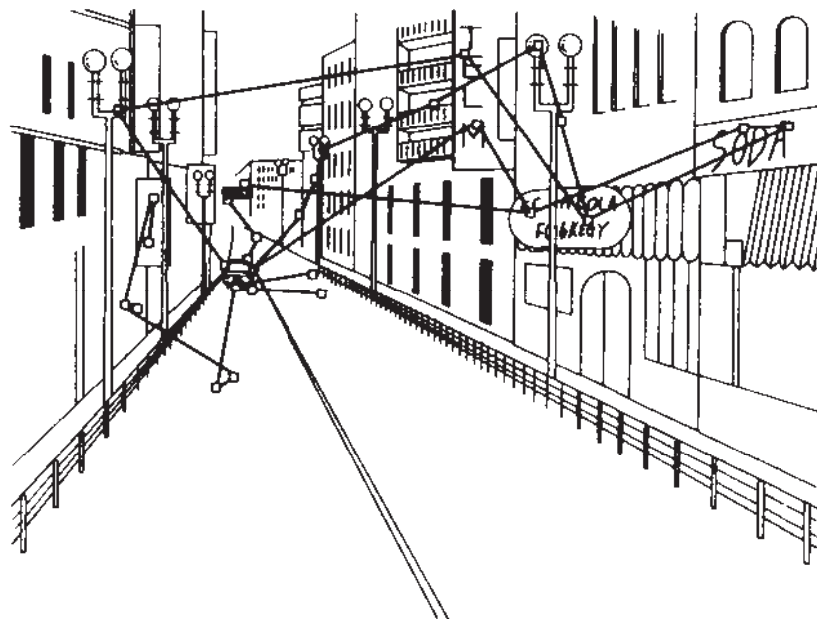
被験者はステレオノーマルの男子学生 1 名を選択した。また、実験中は被験者の頭部の位置ずれ等によって生じる誤差を抑えるため顎の位置を固定した。

実験結果と考察

実験結果を図 5.5, 5.6 に示す。図 5.5 において、図 5.2, 5.3 の血管像の中大脳動脈につけられた上側の十字カーソルを注視した場合がグラフの実線部分で、太い血



a 高速道路



b 一般道路

図 5.1: 高速道路と一般道路の視線の動き

第 5 章 視覚指標計測を利用した応用実験

本章では、Eye-Sensing HMD の応用に関して検討する。5.1 節では立体視することが重要な事例として脳血管の MR アンギオ画像について採り上げる。MR アンギオ画像は MRI 装置から得られる一定の奥行き幅を含んだ立体画像のことである。

5.1 脳血管画像を用いた視点位置履歴測定

眼球運動は、人間の行動の分析にも各方面で適用されている。

人間が画像のどの様な点をよく見ているかについて、眼球運動を用いて分析した例として、図形のエッジ、境界、運動部分等に注視点が集まることが示されている。これら特徴点間を結ぶ軌跡をスキャンパスと呼び、パターンの記憶・再現に重要な役割を持つことが示唆されている¹²⁾。

交通工学への適用例として、車を運転中の視線の動きを分析することにより、交通事故の原因分析や安全性の向上に役立てることが出来る。図 5.1 では、一般道路と高速道路の注視点を比較したもので、高速道路では前方に視線が集中するのに対して、一般道路では、駐車車両や側道、歩行者ばかりでなく周囲の広告看板にまで視線は広がっている。

一方、医用方面への報告も多い。老人性痴呆症の一種であるアルツハイマー病患者の眼球運動を分析し、視標探索時や図の模写時に特殊な注視点分布が生じ、アルツハイマー病の客観的な診察に応用できる可能性を示している¹³⁾。また、歯科医の立場から、義歯によって生じる顔貌の変化を熟練した歯科医がどこを見て判断しているかを分析し、歯科教育に役立てようとする研究も報告されている¹⁴⁾。

図 5.2、5.3 のような MR アンギオ画像による人間の脳血管写真は、医者が撮像角度の異なる 2 枚の写真を使って、立体視を行い患部の診断を行うのに使われている。通常、左右両眼用の写真をそれぞれの眼前に配置し、交差法もしくは平行法により立体視を行う。これらの立体視法を習得するには訓練を要する。

このような視差を持った脳血管写真を ES-HMD の左右両眼に表示させれば、容易に立体視をさせることができ、患部の診断の支援が可能となる。また、熟練し

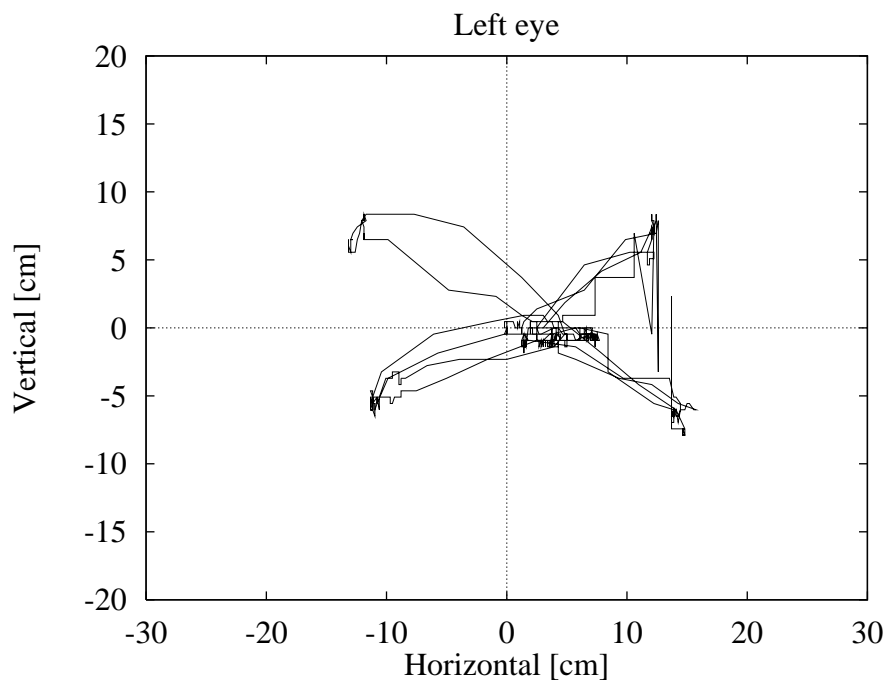


図 4.42: 動画注視時の視点履歴 (左眼)

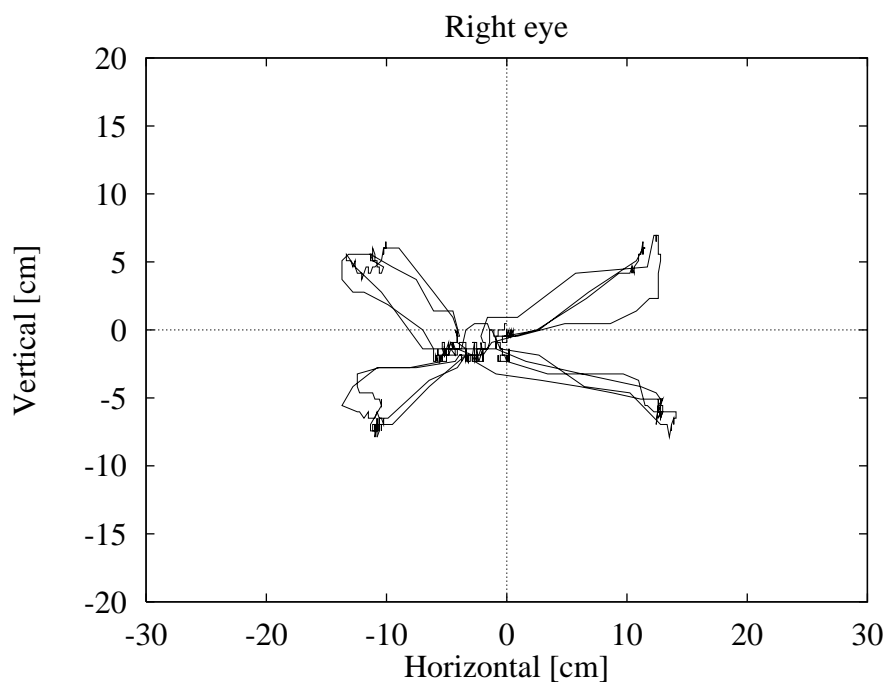


図 4.43: 動画注視時の視点履歴 (右眼)

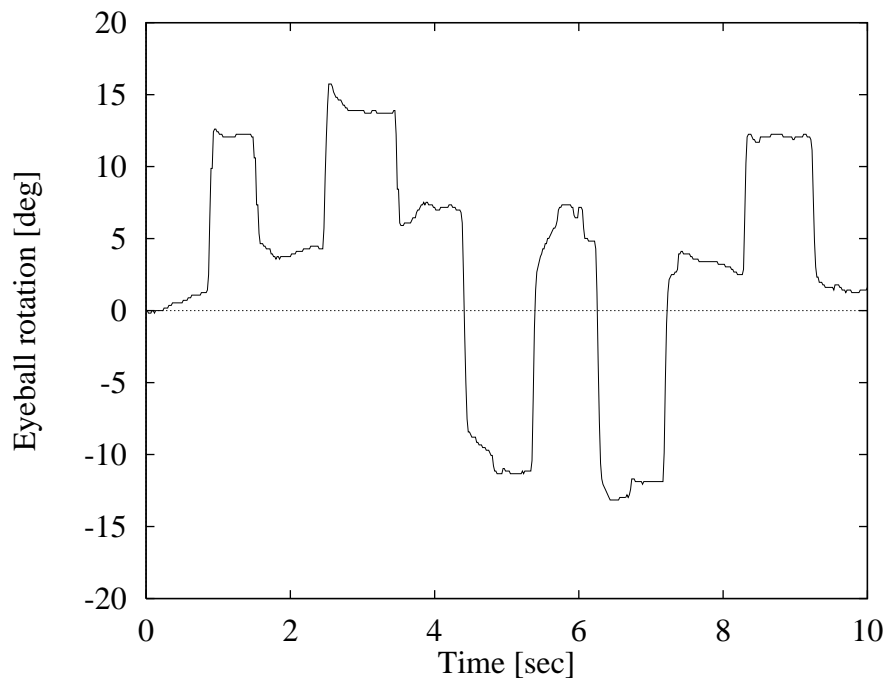


図 4.40: 水平眼球回転角度 (動画像; 左眼)

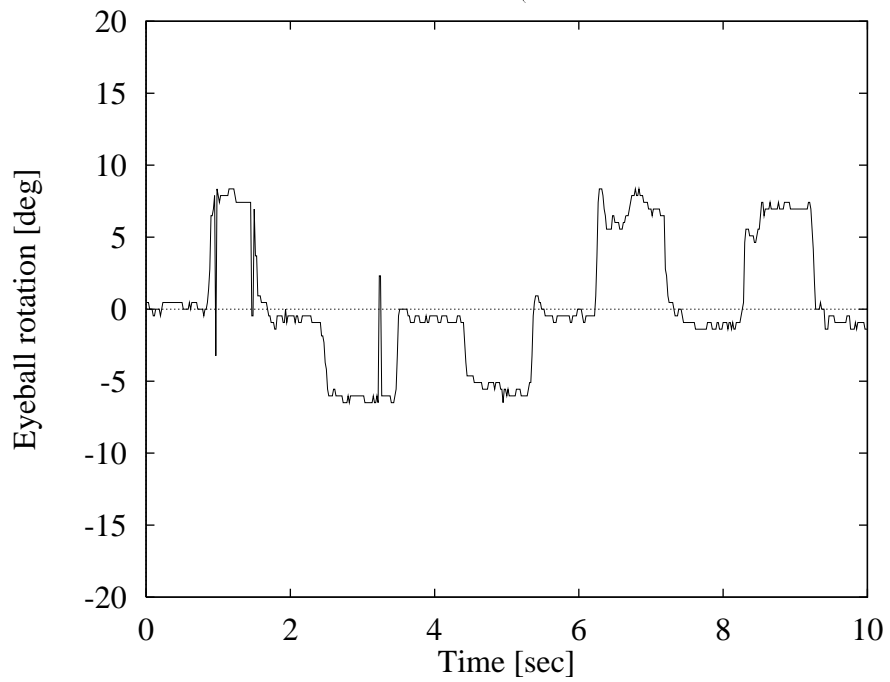


図 4.41: 垂直眼球回転角度 (動画像; 左眼)

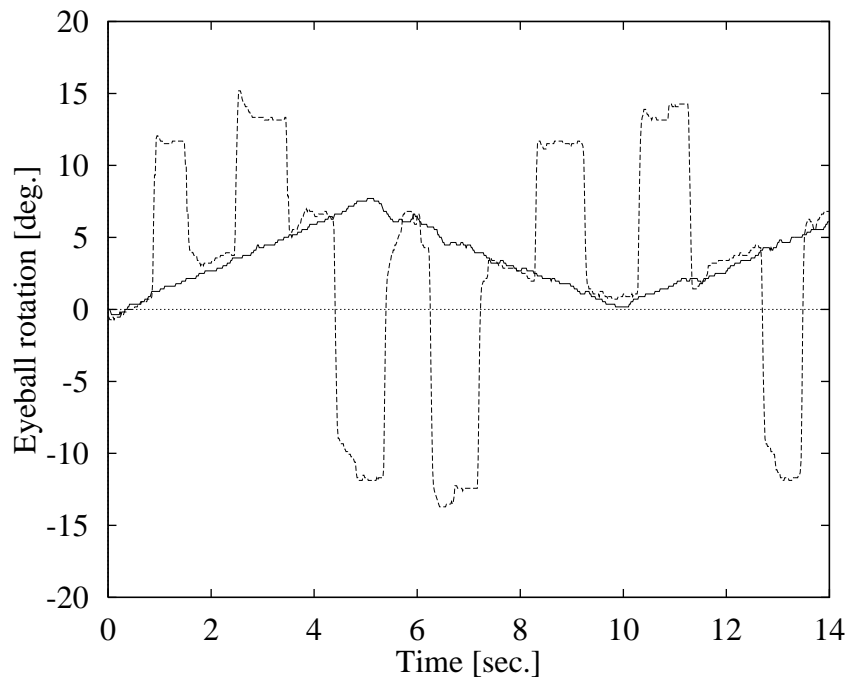


図 4.38: 眼球回転角度 (動画像; 左眼)

(実線; 球オブジェクトのみ注視, 点線; 全てのオブジェクトを交互に注視)

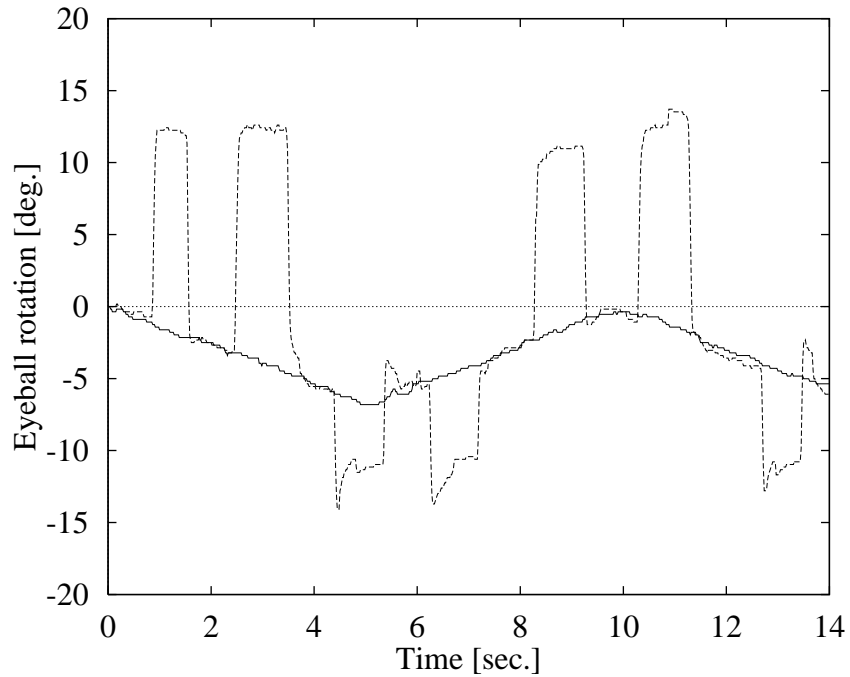


図 4.39: 眼球回転角度 (動画像; 右眼)

(実線; 球オブジェクトのみ注視, 点線; 全てのオブジェクトを交互に注視)

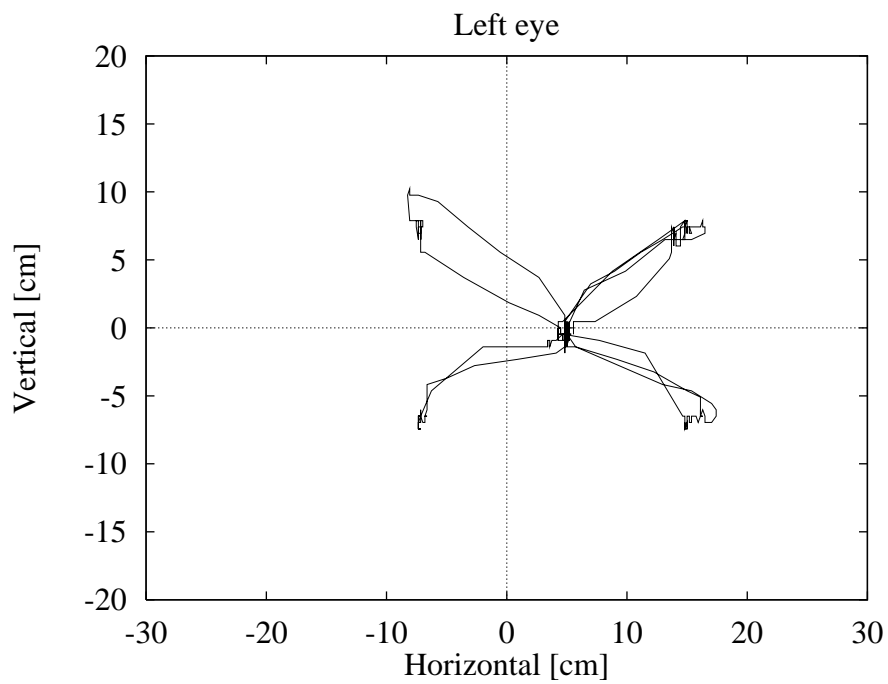


図 4.36: 静止画注視時の視点履歴 (左眼)

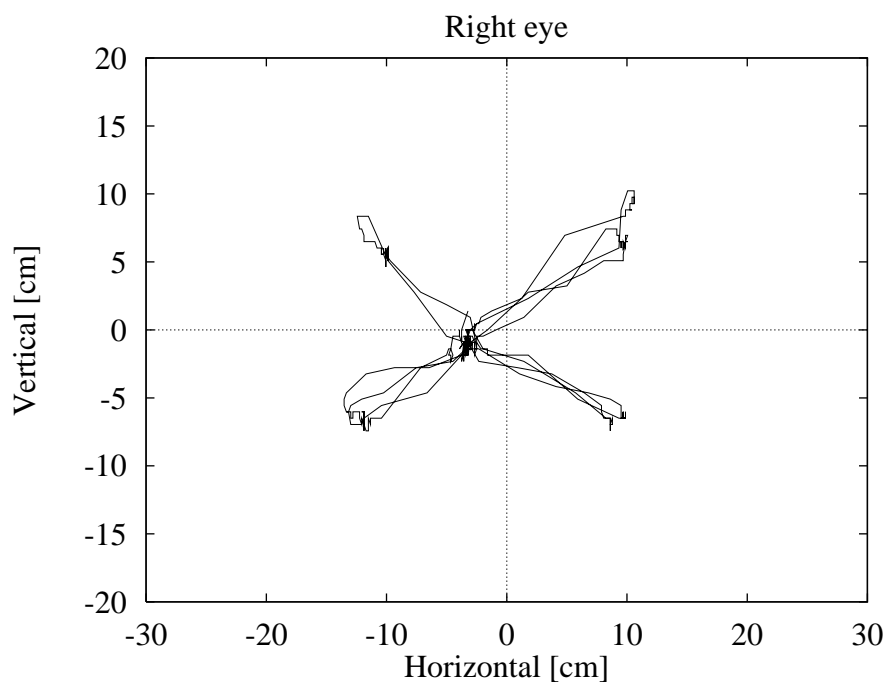


図 4.37: 静止画注視時の視点履歴 (右眼)

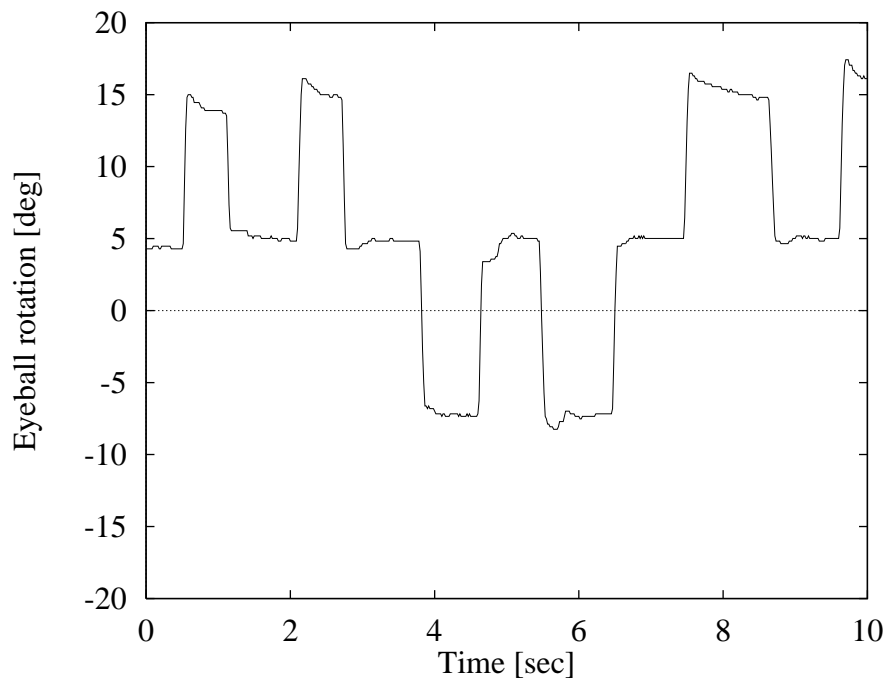


図 4.34: 水平眼球回転角度 (静止画像 ; 左眼)

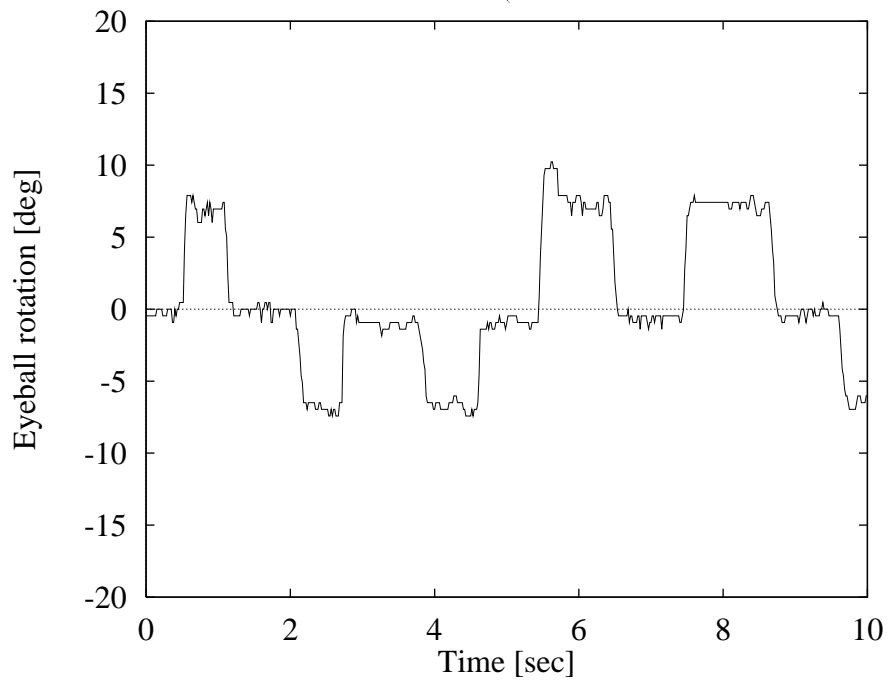


図 4.35: 垂直眼球回転角度 (静止画像 ; 左眼)

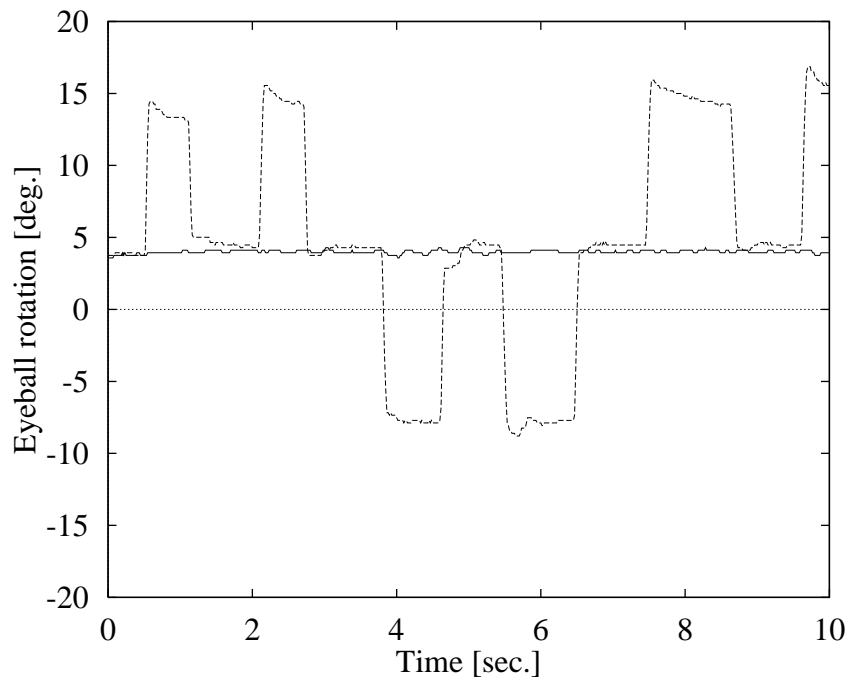


図 4.32: 眼球回転角度 (静止画像; 左眼)

(実線; 球オブジェクトのみ注視, 点線; 全てのオブジェクトを交互に注視)

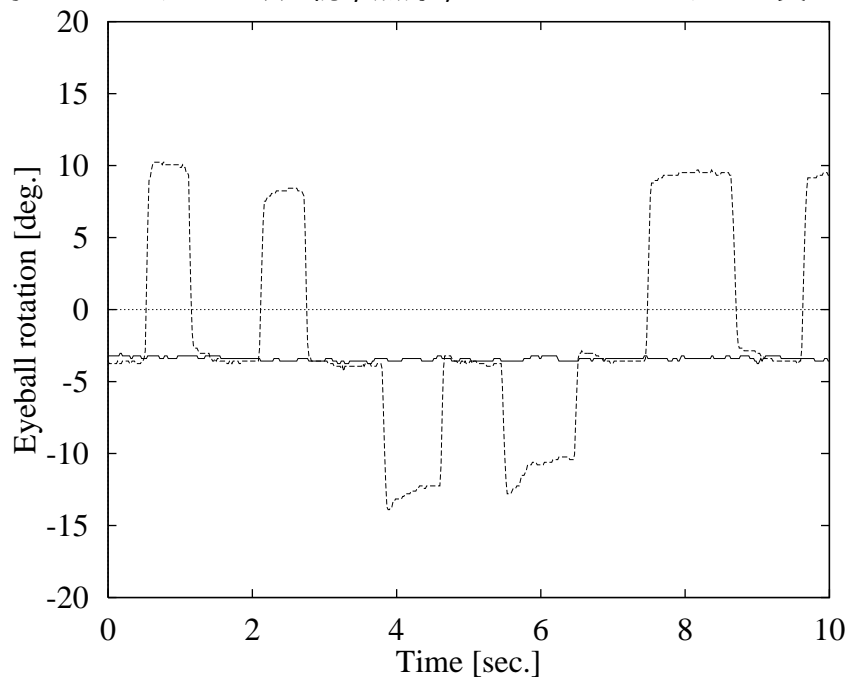


図 4.33: 眼球回転角度 (静止画像; 右眼)

(実線; 球オブジェクトのみ注視, 点線; 全てのオブジェクトを交互に注視)

行き位置を知ることができる。一方、点線部分は立体視画像以外に4つのオブジェクトに対しても交互に注視させる実験の場合の眼球回転角度の時間変化を示すデータである。なお、この点線において、実線部分と重なっているところは、立体オブジェクトを注視しているところに相当する。また、図4.32~4.33の実線部が両眼それぞれ $+4^\circ$ 、 -4° の一定値を示しており、これは輻輳角が 8° であることを示している。一方、視差は 9.15° であり、オブジェクトの呈示位置より約 1° 小さくなっており、遠方を注視していることを示している。立体オブジェクト以外のオブジェクトを注視する場合、右側のオブジェクトは眼球回転角にして 7.5° から 21.6° の範囲を占め、同様に左側のオブジェクトは -7.5° から -21.6° の範囲を占めることが簡単な計算により求められる。このことより、図4.32~4.35の各グラフ内のピーク値において多少の差が認められるが、左右のオブジェクト領域内部を注視していると判断できる。

図4.36, 4.37, 4.42, 4.43には、静止画、動画の場合の平面視点履歴を示しており、被験者の視点移動の様子が理解しやすくなっている。静止画の場合(図4.36, 4.37)には、立体オブジェクトを注視しているとき、輻輳角が約 8° となるが、その視差の分、視点位置が左眼の場合右方向へ右眼の場合左方向へ視点位置が画面中心からずれていることがわかる。また、動画の場合(図4.42, 4.43)には、立体オブジェクトを注視するとき、その輻輳角は $0 \sim 15.9^\circ$ の値で変化するため、水平方向に変化のある視点履歴になっている。

視差のないオブジェクトから視差のあるオブジェクトへ視点に移す場合、眼球の回転はすばやく目標の角度に動いている。被験者の実験後の内観報告によれば、背景のない時よりもより立体的に感じ立体視像を注視しやすかったと報告した。

以上の実験結果から、時間変化に関する両眼の眼球回転角度データをもとに、被験者の視点位置がどこか、また、立体視しているかどうか、立体視している場合の奥行き位置を推定できることがわかる。

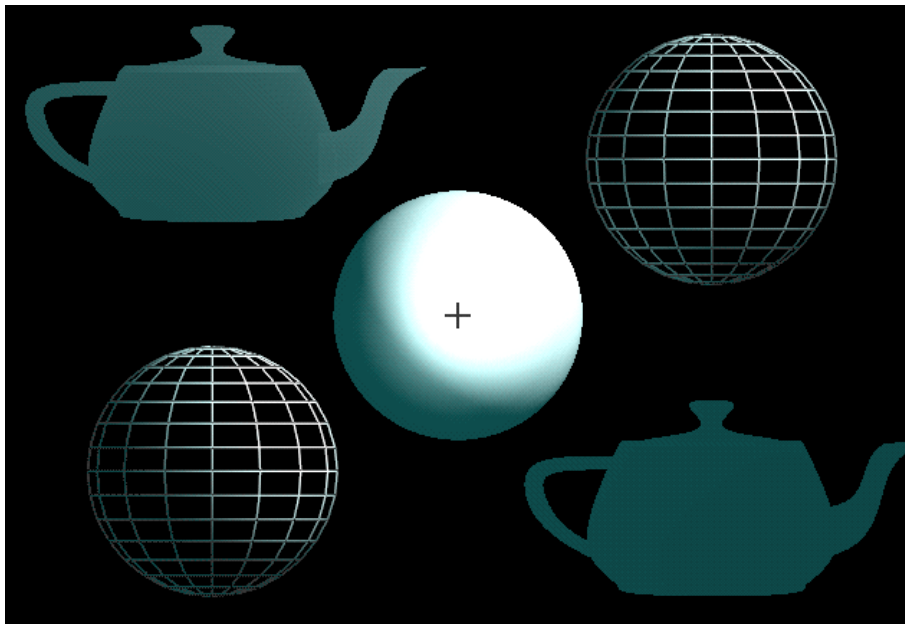


図 4.31: 背景画像付き立体オブジェクト

らう場合の 2 種類を考え，測定を行った．

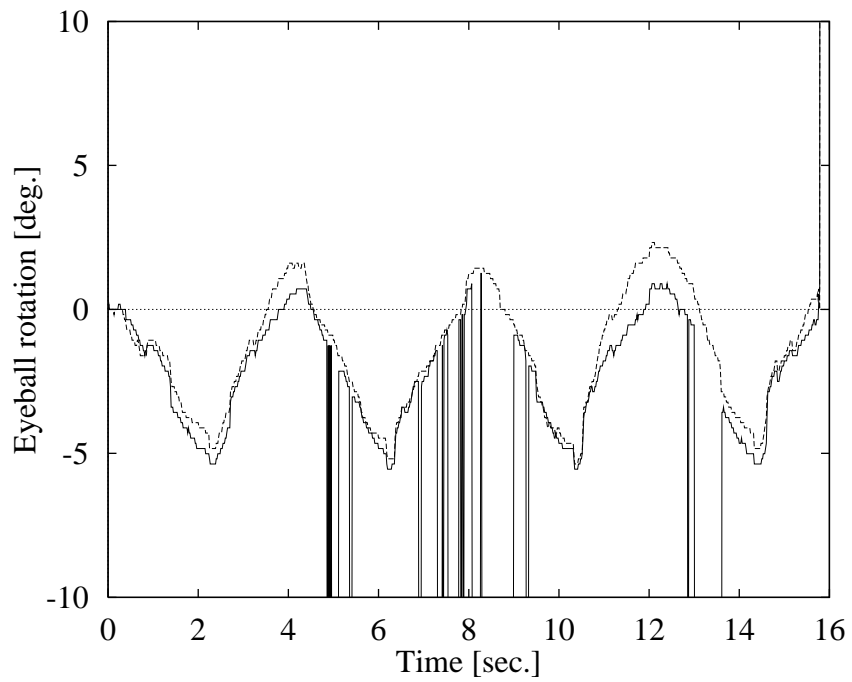
4.4.2 被験者

被験者は前節の実験でステレオノーマルであると判断した TO に対し実験を行った．計測中は，被験者の頭部の位置ずれ等によって生じる誤差を最小限におさえるために顎の位置を固定し，瞬きをしないよう指示した．また，被験者の主観報告により立体オブジェクトが融像しているかどうかを確認した．

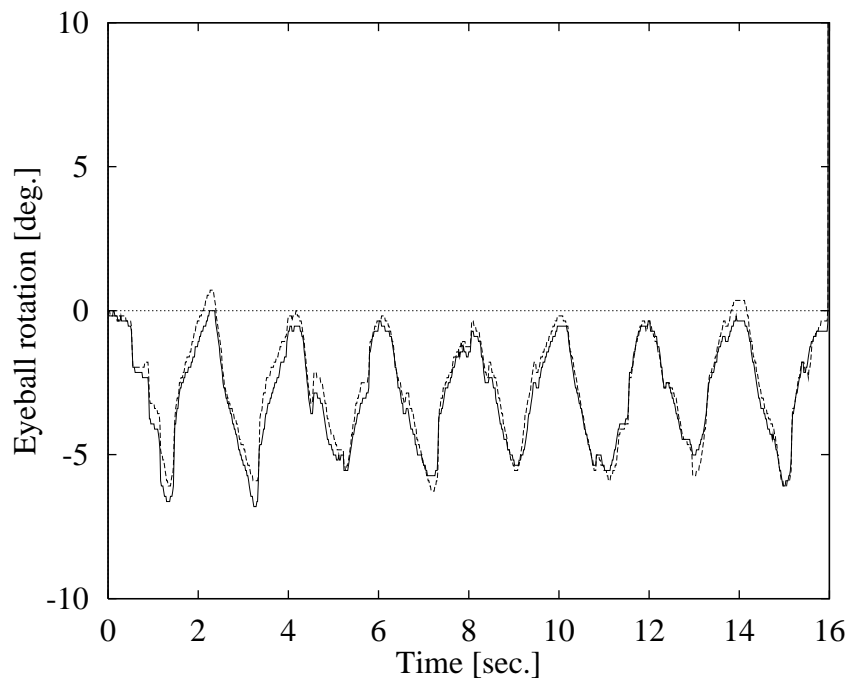
4.4.3 実験結果と考察

結果を図 4.32 ~ 4.43 に示す．これは輻輳運動が観測できた被験者 TO のみの結果で，図 4.32 ~ 4.37 に立体オブジェクトの静止している場合を，図 4.38 ~ 4.43 に運動している場合をそれぞれ示す．また図中の実線が立体オブジェクトのみを注視した場合を，点線が画面の中心にある立体オブジェクトと周辺の 4 つのオブジェクトを順番に注視した場合を示している．

これらの図の実線部分は中心の立体オブジェクトだけを注視させた実験での眼球回転角度の時間変化を示すもので，このデータから被験者が立体視している奥

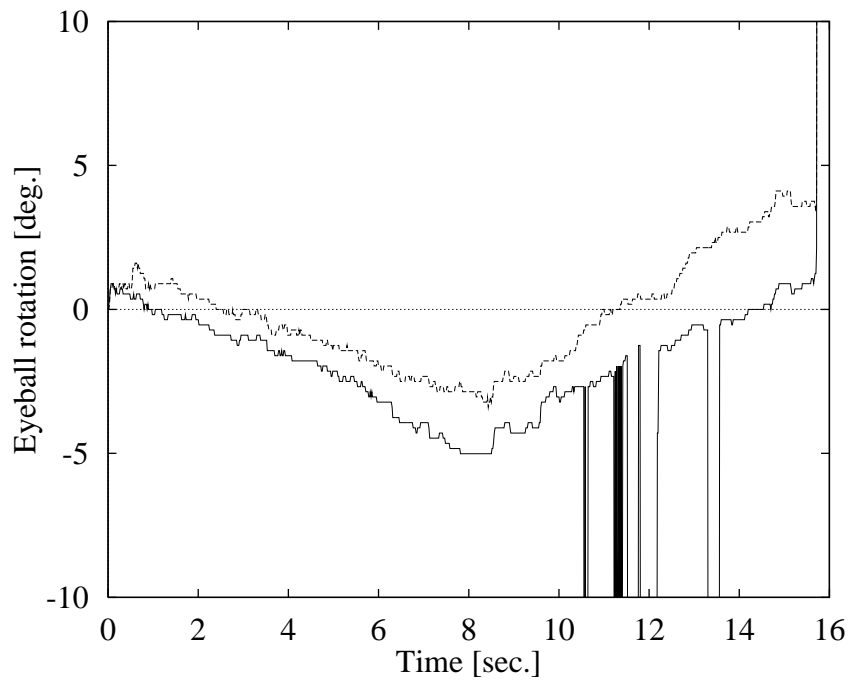


被験者 TM ; 周期 4 秒

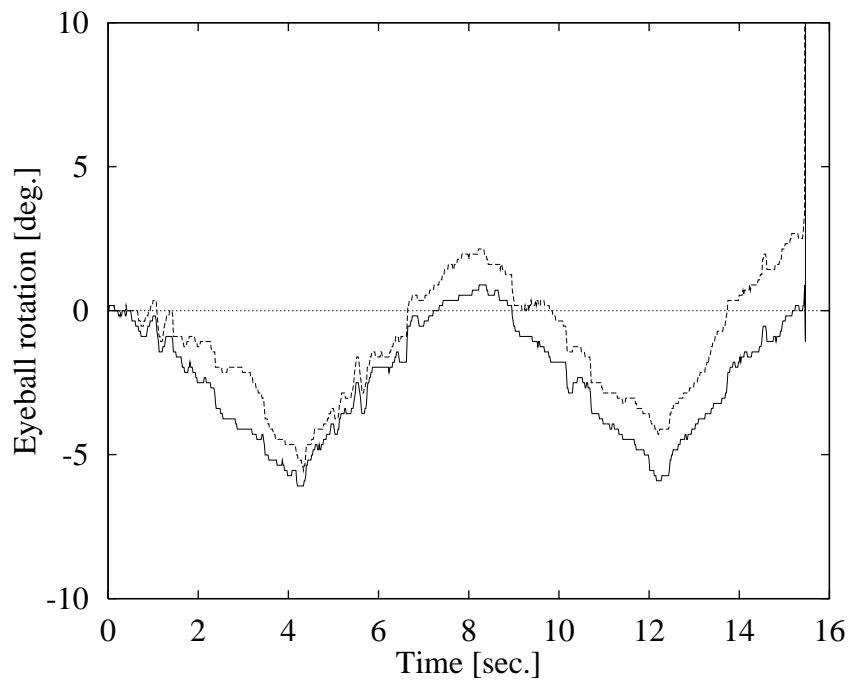


被験者 TM ; 周期 2 秒

図 4.30: 動画注視時における左右両眼の眼球回転角度 (被験者 TM)
(実線; 右眼, 点線; 左眼)

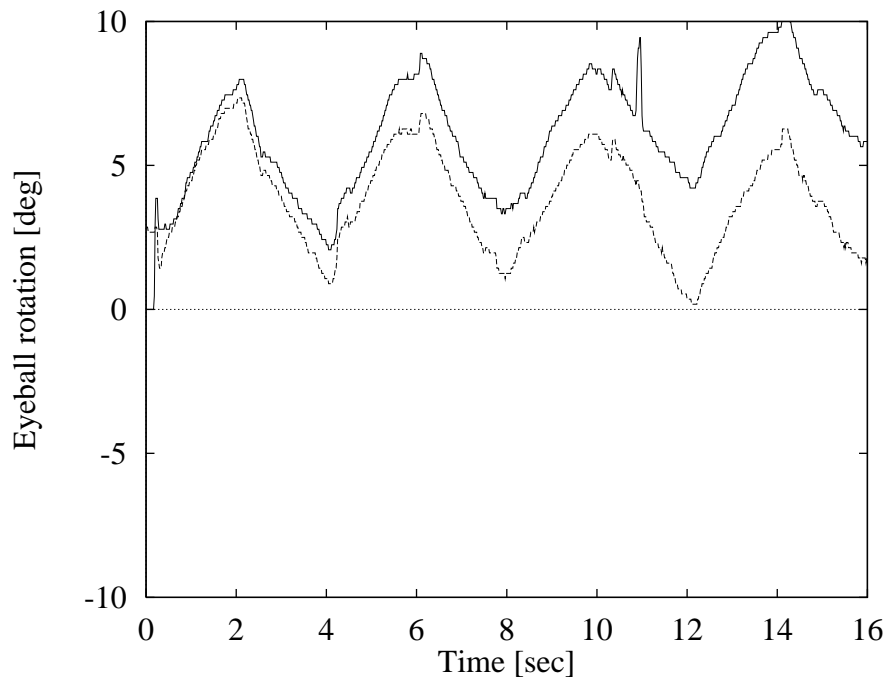


被験者 TM ; 周期 16 秒

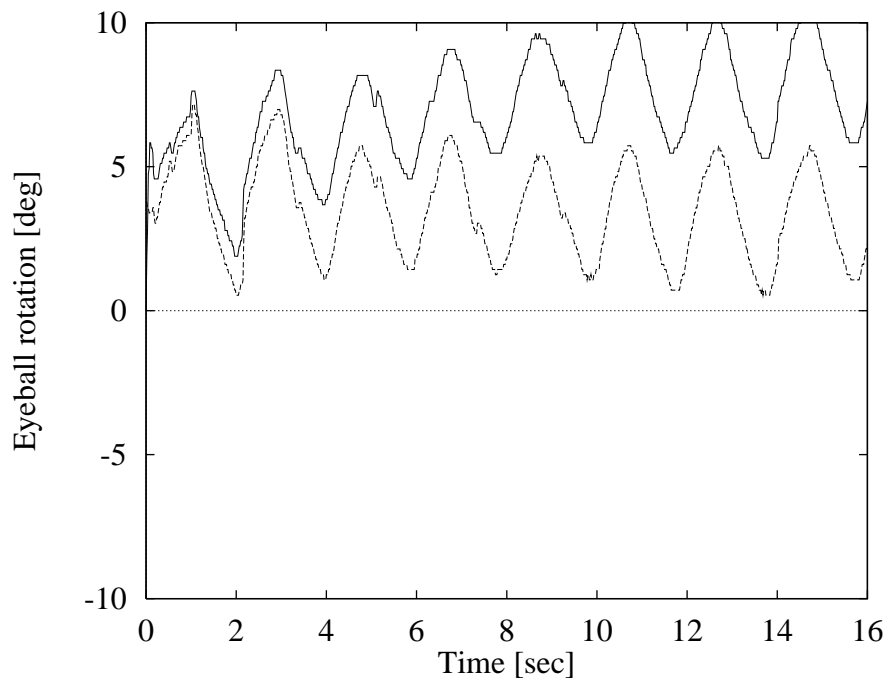


被験者 TM ; 周期 8 秒

図 4.29: 動画注視時における左右両眼の眼球回転角度 (被験者 TM)
(実線; 右眼, 点線; 左眼)

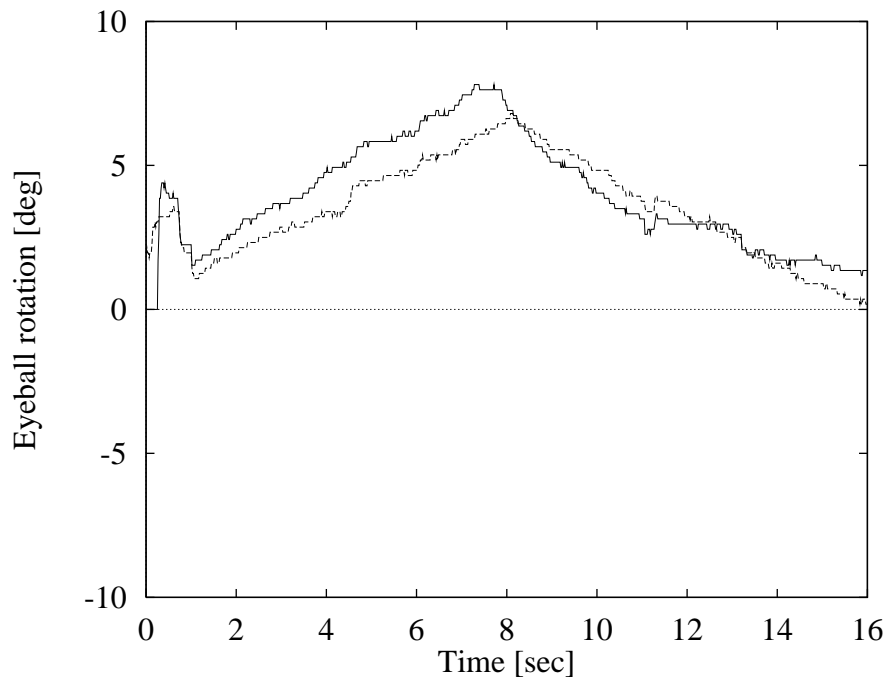


被験者NI；周期4秒

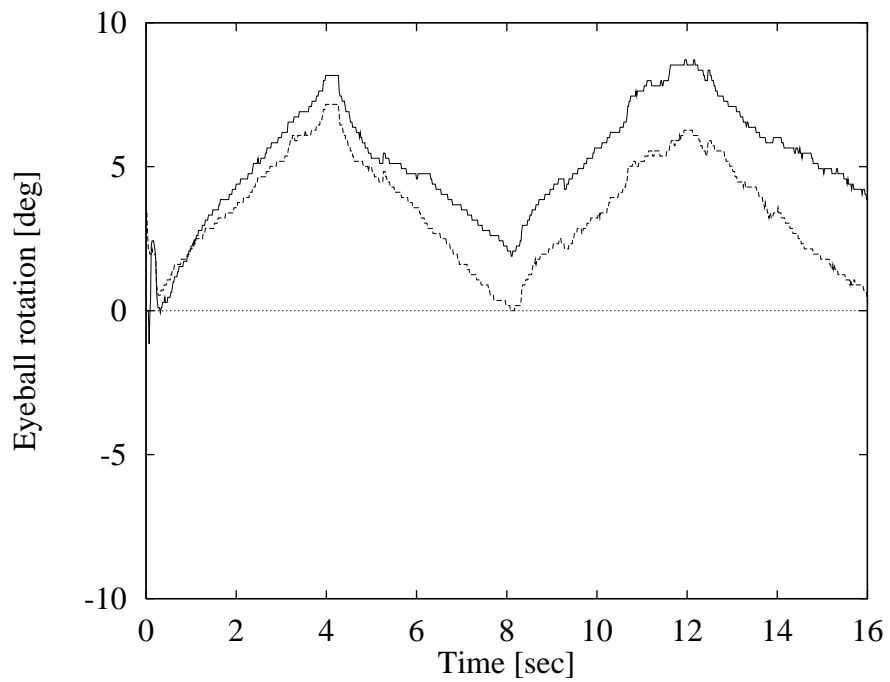


被験者NI；周期2秒

図 4.28: 動画注視時における左右両眼の眼球回転角度 (被験者NI)
(実線; 右眼, 点線; 左眼)

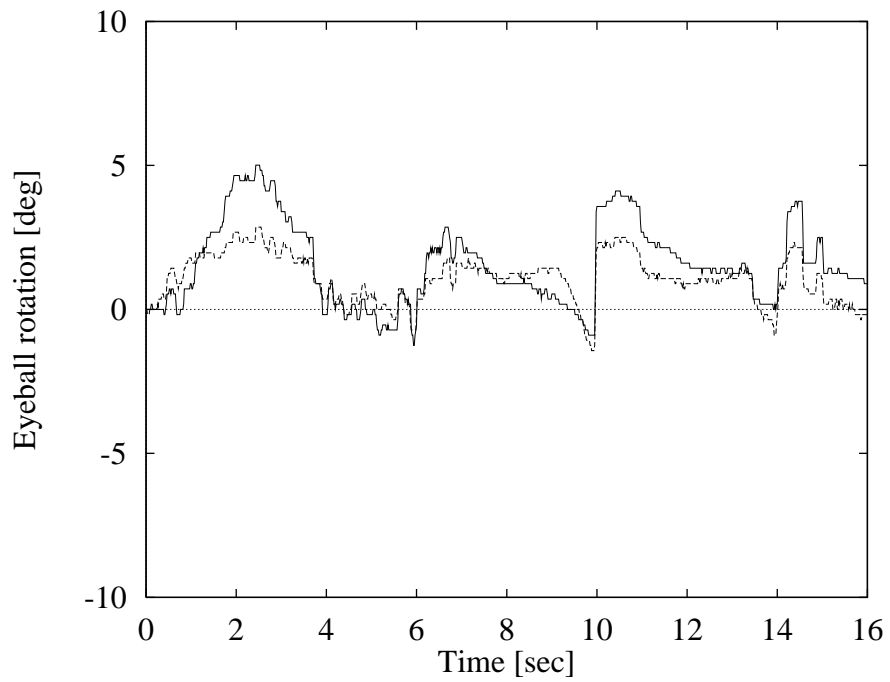


被験者 NI ; 周期 16 秒

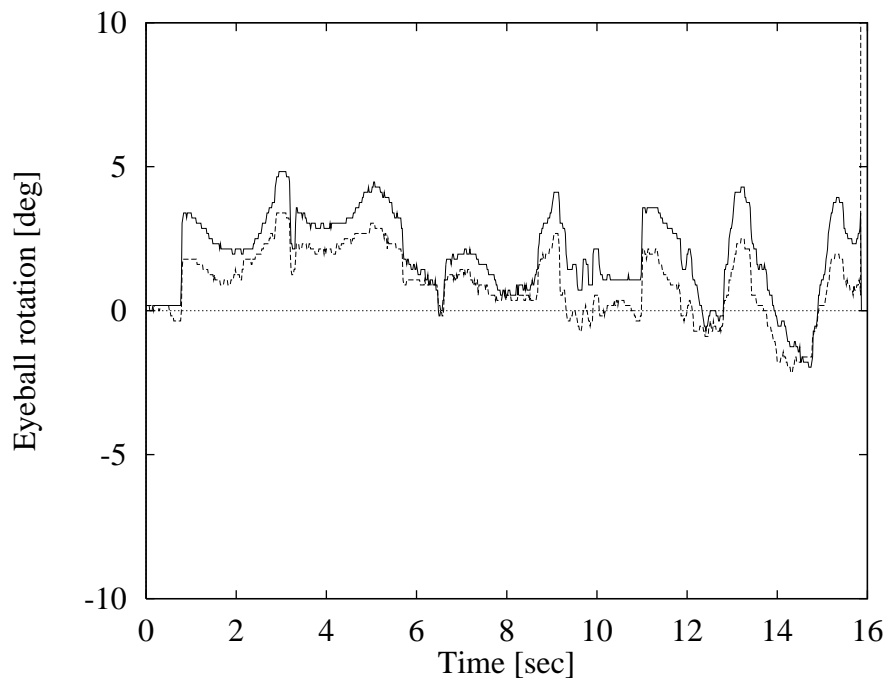


被験者 NI ; 周期 8 秒

図 4.27: 動画注視時における左右両眼の眼球回転角度 (被験者 NI)
(実線; 右眼, 点線; 左眼)

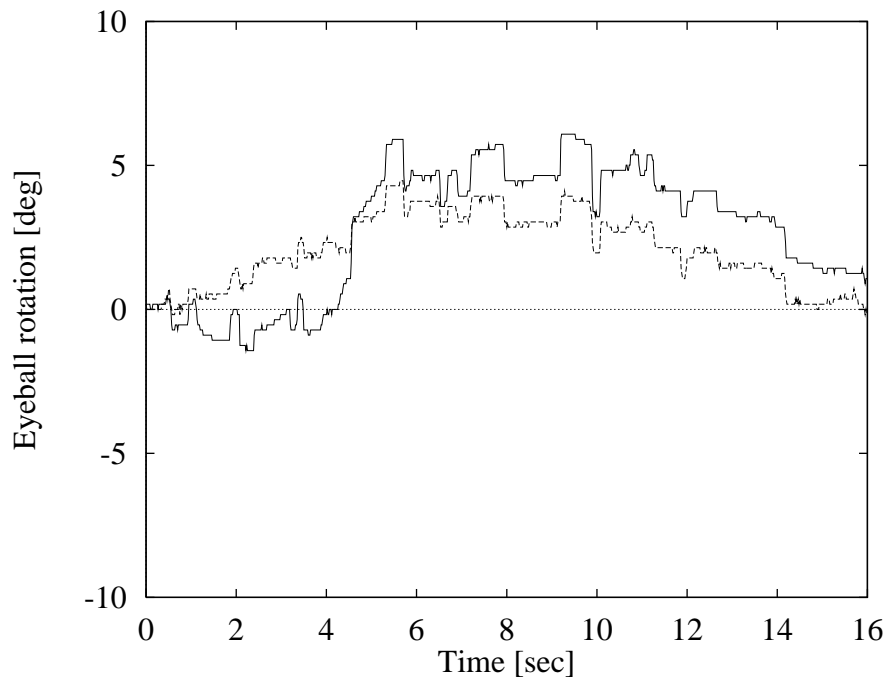


被験者 HF ; 周期 4 秒

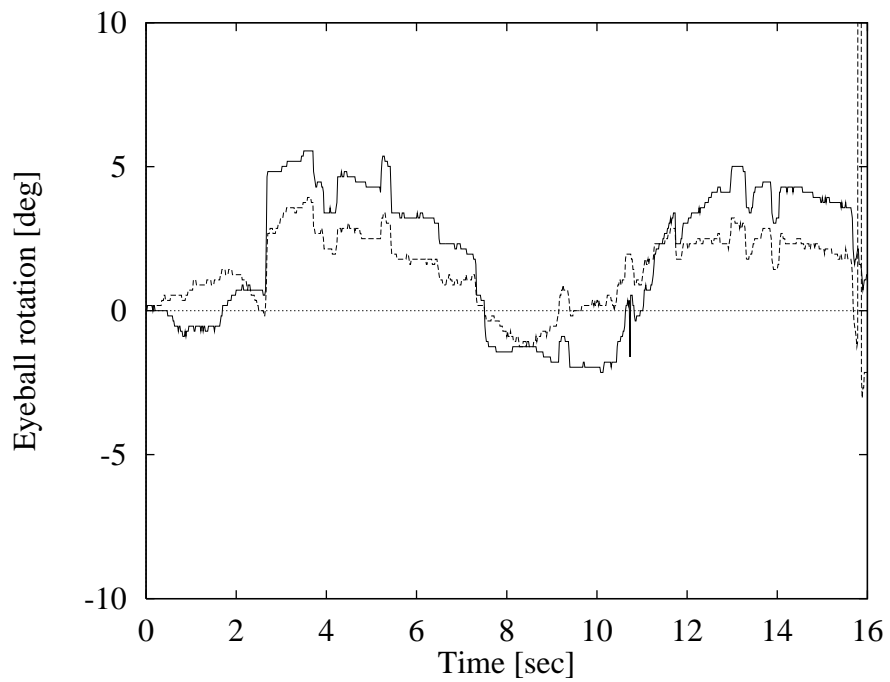


被験者 HF ; 周期 2 秒

図 4.26: 動画注視時における左右両眼の眼球回転角度 (被験者 HF)
(実線 ; 右眼 , 点線 ; 左眼)

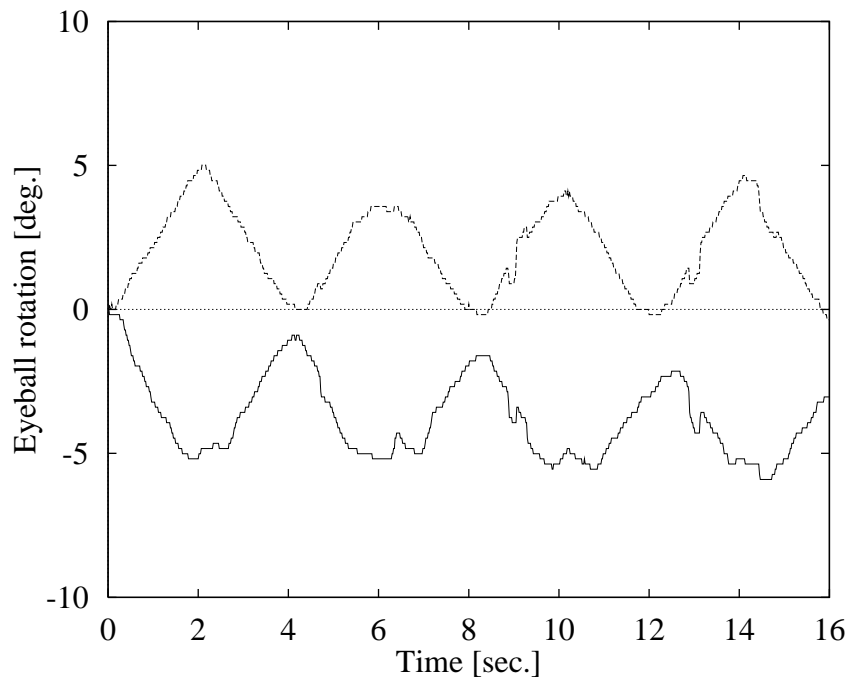


被験者 HF ; 周期 16 秒

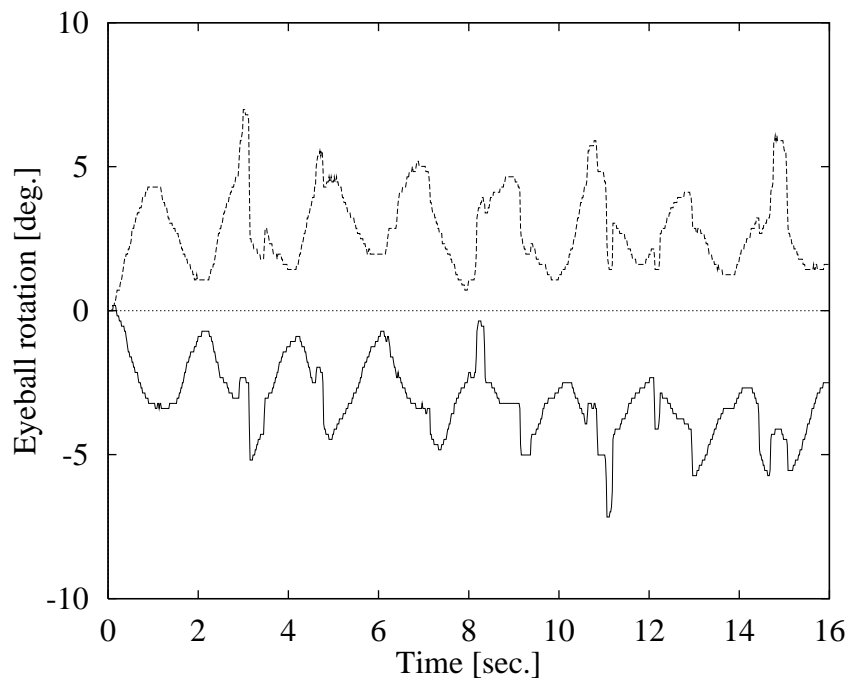


被験者 HF ; 周期 8 秒

図 4.25: 動画注視時における左右両眼の眼球回転角度 (被験者 HF)
(実線 ; 右眼 , 点線 ; 左眼)

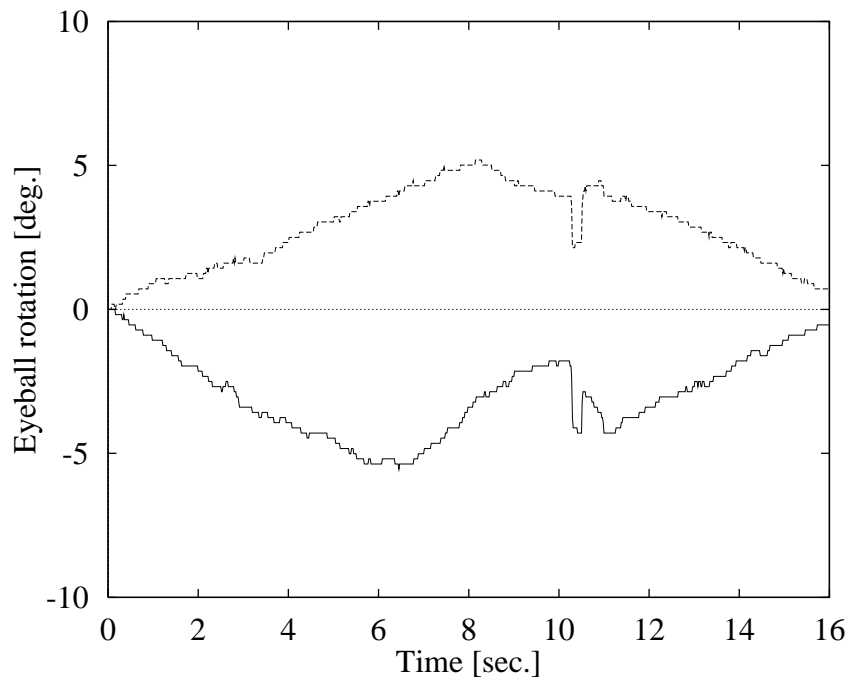


被験者 DM ; 周期 4 秒

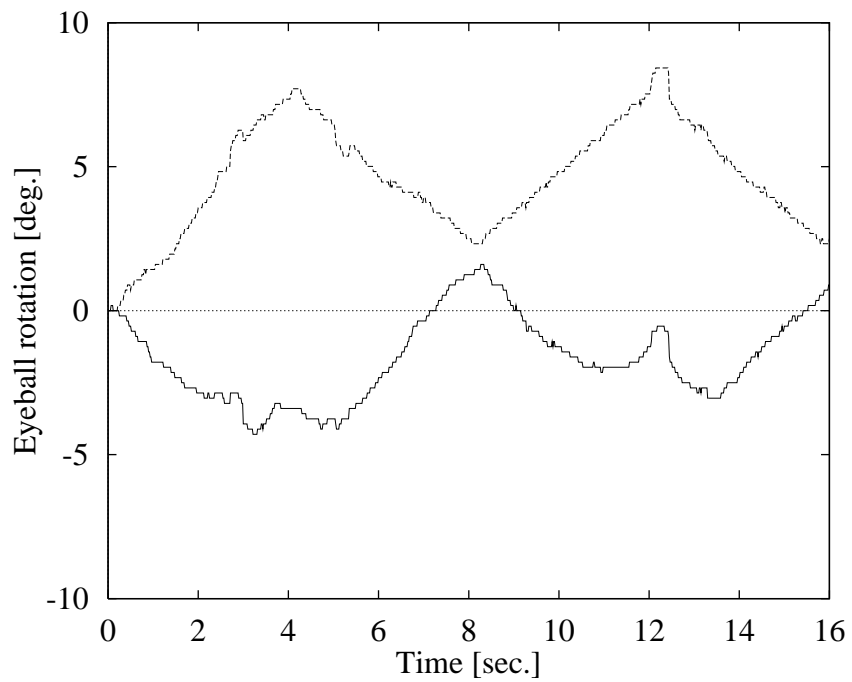


被験者 DM ; 周期 2 秒

図 4.24: 動画注視時における左右両眼の眼球回転角度 (被験者 DM)
(実線; 右眼, 点線; 左眼)

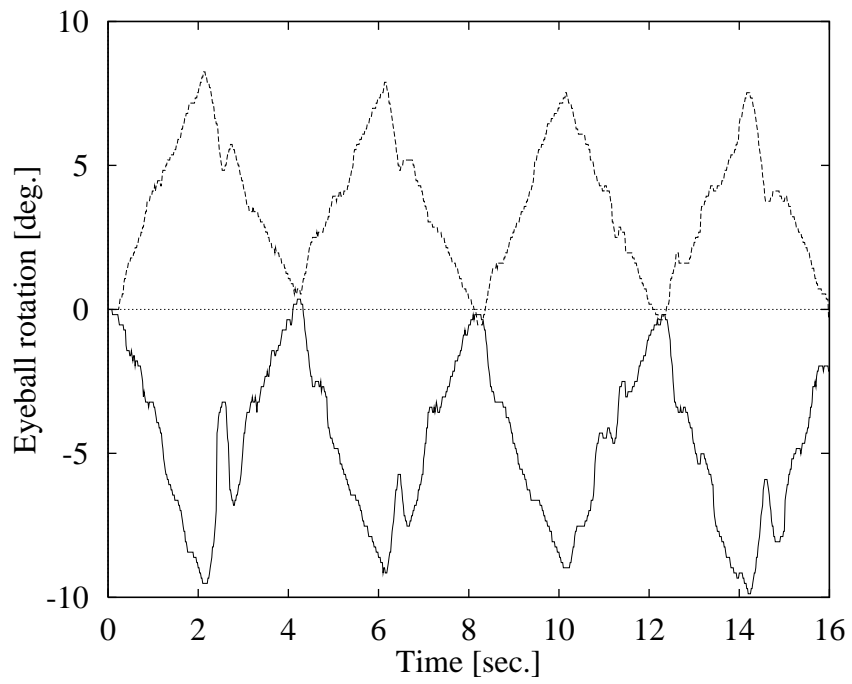


被験者 DM ; 周期 16 秒

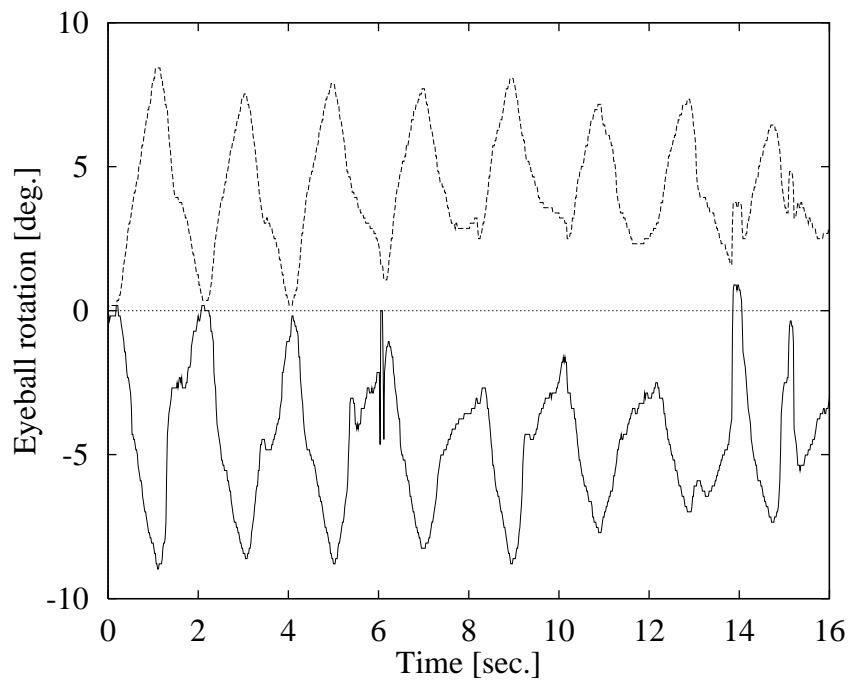


被験者 DM ; 周期 8 秒

図 4.23: 動画注視時における左右両眼の眼球回転角度 (被験者 DM)
(実線; 右眼, 点線; 左眼)

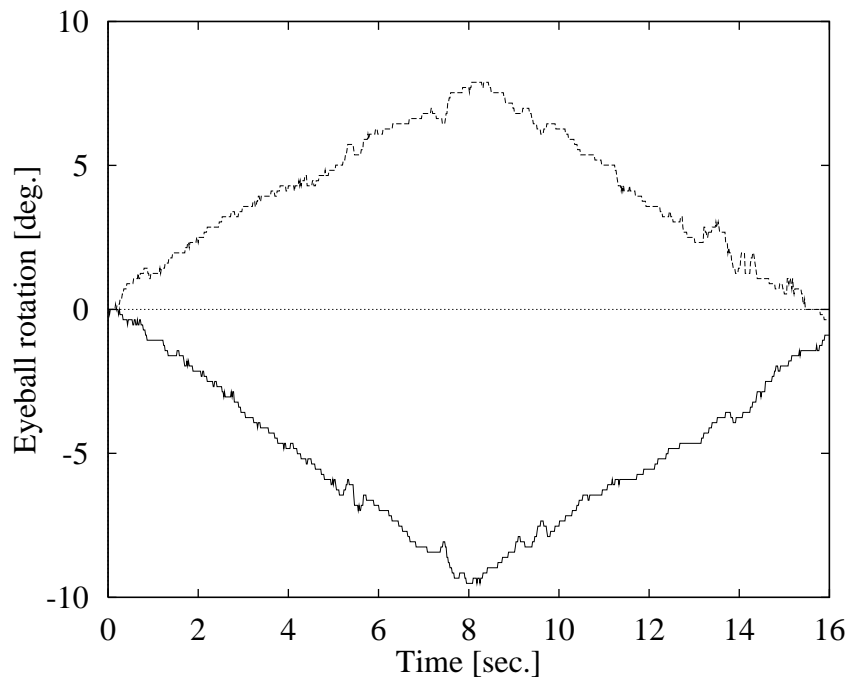


被験者 SF ; 周期 4 秒

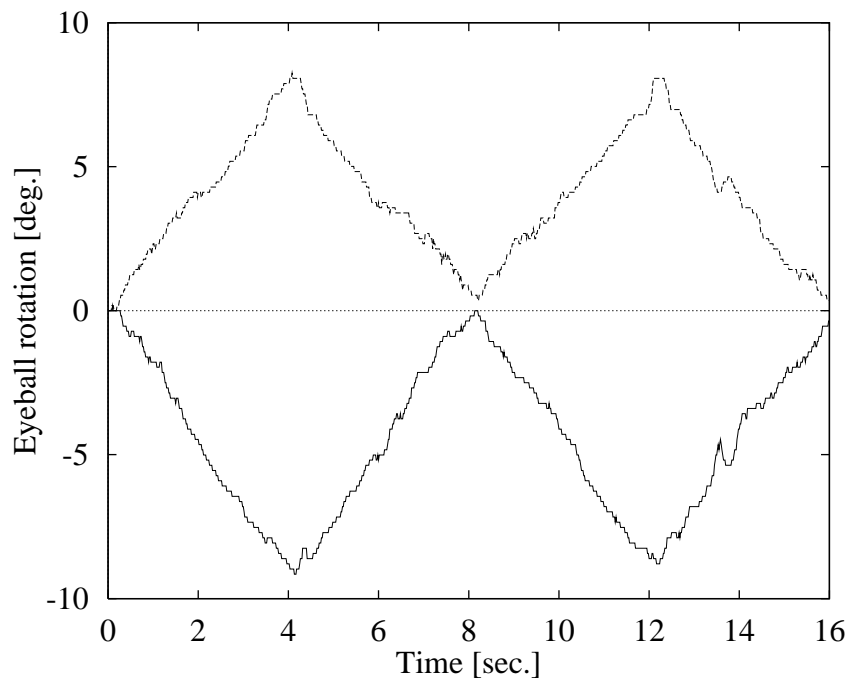


被験者 SF ; 周期 2 秒

図 4.22: 動画注視時における左右両眼の眼球回転角度 (被験者 SF)
(実線; 右眼, 点線; 左眼)

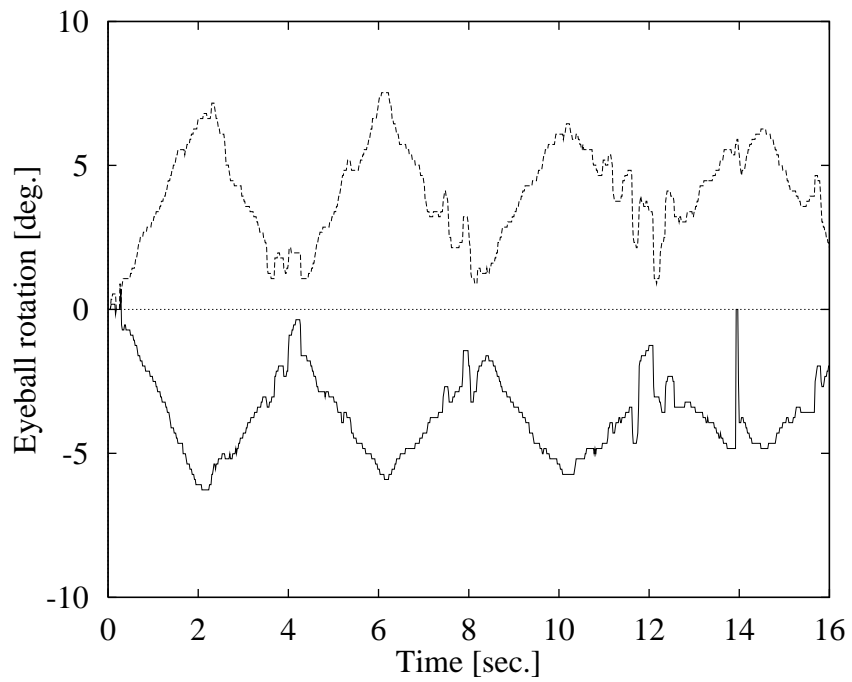


被験者 SF ; 周期 16 秒

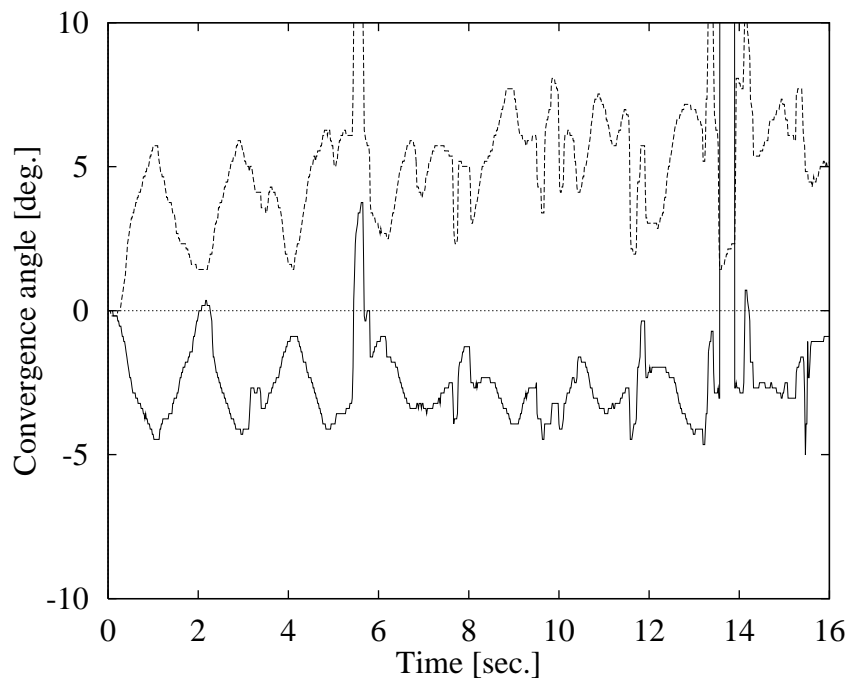


被験者 SF ; 周期 8 秒

図 4.21: 動画注視時における左右両眼の眼球回転角度 (被験者 SF)
(実線; 右眼, 点線; 左眼)

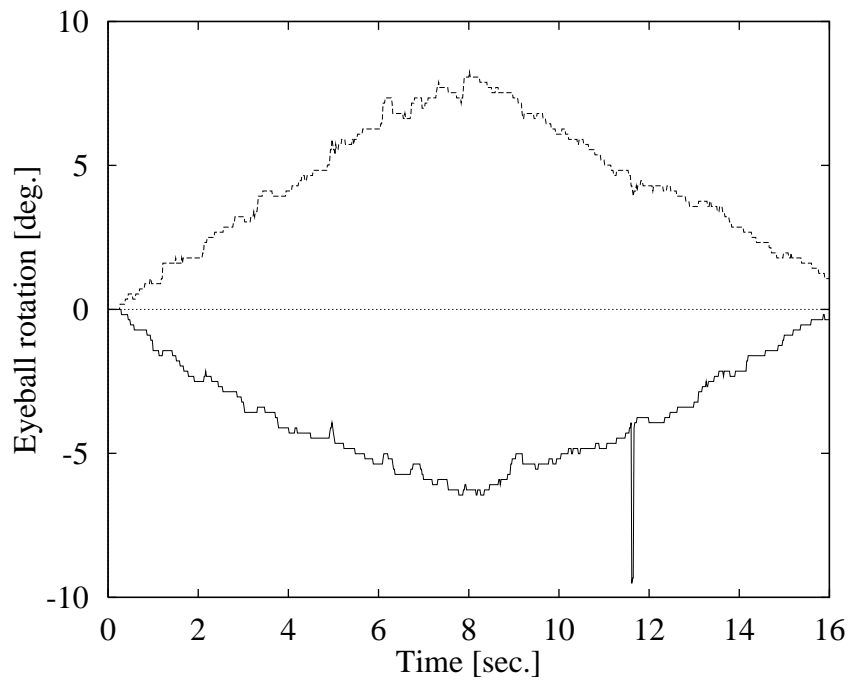


被験者 TK ; 周期 4 秒

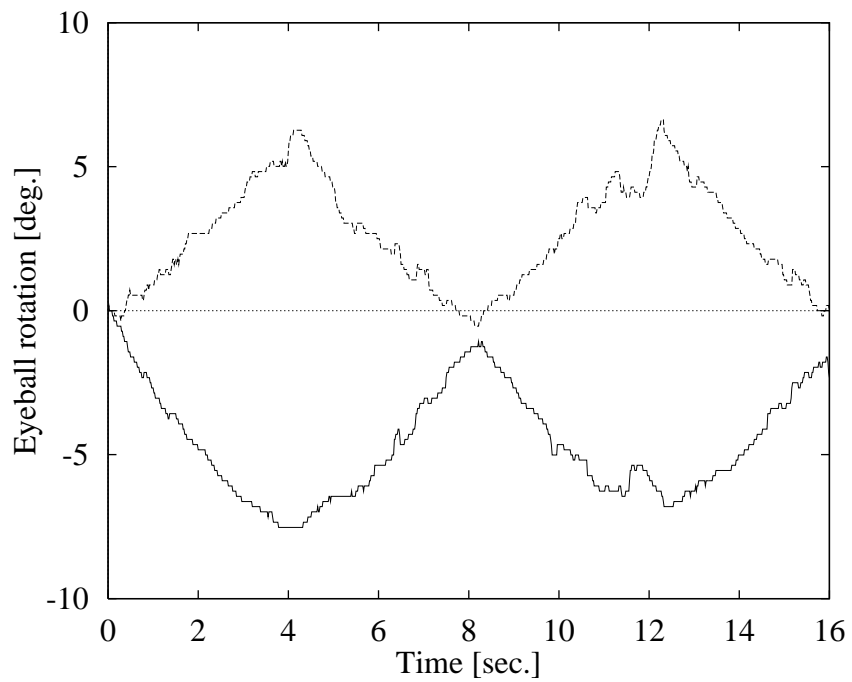


被験者 TK ; 周期 2 秒

図 4.20: 動画注視時における左右両眼の眼球回転角度 (被験者 TK)
(実線; 右眼, 点線; 左眼)

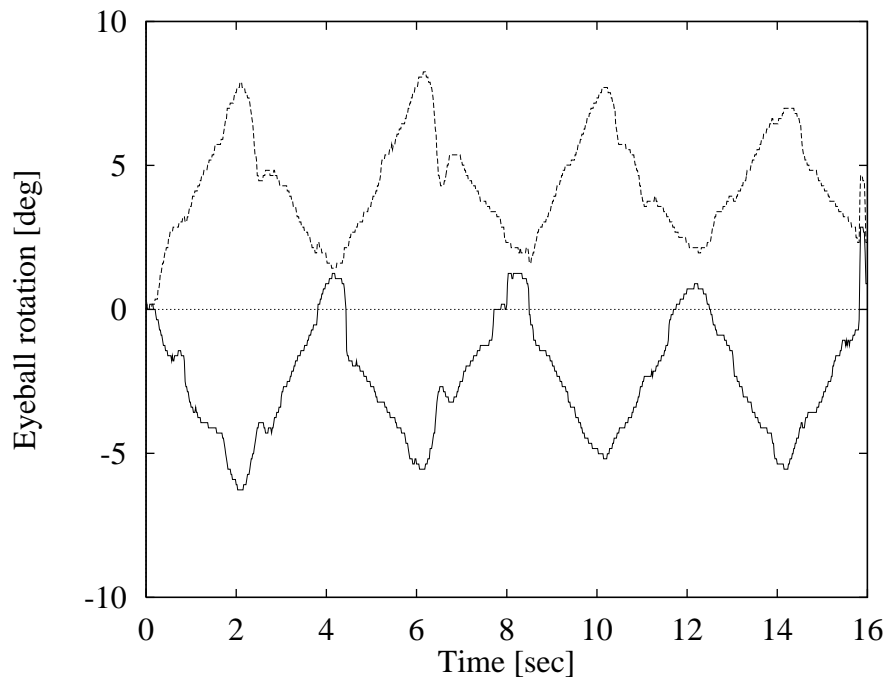


被験者 TK ; 周期 16 秒

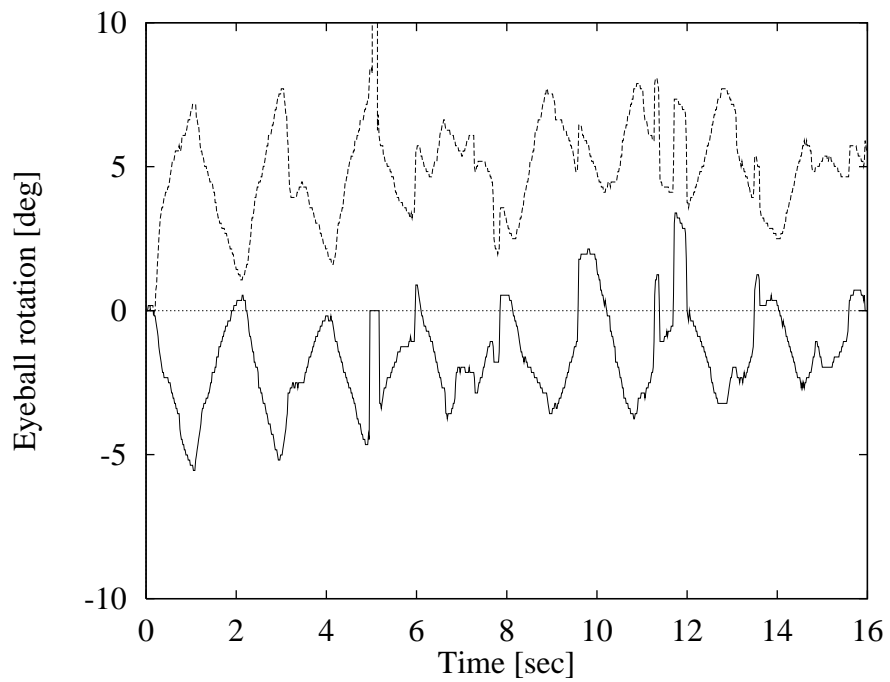


被験者 TK ; 周期 8 秒

図 4.19: 動画注視時における左右両眼の眼球回転角度 (被験者 TK)
(実線; 右眼, 点線; 左眼)

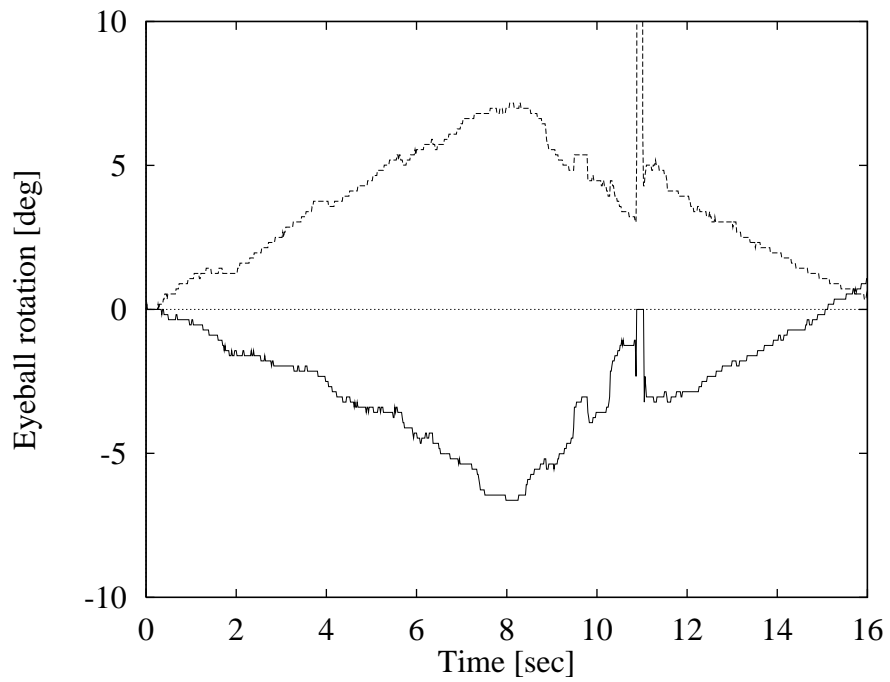


被験者 YA ; 周期 4 秒

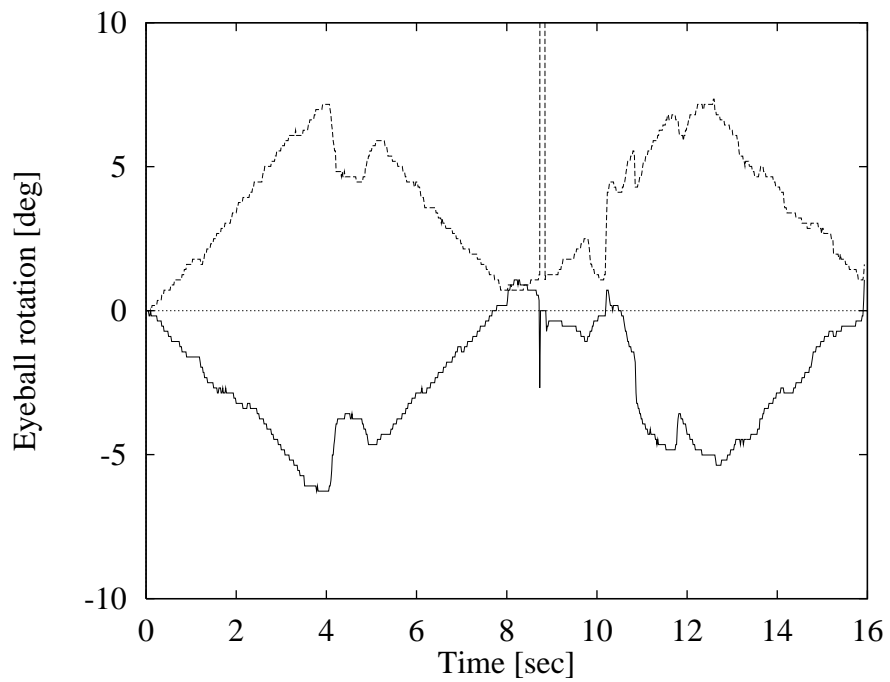


被験者 YA ; 周期 2 秒

図 4.18: 動画注視時における左右両眼の眼球回転角度 (被験者 YA)
(実線; 右眼, 点線; 左眼)

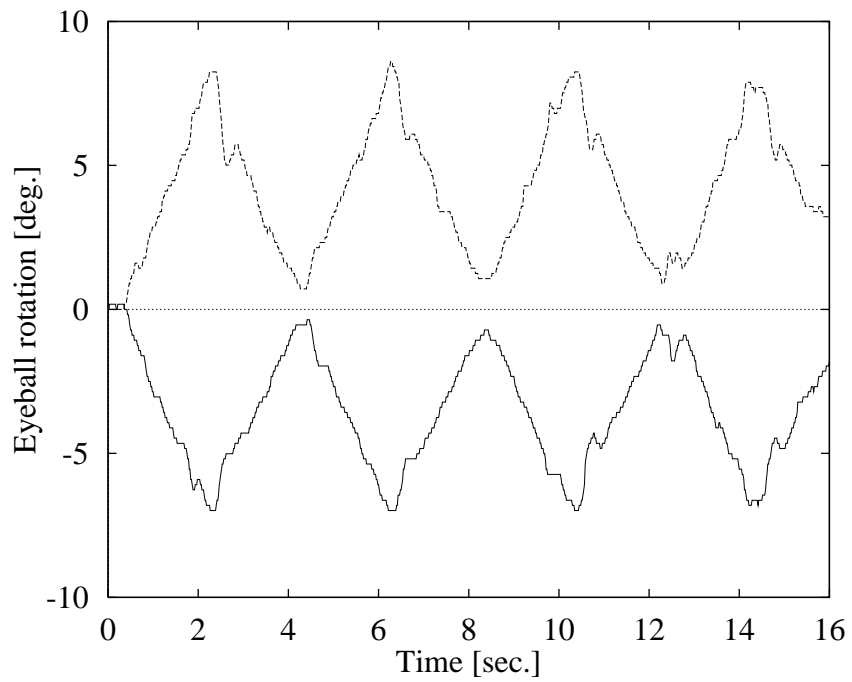


被験者 YA ; 周期 16 秒

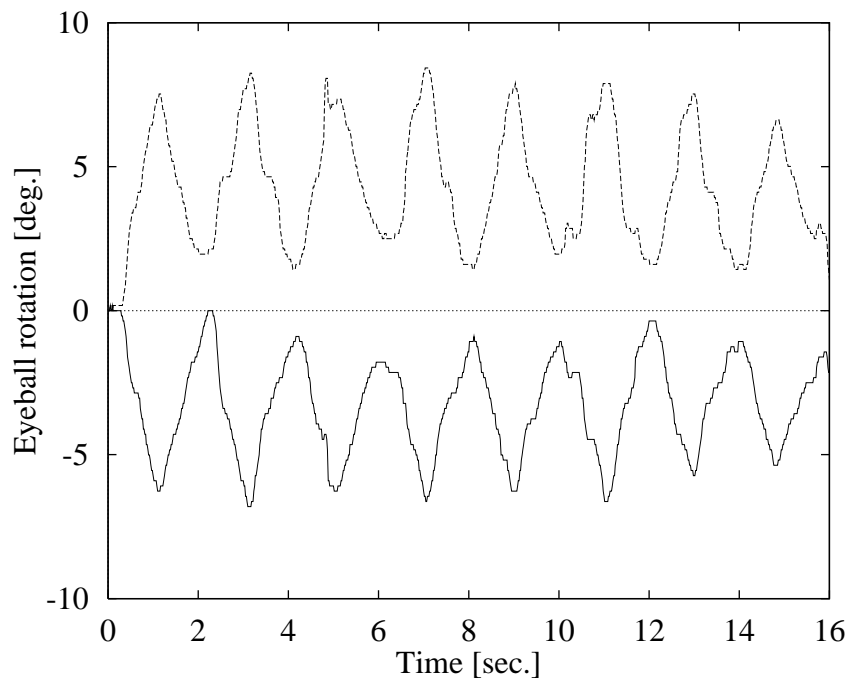


被験者 YA ; 周期 8 秒

図 4.17: 動画注視時における左右両眼の眼球回転角度 (被験者 YA)
(実線; 右眼, 点線; 左眼)

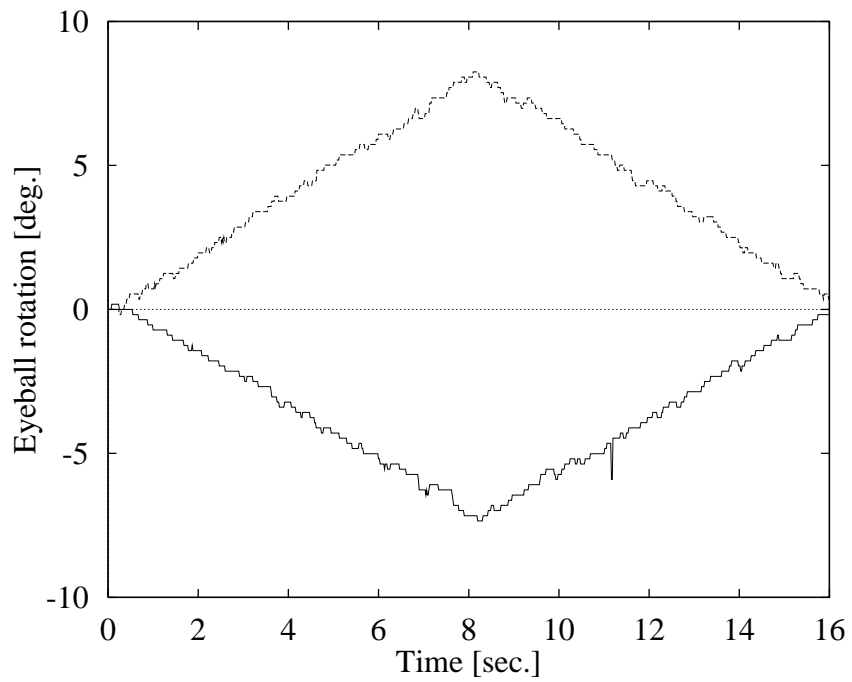


被験者 TO ; 周期 4 秒

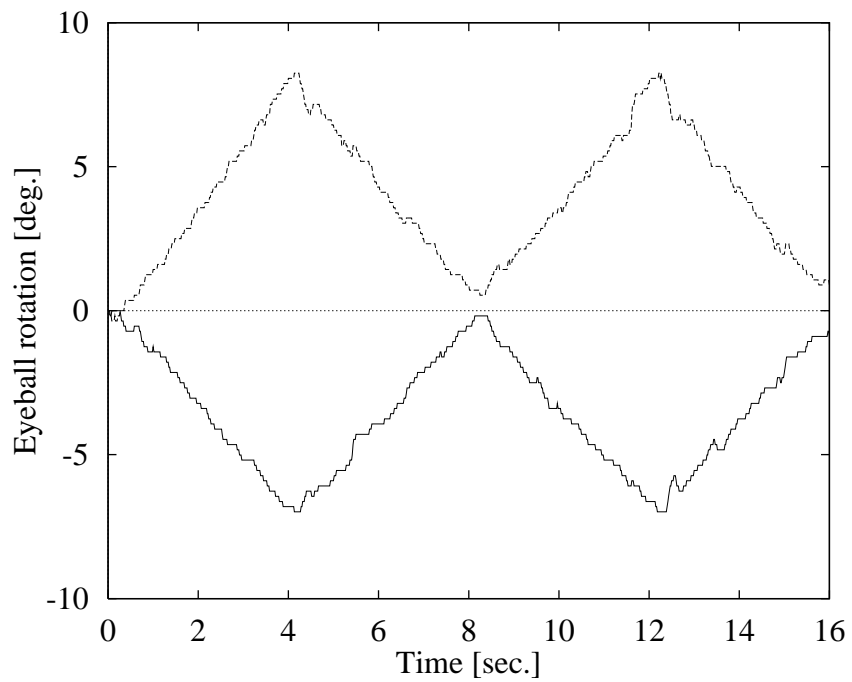


被験者 TO ; 周期 2 秒

図 4.16: 奥動画注視時における左右両眼の眼球回転角度 (被験者 TO)
(実線; 右眼, 点線; 左眼)



被験者 TO ; 周期 16 秒



被験者 TO ; 周期 8 秒

図 4.15: 動画注視時における左右両眼の眼球回転角度 (被験者 TO)
(実線; 右眼, 点線; 左眼)

表 4.3: ステレオノーマル，ステレオアノマリーの判別結果

被験者	ステレオノーマル， ステレオアノマリーの判別結果
TO	ステレオノーマル
YA	ステレオノーマル
TK	ステレオノーマル
SF	ステレオノーマル
DM	ステレオノーマル
HF	ステレオアノマリー
NI	ステレオアノマリー
TM	ステレオアノマリー

融像立体視が可能なステレオノーマルであり，被験者 HF，NI，TM は両眼融像立体視のできないステレオアノマリーであることを示している（表 4.3）．また，静止画と動画の場合を比較すると，ステレオノーマルの場合，動画の運動周期が短くなるほど静止画で融像できていた視差でも二重に見えてしまう傾向があらわれ，それは被験者の主観報告とも一致していた．

4.4 両眼立体視時における視点移動計測

4.4.1 実験方法

4.2，4.3節で使用した画像に，さらに背景画像として4つの平面オブジェクトをそれぞれ左上，右上，左下，右下に表示させた静止画像を使用した．図 4.31に使用した画像を示す．視差を与えるのは中心にある立体オブジェクトのみとし，それ以外のオブジェクトには視差を与えない．測定は2秒間行った．立体オブジェクトに与えられた輻輳角が 4.58° と 9.15° の2つの場合について測定を行った．次いで，立体オブジェクトの運動周期を10秒とした場合の動画画像を16秒間提示し測定を行った．さらに別のパラメータとして，中心にある立体オブジェクトを注視する場合と，中心にあるオブジェクトと4つのオブジェクトを実験開始時から順番に中心 右上 中心 右下 中心 左下 中心 左上 中心と順番に見ても

方向とする。また、視差が最大となるときの眼球回転角が約 8° となり計算値とほぼ一致している。図 4.16は被験者 TO の周期 2 秒のときの結果であるが、視差が 0 である初期位置まで眼球が外転していないことがわかる。これは被験者 TO の「最初は融像していたが 2 度目の視差 0 から融像できなくなった」という主観報告と一致している。焦点距離 1m の位置にあるにもかかわらず、輻輳角が 0° という自然視ではありえない状況が原因と考えられる。また、被験者 SF は周期 2 秒の場合、視差 0 のときと視差が最大るとき融像しなかったと報告したが、グラフを見てみると視差 0 の位置では確かに視差が 0 となる 4 回目から融像できなくなっているが、視差が最大の位置では、融像していることを示すデータになっている。このように輻輳角と主観が必ずしも一致しないこともあった。被験者 DM も周期 2 秒の場合、視差 0 のとき、視差が最大るとき融像しない、2 重に見えたと報告しており、グラフからも視差 0 の位置、視差が最大の位置の両方で融像できない様子わかる。被験者 YA, TK はすべての周期に対し融像したと答えたが、グラフからは周期 16 秒, 8 秒, 4 秒については立体画像の奥行き変化に追随した運動をしているが、周期 2 秒の場合は視差 0 および視差最大となる場合に融像ができおらず、また、立体像の運動が 2 往復目から融像範囲がかなり狭くなっていることがわかる。

被験者 HF, NI, TM の場合は輻輳性眼球運動らしい様子は見られなかった。被験者 HF は、周期 16 秒の場合は測定開始後約 2 秒ほど、周期 8 秒の場合は測定開始後約 1 秒ほど、輻輳運動していたが、その後は左眼の動きに右眼が完全に追随し、単に右眼だけで平面上を左右に移動するオブジェクトを注視しているだけになっている。これは前節で被験者 HF は静止画において輻輳角が 4.58° までしか融像できなかったことに一致しており、静止画と動画の融像範囲が一致していることを示している。周期 4 秒と 2 秒では、まったく融像しておらず、左眼のみで像を見ているデータが得られている。被験者 NI は全ての周期に対し、輻輳運動は現れず、常に左眼のみで画像を注視している眼球運動を表している。つまり、被験者 NI の両眼は、この実験中に輻輳運動をしていなかった。被験者 TM は、周期 16 秒の場合に測定開始後約 0.5 秒ほど輻輳運動していたが、その後は右眼の動きに左眼が完全に追随している。測定後の内観報告によると被験者 NI, TM は立体像が動いているようには感じなかったと報告した。

以上の結果は、被験者が ES-HMD により立体像として融像できるかどうか客観的に診断できることを示しており、また、被験者 TO, YA, TK, SF, DM は両眼

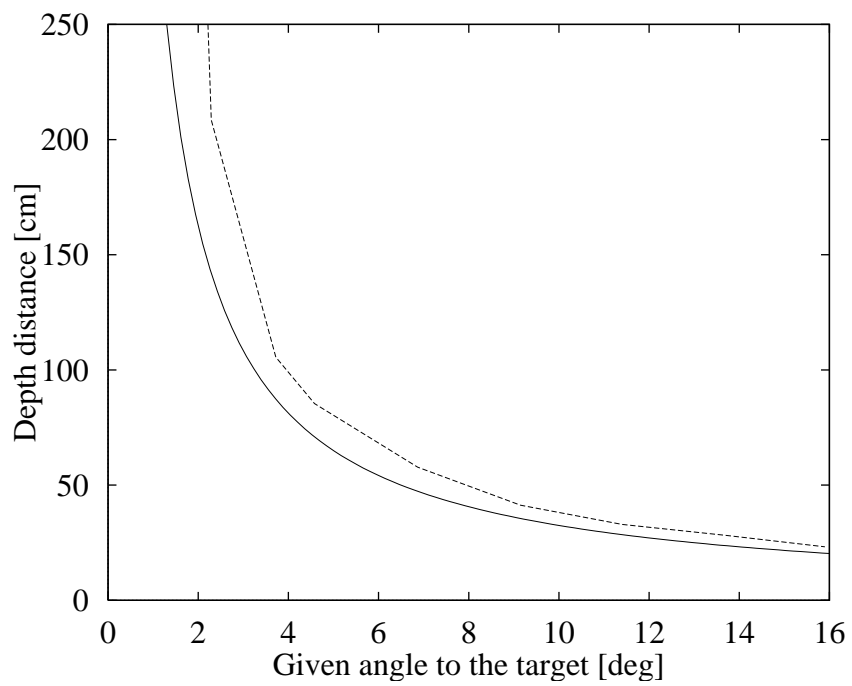


図 4.14: 視差の変化による奥行き距離の計算値と実測値
 (実線; 実測値, 点線; 計算値)(被験者 TO)

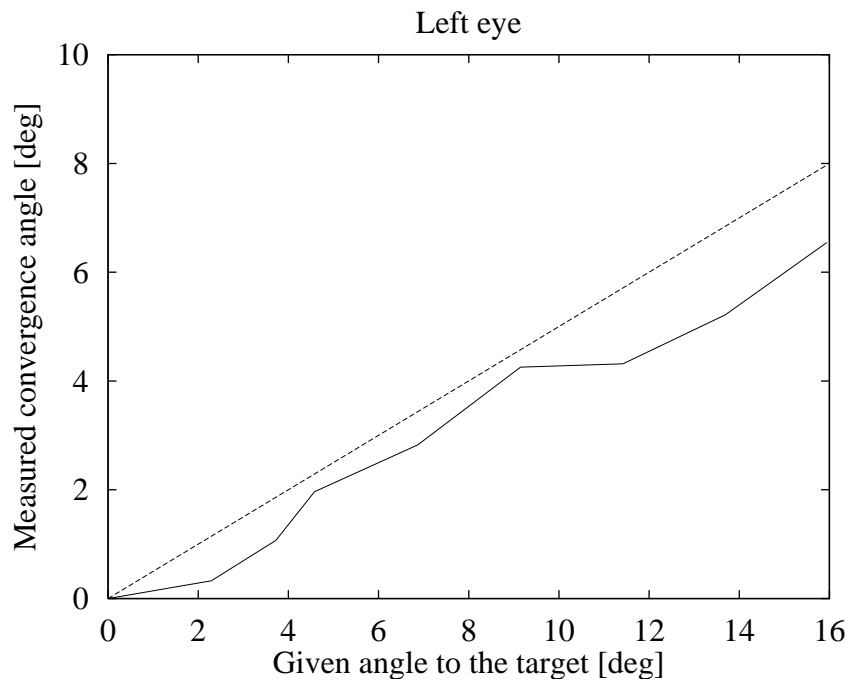


図 4.12: 視差の変化による眼球回転角の変化 (左眼; 被験者 NI)

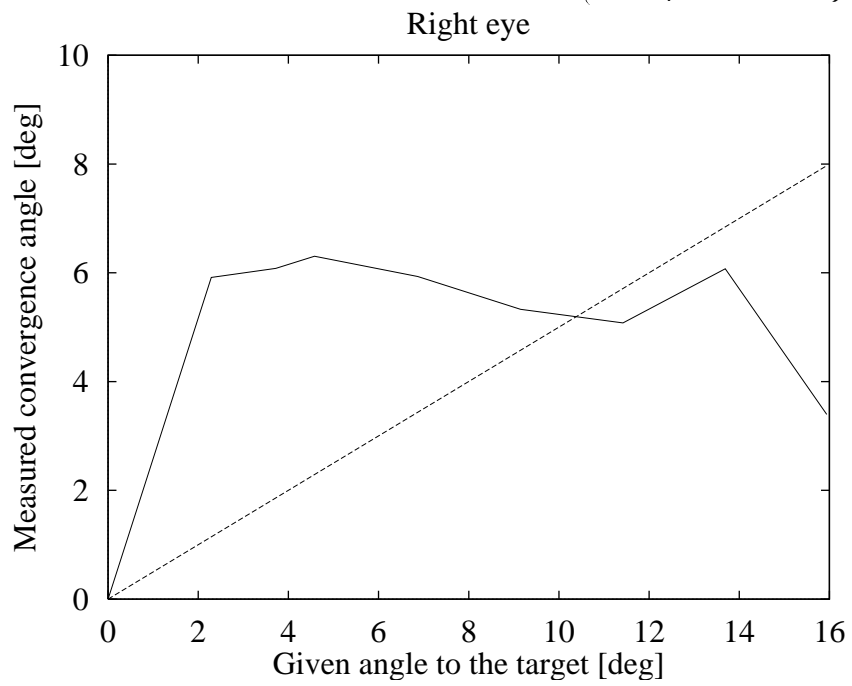


図 4.13: 視差の変化による眼球回転角の変化 (右眼; 被験者 NI)

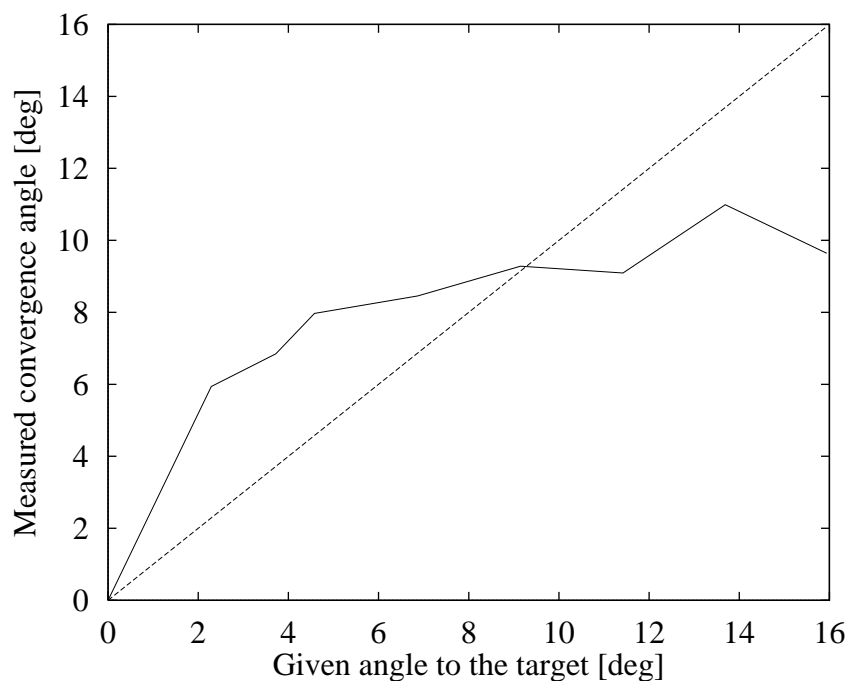


図 4.11: 視差の変化による輻輳角の変化 (被験者 NI)
 (実線; 実測値, 点線; 計算値)

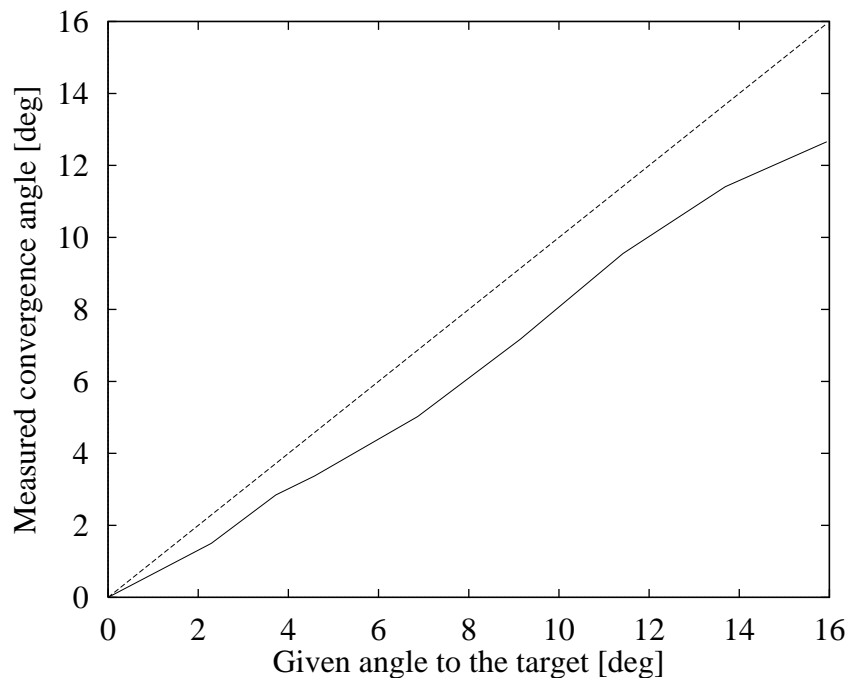


図 4.9: 視差の変化による輻輳角の変化 (被験者 DM)
(実線; 実測値, 点線; 計算値)

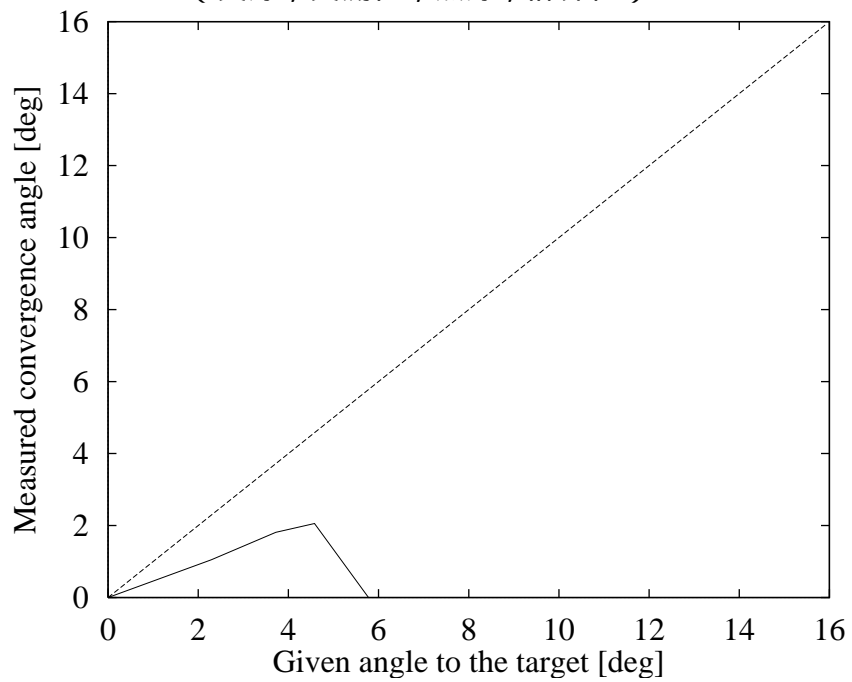


図 4.10: 視差の変化による輻輳角の変化 (被験者 HF)
(実線; 実測値, 点線; 計算値)

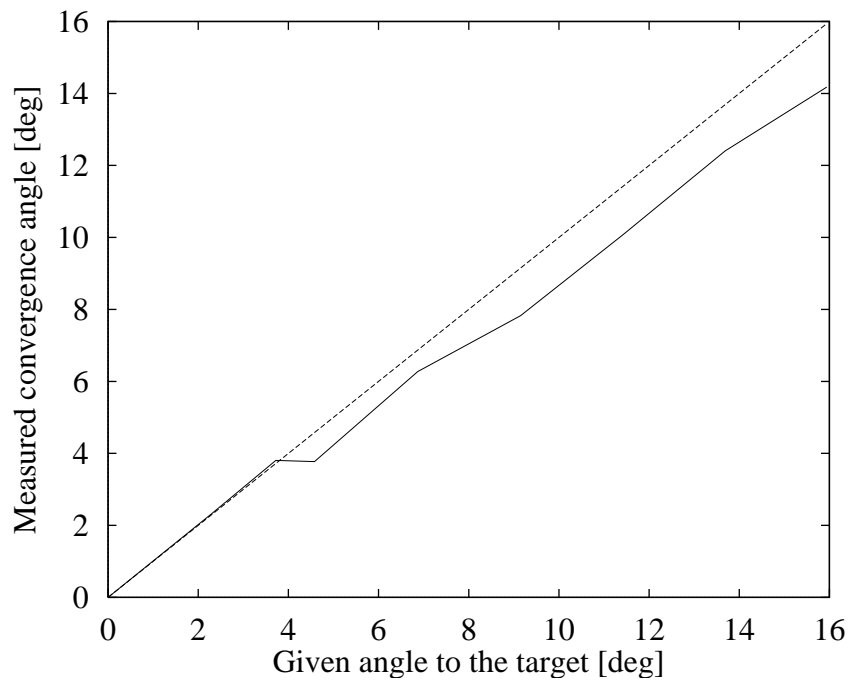


図 4.7: 視差の変化による輻輳角の変化 (被験者 TK)
(実線; 実測値, 点線; 計算値)

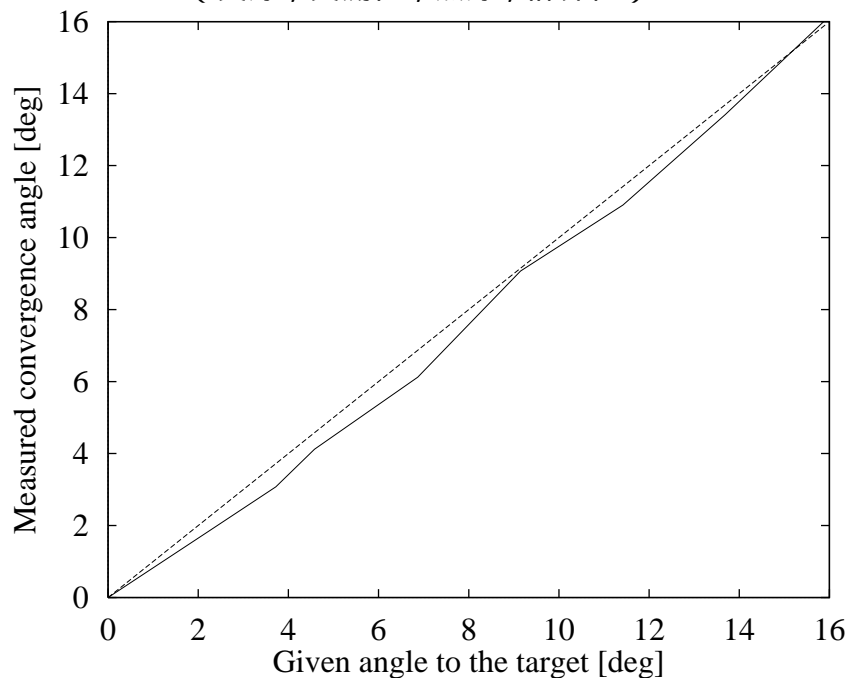


図 4.8: 視差の変化による輻輳角の変化 (被験者 SF)
(実線; 実測値, 点線; 計算値)

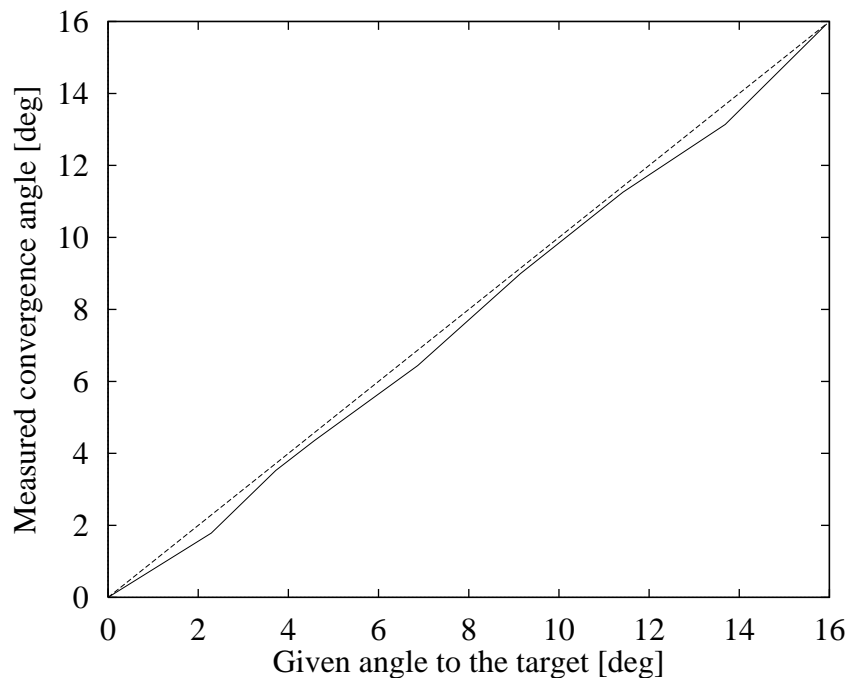


図 4.5: 視差の変化による輻輳角の変化 (被験者 TO)
(実線; 実測値, 点線; 計算値)

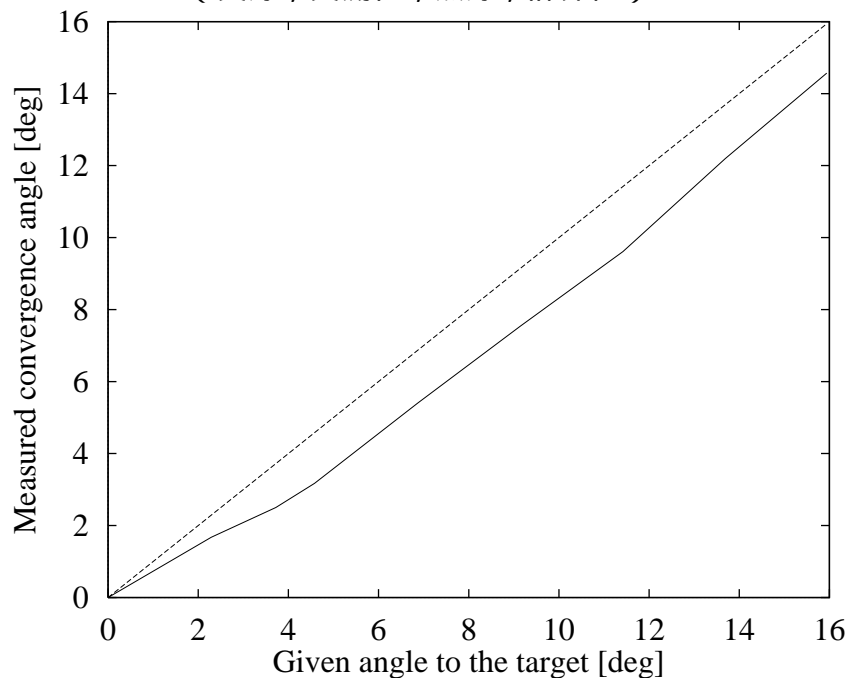


図 4.6: 視差の変化による輻輳角の変化 (被験者 YA)
(実線; 実測値, 点線; 計算値)

図 4.14は、被験者 TO の立体オブジェクトの視差パラメータに対する視点位置の奥行き距離を示している。奥行き測定では視差の大きな（奥行き距離が短い）ところでは計算値と実測値はほぼ一致していたが、視差が小さくなるに従って、計算値と実測値の差が大きくなっていくことがわかる。これは、図 4.3の奥行き分解能の計算値の特性からも理解できるように、視差が大きい時には両眼の回転角が大きいので奥行き分解能が小さくなるため、高い精度で奥行きを測定できるのに対し、視差が小さいときは、逆に奥行き分解能が大きくなるため、CCD カメラで読み取られる瞳孔画像の少しの誤差が大きな奥行きの誤差になるためである。

4.3 立体動画像注視時における視点移動計測

4.3.1 実験方法

4.2節では、静止している立体オブジェクトを表示する条件下であったが、本節では立体オブジェクトの視差を時間的に連続変化させる場合を考える。視差が輻輳角で $0^{\circ} \sim 16^{\circ}$ の間を往復運動するように変化させディスプレイの前後方向に立体オブジェクトが移動する動画として表示した。立体オブジェクトの運動周期は 2, 4, 8, 16 秒とし、それぞれ 16 秒間注視させた。

4.3.2 被験者

被験者は、前節と同じく表 4.2に示すような研究室の男子学生 8 名とした。実験中は、被験者の頭部の位置ずれ等によって生じる誤差を最小限におさえるために顎の位置を固定し、瞬きをしないよう指示した。また、被験者の主観報告により立体オブジェクトが融像しているかどうかを確認した。

4.3.3 実験結果と考察

実験の結果を図 4.15～図 4.30に示す。図 4.15に立体オブジェクトの視差パラメータが連続的に変化する周期 16 秒の動画注視時における眼球回転角度の時間変化を示す。時間が 0 のとき視差が 0、すなわち輻輳角が 0° のときで、時間が 8 秒のとき視差が最大、すなわち輻輳角が 15.9° のときに相当する。立体オブジェクトの奥行きの変化において、物体が近づくときは眼球が内転し、物体が遠ざかるときは外転している。ここで、眼球回転角の符号は右を見るときに回転する方向を正

表 4.2: 実験の被験者

被験者	視力		矯正の有無
	左	右	
TO	1.5	1.5	裸眼
YA	0.2	1.0	裸眼
TK	1.5	1.5	裸眼
SF	1.0	1.0	コンタクト着用
DM	1.2	1.2	コンタクト着用
HF	1.2	1.2	裸眼
NI	1.2	1.5	裸眼
TM	1.5	1.5	裸眼

う眼機能の現れであると考えられる。被験者 TO の主観報告では、両眼の立体オブジェクトは二重像とはならず融像しており、被験者 SF, YA, TK, DM についても、全ての視差で融像していたと答えた。

被験者 HF, NI, TM は、図 4.10 ~ 図 4.11 から分かるように計算値とは異なったグラフを表している。被験者 HF に関しては、図 4.10 から分かるように、視標に与えられた輻輳角が 4.58° のときまで立体画像の奥行き位置に従って、被験者の輻輳角が変化していたが、 6.87° 以上になると全く異なる値となる。これは被験者が 4.58° まで融像できて、 6.87° 以上は融像できなかったという実験後の主観報告と一致している。被験者 NI の場合は輻輳運動を示す図 4.11 では両眼の眼球運動の様子がわからないため、左右の眼の眼球回転についてのデータを図 4.12, 4.13 に示す。左眼の眼球回転角は被験者 TO, SF, YA, TK, DM の眼球運動と同様に視差の変化に対し単調に増加しているのに対し、右眼の運動は視差の変化に関係なく運動していることが分かる。これは、被験者 NI が左右両眼に表示されている画像のうち左眼用の画像については視差の変化に伴い眼球も回転して画像のカーソルを注視しているのに対し、右眼は右眼用の画像の変化を見ていないためだと考えられる。なお、被験者 NI は実験後に「二重像とはならず、融像した」と報告した。このように測定結果から輻輳運動していないだろうと考えられる被験者が主観では融像していると感じる状態での両眼立体視は健康上において何らかの問題点をもたらす可能性がある。

表 4.1: 立体オブジェクトの提示位置における輻輳角と奥行き距離

基準からのずれ量 (cm)	輻輳角 (度)	奥行き距離 (眼前からの距離 (cm))
0	0	
2	2.29	162.50
3.25	3.72	100.00
4	4.58	81.25
6	6.87	54.17
8	9.15	40.63
10	11.42	32.50
12	13.69	27.08
14	15.94	23.21

4.2.2 被験者

被験者は研究室内男子学生 8 名とした (表 4.2)。実験中は、被験者の頭部の位置ずれ等によって生じる誤差を最小限におさえるために顎台で顎の位置を固定し、瞬きをしないよう指示した。また、被験者の主観報告により立体オブジェクトが融像しているかどうかを確認した。

4.2.3 実験結果と考察

実験の結果を図 4.5～図 4.14に示す。図 4.5～図 4.11において、横軸は立体オブジェクトの視差を輻輳角で表した値、縦軸は測定によって得られた輻輳角を示す。実線と点線は視差の異なる 9 種の静止画を表示した場合の輻輳角の実測値と計算値をそれぞれ表している。被験者 TO, SF については、視差と輻輳角の関係は視差の増加と関係なく計算値と実測値に大きな相違は見られず、その差は約 0.5° 以下である。被験者 YA, TK, DM については、立体オブジェクトに与えられた視差が輻輳角にして 4.58° 以上の場合に計算値より小さな値となっておりその差は視差が大きくなるにつれて徐々に大きくなっている。これは、立体オブジェクトに与えられる奥行き位置がディスプレイ位置より手前にくるものの、眼の焦点距離は依然としてディスプレイ位置にあるため、過度の輻輳運動を抑制しようとい

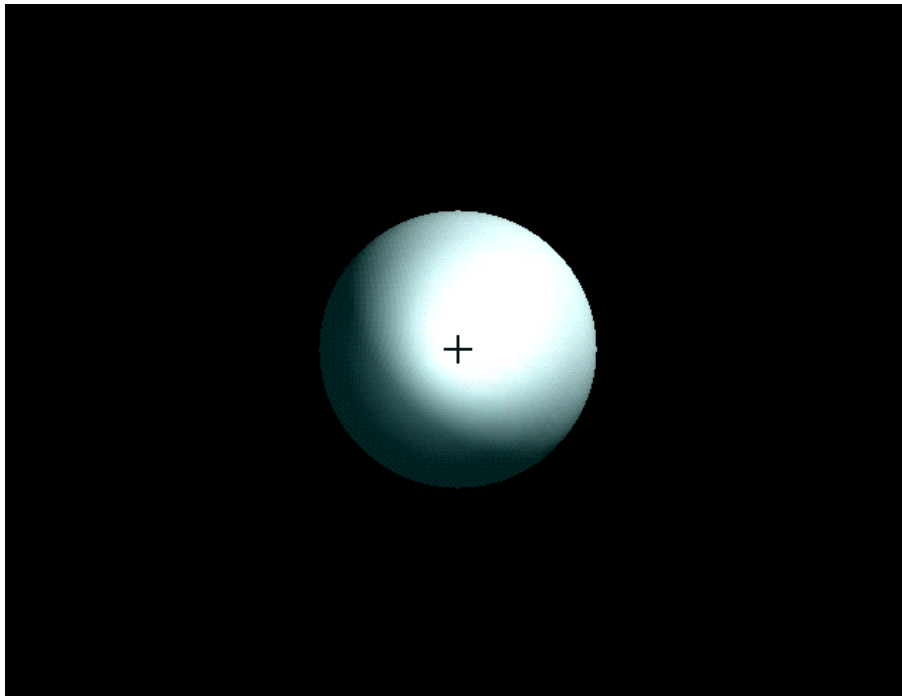
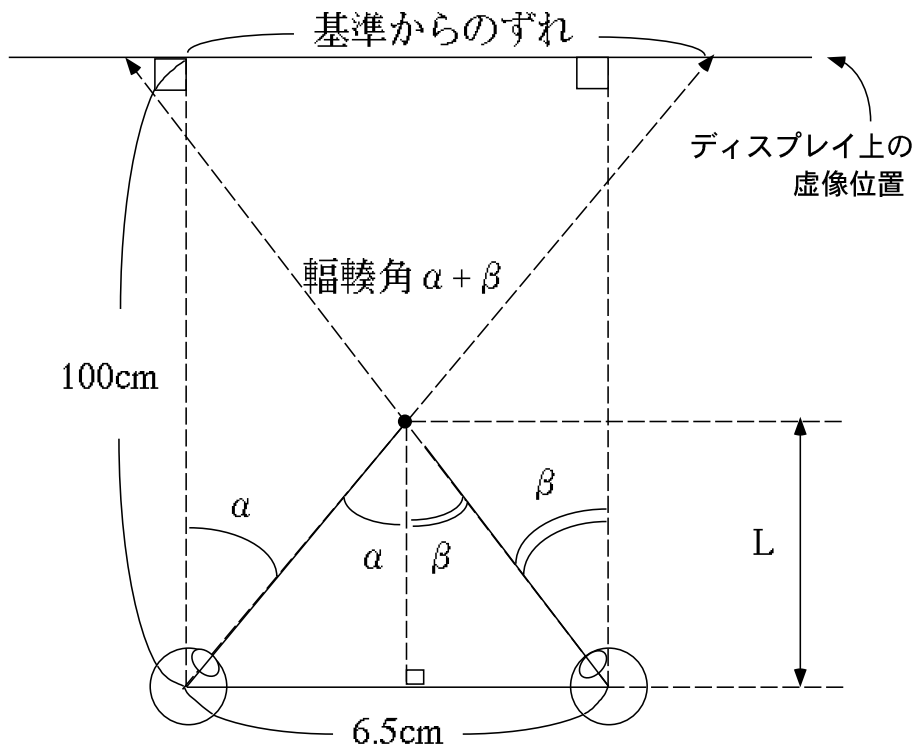


図 4.4: 白色球体画像 (立体オブジェクト)

4.2 立体静止画像を用いたときの奥行き位置の測定

4.2.1 実験方法

図 4.4に示すような黒色の背景色に対して陰影のある白色球体画像 (以下, 立体オブジェクト) を左右両眼に視差を与えて ES-HMD に表示し, そのときの被験者の瞳孔中心位置を測定する実験を行った. 輻輳角が 0° となるように画像を呈示した位置を基準位置とし, その基準からの虚像面上の水平方向のずれが輻輳角において 0° から約 16° の 9 種類の静止画像を ES-HMD に表示した. 表 4.1 に実験に用いた静止画像の輻輳角と奥行き距離の対応を記す. 被験者には, あらかじめ両眼融合式立体視にある程度慣れさせた後, 視差を含む左右像を 1 つの像として融合させる立体視の状態ですべての画像を 12 秒間注視させた.



像位置 (眼前距離) $\div L = 6.5\text{cm}/(\tan \alpha + \tan \beta)$

図 4.2: 輻輳角, 立体像位置の関係

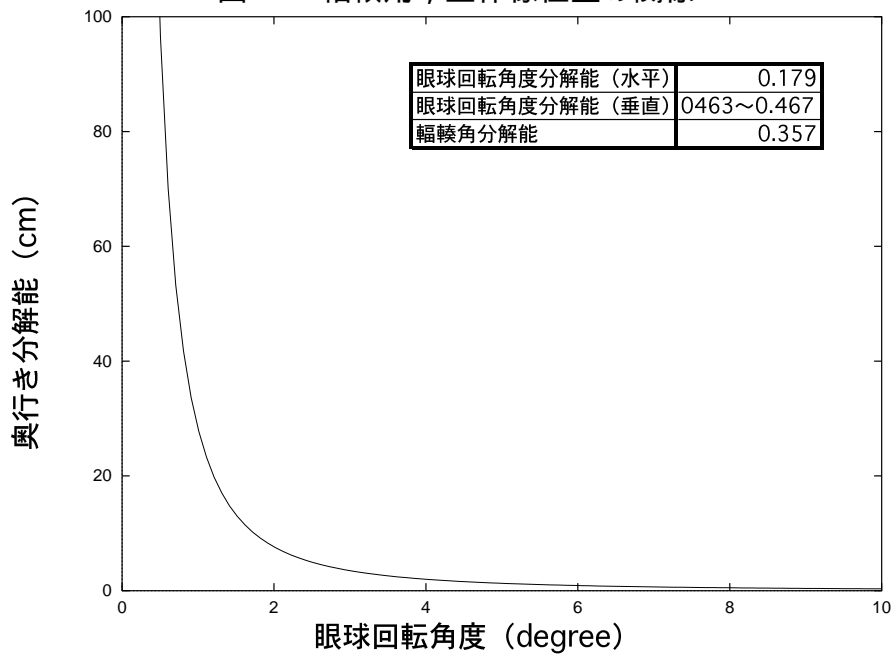


図 4.3: ES-HMD の眼球運動測定の数値

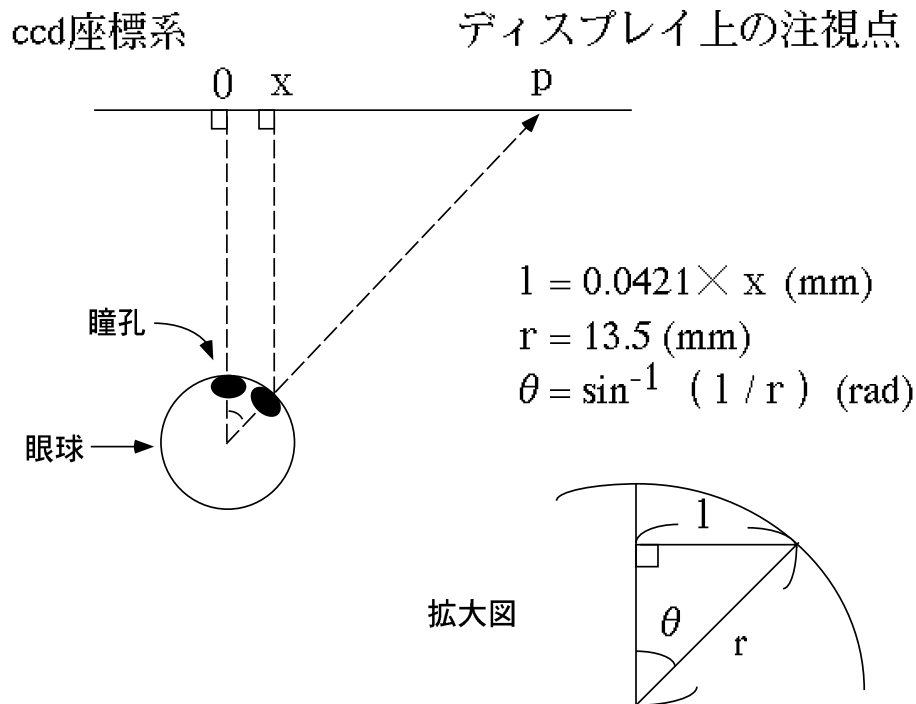


図 4.1: 眼球回転角度の算出法

$$\theta_v = \frac{180}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{0.109 \times x}{13.5} \right) \quad [\text{deg.}] \quad (4.2)$$

次に、左右両眼の眼球回転角度を求めることで、図 4.2 から輻輳角 (+) を求めることができる。同時に奥行き距離 L も次のように求められる。

$$L = \frac{6.5}{\tan \alpha + \tan \beta} \quad [\text{cm}] \quad (4.3)$$

水平瞳孔中心位置座標 x は CCD カメラの画素に対応し、画素が均等に配列されていることを考慮すると、一般に式 (4.2) より、ES-HMD により測定される眼球回転角の分解能は回転角度に依存し一定値とはならない。今回の測定では立体視像の最大輻輳角が約 16° であることから眼球回転角度が $0 \sim 8^\circ$ と微小範囲となるため水平回転角度分解能、輻輳角分解能はほぼ一定値となり、それぞれ約 0.179° 、約 0.357° となり、垂直回転角度分解能は $0.463 \sim 0.467^\circ$ の値をとる。一方、奥行き分解能に関しては図 4.3 のグラフに示すように眼球回転角度が原点より離れるに従って良くなる。

第 4 章 両眼立体視における奥行き位置評価 実験

両眼にそれぞれ視差のある像を呈示する両眼立体視により，奥行き情報を再現することができる．左右眼の網膜上に視差が生じると，その視差を補償し，1つの像として融合するため輻輳運動が生起する．ここでは，立体画像から得られる奥行き位置を輻輳角の変化から測定し，奥行き呈示位置と比較検討を行う．さらに立体動画像を用いて，両眼融像が不可能な被験者すなわちステレオアノマリーの判定を行う．

4.1 眼球回転角，輻輳角および奥行き位置の算出方法

輻輳角から奥行き位置を評価する際に，どのくらいの分解能で奥行きを評価できるかが重要な指標となる．そこで，以下では実験に使用する ES-HMD の奥行き測定に必要な眼球回転角，輻輳角および奥行き位置の算出方法，また，分解能の算出結果を示す．

ES-HMD の仕様から得られる瞳孔中心位置の水平分解能は 0.0421mm，垂直分解能は 0.109mm である．人間の眼球は大小 2 つの球が部分的に重なりあった形状をしており，視軸と回転中心は厳密には一致しない．しかし本報告では，検討する眼球回転角は 10° 以下の小さい範囲内であることを考慮して，ここでは簡単のため半径 13.5mm の単一の球として眼球を近似する¹¹⁾．さらに両眼瞳孔中心間距離を 65mm とし，眼球回転角度分解能とそれによって求められる輻輳角分解能および奥行き分解能を算出することにする．まず，眼球回転角度は ES-HMD の眼球撮像系の CCD カメラにより正面を見たときの瞳孔中心を基準とし，その基準点との差を測定することで図 4.1 のように眼球回転角度 θ_h を求めることができる．CCD 座標系における水平方向の瞳孔中心位置座標を x とすると水平眼球回転角 θ_h ，垂直眼球回転角 θ_v は次のように求まる．

$$\theta_h = \frac{180}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{0.0421 \times x}{13.5} \right) \quad [\text{deg.}] \quad (4.1)$$

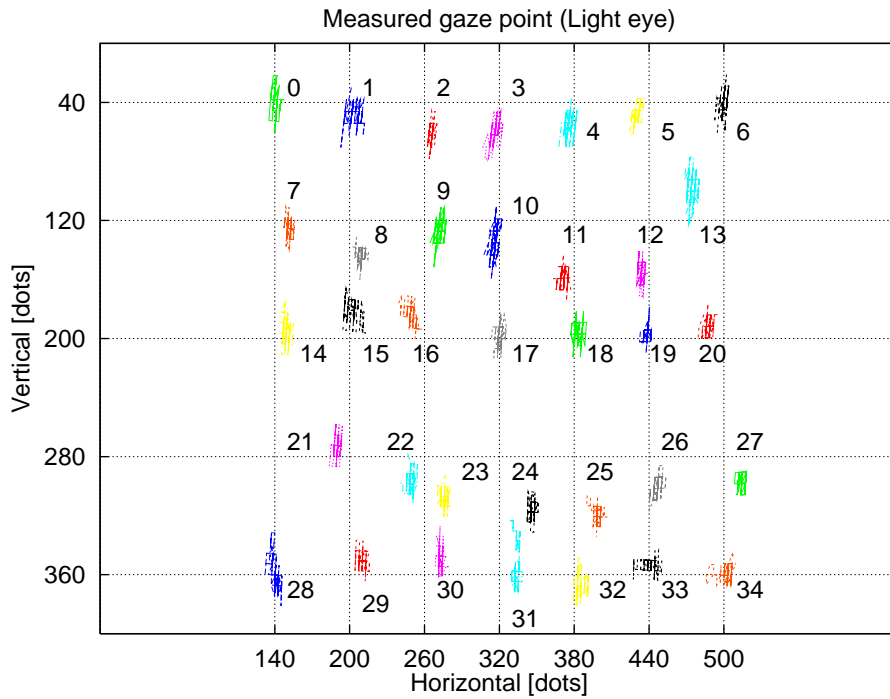


図 3.18: 三角形領域分割較正法による視点位置 (左眼)

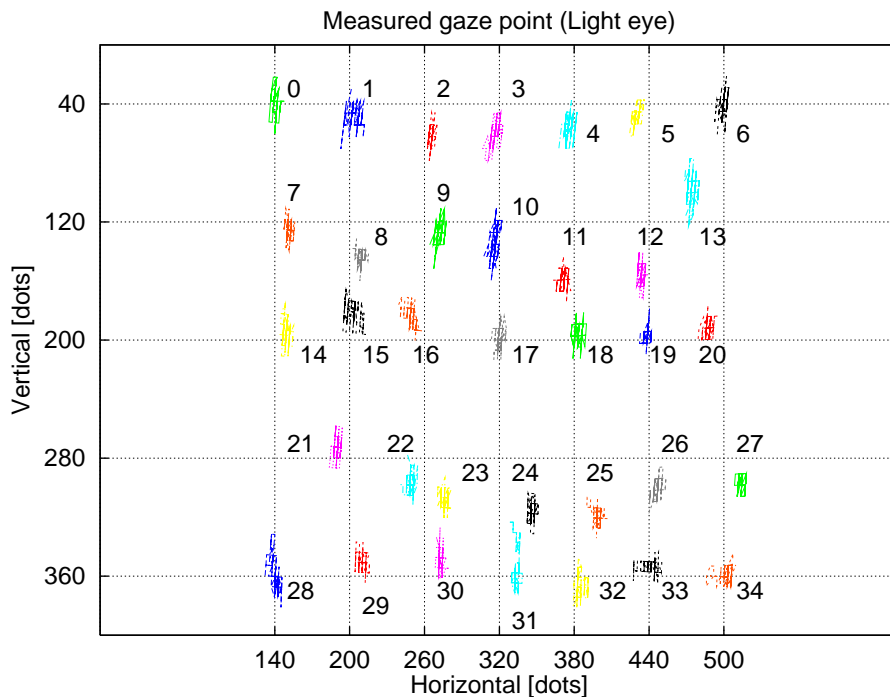


図 3.19: 三角形領域分割較正法による視点位置 (右眼)

表 3.3: 各較正法の比較 (左眼)

	参照点との平均距離 [dots]		参照点との距離の標準偏差の平均 [dots]	
	水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向
二点の補間法	19.1	14.7	2.5	6.8
昨年度の方法	12.6	14.2	3.2	6.6
本研究の方法	10.6	13.9	2.7	6.6

表 3.4: 各較正法の比較 (右眼)

	参照点との平均距離 [dots]		参照点との距離の標準偏差の平均 [dots]	
	水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向
二点の補間法	8.9	33.8	3.0	5.9
昨年度の方法	8.3	21.3	2.9	7.5
本研究の方法	6.2	18.4	2.8	7.4

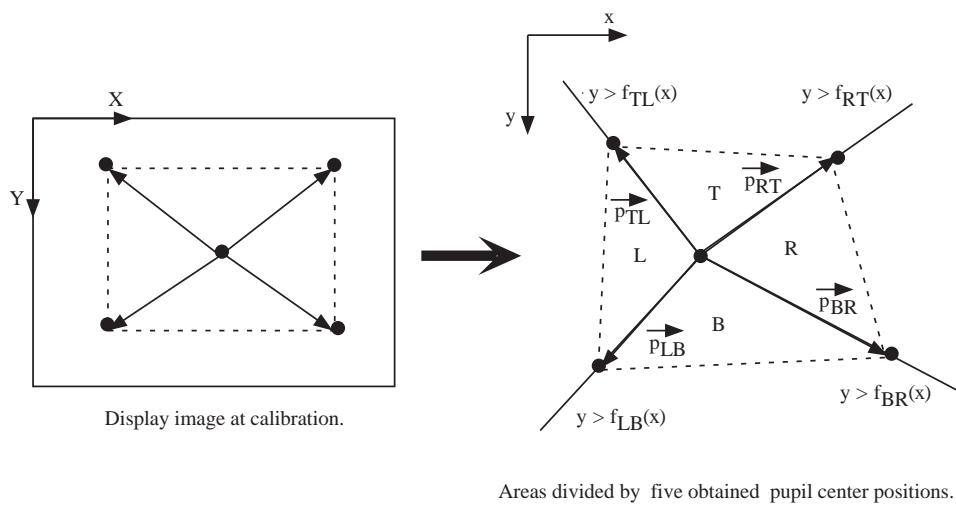


図 3.16: 三角形領域に分割する様子

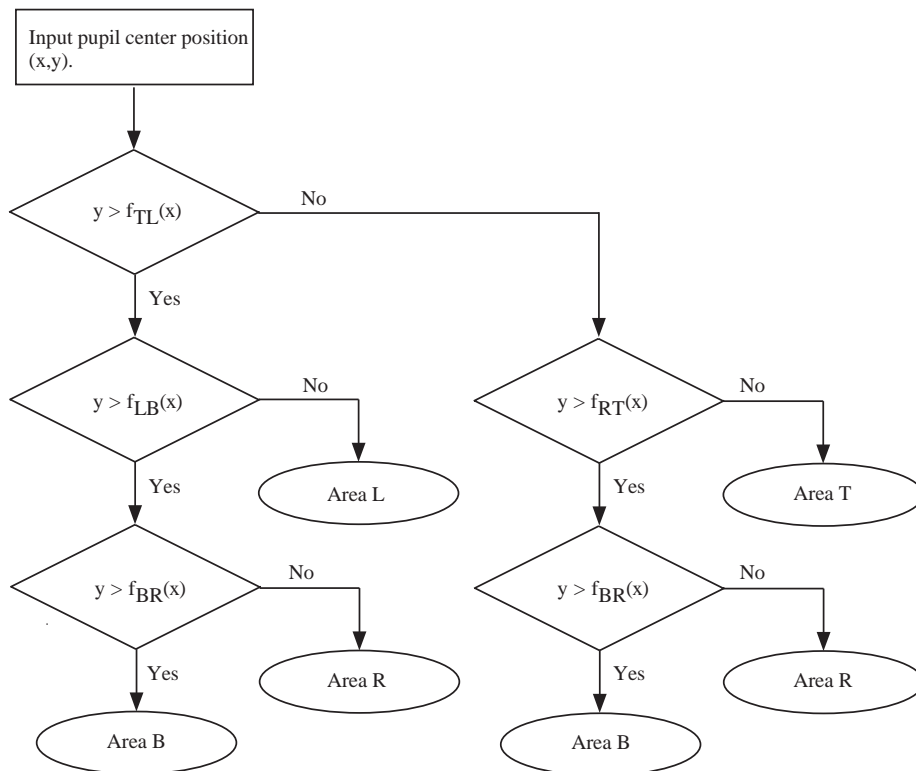


図 3.17: 領域判定アルゴリズムのフローチャート

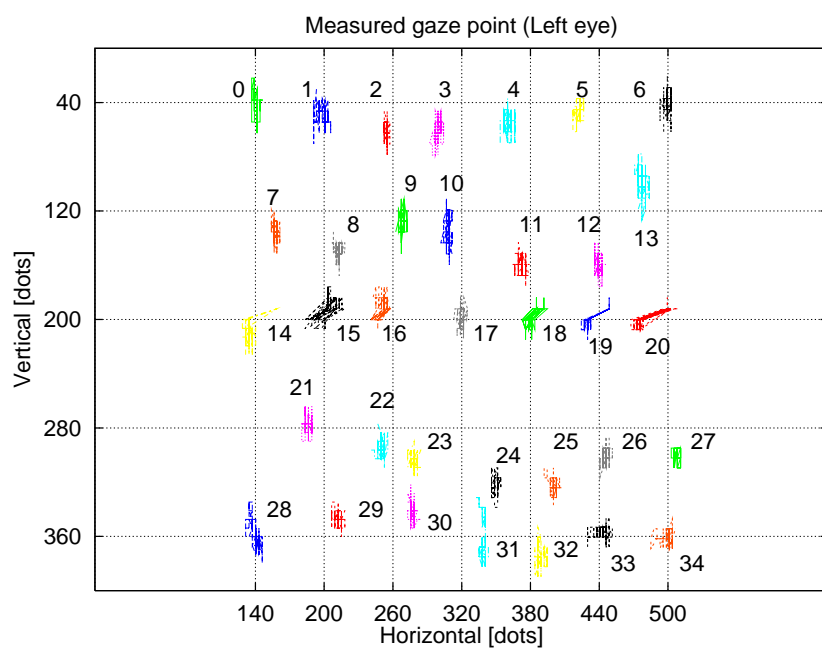


図 3.14: 領域分割を行った線形補間法により得られた視点位置 (左眼)

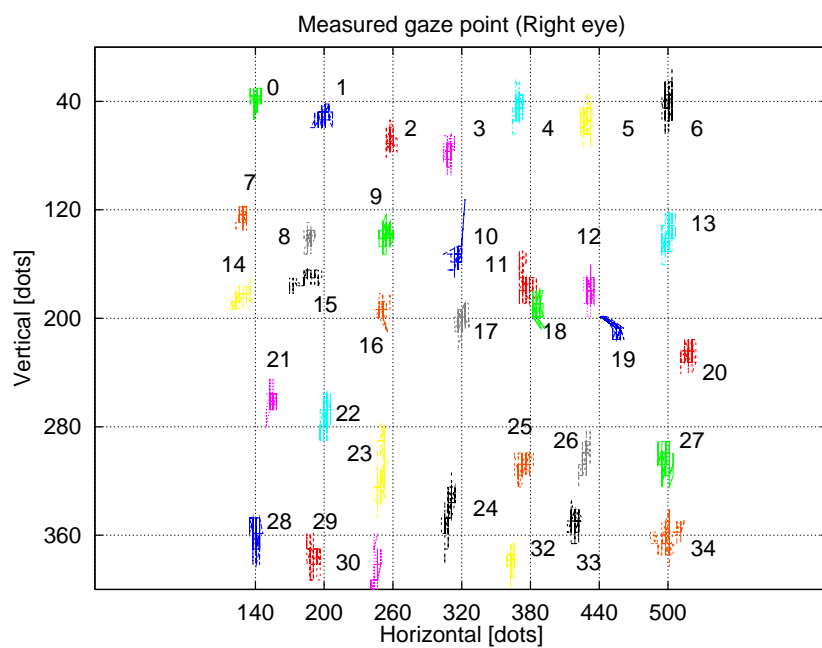


図 3.15: 領域分割を行った線形補間法により得られた視点位置 (右眼)

をみたく k, l を求め、得られた k, l を用いて視点位置 $P(X, Y)$ が次のように求められる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} X_{RT} \\ Y_{RT} \end{pmatrix} + l \begin{pmatrix} X_{TL} \\ Y_{TL} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

ここで、 X_c, Y_c は多角形内部の中心参照点の位置ベクトルである。

以上に述べた方法を用いて、図 3.8, 3.9 の瞳孔中心位置データに対して視点位置の較正を行い、評価を行った。用いた参照点は点 0, 6, 17, 28 と 34 の 5 点で、点 17 を中心として三角形に領域分割を行った。視点位置較正の結果を図 3.18, 3.19 に示す。図 3.18 より、図 3.14 の点 18, 19, 20 にみられた視点位置の不連続の問題が解消されていることがわかる。同様に図 3.19 より図 3.15 の点 10 においても同様の欠点が解決されていることがわかる。

以上に述べた 3 つの視点位置較正法について比較検討を行う。各視点位置較正法により得られた結果よりわかるように、35 個の各視点位置は一点に留まることはなく、視点位置近傍のある範囲内をゆらいでいる。そこで 35 個の視点における重心位置を求め、さらに求めた重心位置と視点位置との標準偏差を 35 個のすべての点について求める。得られた標準偏差は、各視点位置における視点のゆらぎの大きさを表す指標となる。次に求めた重心位置とそれに対応する各参照点との距離を求める。以上の計算により得られた距離と標準偏差を 35 個のすべての点における平均を求めた。左眼および右眼の結果を表 3.3 と 3.4 にそれぞれ示す。各表中の平均距離で示されるように、水平方向および垂直方向とも本研究で提案した方法が最も参照点と近いという結果を表している。注視点のゆらぎを示す標準偏差に関しては、本研究の方法と二点の補間法との差はほとんどない。しかし左眼の水平方向に関しては、昨年度の方法では他の 2 つの方法よりも標準偏差が大きい値となっている。これは前述したように、視点領域分割の境界線上で視点移動が不連続となるため、得られる視点位置データのゆらぎが大きくなるためであると考えられる。

これは注視位置が領域分割の境界線上にあり，領域が変わると各々の領域で，視点位置の較正後の座標にずれが生じているためである．本研究では，この問題を解決するために，領域分割を三角領域に分割しそれぞれの領域の2つの基本ベクトルにより注視位置を計算する方法を考案した．

3.2.2 三角領域分割による較正方法

ディスプレイ上に表示された複数の参照点は凸型の多角形をなし，かつその多角形内部に1つの参照点が存在するものとする．参照点が5つの場合を図3.16に示す．ここで1つの仮定を設ける．すなわち図3.16に示すように凸状の参照点列を注視したときに得られる瞳孔中心位置は凸状になるという，仮定である．この仮定は視野が極端に狭くなく，また参照点間距離が極端に近くない限り満たされると考えられる．すなわち眼球の固視微動よりも十分大きい範囲を視野範囲とし，固視微動の運動範囲より十分大きい範囲に参照点が分布する場合はこの仮定が満たされると考えられる．図3.7の点0,6,28,34の4点を注視した結果は，図3.8または3.9からわかるようにこの仮定が満たされている．

図3.16を例にすると，対象とするCCD座標系の領域を4つの三角形に分割し，各領域境界上の4つの基本ベクトル \vec{p}_{TL} , \vec{p}_{LB} , \vec{p}_{BR} , \vec{p}_{RT} を定義できる．これら4つの基本ベクトルを用いると領域 T, L, B, R のすべての領域上の点が表現できる．領域境界線の各直線の方程式をそれぞれ $y = f_{TL}(x)$, $y = f_{LB}(x)$, $y = f_{BR}(x)$, $y = f_{RT}(x)$ とし，任意の瞳孔中心位置の領域判定アルゴリズムの例を図3.17に示す．

領域判定を行った後，得られた瞳孔中心位置を各領域を構成する基本ベクトル成分に分解し，各基本ベクトルに対応するディスプレイ上のベクトルに対して成分比に応じて比例配分を行うことにより視点位置を合成する．

視点位置合成では，任意の瞳孔中心位置ベクトルを，瞳孔中心位置の属する領域を形成する2つの領域境界ベクトルの成分に分け，その成分比を用いてディスプレイ上の視点を合成する．瞳孔中心位置 $\vec{p} = (x, y)$ が領域 T に属する場合を考える．較正時の参照点に対する瞳孔中心位置 p_{RT}, p_{TL} を示す位置ベクトルを， $\vec{p}_{RT} = (x_{RT}, y_{RT})$, $\vec{p}_{TL} = (x_{TL}, y_{TL})$ とし，これに対応するディスプレイ上の参照点を $\vec{P}_{RT} = (X_{RT}, Y_{RT})$, $\vec{P}_{TL} = (X_{TL}, 0Y_{TL})$ とする．そして，

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} x_{RT} \\ y_{RT} \end{pmatrix} + l \begin{pmatrix} x_{TL} \\ y_{TL} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

$x \leq x_c$ かつ $y > y_c$ のとき

$$\begin{aligned} X &= \frac{X_c - X_{lb}}{x_c - x_{lb}}(x - x_c) + X_c \\ Y &= \frac{Y_c - Y_{lb}}{y_c - y_{lb}}(y - y_c) + Y_c \end{aligned} \quad (3.4)$$

$x > x_c$ かつ $y > y_c$ のとき

$$\begin{aligned} X &= \frac{X_c - X_{rb}}{x_c - x_{rb}}(x - x_c) + X_c \\ Y &= \frac{Y_c - Y_{rb}}{y_c - y_{rb}}(y - y_c) + Y_c \end{aligned} \quad (3.5)$$

較正結果の考察

以上に述べた領域分割を行った線形補間による視点位置較正法を用いて、図 3.8, 3.9 の瞳孔中心位置データに対して、視点位置の較正を行い、評価を行った。用いた参照点は点 0, 6, 17, 28 と 34 の 5 点で、点 17 を中心として領域分割を行った。較正後の結果を図 3.14, 3.15 に示す。この結果を、前述の計算評価法の二点の参照点を較正に用いた結果と比較する。まず左眼では、図 3.10 と 3.14 を比較すると、点 5 と 29 などの視点位置は領域分割を行った方法のほうが改善されていることがわかる。また右眼については、図 3.11 と 3.15 の点 4, 5, 6 の視点位置を比較するとかなり精度が向上している。

しかし、図 3.15 の点 24 のように、領域分割により却って視点位置が離れている場合もある。点 24 の下に位置する点 31 に関しては、ディスプレイの領域外の視点位置となっている。

較正の精度を改善するには、補間に用いる参照点を増やすことが考えられる。これによって視点位置の精度の向上が期待できるが、参照点が多すぎると較正に要する時間が増大するという問題点も考えなければならない。さらにこの方法の欠点として、参照点注視中の瞳孔中心位置が水平方向および垂直方向に関して対称でないとき、各領域を跨ぐような視点移動はその境界線上での視点の軌跡が不連続になるという点が挙げられる。例えば図 3.14 の点 18, 19, 20 または図 3.15 の点 10 などにその様子がみられる。これらの点では、領域分割を行う前の 2 点の線形補間による方法と比較して、注視点のゆらぎが大きくなっていることが観察される。

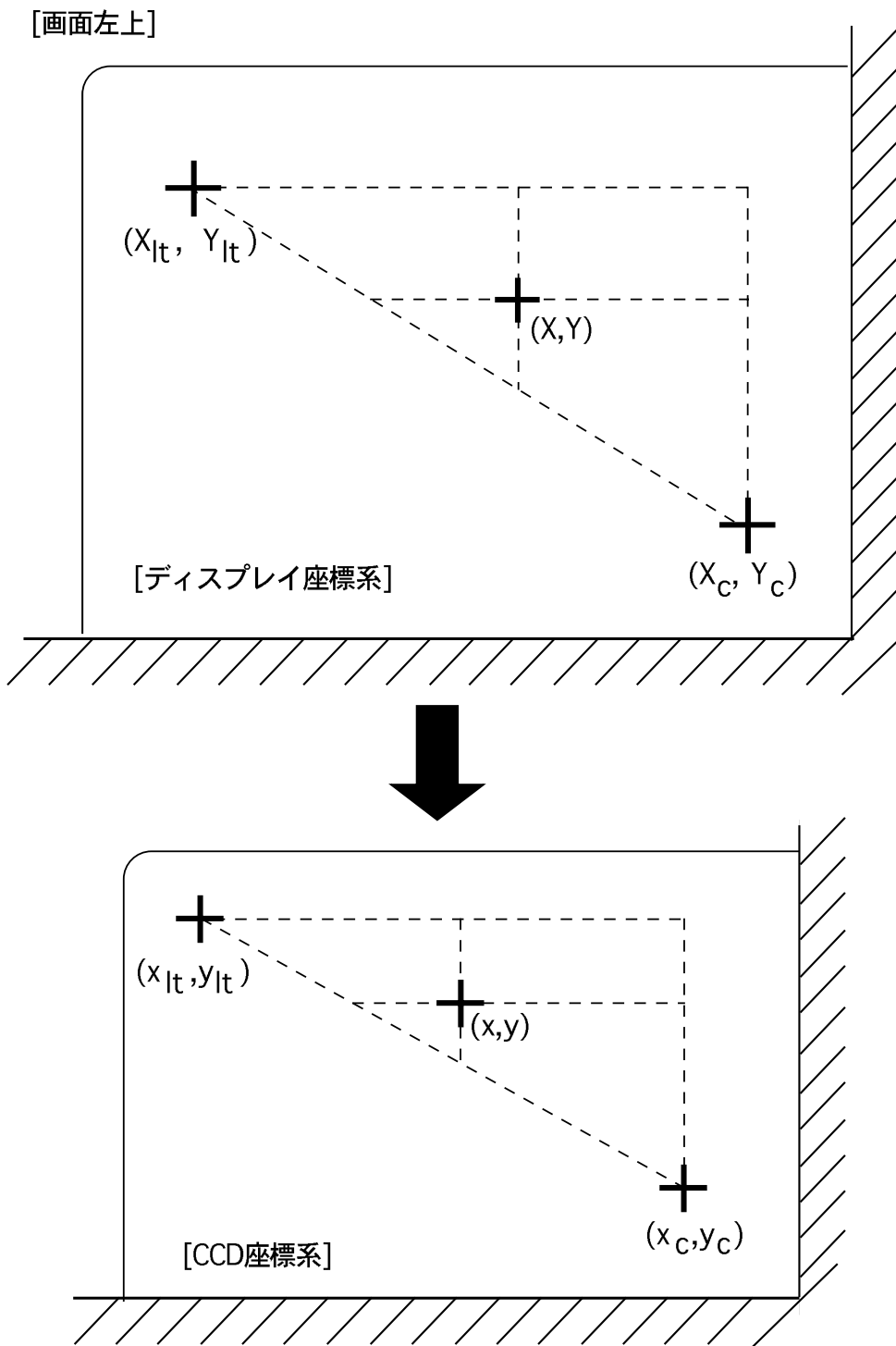


図 3.13: 2 点の参照点を用いた線形補間による視点位置較正法



図 3.12: キャリブレーションの説明図

$$\begin{aligned} \frac{X_c - X_{lt}}{X_c - X} &= \frac{x_c - x_{lt}}{x_c - x} \\ \frac{Y_c - Y_{lt}}{Y_c - Y} &= \frac{y_c - y_{lt}}{y_c - y} \end{aligned} \quad (3.1)$$

より，視点位置座標 (X, Y) は次式により求められる．

$$\begin{aligned} X &= \frac{X_c - X_{lt}}{x_c - x_{lt}} (x - x_c) + X_c \\ Y &= \frac{Y_c - Y_{lt}}{y_c - y_{lt}} (y - y_c) + Y_c \end{aligned} \quad (3.2)$$

以下，同様に次のようになる．

$x > x_c$ かつ $y \leq y_c$ のとき

$$\begin{aligned} X &= \frac{X_c - X_{rt}}{x_c - x_{rt}} (x - x_c) + X_c \\ Y &= \frac{Y_c - Y_{rt}}{y_c - y_{rt}} (y - y_c) + Y_c \end{aligned} \quad (3.3)$$

図 3.12のように，ES-HMD の表示ディスプレイの中心および画面の左上，右上，左上，左下の四隅に十字カーソルを図に示した番号順に表示し，被験者にそのカーソルを注視してもらう．ここで，各点の座標位置は固定されており，ディスプレイ座標系の画面中心座標，左上，右上，左下，右下の四隅の座標をそれぞれ (X_c, Y_c) ， (X_{lt}, Y_{lt}) ， (X_{rt}, Y_{rt}) ， (X_{lb}, Y_{lb}) ， (X_{rb}, Y_{rb}) とする．ここで X 軸， Y 軸はそれぞれディスプレイ上の水平方向および垂直方向を示す．座標上の各カーソルを注視したときの，CCD 座標系における瞳孔中心位置座標をそれぞれ (x_c, y_c) ， (x_{lt}, y_{lt}) ， (x_{rt}, y_{rt}) ， (x_{lb}, y_{lb}) ， (x_{rb}, y_{rb}) とする．ここで x 軸， y 軸は CCD カメラ上の水平方向および垂直方向を示す．被験者が各カーソルを注視している間の CCD 座標系における瞳孔中心座標とディスプレイ座標系における注視点座標との対応関係を求めることができる．

昨年度の研究ではディスプレイおよび CCD 撮像領域を左上，右上，左下，右下の 4 つの領域に分割し，任意の瞳孔中心位置がどの領域に属するのかをまず求め，次いでその領域内で視点位置を較正する方法を用いた．領域の判定方法は次の通りである．すなわち，任意の瞳孔中心位置 (x, y) を，画面中心座標に対応する瞳孔中心位置 (x_c, y_c) と比較して，以下の判定により 4 つに分割した領域のいずれに属するかを決定する．

$x \leq x_c, y \leq y_c$ のとき左上，

$x \leq x_c, y > y_c$ のとき左下，

$x > x_c, y > y_c$ のとき右下，

$x > x_c, y \leq y_c$ のとき右上．

以下，具体的な変換方法と，この方法による較正についての結果を述べる．

座標系の変換

座標変換の原理図を図 3.13に示す．任意の視点位置座標 (X, Y) は，それに対応する CCD 座標系の瞳孔中心座標 (x, y) とキャリブレーションにより得られたパラメータを用いて，各領域ごとに比例配分によって求める．すなわち， $x \leq x_c$ かつ $y \leq y_c$ のとき

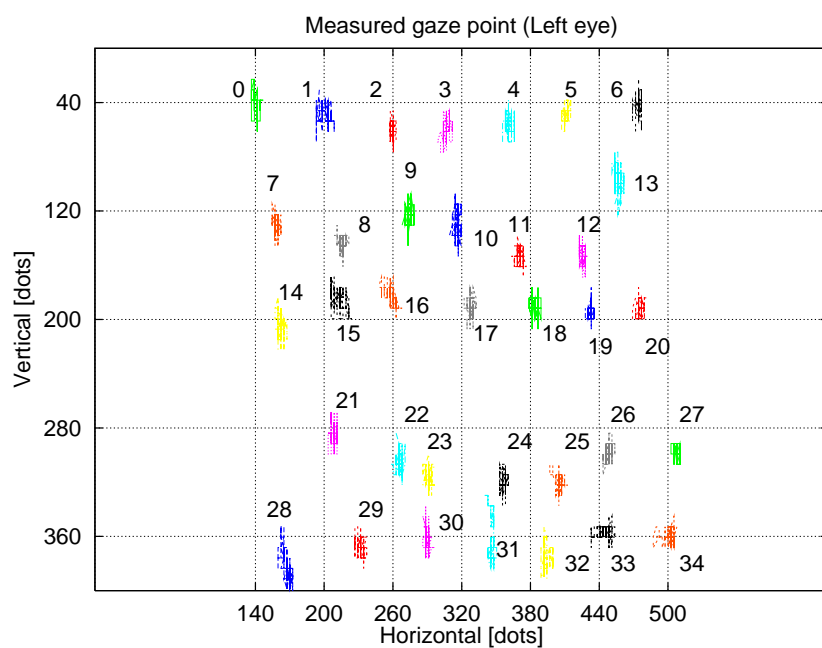


図 3.10: 2 点の参照点の線形補間により得られた視点位置 (左眼)

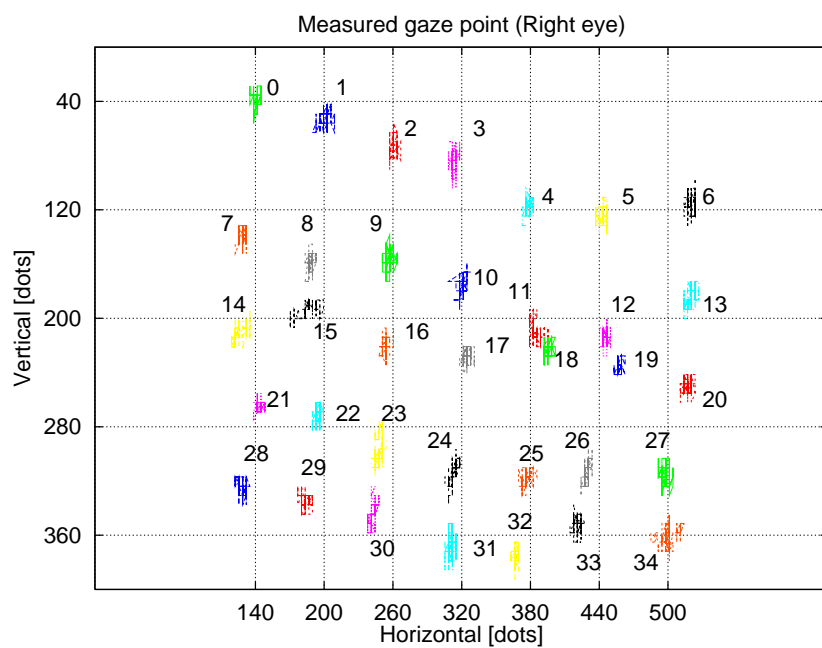


図 3.11: 2 点の参照点の線形補間により得られた視点位置 (右眼)

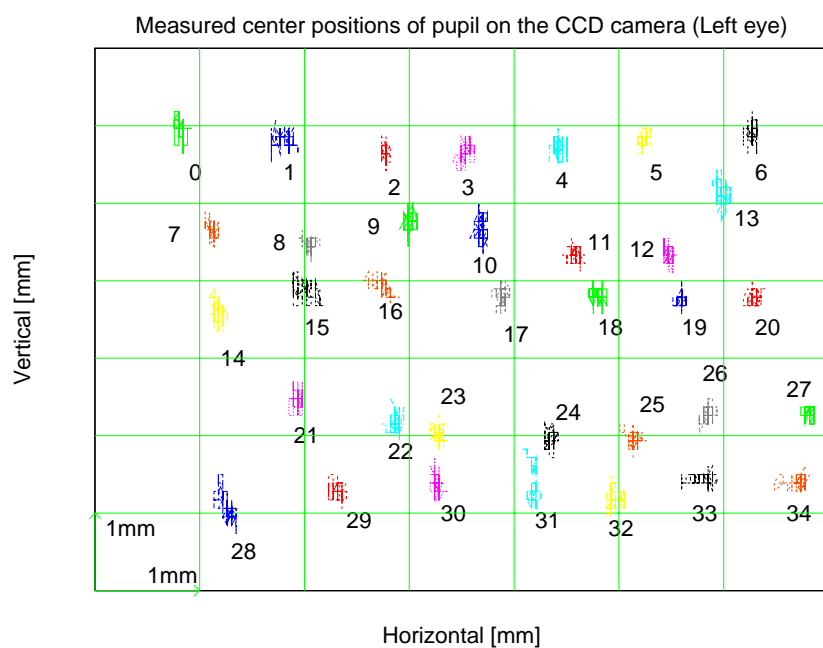


図 3.8: 撮像信号処理系により得られた瞳孔中心位置 (左眼)

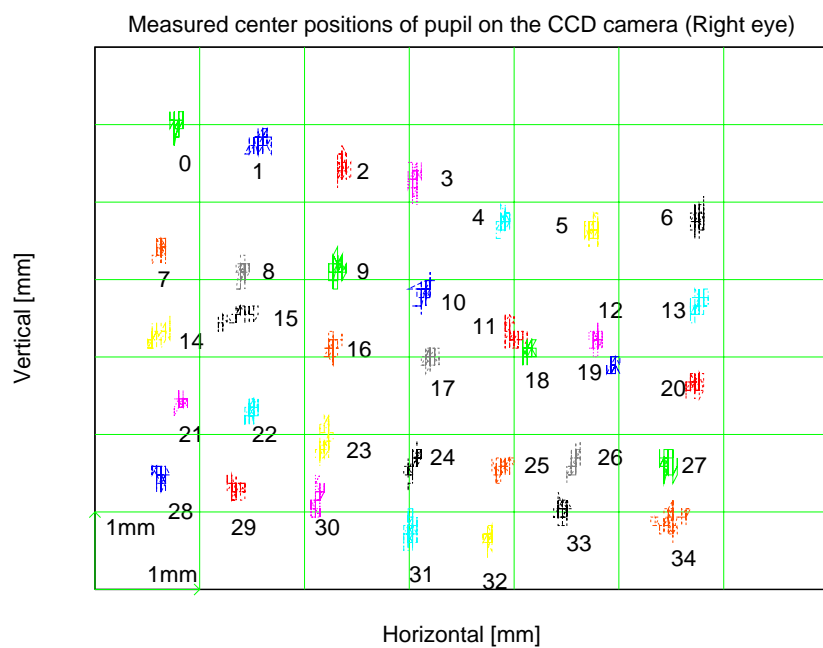


図 3.9: 撮像信号処理系により得られた瞳孔中心位置 (右眼)

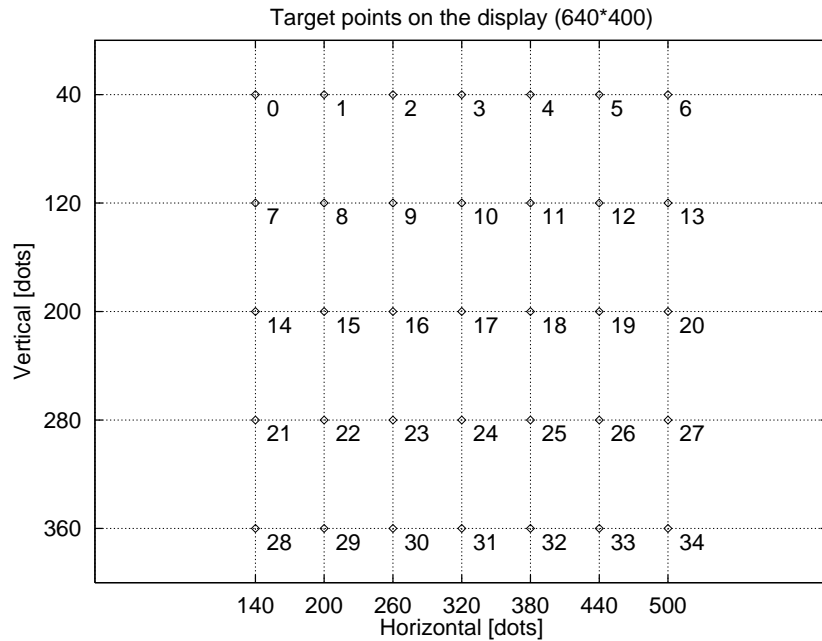


図 3.7: 視点位置精度評価に用いたディスプレイ上の参照点

CCD カメラが傾いていたことによる。また図 3.9に示すように、参照点 11 と 18 に対する瞳孔中心位置は、一部重複していることがわかる。

以上のデータをもとに、図 3.7の 35 個の参照点のうち、対角線の両端の点 0 と 34 の 2 点を線形補間法に用いる参照点として全 35 点の較正位置を求めた。結果を図 3.10, 3.11に示す。図 3.10に示されるように点 21~27 の視点位置は大きく離れていることがわかる。これは較正する前のデータが他の点と比較して大きく離れていることが、図 3.8のデータよりわかる。このような場合には視点位置もかなり離れることになる。また図 3.10の点 13 や 28 についてもディスプレイ上の対応点から離れていることがわかるが、これは参照点である 0 と 34 から離れているために較正精度が劣化したことによると考えられる。この傾向は図 3.11の右眼の視点データにおいてさらに顕著に現れている。この場合は図 3.9の右下がりの傾向が少しも改良されていない。このように 2 点の線形補間による較正法は簡単ではあるが、2 点の参照点より離れるにしたがって、視点位置精度が低下する傾向がある。この問題点を解決するために、昨年度の研究では、CCD カメラの撮像領域を分割し、分割された各領域に対して 2 点の線形補間を行う視点位置較正法を用いた²⁾。この方法の概略は次の通りである。

3.2 視点位置導出方法

視点位置検出の応用を考えるにあたっては，人間の個人差により，また同じ人間でも HMD の装着の具合により，映像表示系の映像上で使用者が注視している位置と CCD 座標系での瞳孔中心の位置の対応関係は，装着するごとに常に変化していると考えなければならない．そのためには HMD を装着するたびに対応関係を表すパラメータを記録し，そのパラメータに基づいた座標系の変換を行う必要がある．この作業を視点位置の較正（キャリブレーション）という．

3.2.1 昨年度までの方法と問題点

最も簡単な較正方法として，2 点のディスプレイ上の参照点を用いる線形補間法がある．まずディスプレイ上の 2 点の参照点を注視している間の瞳孔中心位置を予め求めておく．ディスプレイ上の任意の位置を注視しているときの瞳孔中心位置と予め求めておいた 2 つの瞳孔中心位置から比例配分法により相対位置を求め，その相対位置に対応するディスプレイ上の点を注視点とする方法である．

この方法を評価するために図 3.7 に示す 35 点のうち 1 点ずつを ES-HMD のディスプレイに表示させ，そのときの瞳孔中心位置の測定を行った．図 3.7 の評価用画面は PC98 で作成し，スキャンコンバータを用いて NTSC 信号に変換し ES-HMD に投影した．図 3.7 の原点は左上にあり，水平方向は 0 ~ 640 [dots]，垂直方向は 0 ~ 400 [dots] の範囲で参照点位置を指定できる．合計 35 個の参照点を，水平方向が 140 ~ 500 [dots] の範囲に 7 点，垂直方向が 40 ~ 360 [dots] の範囲に 5 点をそれぞれ点間隔が同一となるように表示した．図中の点 17 が画面中央位置に相当する．最左端と最右端の参照点の水平視野角は 27.8° に相当し，各参照点間の水平視野角は約 $4.5 \sim 4.7^\circ$ となる．一方最上端と最下端の参照点の垂直視野角は 29.6° に相当し，各参照点間の垂直視野角は約 $4.8 \sim 5.0^\circ$ となる．

以上の準備のもとに，成人男子の被験者 TO に対して，参照点を各 1 点ずつ表示したときの注視中の 5 秒間の瞳孔中心位置を測定した．CCD カメラ座標系における左右両眼の瞳孔中心位置の測定結果をそれぞれ図 3.8，3.9 に示す．図よりわかるように，すべての全参照点が CCD カメラの撮像領域を占める範囲は，水平方向が約 6mm，垂直方向が約 5mm であり，前節で述べた眼球撮像系の仕様で示される CCD の撮像領域に対して非常に狭い領域に入っている．図 3.9 に示す右眼の瞳孔中心位置は，水平方向に関して右下がりになっている．これは右眼用の

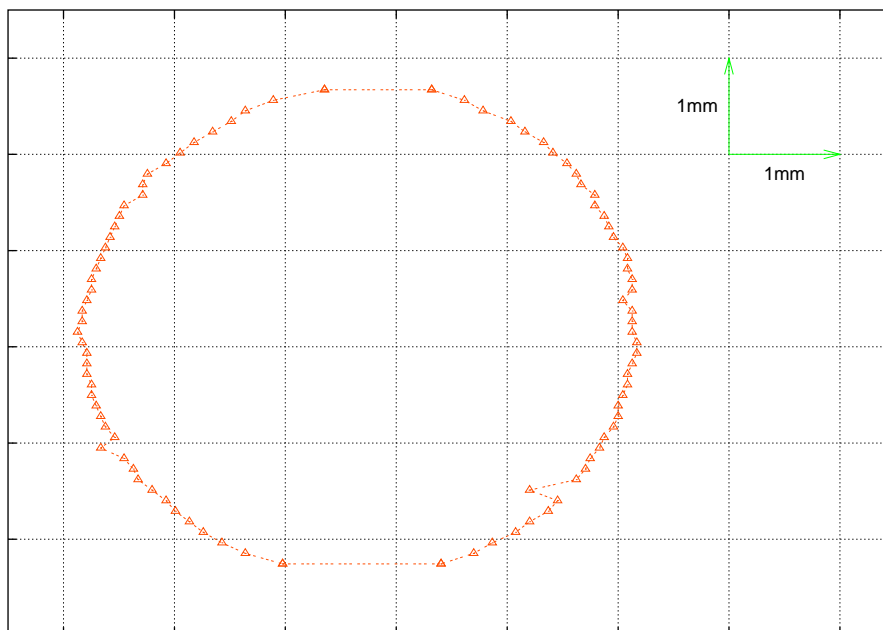


図 3.6: 瞳孔形状情報から再構成した瞳孔形

眼球撮像系の仕様を表 3.2 に，赤外線 LED を取り付けた様子を図 3.5 にそれぞれ示す．

3.1.3 撮像信号処理系

撮像信号処理系では，CCD カメラより得られる NTSC ビデオフォーマット信号を実時間で処理し，CCD カメラ上の瞳孔の形状情報を PC に出力する．

撮像信号処理系により得られる瞳孔形状情報により再構成された瞳孔を図 3.6 に示す．瞳孔の位置分解能は水平方向が 0.0421mm で，垂直方向が 0.109mm である．これは眼球回転角に換算すると回転角が 8° 以内の範囲では約 0.179° に相当するが，この分解能は従来開発された専用の眼球運動追跡装置の性能に匹敵するものである¹⁰⁾．Eye-Sensing HMD はこのような瞳孔計測性能を備えさらに両眼にディスプレイ表示が行えるので，従来にない実験視環境を構築することが可能となる．

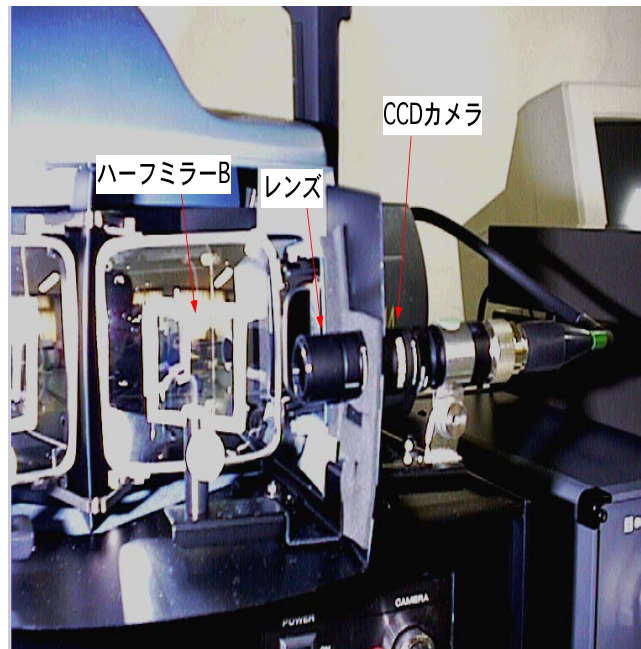


図 3.4: CCD カメラを取り付けた様子

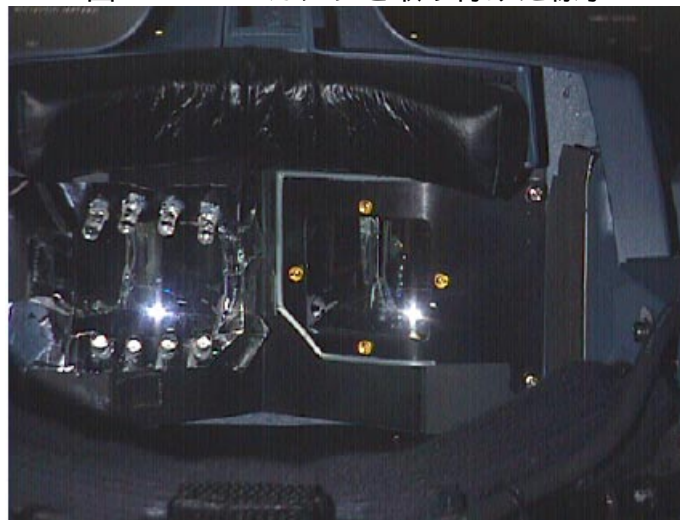


図 3.5: 赤外線 LED を取り付けた様子

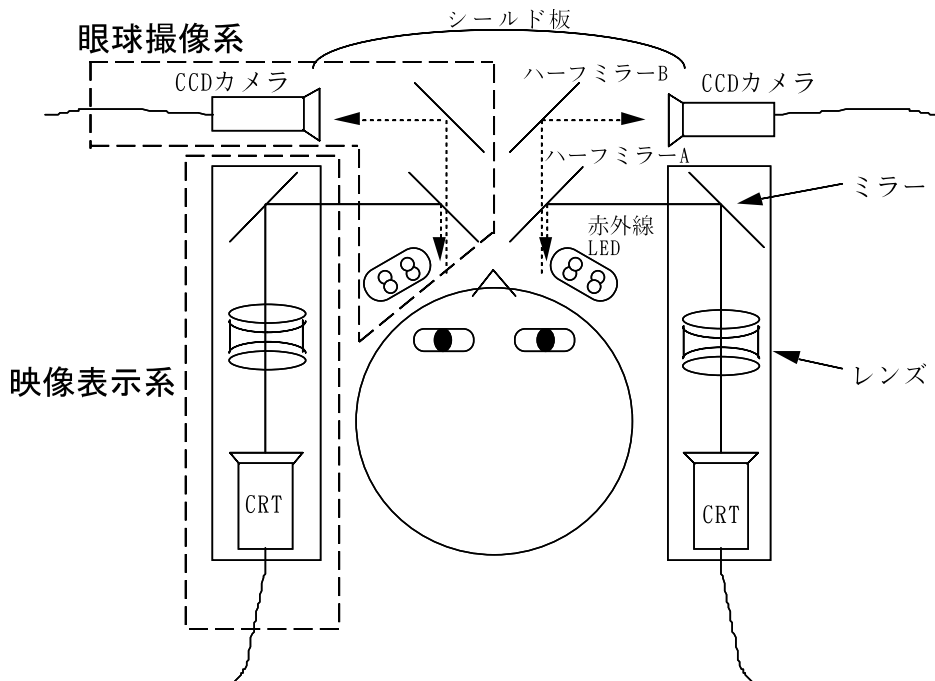


図 3.3: 映像表示系と眼球撮像系の概念図

3.1.2 眼球撮像系

眼球の撮像は、赤外線 LED により眼球を照射し、その反射光を CCD カメラで撮像することにより実現した。眼球の照射に赤外線を用いたのは、人間が知覚できない周波数帯域の光を用いることによって CRT の映像に影響を及ぼさないためである。赤外線 LED は両眼直前の視界外の上・下各 5 つずつ配置し、瞼による影が極力小さくなるようにした。CCD カメラは眼球の近くに配置すれば眼球像が大きく撮れるが、近づけすぎると視野に入り、視界の妨げとなる。逆に遠すぎると、得られる眼球像が小さくなり、瞳孔の大きさや視点位置の精度が低下する。ここではシースルー機能を維持するために、図 3.4 のように、CCD カメラはハーフミラー B の外側に配置し、CRT の映像の水平視野角の外に来るようにした。

CCD カメラ前部には撮像レンズを装着している。CCD カメラと撮像レンズは東芝製の LK-M41MR と JK-L24M2 を使用した。赤外線 LED の眼球表面に対する反射光はハーフミラー A を透過した後、赤外領域に対し反射率が大きくなるようにコーティングされたハーフミラー B によって反射され、レンズを経たあと CCD カメラの入力となる。

表 3.1: 映像表示系の仕様

表示管	CRT
視野角	水平 48° × 垂直 36°
輻輳角	0° 固定
外景透過率	20% 以上 (シールド無し)
	0% (シールド有り)
焦点距離	1m
水平解像度	350TV 本以上
表示輝度	10 f_L 以上

表 3.2: 眼球撮像系の仕様

CCD の有効撮像面積	水平 6.54mm × 垂直 4.89mm (1/2 インチ形)
CCD の有効画素	水平 768 × 垂直 494
CCD の解像度	水平 570TV 本 × 垂直 350 本
走査方式	2:1 インタレース
走査周波数	水平 15.734kHz, 垂直 59.9Hz
レンズ焦点距離	24.0mm
レンズ・眼球間距離	145mm



図 3.1: Eye-Sensing HMD の外観

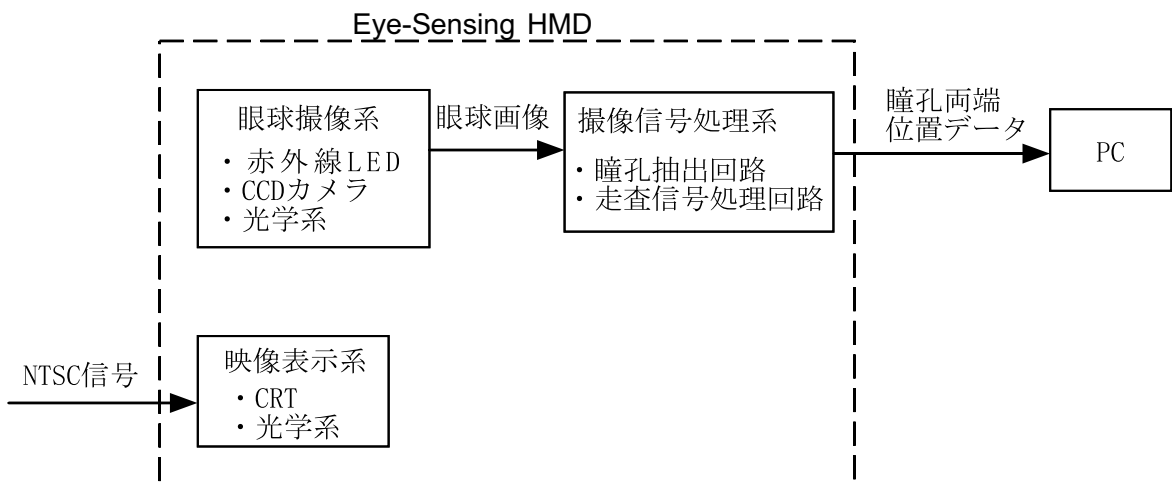


図 3.2: Eye-Sensing HMD の全体構成図

第 3 章 Eye-Sensing HMD の仕様と評価

3.1 Eye-Sensing HMD の仕様

ここでは ES-HMD の仕様について述べる．ES-HMD の外観を図 3.1 に示す．図 3.1 よりわかるように両眼斜め前方に両眼を撮像するための CCD カメラが左右の眼に対して取り付けられている．ES-HMD は両眼用に備えられたディスプレイにより映像の呈示が可能である．さらに眼前のシールド板を上げることにより外光が入射し，外が眺められるシースルー機能を備えている．ES-HMD の構成図を図 3.2 に示す．図 3.2 に示されているように，ES-HMD は映像表示系，眼球撮像系および撮像信号処理系からなる．

以下では各ブロックについて順に述べる．

3.1.1 映像表示系

映像表示系は，ES-HMD の装着者に映像を呈示する．ベースとなる HMD は島津製作所製の STV-E である．表示管として用いた CRT は左右両眼用に各 1 つずつ両側頭部に配置されており，瞳孔間距離に対応した視差を持つ映像を両眼に呈示することにより立体視が可能である．CRT への入力信号フォーマットは NTSC ビデオ信号である．

図 3.3 において CRT は入力された映像を表示するが，そのままでは眼球との距離が近すぎて適切に映像を見ることができないため，レンズおよびハーフミラーからなる光学系によって映像の虚像位置が 1m 前方に来るようにしている．レンズを透過した映像はミラーとハーフミラー A で反射されて眼球に届く．ディスプレイの大きさは 43.5 インチに相当する．ハーフミラー A とハーフミラー B により，HMD を装着した状態でシールド板を開けることによって CRT の映像と外界の両方を同時に見ることが可能となる．これはシースルー機能と呼ばれているが，この機能を実現するために CRT は左右側頭部に配置されている．映像表示系の仕様を表 3.1 に示す．

1 では、昨年度試作開発した Eye-Sensing HMD の視点位置測定法の改良点について述べる。2 では、Eye-Sensing HMD が左右両眼用にディスプレイを備えている特徴を利用して、両眼視差を含む画像を呈示したときの輻輳運動を調べ、両眼立体視が行えているかどうかの判定方法を検討し、さらに両眼視差と輻輳運動との関係を明らかにすることを目的とする。3 では、Eye-Sensing HMD の応用例として、MRI(Magnetic Resonance Imaging) より得られる脳血管立体画像を注視中の視点位置追跡実験を行う。さらに視覚認知実験においてあまり採り上げられることのなかった瞳孔指標を用いて視覚周辺視に関する認知実験を行い、その評価検討を行う。

次章では、昨年度試作した Eye-Sensing HMD の仕様について概観し、本年度改良した両眼撮像機能と視点位置導出法について述べ、Eye-Sensing HMD の評価結果を紹介する。

2.3 Eye-Sensing HMD を用いた昨年度の研究

昨年度，当研究室では人間の内面状態の推定に有効であると考えられる眼球運動や瞳孔運動，瞬目などの視覚系指標に着目し，その導出の実時間処理が可能でしかも仮想空間の提供に有効なデバイスとして視覚系指標の導出を可能にした Eye-Sensing HMD(ES-HMD) を試作した²⁾．その設計上の評価及び計測装置としての応用可能性について昨年度研究が行われた．評価結果より，映像の呈示以外に視点位置，瞳孔の大きさ，瞬目などの視覚系指標も十分な精度で計測できることが確認できた．

仮想環境下における眼機能生理特性については，単眼の撮像機能しか備えていなかったため昨年度は両眼にそれぞれ異なる映像の呈示が可能な HMD の機能を利用していなかった．

ES-HMD の視点位置検出機能を利用して，視点を計算機への入力手段として応用することを昨年度に試み，マウス入力との比較評価を行った．評価結果より，移動対象の大きいときには ES-HMD による視点入力はマウス入力と同等のパフォーマンスがあることを示した．視点入力は従来あまり充実していなかった VR 環境の入力デバイスに加え，有力な補助入力手段となることが期待できる．

昨年度の研究では，片眼しか計測できていなかったこと，視点位置の精度などに課題があった．本研究ではこれらの課題を解決し，さらに，それを踏まえて種々の実験を行う．

2.4 本研究の目的

本研究は，効果的なヒューマンインタフェースを構築するために前節で述べた眼機能および視覚系の指標から様々な有益な情報を抽出することを目的とする．ここで抽出する情報としては，ディスプレイ注視時の注視点位置，両眼輻輳運動そして視覚認知時における瞳孔の大きさを評価対象とする．具体的には以下の3つを研究課題とする．

1. Eye-Sensing HMD より得られる視点位置測定法の改良
2. 仮想現実感などに利用される両眼立体視環境における輻輳運動機能の評価
3. Eye-Sensing HMD を用いた視覚認知特性の評価実験

・奥行き感度

前に述べた種々の手がかりは，単独ではかなり詳しく調べられているものもあるが，統一的な立場からこれらの相互関連を調べた研究は少ない．しかし奥行き感度という量を定義し，これを指標として各手がかりの有効な範囲の相互関連が調べられている，

いま対象までの距離を D ，この対象が後方向にわずかに動いたとき奥行きの変化を知覚し得る最小の距離変化（奥行き弁別閾）を ΔD としたとき，奥行き感度は $D/\Delta D$ で定義される．すなわち，ある視距離 D において，奥行きの変化したことを感じさせる距離変化 ΔD が小さければ小さいほど，奥行き感度が大きいということになる．

上に述べた各々の手がかりのうち，調節，輻輳，両眼視差，運動視差，網膜像の大きさ，空気透視，および明るさについて，その有効範囲が奥行き感度を用いて評価される．

・両眼融合による立体視

左右眼に与えられる像の水平方向のずれ量がある範囲以内ならば，これらは二重像ではなく一つのものとして見え，このずれ量の方向に応じて像が前あるいは後ろに奥行きをもって感じられる．

両眼視差による奥行きの知覚は，左右の目に与えられる像に輪郭の情報が存在しなくとも生じ得る．すなわち，一方の目にランダムな点の集まりで特別な図形情報が存在しないパターンを与える．また，このパターンの一部をある形に切り抜いて水平方向にずらせ，ずらせてできたすき間の部分をランダムな点で埋めて，同様に単眼では特別な図形としては見えないパターンを作成し，これをもう一方の目に与える．このようにすると，切り抜いてずらせた形の部分がずれの方向に応じて明確な奥行きを持って画面の前あるいは後ろに見える．すなわち，このようなランダムドットパターンの見え方から，視覚系には輪郭情報によって奥行きを判断するメカニズムのほかに，パターン全体としての対応（相関）を求め，これによって形の判断をして，さらに奥行きの判断をするメカニズムが存在すると考えられる．

な両眼視差を検出する細胞が存在することが知られている。

両眼視差による奥行きの手がかりの範囲は、ずれ量の融合範囲によって定まりあまり広いものではない。しかし、両眼視差は奥行きの違いには有効で精度も高い。したがって、輻輳によって注視点を定め、さらに両眼視差によってその前後の精密な奥行きを判断を行うという二段構えで、広範囲にわたって正確な奥行きを判断をすることができることになる。

・単眼による手がかり

単眼での奥行きの手がかりには、水晶体と呼ばれる目のレンズの厚さを変えてピント調節を行うことによる効果がある。これは単に調節 (Accommodation) と呼ばれるが、観察距離が 2~3 m 以内の近距離のときにのみ有効である。

動いている電車の窓から景色を見ていると、遠くにある山や雲などはほとんど動かないが、近くにある家や木立は近いほど速く後方に流れていく。またある対象を注視しながら自発的に頭を動かすと、注視点より遠方にあるものは観察者の動きの方向と同じ方向に、注視点より手前にあるものは観察者の動きの方向とは逆の方向に、それぞれ距離とともに大きく動いて見える。

このように観察する人間の位置との相対的变化に伴って生じる対象物の動きの相違は運動視差と呼ばれる。このように動きの相違からもたらされる奥行き判断の効果は、条件により両眼視差と同程度に有効で、現在のテレビジョンや映画など 2 次元の画面の中での奥行き感を与えるのに有効な手がかりとなっている。また画像を同時に観察できる範囲に制限があると、日常の体験とは異なった制約された印象を受ける。この範囲が広くなるほど実際の空間内にいるような感じ (臨場感) が強くなっていく。このような視野の大きさも奥行き感を高めるうえで有効で、大画面の映画やハイビジョンなどにはこの効果が生かされている。

よく知られた物体の場合、小さく見えるほど遠くにあるように感じる。すなわち網膜像の大きさによって奥行きの手がかりを得ることができる。このほか、遠くにある物体ほど霞んだりぼやけたりしてコントラストが弱く見えるという空気透視の効果や、線と線との間隔が狭くなっていくような図形を見るときに奥行き感が生じる線遠近法、遠くなるほど網膜に投影される像のきめ (テクスチャ) が細かく、また、沢山の像が密に投影されるようになるきめの勾配の効果もある。

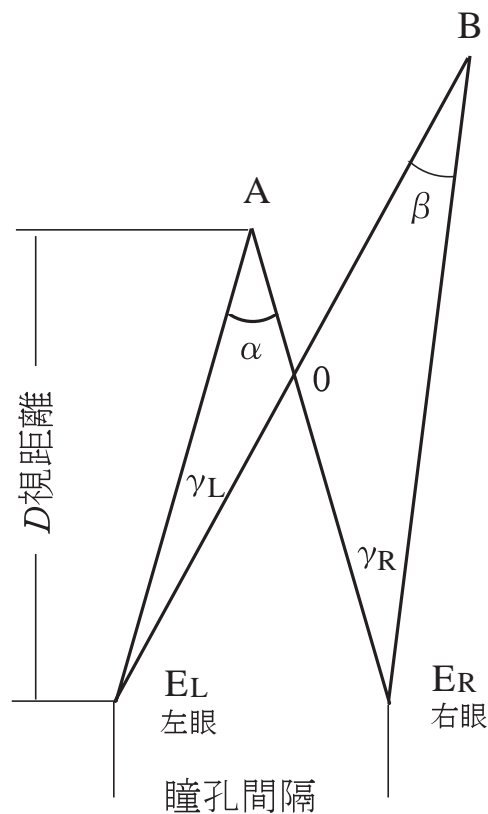


図 2.1: 輻輳角と両眼視差

また、二つの眼が離れた位置にあることによって、ある物体を眺めたときの両眼の網膜の像は同じとはならず、注視点より離れた位置では一般にずれを生じる。両眼におけるこのようなずれ量は両眼視差と呼ばれる。いま同図のように A を注視しているとき、これとは異なった方向で異なった奥行きを持つ対象 B との間の両眼視差は左右眼におけるずれ量の差、すなわち角度で表現すると $\gamma_L - \gamma_R$ で与えられる。また、同図において B が両眼に対して張る角を β としたとき、三角形 $E_L O A$ および三角形 $E_R O B$ に注目すると（内角の和が等しいことから）上記の両眼視差は $\beta - \alpha$ という形でも表現することができる。

両眼像にずれがあるとき一般には二重像として見えることになるが、両眼視差がある程度以下のときには像が一つに融合し、ずれ量の大きさおよび方向に応じて注視している点の前あるいは後ろに明確な奥行きが感じられる。一般の立体ディスプレイでは、この効果が最も多く活用されている。大脳においてもこのよう

また、輻輳と反対に、両眼視線を左右に分散させる機能を開散 (Divergence) という^{5, 6, 7)}。

両眼立体視について

奥行き距離感を得ることは一般に奥行き知覚 (Depth Perception) と呼ばれ、立体視 (Stereoscopic Vision) という言葉は両眼を用いた奥行き知覚という限定された意味で用いる場合がある。しかし、ここでは特に断らない限り、これらの用語を区別せずに用いていくことにする。

われわれが周囲の空間を奥行きをもって立体的に把握する際に、種々の手がかりが用いられる。これらには両眼を利用することによるものと、単眼 (片眼) のみによって生じ得るものがあり、表 2.1 に示すように分類することができる⁸⁾。

表 2.1: 奥行きの手がかり要因

両眼による手がかり	単眼による手がかり
輻輳 両眼視差	運動視差 視野の大きさ 網膜像の大きさ 空気透視 線遠近法 きめの勾配

・両眼による手がかり

われわれの眼が横方向に、ほぼ 6.5cm 離れて二つ存在することによる両眼での手がかりは奥行き判断に特に重要で、これには輻輳と呼ばれるものと、両眼視差と呼ばれるものがある。

ある対象 A を眺めるとき、両眼は内向きに回転してその対象の上で交わる (図 2.1)。このような両眼の働きが輻輳と呼ばれる。このとき対象 A と視線のなす角 (図 2.1 の) を輻輳角という。輻輳による奥行きの手がかりは、もちろん近距離において大きな効果を示すが、20m くらいまで有効といわれている。しかし、遠距離になると輻輳角が小さくなるのでこの効果は急激に小さくなる。

2.2 視覚系の指標について

他の生理指標とは異なり，視覚系指標は瞳孔画像を固定位置から撮像することができ，非接触で測定できる．したがって，被験者は測定器具から圧迫感を受けるなどの心理状態に影響を受けることなく測定を行うことができる．

眼球運動

眼球という一对の球形体がそれぞれに付着した6本の筋肉によって回旋運動するのは言うまでもなく視覚情報を最適の状態を獲得するためのものであり，眼球運動はヒトの運動系の中で手足などに比べて最も微細で精密な運動系である．

視線を右から左，上から下へ移動させると左右の両眼球はほぼ平行して同方向に移動する．このような眼球運動は共同性眼球運動と呼ばれる．これに対し，近づいたり遠ざかったりする物体を見るときにの眼球運動は両眼が反対方向に動くが，これは非共同性眼球運動と呼ばれる．共同性眼球運動では，衝動性眼球運動(サッケード)および滑動性(追跡性)眼球運動の随意性運動と，前庭性眼球運動および視運動性眼球運動の自律性運動に分けられる．サッケードは対象物をすばやく注視するとき生じる不連続運動であり，滑動性眼球運動はゆっくりと運動する対象物を注視するときのスムーズパーシュートと呼ばれる円滑で連続的な運動である．前庭性眼球運動は注視が中断されないように頭部運動を補償する反射性の運動である．視運動性眼球運動は視覚刺激によって誘発される運動で，例えば電車に乗っている人が次々に視界に入る外の景色を眺めるときに生じる緩慢な水平の掃引と最初の眼球位置へ速やかな復帰からなる運動がこれに相当する．これに対し，非共同性眼球運動では物体が近づく時の両眼の内転すなわち輻輳と，物体が遠ざかるときの両眼の外転すなわち開散からなる輻輳性眼球運動が生じる．これは，両眼立体視時の奥行き知覚に関係している⁴⁾．

輻輳・開散の定義

両眼視することのできる人の視線は，両眼ともに注視点に向かうのが普通である．それゆえ，人が眼前無限遠の距離の一点を注視すれば，両眼の視線が相平行し，また眼前にある一点を注視すれば，両眼の視線は，その点に向かって集合する．このように，両眼の視線が注視物体に向かって集合する機能を輻輳(Convergence)という．

第 2 章 研究の背景

2.1 ヒューマンインタフェースにおける視覚系指標の役割

科学技術の発展により，近年ますます自動化，大規模化したシステムでは人間の役割はそのシステムの監視制御に移ってきている．特に大規模システムの一例として原子力発電プラントを考えれば，最近の事故の大半は人間と機械とのミスマッチに起因するヒューマンエラーが主な原因となっている．

ヒューマンエラーの防止を考えれば，オペレータの認知過程，内面状態を知ることがヒューマンエラーの軽減に重要となってくる．オペレータの認知過程，内面状態を知るために心電図，皮膚電位，呼吸曲線，血圧，眼球電位など，さまざまな生理指標が扱われているが，本研究では視覚に着目することとした．

ところでヒューマンインタフェースの新しい形態として仮想現実感が近年注目されている．仮想現実感には実際には実現困難な環境を計算機内で構築し，仮想世界内で疑似体験を可能にしたものである．ここでは視覚や聴覚の刺激が与えられるだけでなく仮想オブジェクトへのインタラクションも可能であるという特徴をもつ．仮想現実感技術を利用したプラント制御盤オペレーション用 CAI システムが提案されている¹⁾．ここでは学習者が仮想制御盤を疑似体験できるだけでなく，学習者の認知過程や精神作業負荷などの内面状態を生理指標から推定し，その推定結果を課題の難易度の調整や学習者の思考過程の推定などの機能に利用し，学習者の理解度の向上を目指したものであった．そのシステムでは，人間の内面状態推定のための生理指標として眼機能および視覚指標に着目している．そのようなシステムを構築するために，当研究室にて Eye-Sensing HMD を構築した²⁾³⁾．この装置は仮想環境の提供に役立つだけでなく，体験者の眼球運動や瞳孔の大きさを実時間で測定できるという特徴をもつ．

次節以降で眼機能，視覚指標などの従来知見について述べた後，Eye-Sensing HMD の概要について述べる．

を行った。その一例として、両眼立体視環境を採りあげた。両眼立体視は、近年新しいヒューマンインタフェースの形態として注目されている仮想現実感において利用され、仮想空間への没入感や臨場感の向上に役立っている。しかし、その反面、人工的に生成される両眼立体視は、自然視とは異なり、人間の眼機能および視機能への影響が懸念されている。本研究では、そのような視環境下における眼機能の評価を行う。また ES-HMD の特徴を利用した視覚認知実験も行う。

本論文の構成は以下の通りである。

第 2 章では、本研究の背景としてヒューマンインタフェースにおける視覚系指標の役割、昨年度行った Eye-Sensing HMD を用いた研究の概要を説明し、本研究の目的について述べる。

第 3 章では、Eye-Sensing HMD の仕様について述べた後、今年度考案した視点位置較正法とその評価について述べる。

第 4 章では、両眼視差を含んだ立体像を使った眼球の輻輳運動の測定、同時にステレオノーマル、ステレオアナマリーの判別について述べる。

第 5 章では、応用実験として MR 画像注視時の視点位置測定と、視覚視標を利用した認知実験について述べる。

最後に第 6 章では、本研究の結論について述べる。

第 1 章 序論

人間に理解しやすい形で効率良く情報を呈示することはヒューマンインタフェース研究において重要な使命と言える。人間が外界から獲得するほとんどの情報は「眼」というセンサーを利用する。情報の「入力系」として、視覚というチャネルの重要性は明白であるが、「出力系」としての人間の眼は何を語ってくれるのだろうか。人間が発する情報を解釈し利用することもまたヒューマンインタフェースにおける重要な研究テーマである。

「出力系」の情報として眼球運動を例にとると、その研究は 19 世紀後半に始まり、それ以前は眼球の挙動に対する言葉はあっても眼球の動きがあまりにも身近な存在であるため研究対象とならなかったようである。その後、1960 年代には研究課題多様化の時代となった。視覚成立の根本問題を提起する眼球微動の新知見、睡眠中の高速眼球運動 (REM; 逆説睡眠) による夢の検出などが刺激となり、眼球運動の研究が人の知、情に向けられ始めたのである。非象徴性形態に対する眼球運動など主流派の知覚心理学研究よりも、高次の注意の意識構造とか想像や思考活動中の眼球運動に研究者の関心が移っていった。以上のように眼球運動は人の心理、知覚に関する内面状態を表出し得る指標と考えられる。

精神作業負荷や認知過程などの内面状態は、人間の行動結果と密接に関連していると考えられるが、それはときに「ヒューマンエラー」という形で現れる。ヒューマンエラーが重大な被害をもたらす事例として原子炉プラントがある。ここでは安全性や信頼性を高めるために、システムの信頼性の向上に加えて、そのシステムを運転管理する人間のヒューマンエラーを少なくするようなマンマシンインタフェースを設計することが重要となる。

人間の内面状態を推定するため、様々な生理指標を扱った研究がなされてきたが、視覚は脳の高次の神経支配を受けるため、その分析は人間の認知状態を知る上で有益な指標となるだろう。

そこで、本研究では眼機能および視覚機能から「出力系」としての情報を得るため、昨年度試作した、眼球撮像機能を備えた頭部搭載型ディスプレイ (Eye-Sensing Head Mounted Display; ES-HMD) を用いて、従来の装置では測定が困難であった様々な環境下での視点位置、瞳孔径などを計測し、眼機能および視覚機能の評価

表目次

2.1 奥行きの手がかり要因	5
3.1 映像表示系の仕様	13
3.2 眼球撮像系の仕様	13
3.3 各較正法の比較 (左眼)	29
3.4 各較正法の比較 (右眼)	29
4.1 立体オブジェクトの提示位置における輻輳角と奥行き距離	35
4.2 実験の被験者	36
4.3 ステレオノーマル, ステレオアナマリーの判別結果	45

4.39	眼球回転角度 (動画像; 右眼)	67
4.40	水平眼球回転角度 (動画像; 左眼)	68
4.41	垂直眼球回転角度 (動画像; 左眼)	68
4.42	動画注視時の視点履歴 (左眼)	69
4.43	動画注視時の視点履歴 (右眼)	69
5.1	高速道路と一般道路の視線の動き	71
5.2	脳血管画像; 左眼用	73
5.3	脳血管画像; 右眼用	73
5.4	頭部の主要動脈	74
5.5	脳血管の注視時の奥行き	75
5.6	脳血管注視時の視点位置分布 (左眼)	76
5.7	視点履歴 (左眼)	78
5.8	脳血管写真 (左眼用)	79
5.9	周辺視効果; 文字暗唱実験	82
5.10	周辺視効果; 光刺激実験手順	83
5.11	周辺視効果 (文字暗唱; 左眼; 被験者 SF)	85
5.12	周辺視効果 (文字暗唱; 右眼; 被験者 SF)	85
5.13	周辺視効果 (文字暗唱; 左眼; 被験者 YA)	86
5.14	周辺視効果 (文字暗唱; 右眼; 被験者 YA)	86
5.15	周辺視での眼球回転 (文字暗唱; 左眼; YA)	87
5.16	20 回試行の平均値 (文字暗唱; 左眼; YA)	88
5.17	周辺視効果 (文字暗唱; 左眼; 被験者 DM)	89
5.18	周辺視効果 (文字暗唱; 右眼; 被験者 DM)	89
5.19	周辺視効果 (文字暗唱; 左眼; 被験者 TM)	90
5.20	周辺視効果 (文字暗唱; 右眼; 被験者 TM)	90
5.21	周辺視効果 (前注意過程; 左眼; 被験者 SF)	91
5.22	周辺視効果 (前注意過程; 右眼; 被験者 SF)	91
5.23	中心視での眼球回転 (被験者 SF)	92
5.24	周辺視での眼球回転 (被験者 SF)	92

4.7	視差の変化による輻輳角の変化(被験者 TK)	39
4.8	視差の変化による輻輳角の変化(被験者 SF)	39
4.9	視差の変化による輻輳角の変化(被験者 DM)	40
4.10	視差の変化による輻輳角の変化(被験者 HF)	40
4.11	視差の変化による輻輳角の変化(被験者 NI)	41
4.12	視差の変化による眼球回転角の変化(左眼;被験者 NI)	42
4.13	視差の変化による眼球回転角の変化(右眼;被験者 NI)	42
4.14	視差の変化による奥行き距離の計算値と実測値	43
4.15	動画注視時における左右両眼の眼球回転角度(被験者 TO)	46
4.16	奥動画注視時における左右両眼の眼球回転角度(被験者 TO)	47
4.17	動画注視時における左右両眼の眼球回転角度(被験者 YA)	48
4.18	動画注視時における左右両眼の眼球回転角度(被験者 YA)	49
4.19	動画注視時における左右両眼の眼球回転角度(被験者 TK)	50
4.20	動画注視時における左右両眼の眼球回転角度(被験者 TK)	51
4.21	動画注視時における左右両眼の眼球回転角度(被験者 SF)	52
4.22	動画注視時における左右両眼の眼球回転角度(被験者 SF)	53
4.23	動画注視時における左右両眼の眼球回転角度(被験者 DM)	54
4.24	動画注視時における左右両眼の眼球回転角度(被験者 DM)	55
4.25	動画注視時における左右両眼の眼球回転角度(被験者 HF)	56
4.26	動画注視時における左右両眼の眼球回転角度(被験者 HF)	57
4.27	動画注視時における左右両眼の眼球回転角度(被験者 NI)	58
4.28	動画注視時における左右両眼の眼球回転角度(被験者 NI)	59
4.29	動画注視時における左右両眼の眼球回転角度(被験者 TM)	60
4.30	動画注視時における左右両眼の眼球回転角度(被験者 TM)	61
4.31	背景画像付き立体オブジェクト	62
4.32	眼球回転角度(静止画像;左眼)	64
4.33	眼球回転角度(静止画像;右眼)	64
4.34	水平眼球回転角度(静止画像;左眼)	65
4.35	垂直眼球回転角度(静止画像;左眼)	65
4.36	静止画注視時の視点履歴(左眼)	66
4.37	静止画注視時の視点履歴(右眼)	66
4.38	眼球回転角度(動画像;左眼)	67

目 次

2.1	輻輳角と両眼視差	6
3.1	Eye-Sensing HMD の外観	12
3.2	Eye-Sensing HMD の全体構成図	12
3.3	映像表示系と眼球撮像系の概念図	14
3.4	CCD カメラを取り付けた様子	15
3.5	赤外線 LED を取り付けた様子	15
3.6	瞳孔形状情報から再構成した瞳孔形	16
3.7	視点位置精度評価に用いたディスプレイ上の参照点	18
3.8	撮像信号処理系により得られた瞳孔中心位置 (左眼)	19
3.9	撮像信号処理系により得られた瞳孔中心位置 (右眼)	19
3.10	2 点の参照点の線形補間により得られた視点位置 (左眼)	20
3.11	2 点の参照点の線形補間により得られた視点位置 (右眼)	20
3.12	キャリブレーションの説明図	22
3.13	2 点の参照点を用いた線形補間による視点位置較正法	23
3.14	領域分割を行った線形補間法により得られた視点位置 (左眼)	27
3.15	領域分割を行った線形補間法により得られた視点位置 (右眼)	27
3.16	三角形領域に分割する様子	28
3.17	領域判定アルゴリズムのフローチャート	28
3.18	三角形領域分割較正法による視点位置 (左眼)	30
3.19	三角形領域分割較正法による視点位置 (右眼)	30
4.1	眼球回転角度の算出法	32
4.2	輻輳角, 立体像位置の関係	33
4.3	ES-HMD の眼球運動測定の計算値	33
4.4	白色球体画像 (立体オブジェクト)	34
4.5	視差の変化による輻輳角の変化 (被験者 TO)	38
4.6	視差の変化による輻輳角の変化 (被験者 YA)	38

4.4.1	実験方法	45
4.4.2	被験者	62
4.4.3	実験結果と考察	62
第 5 章	視覚指標計測を利用した応用実験	70
5.1	脳血管画像を用いた視点位置履歴測定	70
5.1.1	脳血管画像の特徴点の視点位置測定	72
5.1.2	脳血管画像注視時の視点移動測定	76
5.2	視覚認知実験	77
5.2.1	周辺視とズームレンズ効果	77
5.2.2	実験方法	80
5.2.3	実験結果と考察	84
第 6 章	結論	93
	謝 辞	95
	参 考 文 献	96
	付録 A 用語の説明	97

目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 研究の背景	3
2.1 ヒューマンインタフェースにおける視覚系指標の役割	3
2.2 視覚系の指標について	4
2.3 Eye-Sensing HMD を用いた昨年度の研究	9
2.4 本研究の目的	9
第 3 章 Eye-Sensing HMD の仕様と評価	11
3.1 Eye-Sensing HMD の仕様	11
3.1.1 映像表示系	11
3.1.2 眼球撮像系	14
3.1.3 撮像信号処理系	16
3.2 視点位置導出方法	17
3.2.1 昨年度までの方法と問題点	17
3.2.2 三角領域分割による較正方法	25
第 4 章 両眼立体視における奥行き位置評価実験	31
4.1 眼球回転角，輻輳角および奥行き位置の算出方法	31
4.2 立体静止画像を用いたときの奥行き位置の測定	34
4.2.1 実験方法	34
4.2.2 被験者	35
4.2.3 実験結果と考察	35
4.3 立体動画像注視時における視点移動計測	37
4.3.1 実験方法	37
4.3.2 被験者	37
4.3.3 実験結果と考察	37
4.4 両眼立体視時における視点移動計測	45

修士論文

Eye-Sensing HMD を用いた

題目 視点位置の計測と視覚特性実験
に関する研究

指導教官

吉川 榮和 教授

京都大学大学院エネルギー科学研究科 エネルギー社会・環境科学専攻

氏名

藤山 宏昭

平成 10 年 2 月 10 日